

**應用 AIoT 技術進行建築物安全耐
震能力評估檢查**

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 110 年 12 月

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐 震能力評估檢查

研究主持人：王榮進
協同主持人：李明濤
研究員：李台光、黃國倫、周楷峻、林沛暘
研究助理：陳鵬宇、陳克宜
研究期程：中華民國 110 年 3 月至 110 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 110 年 12 月

目次

表次.....	I
圖次.....	II
摘要.....	IV
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與目的.....	1
第二節 計畫流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	7
第一節 智慧物聯網(AIoT).....	7
第二節 微振量測.....	11
第三節 長期震動觀測.....	15
第四節 採用人工智慧之結構物快速評估.....	25
第三章 研究理論與方法.....	29
第一節 微振量測方法.....	29
第二節 長期震動預測結構反應.....	34
第三節 AIOT 導入方法.....	39
第四章 場域驗證.....	45
第一節 實證場域選擇.....	45
第二節 安裝評估規劃.....	48
第三節 量測結果.....	56
第五章 量測標準流程建立.....	83
第一節 長期監測流程.....	83
第二節 微振量測流程.....	87

目次

第六章 AIoT 建築物安全監測應用及推動	103
第一節 AIoT 建築物安全監測技術.....	103
第二節 AIoT 建築物安全監測應用方式	104
第三節 相關規定檢討與推動.....	109
第七章 結論建議.....	117
第一節 結論	117
第二節 建議.....	119
附錄一 期中審查意見回覆對照表.....	121
附錄二 應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢 查專家座談會意見表.....	129
附錄三 期末審查會議審查意見回覆表	141
附錄四 六處長期監測場域監測設備及點位分布	146
附錄五 成果說明會.....	162
參考書目	292

表 次

表 4-1 6 處已安裝長期監控設備之場域.....	48
表 4-2 微振量測設備設備規格	52
表 5-1 長期監測紀錄表	97
表 5-2 微振量測紀錄表	99

圖次

圖 1-1 研究流程圖.....	5
圖 2-1 相對屋頂位移和正規化預估基底剪力關係圖	23
圖 2-2 利用原始的抗震容量曲線推估正規化殘餘勁度和最大殘餘屋頂位移的步驟.....	23
圖 2-3 卷積神經網路架構	26
圖 2-4 PhyCNN 架構.....	27
圖 3-1 特徵頻率與模態形狀示意圖	33
圖 3-2 本計畫所訓練之神經網路架構	41
圖 3-3 本計畫欲導入 AIOT 之成果	41
圖 3-4 一棟五層以及一棟四層樓之鋼構抗彎構架	42
圖 3-5 神經網路預測之樓層位移與實際位移比較	43
圖 4-1 10 年內發生規模 6.0 以上地震機率分布圖	46
圖 4-2 中央氣象局地震測報中心歷史地震資料	46
圖 4-3 日本東京大學性能測試	49
圖 4-4 Palert Plus	49
圖 4-5 地震早期預警控制主機	51
圖 4-6 AA222 及配件.....	52
圖 4-7 長期監測地震儀安裝點位示意圖	53
圖 4-8 微振量測地震儀安裝點位示意圖	54
圖 5-1 結構長期監測作業流程圖	85
圖 5-2 特殊平面形狀建築，建議感測器平面配置說明圖	86
圖 5-3 一般平面形狀建築，建議感測器平面配置說明圖	86
圖 5-4 高端型建築(左)、基本型建築(右)監測系統立面說明圖	86

圖 5-5 結構安全監測系統雲端服務流程圖	87
圖 5-6 微振量測訊號正規化流程圖	88
圖 5-7 垂直配置量測作業流程圖	89
圖 5-8 微振量測作業流程圖	89
圖 5-9 感測器正規化量測	91
圖 5-10 正規化後各量測訊號歷時	91
圖 5-11 感測器佈設示意圖(5, 10, 15, 20, 30, 50 層大樓).....	93
圖 5-12 感測器固定方式(左為石膏、右為強力雙面膠).....	94
圖 5-13 系統識別振動頻率	94
圖 5-14 系統識別振形圖.....	95
圖 5-15 各種結構平面形狀下，水平配置量測建議點位(紅色點).96	
圖 5-16 系統識別扭轉向之時間歷時圖	96
圖 5-17 系統識別扭轉向振動頻率	96
圖 6-1 系統架構概念圖.....	108
圖 6-2 長期監測資訊傳遞流程圖	108

摘要

關鍵詞：AI、IoT、結構安全監測

一、研究緣起

台灣位於環太平洋地震帶板塊交界處，地震發生頻繁。根據歷史記錄，臺灣近百年曾經發生多次災害性的地震，例如：1986 年花蓮地震以及造成重大傷亡的 1999 年南投集集大地震等。紀錄顯示台灣平均 20 至 30 年即有致災性的高強度地震風險，中高強度的地震更是不計其數。

期望收集國內外 AIoT 技術進行建築物結構安全監測之資料，了解目前可行的建築結構監測與分析方式，提升自動化比例，減少大規模監測時所需的人力。

並由法規政策及宣導推廣等面向，探討 AIoT 應用於建築結構結構監測未來推動的方式，降低推動時的阻力。未來能促進應用智慧化的技術保障人民生命財產安全，打造安居樂業的智慧城市，並作為後續研究參考。

二、研究方法及過程

收集國內外 AIoT 技術進行建築物結構安全監測之資料，了解目前可行的建築結構監測與分析方式，並探討 AI 智慧及 IoT 技術結合結構監測與分析之應用範疇，從中整合具有準確性、可行性的監測方式，並選擇一處實證場域進行建築結構監測分析的實證。監測方式包含長期監測與微振量測兩大類。長期監測將於實證場域裝設地震記錄儀等器材，並以 IoT 方式連結資訊進行分析。

透過實際監測與數據蒐集，建立監測數據蒐集格式與通報流程之方式，作為後續推廣時參考。

三、重要發現

本研究建議初步推廣期間，考慮服務到更多的民眾，建議以供公眾使用的大型建築為主要類型，例如商場、旅館、醫院、學校、政府單位或社會住宅等開始試辦。用戶於地震後收到即時分析結果，可以判斷是否需要立即疏散建築內人員，或是於事後進行結構補強的工作。

分析端可由國內具公信力之地震與建築相關專業機構擔任，持續更新建築結構監測模式，如國家實驗研究院國家地震工程研究中心結合財團法人台灣建築中心，作為後續國內地震監測的後端分析單位。

政府端可分別由中央主管機關與地方主管機關管理。中央主管機關可藉由整體數據了解國內建築物的安全狀況，規劃相關政策引導建築結構安全提升。地方主管機關則可篩選資料中具風險之建築物，強制督導改善，保障人民生命財產安全。

四、主要建議事項

根據研究發現，本研究針對行政檢查業務委託民間辦理處理的法制化，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：國家地震工程研究中心

本研究主要以住宅類建築物進行 AI 模型訓練，若想最大化此 AI 模型之適用範圍，應盡可能針對不同結構形式(如抗彎構架、剪力牆)與材料(如鋼筋混凝土造、鋼構造)進行量測，且需要長時間的觀測以確保地震規模由小至大的紀錄均能被 AI 考量。考慮到大地震發生的頻率較低，也可以透過過往各種強震之數值模擬結果來訓練神經網絡。如此訓練出來的模型將可以作為代理模型用於即時的結構安全監測與評估。

長期性建議—耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書加入地震監測相

摘要

關規範

主辦機關：內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：各縣市政府、財團法人台灣建築中心

耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書，或是都市更新、都市危險及老舊建築物重建契約範本中，加入 AIoT 長期地震監測相關規範，快速了解建築物結構狀況確保民眾生命財產安全。此外可於相關文件中加入地震速報瓦斯遮斷功能以及電梯自動連動控制，於接收地震速報訊號後啟動連動服務。

ABSTRACT

Keywords: AI、IoT、Structural safety monitoring

Taiwan is located on the *Circum-Pacific belt* and at a compressive tectonic boundary, so frequent earthquakes often pose a threat to people's lives and property. As the technologies of IoT and AI have matured over time, applying them to the structural safety monitoring system is increasingly being put into practice. Therefore, this research aims to combine IoT and AI technologies to collect and analyze relevant data of buildings' structure before and after an earthquake, to help better protect people's lives and property.

By collecting structural safety monitoring data gathered and evaluated by AIoT technologies at home and abroad, the research aims to understand current feasible methods for structural safety monitoring and analysis, and to discuss a range of applications of combining AI and IoT technologies for structural monitoring and analyzing, in order to reduce the manpower required for monitoring. In addition, by using long-term monitoring and ambient vibration measurements, the research selects a field to serve as evidence for evaluating structural safety monitoring. Through real-time monitoring and data collection, the research seeks to prove the feasibility of applying AI to analyzing the structural status of buildings, and to establish operational processes for long-term monitoring and ambient vibration measurement. Moreover, by discussing laws and policies as well as dissemination, the research proposes possible ways to promote the application of AIoT to monitor structural safety and hopes to reduce future resistance to adoption of these technologies.

This research adopts relevant AIoT technologies to collect related structural data of buildings before and after an earthquake automatically. Meanwhile, it immediately identifies potential problems in a building to assist the owners and management entities

摘要

in doing advance preparation, and also serves as a reference for emergency response and restoration measures after accidents. Make use of smart technologies to protect people's lives and property, and to build a smart city so people may enjoy a good and prosperous life.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與目的

一、研究緣起

台灣位於環太平洋地震帶板塊交界處，地震發生頻繁。根據歷史記錄，臺灣近百年曾經發生多次災害性的地震，例如 1906 年梅山地震、1935 年新竹-臺中地震、1951 年花東縱谷地震、1964 年白河地震、1986 年花蓮地震以及造成重大傷亡的 1999 年南投集集大地震等。紀錄顯示台灣平均 20 至 30 年即有致災性的高強度地震風險，而其他如 105 年 2 月 6 日高雄市發生規模 6.4 地震(台南維冠)、107 年 2 月 6 日花蓮發生規模 6.0 地震造成 17 人罹難等，此類中高強度的地震更是不計其數。

1995 年，比爾蓋茲在《未來之路》一書中，展開他的智慧家居狂想，成為物聯網概念的濫觴。1998 年，美國麻省理工學院 Auto-ID 中心主任愛斯頓（Kevin Ashton）提出物聯網（Internet of Things，簡稱 IoT）一詞，全球化的網路基礎建設，透過資料擷取以及通訊能力，連結實體物件與虛擬數據，進行各類控制、偵測、識別及服務，從此這詞廣泛流傳。AI（artificial intelligence）人工智慧指由人製造出來的機器所表現出來的智慧。通常人工智慧是指透過普通電腦程式來呈現人類智慧的技術。目前人工智慧的研究方向已經被分成幾個子領域，機器學習是人工智慧領域的核心研究問題之一，主要目的是為了讓機器從使用者和輸入資料等處獲得知識，從而讓機器自動地去判斷和輸出相應的結

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

果。

在台灣地震頻仍，同時 IoT 與 AI 技術日趨成熟邁入應用階段，如能結合 IoT 與 AI 技術，自動蒐集建築物在地震前後的結構相關數據，同時自動快速評估可能發生問題的建物，協助用戶或管理單位進行事前準備，及災後快速反應及復原措施的參考，將可以智慧化的技術保障人民生命財產安全，打造安居樂業的智慧城市。

二、研究目的

本研究希望結合 IoT 與 AI 技術與地震記錄儀自動蒐集建築物在地震前後的結構相關數據，同時自動快速評估可能發生問題的建物，提升效率免去人工實地清查評估，快速地掌握建物狀況。

本研究分別探討運用 AIoT 長期監測及微振量測兩種方式。未來長期監測可透過平時勘檢、震前預警、震中紀錄、震後分析等階段，協助用戶或管理單位進行事前準備，及災後快速反應及復原措施。微振量測則可先建立基礎監測資料，於地震或施工補強後再進行第二次監測，了解建築物結構變化，是否因地震發生風險或因工程確實達到補強效果。具體目的的分述如下：

一、AIoT 建築物安全監測數值蒐集及通報流程之設置建議研究將以一棟建築物微實證場域，進行 AIoT 地震長期監測及微振量測，並建立監測數據蒐集格式與通報流程之建議。

二、確認 AIoT 技術進行耐震能力評估檢查之應用範疇探討 AI 智慧

及 IoT 技術進行耐震能力評估檢查之應用範疇，減少建築結構檢查所需人力，提升資料蒐集頻率及震後反應速度。

三、AIoT 長期監測可達到震前預警、震中紀錄、震後分析等效益。

震前透過網路連線地震警報器進行地震預警，在強震來臨前提早對民眾預警及自動對建築物內之設備進行反應。震中自動紀錄震時建物數據，作為後續大數據分析之應用。震後運用 AIoT 對結構監測結果進行評估，即時將受災情況通報給相關人員，減少檢查人力，補強平時勘檢的頻率。

四、推動 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估普及化應用 IoT

與 AI 技術與地震記錄儀自動蒐集數據與節省專業人力的效益，希望能進一步將相關技術推動與普及，擴大整體效益。

第二節 計畫流程

本計畫旨在建築物安全耐震能力評估，計畫執行的研究流程如圖 1-1 所示，採用之研究方法，說明如後。

一、文獻回顧/資料調查蒐集

研究團隊收集國內外 AIoT 技術進行建築物結構安全監測之資料，了解目前可行的建築結構監測與分析方式，並探討 AI 智慧及 IoT 技術結合結構監測與分析之應用範疇，從中整合具有準確性、可行性的監測方式，提升自動化比例，減少大規模監測時所需的人力。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

二、實證場域監測數據蒐集分析

選擇一處實證場域進行建築結構監測分析的實證。本研究監測方式包含長期監測與微振量測兩大類。長期監測將於實證場域裝設地震記錄儀等器材，並以 IoT 方式連結資訊進行分析。實際監測地震發生時建築物結構產生加速度、位移等數據，透過 AI 分析了解建築耐震狀況。微振量測則在研究初期先行進行一次微振量測作為基準，待地震事件或補強工程後再一次監測比較分析數據差異。此外另本研究將另行就 6 處已安裝長期監控設備之建築物，蒐集其長期監測資料，補充長期監測可能面臨數據較少的問題。

透過實際監測與數據蒐集，建立監測數據蒐集格式與通報流程之方式，作為後續推廣時參考。

三、推廣方式探討與建議

由法規面及商業模式等面向，探討未來推動的方式。法規面將探討目前耐震相關監測規定，內容是否適合應用 AIoT 方式作為另一個監測選項，以及法規條文是否有需要修正或補充。另於商業模式上提供具有財務可行性的選項，降低推動時的阻力，增加自動監測分析方式的普及度。

四、舉辦研究成果說明會

本研究將在期末報告完成前舉辦研究成果說明會，發表 AIoT 應用於建築結構結構監測之可行方案及本研究研究成果。通過邀請產官學各界代表宣導推動本研究計畫方案的應用，同時交換各界意見與建議，將更多元的思考面向整合於最終期末報告中。

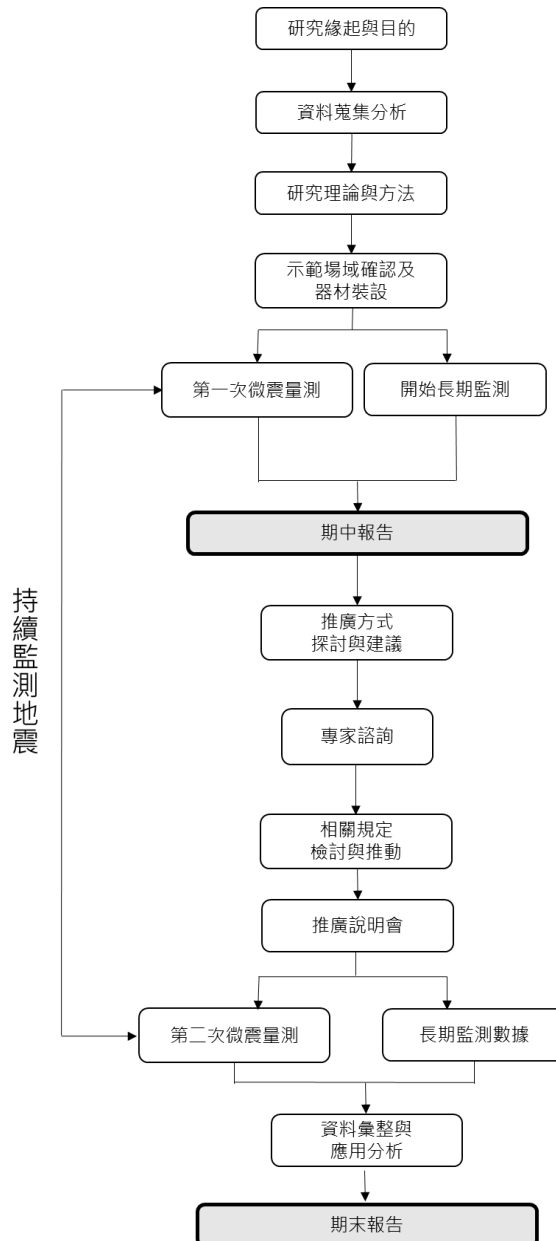


圖 1-1 研究流程圖

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

第二章 文獻回顧

第一節 智慧物聯網(AIoT)

隨著大數據(Big Data)、人工智慧(AI)和物聯網(IoT)的興起，智慧系統與應用影響到日常生活的許多層面，也為智慧計算基礎架構創造了機會。近期，第四次工業革命揭開了智慧製造的序幕，藉由新興技術來收集和分析數據，並透過智慧物聯網(AIoT)應用程式從數據中獲取知識和效率。

人工智慧(AI)與物聯網(IoT)技術的價值是相輔相成。根據高德納諮詢公司(Gartner)的預測，到2022年，80%的企業物聯網項目將包括AI解決方案。到2025年，全球將有超過500億個互聯設備，產生180 ZB，相當於1800億個1TB的海量數據輸出。《全球人工智慧研究報告》指出，未來到2030年，人工智慧預計能使全球GDP增長14%，貢獻將近15.7萬億美元。

另根據麥肯錫的研究，到2025年，全球物聯網的應用產值也將可能高達11.1萬億美元，當到2030年時，人工智慧預計將帶來13萬億美元產值。智慧物聯網(AIoT)藉助新興技術來收集和分析數據，並通過人工智慧和物聯網應用程序從數據中獲取知識和效率。

AIoT推動了全球技術產業鏈上、中下游製造業的巨大需求。例如，在工廠中，將使用特定的雲機器學習算法來測量由各種與IoT相關的設備所產生的數據，然後反饋到與IoT相關的機器，使工廠變得更智慧，

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

以實現自動化製造、節省電力、跟蹤和診斷機械、進行預防性維護等作業。應用和開發方向的範圍包括智慧家居、智慧醫療保健、智慧工廠、自駕車、交通管理、商業服務以及金融技術等。

人工智慧技術使機器能夠從外部數據中學習，進行預測分析或在分析後協助決策。因此，IoT 通訊數據的傳輸速度對於 AI 自主推理系統的計算至關重要。這三項核心技術包括嵌入式系統和傳感器、雲數據和分析、人工智能和邊緣計算應用程序。[1]

環太平洋的火環帶地震頻傳，多處火山噴發，赤道附近的颱風、颶風路徑詭譎，短延時強降雨量驚人，以致洪災與坡地災害不斷；同時異常高、低溫變化導致人們調適困難，加上高溫的都市熱島效應與森林火災延燒不斷，據統計，根據 Emergency Events Database (EM-DAT) 2020 年重大天然災害蒐整統計結果，因災害死亡人數約 8,274 人、9,975 萬人受到影響，造成 708 億美元之經濟損失。其中印度為 2020 年受災最嚴重的國家，不僅造成 2,622 人死亡，受影響人數也是最多人（3,675 萬人）；另外，美國為受災損失最多的國家，約 269.75 億美元。

面對全球氣候變遷所帶來嚴峻的災害管理課題，各國政府、企業與人民必須透過防災演練與防災警戒機制的建立，提醒「自助」優先於「互助」，更優先於「公助」。而隨著人工智慧 (Artificial intelligence, AI) 與物聯網 (Internet of Things, IoT) 的技術 (本文簡稱 AIoT) 的崛起，其在各領域亦有不斷的創新應用。以下將介紹

AIoT 技術在 IoT 產業價值鏈中於各層次的應用特色，以及可為災害防救帶來的創新機會與商機。

IoT 通訊模組與資料儲存與運算的雲端架構。以目前許多環境監測設備來說，大部分重要基礎設施資料仍透過數據機 (Modem) 上傳至伺服器，亦有 Wi-Fi 網路甚至架設微波傳輸上傳。

1. 延伸通訊距離擷取即時偏遠／災區資訊：過去網路層技術受限通訊距離，一直是偏遠山區與災區資料傳輸的瓶頸。所幸現在有 SigFox、NB-IoT、LoRa 等 LPWAN (Low-Power Wide Area Network, 低功率廣域網路) 技術，可滿足遠距離無線通訊需求。但若有高速、及時傳輸需求，則仍需仰賴其他如 4G/5G 等傳輸技術。成本方面，NB-IoT 電信業者利用其既有的基地站台架設開道與中繼站，仍需要通訊收費；採用 LPWAN 架構私有通訊開道，後續通訊免費，但須自行運營維護，且前期建置站台成本較高。
2. 雲端的防災大數據資料特性：多元廣布的環境監測感知設備，已經具備大數據的 4V 特性，包括：資料量龐「大」(Volume)，多樣性的監測數據，考驗高速運算與既有預測模型；災中訊息資料變動「快」(Velocity)，即時的視覺化監測數據展示需要客製化處理，並且快速提出具體防災決策方案；多元監測設備來源種類繁「雜」(Variety)；常有異常監測數據出現，如何第一時間對資料真偽存「疑」(Veracity)，避

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

免誤判，影響防災決策。

3. 大數據能鑑往知來經驗學習：網路層必須新舊資料兼容。AIoT 技術建構的智慧防災仍必須仰賴過去經驗，快速、正確預測下一刻的防災行動。沒有資料則無法建構人工智慧模型，因此過去觀測的歷史數據十分珍貴。後續透過更多即時累積的數據資料，再進行深度學習與演進，提供最佳的預警時間與疏散避難規劃。[2]

在台灣地震仍頻，現況之 IoT 與 AI 技術日趨成熟邁入應用階段，且已有防災應用 IoT 與 AI 技術之觀念產生，期望能結合 IoT 與 AI 技術，自動蒐集建築物在地震前後的結構相關數據，同時自動快速評估可能發生問題的建物，協助用戶或管理單位進行事前準備，及災後快速反應及復原措施的參考，將可以智慧化的技術保障人民生命財產安全，打造安居樂業的智慧城市。

第二節 微振量測

若將結構物視為一個獨立系統，即可利用結構動力與結構矩陣等理論建立其等效之簡易數學模型，當此系統輸入一個外部訊號時，如地震力、風力、微振動...等，將可依據結構的實際量測或數值模型的推導得到對應之結構反應，如：樓層的位移、速度或加速度輸出訊號。而所謂的系統識別即為利用輸入訊號與輸出訊號之間的關係推演其等效的數值模型進而得到此結構物系統的模態參數。所求得之參數可作為安全檢驗之用處，評斷結構建造結果是否符合最初設計時之目標期許，亦可作為診斷建築物經歷地震、災害或材料老化後的健康狀況及其整體安全性，以此依據確保結構物的安全性能，並利用此準則加以補強其結構強度。

結構之系統識別若從描述系統的方式亦可分為兩種模式，參數模式[3]與非參數模式識別。所謂參數模式系統識別為辨別結構物具有物理意義之參數，且該參數可代表系統中數學模型之模態性質，能表示該結構動態行為或是該狀態下固有之振動特性，舉例來說即為一般結構動力分析裡的自然頻率 ω 及阻尼比 ξ 等。而非參數模式識僅對已知的輸入及輸出資料以一組數學函數作為連結使其互為相關，透過直接記錄系統之輸出對輸入的響應過程來進行識別，也可依據分析輸入與輸出的自相關、互相關函數、自功率譜密度或交互功率譜函數進而間接估算系統之數學模型，非參數模式為經典控制理論中常用以描述線性系統的數學模型。另外，系統識別可依據所使用的資料來分類，可分為時間域與頻率域識別。時間域之系統識別為將所量測的歷時反應作為識別所需之資料，過

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

程均於時間域中運算，需選擇適宜的數學模式及誤差準則，再依循數值方法推論出相關參數，而頻率域識別則將所獲得之訊號資料由時間域轉換至頻率域再進行分析，若識別位於非線性系統或是時變狀態中，可利用視窗移動方法尋找等值線性系統參數，其優點為計算效率高，而缺點則為收集訊號資料長短與取樣頻率大小會影響識別精確度。再者，若依照量測數據之處理程序，則系統識別可再概分成線上模式(on-line model)及離線模式(off-line model)兩類。線上模式為批次分析數據，即為各筆資料進行單獨識別，分析技巧著重於遞迴公式(Recursive Formula) [4]，其優點為計算快速、可分析時變系統以及節省數據儲存空間與時間，但其用於分析線性非時變系統時精度會大幅降低。而離線模式則將所有數據全數記錄完成乃當進行運算分析。目前所利用的系統識別法大部分已成功應用於土木實務工程，由於估算方法之多樣性，有不少專家學者即針對各種方法進行比較，如 Yun 和 Shinozuka [5]則針對傳統最小平方差法、工具變數法、最大可能機率法(Maximum Likelihood Algorithm)和有限訊息最大可能機率法(Limited Information Maximum Likelihood Method)應用於多重輸入/輸出系統建立 ARX(Auto Regressive eXogenous) 模式之比較。Ghanem 和 Shinozuka [6]、[7]亦對推廣卡氏過濾法(Entended Kalmen Filter Algorithm)、最大可能機率法、遞迴最小平方差法(Recursive Least Square Method)、和遞迴工具變數法應用於多重輸入/輸出系統建立 ARX 式比較。Saridis [8]針對線上分析法之互相關法(Cross

Correlation Algorithm)、一階隨機近似法(First Order Stochastic Approximation Algorithm)、二階隨機近似法(Second Order Stochastic Approximation Algorithm)、最大可能機率法、最大事後機率法(Maximum Posteriori Probability Algorithm)、推廣卡氏過濾法應用於線性單一輸入/輸出系統(SISO)之比較。

結構設施的性能會因為反覆的自然危害而降低或失去原有之表現。在強烈的地震或風載作用後，某些關鍵構件會因此受到損壞，因而引起對於結構安全的擔憂。損壞構件可以經由目視檢查；然而，由於非結構部件(如隔牆和鑲板)有時是無法輕易觀察的，因此判別損傷應該通過其他方法進行評估，例如非破壞檢測方法或以振動分析的結構健康監測技術。與健康狀況下的結構物相比，利用結構的變化行為來觀察結果可能會惡化結構之性能。而 Farrar 和 Sim [9,10]運用模態分析可以獲得結構動力特性(即自然頻率，阻尼和振態)，進而比較相對變化判斷結構損傷。儘管結構中存在的變化可以識別，但結構完整性的程度是仍然未知的。

模型更新是一種調整結構模型中所使用之參數以呈現該結構最新狀態的方法，透過處理結構的靜態或動態測量來獲得更新之參數，隨後更新後的模型將呈現結構的當前性能，以便更詳細地調查與探究整個結構系統，甚至可以定位結構損壞位置。Mottershead、Zhang 和 Jaishi [11,12,13]於模型更新方面進行研究，模型更新過程可以通過一系列基

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

於結構動態特性的優化方法來實現。但是 Carden [14] 等人在模型更新方法最主要的問題是大多數的理論不能保證在更新參數方面的解決方法是準確的。此外，Berman [15] 認為一旦結構模型中所使用的自由度 (DOF) 數量少於實際結構中的自由度數量，此更新參數之解決方法更難以獲得。Casas [16] 認為通常結構阻尼識別會產生偏差，必需透過工程上之判斷作為輔助，錯誤的新模型可能會導致誤判結構的行為。自然頻率在模型更新過程中被視為一個目標函數，而 Wahab 等人 [17] 建議在目標函數中增加模態振形，由此產生的更新模型將更能夠表示結構的動態行為。由於傳感資訊有限，模型更新方法理當陷入瓶頸；然而，Chen [18] 利用簡化模型可以完整地呈現結構的動態行為，並作為評估結構完整性的方法之一。簡化模型可以透過模型更新進行優化，並應用於結構的損傷識別。

建立結構模型的過程中，系統識別技術扮演著重要的角色。如前所述，模態特性通常用於推行或更新結構模型，而模態特性可以隨著系統識別經由模態分析來獲得。對於現實生活應用，由於輸入訊號之不可預測，系統識別應以隨機的方式進行處理。在時間域上，Van Overschee 與 De Moor [19] 在 1991 年提出的隨機子空間系統識別是最廣為接受的方法，此方法利用延伸可觀測性來推導模態參數，並成為目前最可靠之識別方法之一。此外，1999 年 Peeters 和 De Roeck [20] 進一步研究 SSI 方法以提高計算效率。Peeters 和 De Roeck [21] 在 2001 年更提出了 SSI 的穩態圖來提高識別結果的精確性。爾後 Brownjohn [22,23,24,25,26]

等諸多研究人員也採用類似的方法來探究環境振動下結構的模態特性。上述研究結果顯示，結構之自然頻率和模態振形可成功地獲取，特別是在低階模態方面能夠擁有精準的識別成果。

第三節 長期震動觀測

i. 熵分析：

針對建築物長期震動觀測乃是透過裝置於結構物上之傳感器，感應到地表峰值加速度（PGA）超過設定之閾值時，將觸發感測器機制，激活監測系統以收集加速度數據，記錄感測器受到該次地震事件觸發前中後之結構振動週期訊號。並透過對傳感器測量到之結構微振加速度訊號進行熵分析，透過觀察熵值在各尺度下趨勢的變化進行長期結構健康診斷。

Rudolph Clausius 首先於 1865 年提出熵，源自希臘語，意義為一個系統不受外部干擾時往內部最穩定狀態發展的特性。在熱力學方面，定義為不能做功的能量總數，當總體的熵增加，其作功能力也就會下降。在 1948 年，Shannon[27]將熱力學中的概念轉化到資訊理論領域中，熵 (Entropy) 被歸類為接收的信息中所涵括之資訊平均量，又稱資訊熵、平均資訊本體量，熵越高，能傳輸越多的資訊，熵越低，則意味著傳輸的資訊越少，例如：擲雙面不同之硬幣(兩個等機率的結果)比擲六面不同點數之骰子(六個等機率的結果)，提供更少的資訊量，代表熵值更小，即當比較不可能發生的事情發生了，將會提供更多的資訊，為不確定性的量度。1958 年，Kolmogorov[28] 把資訊熵的概念精確化，提出

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

Kolmogorov Sinai Entropy，應用於 D 維度動態系統量測時間序列複雜程度，量度系統運動的隨機性或無序性，而此法在低維度混沌系統中能有效運用，但由於現實世界中實驗數據會摻雜許多不同雜訊，導致在此狀態下實驗結果之準確性不如預期。1991 年，Pincus[29] 在研究嬰兒猝死病症之心率變化時，根據 Kolmogorov 熵做出改良，提出近似熵 (Approximate Entropy, ApEn)，可提供測量現實生活時間序列中的不規則程度或亂度，當樣板長度變化時會產生新模式機率，而機率越高則近似熵越大，近似熵越大代表越不規則或越複雜，有較強的適應性。反之，近似熵越小則代表較具規則性，由於近似熵能適應現實中的噪聲干擾以及較能夠分析稍短之時間序列，迄今仍為各醫療與工程所用。

Richman[31]於 2000 年時，以近似熵為基礎發表取樣熵 (Sample Entropy, SampEn)，改良近似熵由於時間序列長度影響而造成的誤差。在分析時間序列方面，提供了各種參數調整之選擇，如樣板長度、訊號取樣長度，以及閾值，取樣熵在計算結果有更佳的一致性 (relative consistency)，因為在與其他不同時間序列計算結果比較時，當一時間序列得到較高的熵值，在調整不同數值之樣板長度、訊號取樣長度，以及閾值的情況下，也會得到較高的熵值，而另一優勢在於，當時間序列或是訊號毀損或遺失，對於計算最終熵值結果影響也較細微。

在 2002 年，Costa[31]提出多尺度熵 (MSE)，藉由變更時間序列訊號之尺度，改善對於無法判別人類病理訊號，如心律不整或心臟血管疾病等訊號之瓶頸，將只能適應單調系統之單尺度近似熵與取樣熵經由粗

粒化的演算程序，轉為適應各種不同訊號之多尺度熵，可提升熵值對於不同訊號之準確性，解決臨床病理訊號之辨別問題。Costa 等人對於多尺度熵之理論驗證，先以分析白噪音(white noise)及粉紅噪音(1/f noise)做為實驗噪聲。白噪音因為熵值較高，顯示訊號較為複雜，但隨著尺度增加，白噪音分析結果呈現遞減，代表在尺度上相似性較低，結構簡單，趨近於隨機。而粉紅噪音之熵值則是保持相同，當尺度大於 4 之後，粉紅噪音熵值開始較白噪音來的大，代表尺度上相似性較高，複雜度大，而白噪音分析結果呈現之遞減，表示訊號只有在原始訊號時含有訊息，此研究結果初步驗證多尺度熵於理論上之可行性。而在實務驗證方面，則是藉由測量心律之時間序列，目標為分別健康人類、心律不整以及充血性心臟病三種不同類型的心臟疾病患者，經由多尺度熵法計算分析，其中健康對照組的熵值擁有最高熵值，這顯示健康的訊號為最複雜之訊號。到目前為止，多尺度熵分析方法被廣泛運用於生物醫學、財務與工具機領域。

而在交叉取樣方面，於 1996 年 Pincus[32]開始有了交叉近似熵(Cross-Approximate entropy, C-ApEn)之研究，為交叉理論之先行者，而後於 2000 年，Richman[33]提出交叉取樣熵(Cross-Sample Entropy)，將熵發展為能夠表示訊號間之異步性(dissimilarity)以及非同步程度(asynchrony)，概念為當一時序訊號相較另一時序訊號有高之同步程度時，其交叉取樣熵值，會呈現較低之狀態，這意味著訊號之相似性與熵值關係密不可分。而在實務性方面，將觀察胸腔體積以及心跳頻率作為

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

實驗驗證，以交叉取樣熵與交叉近似熵對兩者進行分析，而結果最終以交叉取樣熵對於分辨心跳訊號同步程度，相較於交叉近似熵，更為準確與判讀容易。

於 2013 年，Wu[34] 等人提出複合多尺度熵(Composite multiscale entropy, CMSE)，演算程序如圖 2，將過去在尺度因子很大時造成粗粒化後的時間序列訊號有熵值不穩定以及不準確之問題改善。在實驗方面，則是運用粉紅噪音(1/f noise)以及白噪音(white noise)進行模擬，而結果表現出複合多尺度熵(CMSE)能降低熵值與其標準差，得到更具說服力之成果，其後，再從機具方面實驗，利用齒輪震動訊號，判斷齒輪之破壞情況，有效驗證 CMSE 在健康診斷的實用性。Yin[35] 等人於 2016 年，提出複合多尺度交叉取樣熵(Composite multiscale cross-sample entropy, CMSCE)，將複合多尺度與交叉熵結合，提升多尺度取樣熵之準確性，然而，儘管此法在未定義熵值的出現還是時有所見，但其準確性在實務上還是受人所廣用，如運用人工訊號來計算國家股市之密切與相關性。

2017 年，Guan[36] 等人提出了一種針對剪力結構構件的損傷識別方法，從所測得的動態響應中，提取模態頻率與有限元素模型結合，運用交叉熵優化技術疊代解決損傷識別問題，討論了結構損壞位置、測量位置及損壞嚴重性等影響因素，並研究在不同測量噪聲水平下之檢測可靠性。同年，Wimarshana[37] 透過取樣熵與小波變換進行參數優化，偵測懸臂梁上之呼吸裂紋，提高呼吸裂紋識別之靈敏度，藉由此研究，

該裂紋識別靈敏度提高了 8%，驗證了利用熵進行數值參數優化之可行性。2020 年，Li[38] 等人提出複合多尺度交叉部分取樣熵(CMPCSE)，量化兩時間序列之內在相似性，並運用 CMPCSE 消除恒生指數(HSI)的影響，分析結果表明上海證券交易所綜合股價指數與深圳證券交易所更有強之相似性，將此法認為辨別相似性之有效工具。2021 年，Ma[39] 提出綜合精細多尺度取樣熵，在噪音干擾下診斷滾動軸承之早期故障，運用此法確定模態是否由故障訊號所主導，於中心頻段中選擇能量最高的模態分量，進行包絡頻譜變化，再透過模擬與實驗驗證其性能。

ii. 基於建築特性與層間變位比：

目前大部分的建築物監測系統，多使用量測加速度的方式，因其易於裝設，並提供穩定且可靠的量測資訊，產品眾多且價格合理。然而，加速度計應用於位移的量測亦有缺點，主要因為積分會造成基線漂移(baseline offsets)的問題，一般使用高通濾波去除低頻的基線飄移訊號，但是同時造成結構之低頻訊號被去除，特別是永久位移的訊號，導致利用加速度訊號所推估之位移的低頻訊號是不準確的[45, 46]。接觸式的相對位移量測方式亦有利用位移計(linear variable differential transducer, LVDT)和 laser Doppler vibrometer (LDV)的技術，因須額外架設支撐構架，具有費用昂貴、安裝困難、佔據空間等缺點，導致實務上使用是有限的。

由於數位相機與電腦運算的影像量測技術在近幾年來快速成長，影像感光元件的解析度倍增且相關設備成本亦漸漸降低，加上電腦記憶體

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

與處理器速度的提升，允許進行更精細的運算程序，因此數位影像量測層間變位的相關研究開始快速發展，例如雙監視器量測層間變位[47]、去除相機旋轉效應造成之量測誤差[48]、智慧單相機震後快速安全診斷系統[49]等技術。數位影像量測層間變位的優勢在於位移的低頻訊號可以準確量測，補足加速度量測的不足之處。

假設可以在地震中同時量測得到樓層相對的位移和每樓層受地震力下的絕對加速度振動反應，且精度在合理範圍內。此外，亦需要於震前完成非線性靜力側推分析(nonlinear static pushover analysis)。提出利用建築物的地震反應量測訊號，找出勁度減少量和屋頂殘餘變形量兩個參數，藉此推估震後的耐震能力。

建築物於時間 t_k 的屋頂相對位移 Δ_R 的歷時可以藉由加總每層的相對位移歷時計算：

$$\Delta_R(t_k) = \sum_{j=1}^N d_j(t_k)$$

這裡 d_j 代表層間變位歷時， j 代表第 j 層， N 且代表樓層總數。對真正的建築物來說，基底剪力 V_e 不易直接量測，但可藉由量測所得之絕對加速度和每樓層的總體質量，利用以下公式推估得到基底剪力 V_e ：

$$V_e(t_k) = \sum_{j=1}^N m_j \ddot{x}_j(t_k)$$

這裡 m_j 和 \ddot{x}_j 各別代表第 j 層總體質量和第 j 層絕對加速度歷時。地表層樓不包含在公式裡面。藉由把預估基底剪力除以整體總質量，可以將基底剪力正規化，如下式：

$$V_n(t_k) = V_e(t_k) / \sum_{j=1}^N m_j g$$

這裡 V_n 代表正規化預估基底剪力， g 代表重力加速度。震後建築物正規化殘留勁度(每單位相對屋頂位移的正規化預估基底剪力)可以藉由曲線擬合法推估。因為於地震後段的微小擾動所量測之振動反應之訊躁比可能較低，所以取加速度的大小在適合範圍內來決定正規化殘餘勁度較為合理，但應確保此時結構物的行為主要為線性。

此一範圍之加速度上限，不只跟建築型式有關，還跟建築物抗震需求有關，而此二因素與建築物正規化耐震設計的基底剪力有關。因此，加速度上限可參考正規化耐震設計的基底剪力。亦即在較高的耐震設計基底剪力時，應可確保在較強的地表擾動下結構行為仍呈線性，而當結構的耐震設計層級較低的情況下，結構將較早出現非線性行為。因此，以台灣的耐震設計等級來看，正規化耐震設計的基底剪力上限設為 75gal 普遍來說應是合適的。但在不同地方與加速度的上限應要看當地的耐震設計等級而定。對於取加速度的下限，則主要是跟測量系統能力有關。如果使用較高性能的量測系統，則可使用較低的加速度下限。因此，加速度的上下限會因為不同案例而不同。

在本研究中，屋頂加速度的範圍取在 25gal 到 75gal 之間。屋頂加速度下限設為 25gal 的原因，是因為取更小時滯遲迴圈圖的看起來較為發散。屋頂加速度上限設為 75gal 的原因，是因為對於所有模擬的地表擾動的情況下，滯遲滯迴圈圖都可以有充足的線性數據來推估正規化殘餘勁度。正規化殘餘勁度是基於一階線性函數的曲線擬合而得(如圖 2-

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

1)。一旦正規化殘餘勁度被決定，最大屋頂殘餘位移 Δ_{res} 就可以用該一階線性函數的截距來得到(如圖 2-1)。在有些情況下，在同一個地震歷時中，利用最尾端的地震歷時所得到之屋頂殘餘位移，可能小於其他時間段所得到之屋頂殘餘位移。因此應考慮任一時間曾發生之最大屋頂殘餘位移，並將其用於推估震後地震能力。

震後地震能力可以用正規化殘餘勁度 K_d 和最大殘餘位移 Δ_{res} 來預估(過程在圖二)。步驟一開始先從最大殘餘位移跟零基底剪力的位置(就是圖 2-2(a)的 A 點)為起點，沿著正規化殘餘勁度直到跟原始容量曲線相交於一點(就是圖 2-2(a)的 B 點)。A 點座標是 $(\Delta_{res}, 0)$ 而 B 點座標是 (Δ_y^d, F_y^d) 。然後，剩餘的震後容量曲線會跟著 B 點後的原始容量曲線，直到屋頂位移等於極限屋頂位移 Δ_{roof} (就是圖 2-2(a)的 C 點)。C 點座標是 (Δ_{roof}, F_u) ， F_u 是極限正規化基底剪力。

下一步，線段 AB 及線段 BC 都往左平移最大屋頂殘餘位移的量，就可以得到震後容量曲線(就是圖 2-2(b)的線段 A'B'C')。因為屋頂位移有極限，所以當正規化殘餘勁度較小，且極限屋頂殘餘位移較大時，有可能導致容量能力曲線跟線 AB 沒有交點。

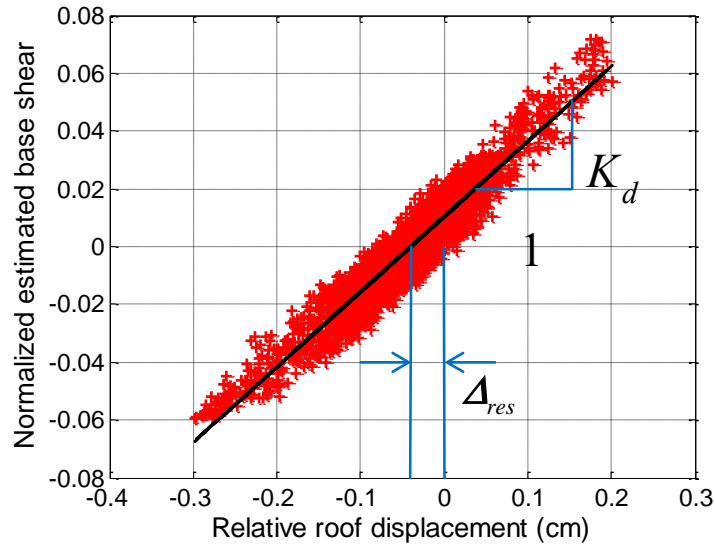


圖 2-1 相對屋頂位移和正規化預估基底剪力關係圖

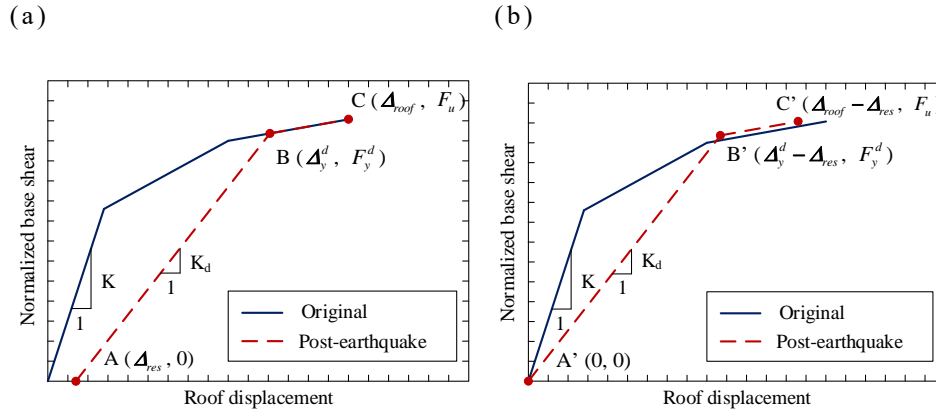


圖 2-2 利用原始的抗震容量曲線推估正規化殘餘勁度和最大殘餘屋頂位移的步驟

(a) 第一步 (b) 第二步

一旦震後容量曲線獲得後，即可用簡化式容量震譜法推估結構物的震後抗震能力，將所有在容量曲線上的點都視為性能點，並計算其抗震需求。根據 ATC-40 的步驟，即可將這些性能點計算得到等效容量震譜

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

值，等效阻尼比 β_{eq} 是根據簡化之雙線性和預設之阻尼修正係數 κ 來決定。最後，參考地表加速度峰值可以由公式(4)到(7)計算出來，其中，耐震設計震譜的參數係根據台灣耐震設計規範(CPAMI2011)。

$$A_p = \frac{S_{a,p}}{\left[1 + \left(\frac{2.5}{B_s} - 1\right) \frac{T_{eq}}{0.2T_0}\right]} \text{ for } T_{eq} \leq 0.2T_0 \quad (4)$$

$$A_p = \frac{B_s}{2.5} S_{a,p} \text{ for } 0.2T_0 < T_{eq} \leq T_0 \quad (5)$$

$$A_p = \frac{B_s T_{eq}}{2.5T_0} S_{a,p} \text{ for } T_0 < T_{eq} \quad (6)$$

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{d_p}{a_p g}} \quad (7)$$

A_p 代表性能點所對應之地表加速度； B_s 和 B_l 代表阻尼比修正數； $S_{a,p}$ 代表頻譜加速度的性能點； T_{eq} 代表對應於性能點 (d_p, a_p) 之等效基本週期， d_p 和 a_p 分別代表性能點對應之譜位移和譜加速度。 T_0 代表特徵週期，被定義為 $T_0 = (S_{D1} B_s) / (S_{DS} B_l)$ ， S_{D1} 和 S_{DS} 分別代表阻尼比為 5% 之一秒譜加速度和最大譜加速度。在這篇文章中， S_{D1} 和 S_{DS} 分別等於 0.45g 和 0.8g，而考量遲滯迴圈不完美的情況下， κ 等於 0.67。對於本研究所有探討的案例，最大屋頂變位的性能點之耐震性能均為最大。最大震損前後性能目標地表加速度分別為 A_p^I (震前抗震容量) 和 A_p^D (震後抗震容量)，因此，結構物的殘餘耐震性能比可定義為

$$R_c = \frac{A_p^D}{A_p^I} \times 100\%$$

第四節 採用人工智慧之結構物快速評估

傳統透過地震儀所量測之數據來評估結構物反應之方法可略分為系統識別[40、41、42]或是分析有元素模型[43、44]等兩種類型。採用系統識別主要是透過量測到的紀錄來推估結構的參數如自然振動頻率、模態及勁度等。比如若結構物的頻率在地震前後有明顯的增加，可推測為結構物受損導致勁度減少所造成。另一方面，透過比較地震儀量測到的數據與有限元素模型模擬的結構反應，結構的參數可以不斷地更新修正直至量測的數據與模擬之結果趨於一致。兩類方法分別在計算的效率以及精確度有其各自的優點。系統識別可以快速地評估結構的狀況，但無法精確的預測結構物的非線性反應。相對地，利用不斷更新有限元模型可以達到精確模擬目標結構物，但卻需要投入大量的計算成本。

隨著近年來人工智慧的發展，基於機器學習(machine learning)的結構健康監測可以大幅的提升計算的效率並減少人工操作所帶來的影響以提升預測的準確度。卷積神經網路(CNN, convolutional neural network)為近幾年機器學習與深度學習(deep learning)發展的核心。如圖 2-3 所示，其優勢在於深度的網路架構可以取代傳統結構健康監測中複雜的特徵選取(feature selection)。以數據驅動(data driven)模型學習並歸納出正確率最高的參數。

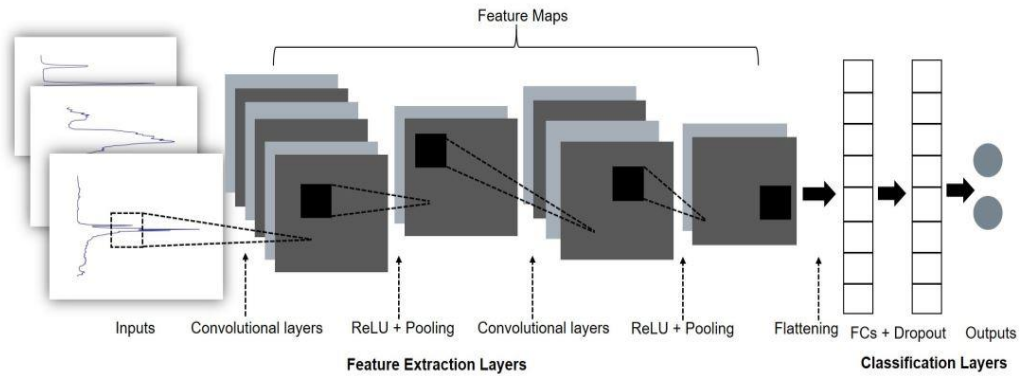


圖 2-3 卷積神經網路架構 [50]

CNN 依據輸出層的形式可分為分類型(classification)或是目標檢測型(object detection)，近來便有透過街景照來快速區分出城市中的軟弱層(soft-story)房屋[51]以及利用震後的現場照片來偵測房屋的損傷[52]。針對結構物受震反應的預測，Lu[53]等人將地震儀量測之紀錄轉換為時頻分布(TFD，time-frequency distribution)圖並透過深度卷積神經網路預測結構的損傷程度(輕、中、重)。Wu[54]等人則直接透過 CNN 針對輸入地表運動歷時來預測結構物的樓層加速度歷時。不論是針對 1-D 時間歷時或是 2-D 影像，CNN 都可以有效且準確地預測結構的反應，然而其高正確率往往是基於足夠的訓練數據。以圖像分類為例，要訓練出好的 CNN 模型可能需要上千甚至上萬張圖片。CNN 另一個常為人詬病的便是其缺乏解釋性(interpretability)。不同問題訓練出的深度網路架構所學習之參數具有何種物理意義，仍有待研究。針對上述兩個問題，Zhang[55]等人將動力運動方程式(即牛頓第二運動定律)作為訓練 CNN

時的目標函數來限制並加快最優參數的搜尋。其結果可以準確且有效地預測結構的非線性動力歷時以及構件的遲滯反應外，更可以降低所需的訓練集並增加 CNN 模型的物理解釋性。其所提基於物理法則之 CNN(PhyCNN)架構如圖 2-4 所示。

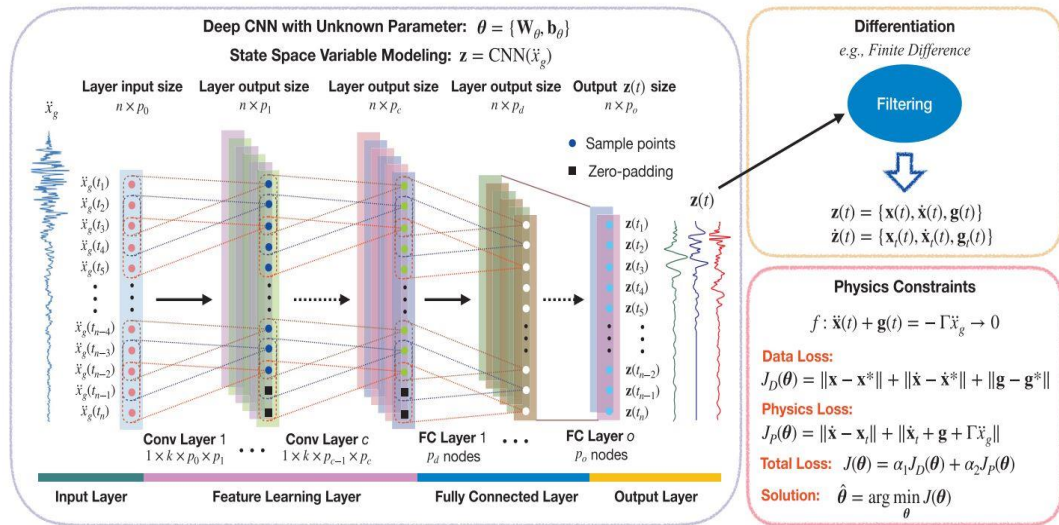


圖 2-4 PhyCNN 架構[55]

本研究所量測之數據可透過上述方法進行快速的結構反應評估，以預測結構在震前、中、後的健康狀況。本研究當前僅針對一棟建築物進行地震儀安裝，可量測到之地震數據勢必受限，但透過前述 PhyCNN，不須大量訓練集依舊能達到一定的準確性。此外，此一方法所預測之結果可與前述章節所提之熵分析作驗證。訓練完成之 CNN 模型僅需將新量測之地震紀錄輸入即可立即評估結構的安全性，可以達成真正的即時反饋(real-time feedback)。本研究為一示範案例，後續可針對區域範

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

圍內多棟建物進行地震儀安裝與監測來強化數據集。一旦區域內具有代表性的建築與場址都納入訓練集後，便可以再次透過機器學習(如 k 平均數叢聚分析)來推測周遭所有房屋的受震反應與健康狀況。本研究可以此作為橋梁來連接物聯網、大數據及結構安全監測並提升都市耐震性。

第三章 研究理論與方法

本案於微振量測方法將利用隨機子空間識別法，長期震動預測結構反應將利用嫡分析法，相關方法分析如下所示：

第一節 微振量測方法

利用隨機子空間識別法，將結構物量測之振動訊號識別其模態頻率、模態阻尼及模態形狀等動態參數。隨機子空間識別理論(Stochastic Subspace Identification, SSI)考慮一個 n_1 維自由度之物理系統，該物理系統由透過彈簧及阻尼連接之質量組成，由下式表示：

$$M\ddot{x}(t) + C_1\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) = B_1u(t) \quad (3.1.1)$$

其中 $x(t) \in R^{n_1}$ 為在連續時間 t 時之位移向量； M ， C_1 ， $K \in R^{n_1 \times n_1}$ 為質量、阻尼及勁度矩陣；在時間函數上的點表示為時間之導數； $f(t) \in R^{n_1}$ 為激發力，可用 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量與轉換矩陣 $B_1 \in R^{n_1 \times m}$ 表示，亦即 m 個輸入的 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量根據轉換矩陣 $B_1 \in R^{n_1 \times m}$ 所指定的自由度施加於該物理系統上。可轉換為狀態形式：

$$\dot{s}(t) = A_c s(t) + B_c u(t) \quad (3.1.2)$$

輸出向量 $y(t) \in R^{l \times 1}$ 可定義為：

$$y(t) = C_a \ddot{x}(t) + C_v \dot{x}(t) + C_d x(t) \quad (3.1.3)$$

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

其中 C_a 、 C_v 及 $C_d \in R^{l \times n_1}$ 為加速度、速度及位移之輸出矩陣。再轉為離散時間隨機狀態空間模型：

$$\dot{s}_{k+1} = As_k + w_k, \quad y_k = Cs_k + v_k \quad (3.1.4)$$

利用隨機子空間識別法，可由輸出向量 y_k 識別得系統之 A 、 C 和模態參數，主要步驟如下：

1. 漢克爾矩陣(Hankel matrix)可利用輸出之量測數據組成：

$$Y = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \in R^{2li \times j} \quad (3.1.5)$$

其中 i 為使用者自定之參數，須大於系統階數 n ；因所量測為 l 之自由度，所以輸出向量 y_k 為 l 列，而 H 矩陣為 $2li$ 列；而 j 對應的是漢克爾矩陣之行數；為了確保輸出向量 y_k 之所有 r 時間取樣都有填入漢克爾矩陣中，則 j 可相等於 $r - 2i + 1$ 。漢克爾矩陣可分為過去 $Y_p \in R^{li \times j}$ 和未來 $Y_f \in R^{li \times j}$ 兩部分。

2. 列空間投影：

定義 O_i^t 為矩陣 Y_p 之列空間正交投影於矩陣 Y_f 之列空間，公式如下：

$$O_i^t = Y_f / Y_p \equiv Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^\dagger Y_p \in R^{li \times j} \quad (3.1.6)$$

其中“/”為投影運算， T 為轉置運算及 \dagger 為虛逆矩陣運算。投影運算也可使用 QR 分解進行快速運算。

將正交投影 O_i^t 進行奇異值分解(Singular Value Decomposition, SVD)：

選擇系統階層 n ，將奇異值向量和奇異值分為兩部分：

$$O_i^t = USV^T = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} \approx U_1 S_1 V_1^T \quad (3.1.7)$$

其中， S_1 包含前 n 個奇異值。

3. 計算擴展觀測矩陣， Γ_i ：

$$\Gamma_i = U_1 S_1^{1/2} \equiv \begin{bmatrix} C \\ CA \\ M \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \in R^{li \times n} \quad (3.1.8)$$

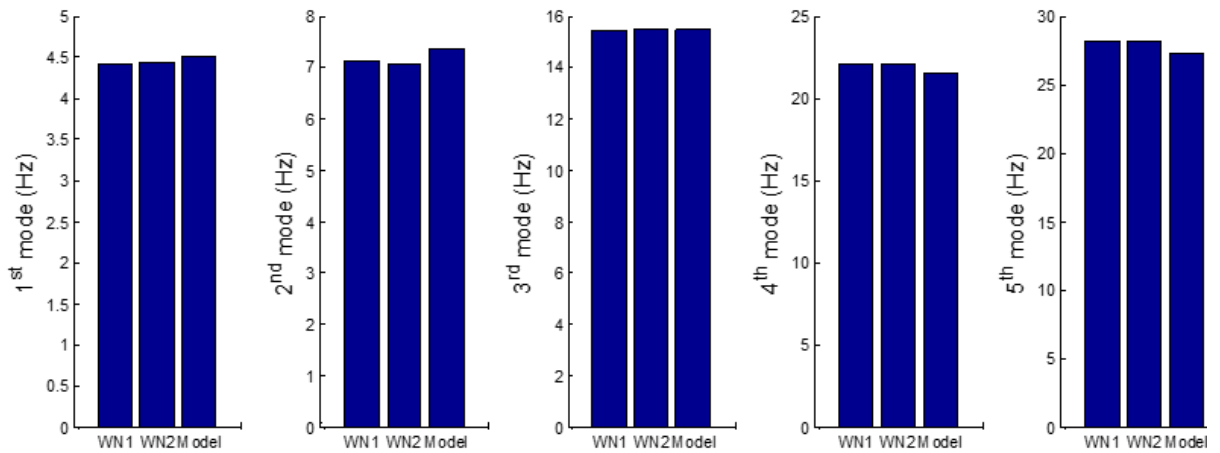
由 Γ_i 求得系統參數矩陣 A 及輸出矩陣 C ：

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

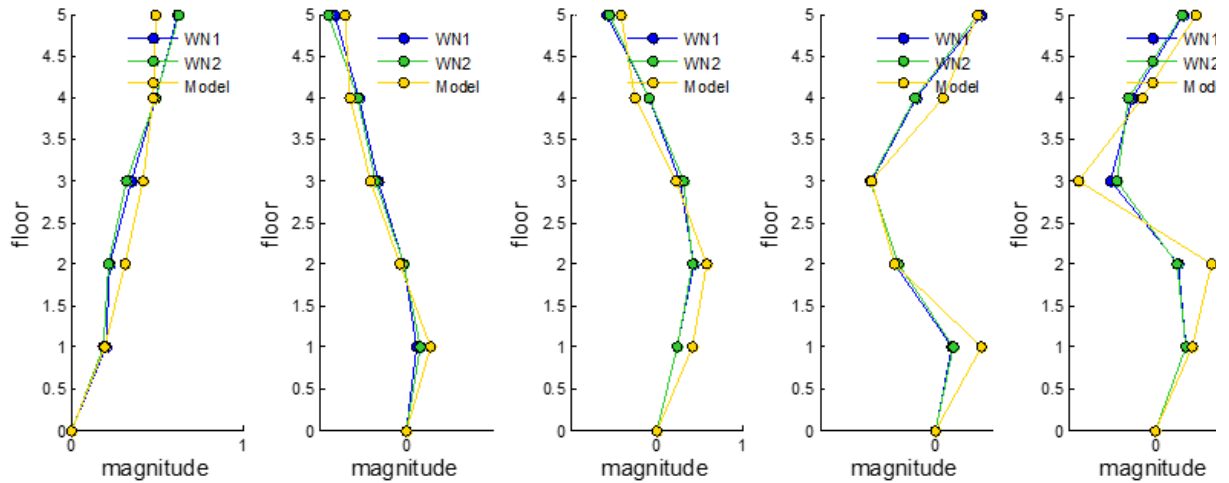
$$A = \underline{\Gamma}_i^{\dagger} \bar{\Gamma}_i \quad (3.1.9)$$

其中 $\underline{\Gamma}_i^{\dagger} \in R^{l(i-1) \times n}$ 為 Γ_i 無最後之 l 列之矩陣， $\bar{\Gamma}_i \in R^{l(i-1) \times n}$ 為 Γ_i 無初始之 l 列之矩陣。而矩陣 C 可從 Γ_i 之初始 l 列所求得。

再根據系統模態參數運算求得無阻尼之特徵頻率 f_i 、阻尼比 ξ_i 和模態形狀 φ_i (圖 3-1)。透過隨機子空間識別法，成功識別橋梁模態後，再利用 AI 方法，在固定感測器數量的情況下，進行感測器位置最佳化，使感測器位置的配置能夠有效識別結構物模態。



(a) 特徵頻率



(b) 模態形狀

圖 3-1 特徵頻率與模態形狀示意圖

微振量測取樣頻率將訂為 200Hz，亦即使 Nyquist Frequency 為 100Hz 以涵蓋上述頻率範圍，每次微振量測時間至少 2 分鐘。初始階段將利用微振量測法進行長期結構安全監測作業，包含各類感測器位置評估及設置、監測系統安裝及維護，為執行長期的建築物健康監測打下穩固資料汲取系統。

第二節 長期震動預測結構反應

i. 多尺度熵：

Costa[31]將只適用於單一尺度之熵分析法改良，透過將時間序列轉為多尺度，使原本在生醫領域無法判斷健康與病患人類心律訊號之瓶頸獲得改善，進而提升鑑別臨床病理訊號之準確性。而此種透過粗粒化 (Coast-grained) 之演算法程序，使原始訊號轉換為各種不同尺度的熵分析理論，學者稱之為多尺度熵 (Multiscale Entropy, MSE)。

在 Costa 所提出之多尺度熵概念，與傳統熵分析法最顯著的不同，乃是由於粗粒化過程而使熵值與過去只進行取樣熵或近似熵之結果有所區別。將一序列長度為 $1 \sim N$ 之原始時間訊號 $x_1, \dots, x_i, \dots, x_N$ ，以尺度因子 (Scale Factor) τ 分割，使時間訊號劃分為每組長度為 N/τ 之資料序列，並透過將各組被分割之資料序列進行算術平均值，進而建構出新的時間序列 $\{y_j^{(\tau)}\}$ 。經由粗粒化構成新時間序列之演算程序如下所示：

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, \quad 1 \leq j \leq N/\tau \quad (3.2.1)$$

當進行上述程序，定義出新時間序列之後，再對每一經由 τ 分割之各尺度時間序列進行取樣熵 (Sample Entropy) 分析，進一步得到此時間序列 $x_1, \dots, x_i, \dots, x_N$ 於各尺度下之取樣熵值 S_E 。利用得到之熵值繪製出橫軸為尺度因子，縱軸為熵值之曲線圖 ($f(\tau) = S_E$)，從多尺度熵 (MSE) 之曲

線中，觀測其時間序列在不同尺度下之繁雜度。

ii. 複合多尺度熵：

複合多尺度熵(Composite multiscale entropy, CMSE)由 Wu[34]所提出，其目的為藉由通過增加粗粒化的次數，來減少多尺度熵於較高尺度時，熵值不穩定以及熵值有變異數偏大之狀況，為多尺度熵之改良型。

在複合多尺度熵的演算法中，起始與多尺度熵相同，均為將一序列長度為 $1 \sim N$ 之原始時間訊號 $x_1, \dots, x_i, \dots, x_N$ ，以尺度因子 (Scale Factor) τ 分割，再進行算術平均定義新時間序列 $\{y_j^{(\tau)}\}$ ，而其相較多尺度熵之不同處在於，粗粒化次數從單次變更為與粗粒化序列之尺度因子 τ 數相同，當尺度因子 $\tau=2$ ，粗粒化次數為 2，即分別從序列之第一點與第二點為開始進行分割，建立兩個新粗粒化時間序列，同理，當尺度因子 $\tau=4$ ，即分別從序列之第一點、第二點、第三點及第四點為起始，構成四個新粗粒化時間序列。複合粗粒化程序之新時間序列演算如下式所示：

$$y_{k,j}^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+k}^{j\tau+k-1} x_i, \quad 1 \leq j \leq N/\tau, \quad 1 \leq k \leq \tau \quad (3.2.2)$$

進行上述複合多尺度熵之演算程序後，可得新粗粒化序列，以 $y_k^{(\tau)} = \{y_{k,1}^{(\tau)}, y_{k,2}^{(\tau)} \dots y_{k,p}^{(\tau)}\}$ 表示，其中 p 為序列總長， k 表示第 k 個粗粒化序列。

其後，進行取樣熵分析，將各尺度粗粒化序列取樣熵 (Sample Entropy) 進行平均，求得各尺度下之熵值，演算式定義如下：

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

$$CMSE(x, \tau, m, r) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{\tau} SampEn(y_k^{(\tau)}, m, r) \quad (3.2.3)$$

與前述步驟相同，以各尺度下之熵值繪製出 $(f(\tau)=S_E)$ 之曲線圖後，藉由觀測複合多尺度熵(CMSE)判別複雜度之相對變化，對比於多尺度熵，經由複合粗粒化演算後所得之複合多尺度熵值較多尺度熵精準。

iii. 複合多尺度交叉取樣熵：

交叉取樣熵(Cross-Sample Entropy)理論由 Richman[33]所提出，將分析目標僅適用單一時間序列訊號之取樣熵，發展成專為兩種不同時間序列訊號進行分析之方法，主要目的乃在於評估兩相同長度但不同複雜度及亂度之時間序列訊號下，資料異步性(dissimilarity)與非同步程度(asynchrony)。將兩時間序列各自建構為樣板空間，以相似距離之概念計算，評估兩者相似度，進而取得其交叉取樣熵值。運用交叉取樣熵計算訊號相似度之過程，概述如下：

首先，擷取兩相同長度 N 之時間序列 $\{X_i\} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ 與 $\{Y_j\} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_N\}$ ，接著將兩時間序列分解，建構為長度為 m 個點之樣板 $u_m(i) = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}\}$ ， $1 \leq i \leq N - m + 1$ 跟 $v_m(j) = \{y_j, y_{j+1}, \dots, y_{j+m-1}\}$ ， $1 \leq j \leq N - m + 1$ ，進而將其組合為各自的樣板空間(pattern space)， T_x 以及 T_y ，定義如下：

$$T_x = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & L & x_m \\ x_2 & x_3 & L & x_{m+1} \\ M & M & O & M \\ x_{N-m+1} & x_{N-m+2} & L & x_N \end{pmatrix} \quad (3.2.4)$$

$$T_y = \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & L & y_m \\ y_2 & y_3 & L & y_{m+1} \\ M & M & O & M \\ y_{N-m+1} & y_{N-m+2} & L & y_N \end{pmatrix} \quad (3.2.5)$$

而後，比較兩樣板，分析計算其兩樣板間 $u_m(i)$ 與 $v_m(j)$ 之相似數量，

將相似數量表示為 $n_i^m(r)$ ，其定義如下所示：

$$n_i^m(r) = \sum_{j=1}^{N-m} d[u_m(i), v_m(j)] \quad (3.2.6)$$

兩樣板相似度，則是以絕對相似距離作為判定依據，計算定義如下：

$$d[u_m(i), v_m(j)] = \max \{ |x(i+k) - y(j+k)| : 0 \leq k \leq m-1 \} \quad (3.2.7)$$

$$d[u_m(i), v_m(j)] \leq r, \quad 1 \leq j \leq N-m \quad (3.2.8)$$

式 3.2.8 中， r 為閾值，為判定兩樣板是否相似之條件。計算出兩樣板之距離大於 r 時，判斷其兩者間為不相似，而當計算之兩樣板距離小於 r 時，則將其判別為相似。當不同樣板經由持續的輪流替換迴圈進行比對，得到所有樣板距離小於閾值之相似數量 $n_i^m(r)$ 後，即運用所得相似數量計算樣板之相似機率 $U_i^m(r)(v||u)$ ，如下式所示：

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

$$U_i^m(r)(v\|u) = \frac{n_i^m(r)}{(N-m)} \quad (3.2.9)$$

再將全部長度均為 m ，經由上式所計算出的相似機率加總，並再一次取算數平均，得到平均相似機率，其運算式如下：

$$U^m(r)(v\|u) = \frac{1}{(N-m)} \sum_{i=1}^{N-m} U_i^m(r)(v\|u) \quad (3.2.10)$$

從 3.2.10 式所得之 $U^m(r)(v\|u)$ ，為兩相同長度之時間序列經由拆解與重組 m 長度樣板並計算相似機率後之訊號相異程度，意即兩樣板空間之同步性。而交叉取樣熵之演算方法，乃是將時間序列拆解為長度 $m+1$ 之兩樣板，再一次上述演算後求得平均相似機率 $U^{m+1}(r)(v\|u)$ ，並經由下式計算出交叉取樣熵：

$$CS_E(m, r, N) = -\ln \left\{ \frac{U^{m+1}(r)(v\|u)}{U^m(r)(v\|u)} \right\} \quad (3.2.11)$$

根據 ii 節複合多尺度之概念，Yin[35] 等人提出複合多尺度交叉取樣熵(Composite multiscale cross-sample entropy, CMSCE)，結合複合粗粒化與取樣熵理論。其演算方法，乃在計算交叉取樣熵之前，將時間序列先運用複合粗粒化轉為不同尺度，再進行交叉取樣熵分析求出熵值，如下所示：

$$CMSCE(x, y, \tau, m, r) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{\tau} SampEn(x_k^{(\tau)}, y_k^{(\tau)}, m, r) \quad (3.2.12)$$

將導出之熵值，繪製出 $(f(\tau)=S_E)$ 曲線，綜合前述所有方法之優點，觀測分析複合多尺度交叉取樣熵(CMSCE)於不同尺度下熵值，從而準確分析出訊號間之非同步程度。

第三節 AIOT 導入方法

前述微振量測係希望透過系統識別方法來獲取結構物基本特徵，如勁度與自然震動週期。若是此些參數在地震前後有所差異，便可作為判斷是否有需要進一步評估結構損傷之依據。另一方面，長期振動監測便是透過每次震後所量測到的數據如樓地板加速度或層間位移做出第一時間之判斷來評估結構的安全性。此外，所量測到的數據亦可以用來修正結構物的系統參數來建立更準確之數值模型。

長期監測所量測到的數據雖可以透過與數值分析結果的比較來反覆修正得到最接近現地之模型，但其過程繁瑣且費時。為此，本計畫欲透過現場量測之數據搭配新近發展之人工智慧神經網絡，開發代理模型(surrogate model)來輔助結構物受震反應之快速預測。所需之數據為前面章節所述三軸力平衡式加速度計紀錄之加速度歷時，當中以一樓數據作為該建築之輸入地震力時，其餘樓層數據作為結構反應來訓練神經網絡，數據傳輸的方式是現場加速度計傳輸給現場主機(CUBE)後，透過外網上傳至雲端網路，再載至本地電腦進行使用。

本計畫欲訓練之神經網路架構使用了捲積神經層(convolutional layer)進行自動化特徵的選取，並透過結構動力之運動方程式約束並強化所選取參數的物理意義與解釋性(interpretability)。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

神經網絡的架構如圖 3-2 所示，輸入之地表加速度透過捲積核心(kernel)自動化選取並組成特徵圖(feature map)，此為一捲積層。經過多個捲積層後，透過全連結層(fully-connected layer)將所有神經元串接並輸出結構之反應，此一過程為稱為前向傳遞(forward propagation)。輸出之樓層加速度與量測之樓層加速度的差，為此一次前向傳遞之誤差，亦稱為損失函數，如式 1 所示，其中 \ddot{x} 為量測之結果， \ddot{x}^* 為預測之結果， θ 為神經網絡內之參數，需透過對損失函數求導以及連鎖律(chain rule)進行修正，此一過程為後向傳遞(backward propagation)。神經網絡參數 θ 之優化便是透過反覆的前向與後向傳遞，使損失函數最小化而求得。

樓層位移歷時的預測，則是針對運動方程式進行有限差分法而得。如式 2 所示，其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 及 \mathbf{K} ，為結構之質量、阻尼與勁度。此處雖為未知，但由於神經網絡求得之加速度歷時是經過其自動化特徵選取及優化之結果，已將結構之特徵考量，可以直接利用加速度增量以及常用有限差分法(如中央差分)求得位移之增量，進而求得位移歷時。此一過程保證了所訓練之神經網絡及其預測的結果符合結構受振運動之物理原則，故此一模型稱為 PhyCNN(physic-based convolutional neural network)[1]。

$$J(\theta) = \|\ddot{x} - \ddot{x}^*\| \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (2)$$

圖 3-2 為上述採用深度神經網絡之預期成果，長期觀測下來，神經

網絡能由小至大各類型地震中不斷更新其所學習之參數，透過其預測之動力歷時，來評估結構結構是否有嚴重損傷。比如透過樓層加速度判斷非結構構件之損傷，以及層間位移判斷結構構件之損傷。

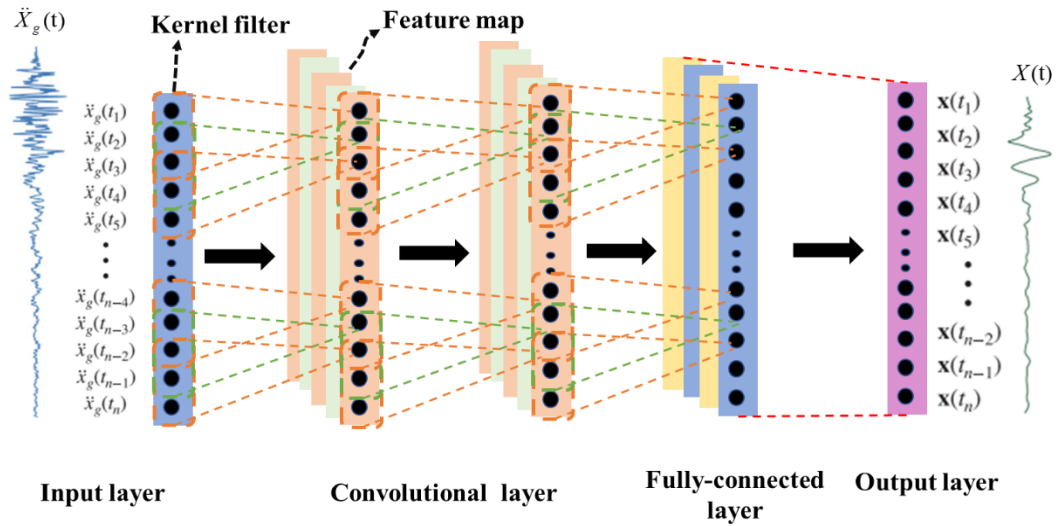


圖 3-2 本計畫所訓練之神經網絡架構

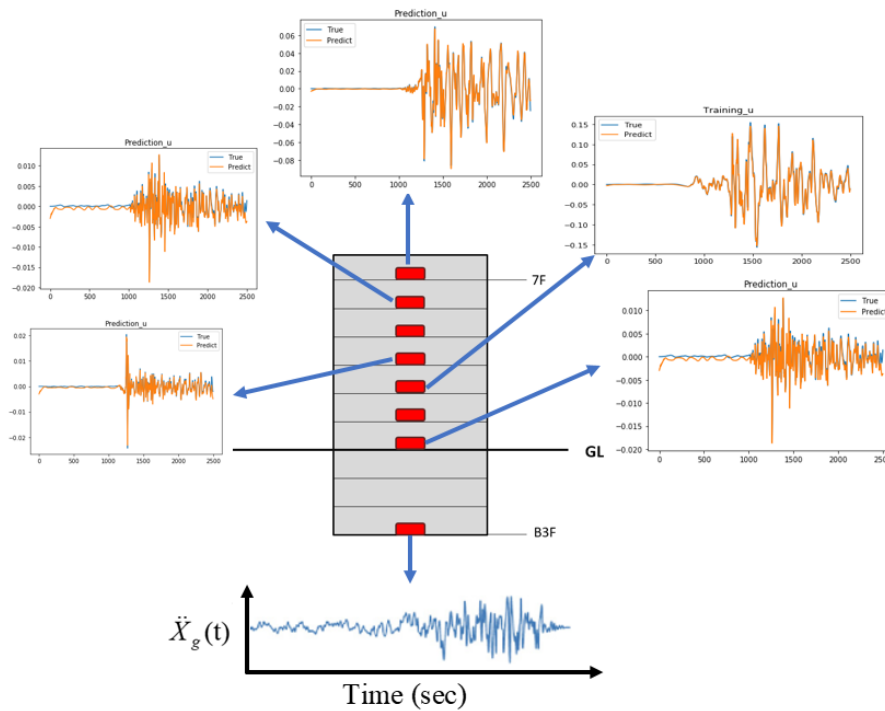


圖 3-3 本計畫欲導入 AIOT 之成果

為佐證導入 AI 輔助預測結構受震反應之可行性，本計畫利用國家地

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

震工程研究中心過往完成之振動台實驗數據來訓練上述之深度神經網絡。

實驗試體如圖 3-4 所示結合一棟五層以及一棟四層樓之鋼構抗彎構架。

量測的數據包含在南北側每層樓兩台加速度規所紀錄之樓層加速度以及

在北側每層樓兩台雷射位移計所紀錄之樓層位移。輸入地震歷時為

1940 年在美墨邊界所發生之 El Centro 地震紀錄，由小至大依序將 PGA

調整為 50gal、200gal、300gal、400gal、500gal 及 800gal 後輸入。

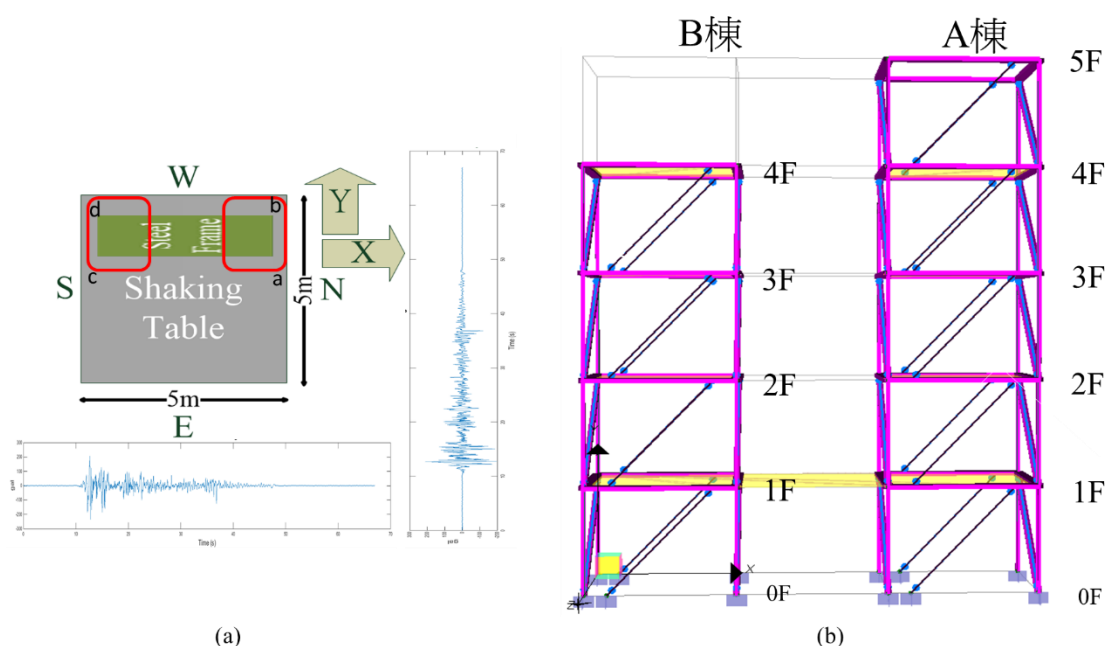


圖 3-4 一棟五層以及一棟四層樓之鋼構抗彎構架

圖 3-4 (a)試體配置方位與地震輸入方向;(b)雙塔鋼構架側視圖

神經網絡的輸入為振動台台面加速度，輸出為各樓層之加速度，並利用前述物理運動方程式預測樓層位移歷時。在每次訓練的過程均會先由地表加速度預測樓層加速度與位移，此為一次前向傳遞。而後便會透過與實際量測數據之差進行後向傳遞來修正此次訓練之參數。本計畫在訓練上使用 TensorFlow 深度學習架構並搭配 NVIDIA 高階圖像顯示卡

RTX2080 來加速訓練過程。一次訓練共有 5000 次前向與後向傳遞，在進行後向傳遞時所用之隨機梯度下降法(stochastic gradient descent)採用 0.0001 之學習率(learning rate)來搜尋可以最小化損失函數之參數。訓練之結果如圖 3-5 所示。雖然此模型僅考慮一個地震事件(El Centro)，且也僅適用於此鋼構試體，但結果確實顯示了可以利用 AI 從量測到之數據來預測結構反應進而可以減少結構在進行詳細評估時因為建模所花費的時間。

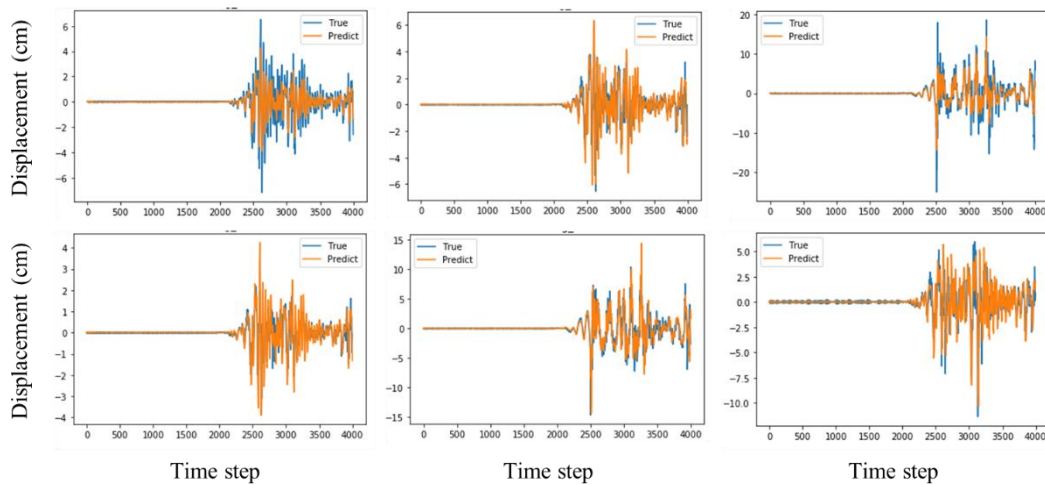


圖 3-5 神經網絡預測之樓層位移與實際位移比較

若想最大化此 AI 模型之適用範圍，應盡可能針對不同結構形式(如抗彎構架、剪力牆)與材料(如鋼筋混凝土造、鋼構造)進行量測，且需要長時間的觀測以確保地震規模由小至大的紀錄均能被 AI 考量。考慮到大地震發生的頻率較低，也可以透過過往各種強震之數值模擬結果來訓練神經網絡。如此訓練出來的模型將可以作為前述之代理模型用於即時的結構安全監測與評估。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

第四章 場域驗證

為實證 AIoT 技術對建築物結構安全監測之效益，本研究選定一處實證場域實際進行實證，分別採用安裝地震記錄儀的長期監測與微振測量兩種方式進行操作。

第一節 實證場域選擇

一、地震發生頻率與可及性

實證場域區位選擇主要考量能增加監測到地震發生的頻率，以及研究人員至現場進行設備裝設、調整等研究作業進行的可及性。因此本研究主要依照地震發生頻率與研究人員可及性進行選址。

依據中央氣象局地震測報中心之地震潛勢分析，台灣未來 10 年內發生規模 6.0 以上大型地震的熱點主要在花蓮北部外海至宜蘭交界處。(如 圖 4-1)

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

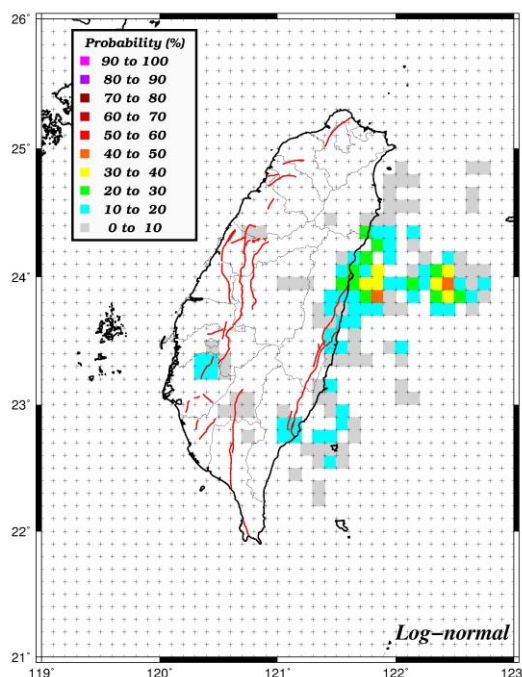


圖 4-1 10 年內發生規模 6.0 以上地震機率分布圖

資料來源：中央氣象局地震測報中心

如以地震震度 4 級查詢中央氣象局地震測報中心之歷史地震資料，近 1 年(2020 年 1 月至 2020 年 12 月) 宜蘭縣地震震度達 2 級以上的地震資料筆數達 475 筆，花蓮縣則有 643 筆。

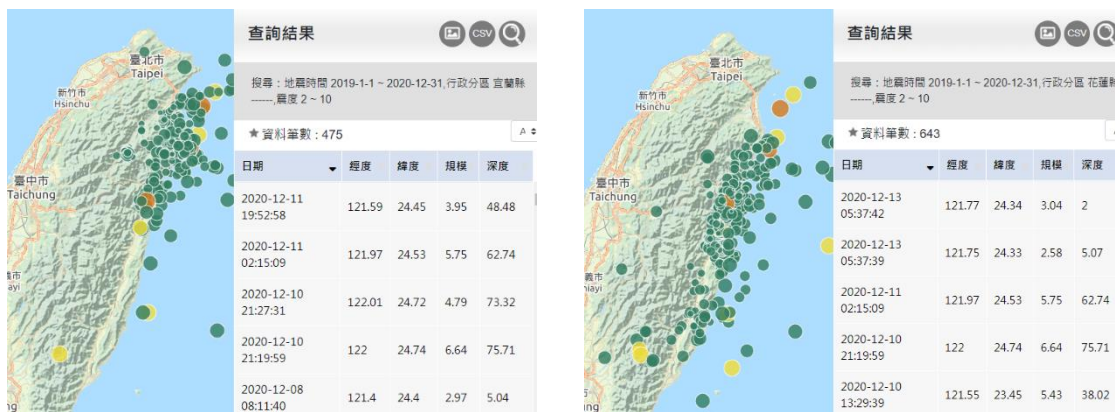


圖 4- 2 中央氣象局地震測報中心歷史地震資料

由上述資料可見宜蘭、花蓮均為地震頻繁之區域，適合作為本研究實證場域。惟考量本研究人員交通可及性，故選擇以宜蘭縣做為實證場域的區位。

二、建築類型與結構

建築結構安全監測可應用的範圍極廣，各類型建築甚至公共工程皆可採用。在初步推動時考慮服務到更多的民眾，建議以供公眾使用的大型建築為主要類型，例如商場、旅館、醫院、學校等。

另大型公共建築較常有挑高、大跨距及非標準層的設計，在結構上需要有較高強度的搭配，在地震後較亦需要以更完善的監測來了解結構狀況是否有改變，保護使用者的生命財產安全。故本研究實證場域優先選擇公共建築，瞭解實際應用的狀況，並思考各項運用的可行性。

三、本研究實證場域

綜合上述基本原則，本研究實證場域選擇宜蘭縣礁溪鄉的一處飯店建築，基本資訊如下：

- (一) 場域案名：礁溪 00 飯店
- (二) 使用用途：飯店
- (三) 建築區位：宜蘭縣礁溪鄉
- (四) 建築規模：地下 3 層，地上 7 層
- (五) 構造類型：混凝土（含鋼筋混凝土）構造
- (六) 是否有挑高樓層：有

四、長期監測資料案例

因長期監測僅能於地震發生時進行紀錄，為增加實際觀測數據提供後續分析之用，本研究將另行就 6 處已安裝長期監控設備之場域蒐集其監測資料，納入分析。

各場域中地震記錄儀依建築物不同分布於不同樓層，原則一棟建築物放置於 3 個樓層，共計至少 3 台記錄儀。各場域清單實際安裝位置數量如下表：

表 4-1 6 處已安裝長期監控設備之場域

編號	案名	安裝位置 (樓層及數量)
1	臺北市 00 社會住宅	B4F(3)、2F(1)、7F(3)、10F(1)、14F(3)、
2	新店 00 青年社會住宅	B1F(1)、10F(1)、20F(1)
3	00 藝文行政中心	B1F(1)、6F(2)、7F(1)
4	台中 00 商場	B1F(1)、7F(1)、14F(1)
5	高雄 00 飯店	B1F(1)、9F(1)、16F(1)
6	00 醫院醫療大樓	B1F(1)、7F(2)、11F(1)

6 處已安裝長期監控設備之場域，其安裝地震記錄設備及點位詳見附錄三。

第二節 安裝評估規劃

本研究於宜蘭縣新設立之實驗場域，將架設長期監測所需設

備，另進行兩次微振量測，所採用設備如下：

一、長期持續監測設備

(一) Palert Plus 網路型加速度地震儀

本計畫使用之監測儀器 Palert Plus 於 2018 年 5 月通過日本東京大學性能測試，確保技術可行性；此外本技術已實際應用於谷歌台灣資料中心、美商蘋果電子股份有限公司、台灣積體電路製造股份有限公司等國際大廠，實務可行性已經過驗證。



圖 4-3 日本東京大學性能測試



圖 4- 4 Palert Plus

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

Palert Plus 詳細規格如下：

1. 配置地點：安裝配置於建築物地面層、中間樓層或結構特殊樓層、頂樓等，實際測量地震。

2. 設備規格：

- 儀器：三軸向微機電加速度計、支援第四垂直軸速度計

可內建或外接

- 量測範圍：±2G

- 動態範圍：100 dB

- 解析度：4 通道 24 位元

- 輸出取樣率：50sps、100sps、200sps(可設定)

- 地震觸發邏輯：PD、PGA、STA/LTA

STA 範圍：0.1 – 120 秒(可設定)

LTA 範圍：0.1 – 120 秒(可設定)

地震事件記錄時間：200 秒(可設定)

- 資訊顯示：LCD 液晶螢幕顯示(2x20)，即時顯示儀器狀態

- 通訊：網路連接，相容 Modbus 通訊協定

- 軟體：即時波線展示與設定、地震事件記錄

- 記憶容量：16GB(可擴充至 64GB) 儲存儀器參數與地震記錄

- 內建時鐘精度(RTC)：±60 秒 / 年

(二) 地震早期預警控制主機 PX-01

PX-01 為一多功能的資料處理與記錄器，適用於連接 Palert 地震 P 波感測儀，作為現地預警三取二架構中的地震判斷智慧控制器。詳細規格如下：

- 1.配置地點：安裝配置於中央監控室。
- 2.設備規格：
 - 中央處理器(CPU): ARM1176JZF-S 700MHz
 - 記憶體: 8GB MicroSD 卡(標準，可擴充)
 - 網路通訊埠: 10/100Base-TX Ethernet Controller
 - 內建看門狗(Watchdog Timer) 10 秒
 - LCD 顯示幕: 顯示排數與字數 2 x 20
 - RTC 準確度: ± 30 seconds / year，支援 NTP 校正



圖 4- 5 地震早期預警控制主機

二、微振量測設備

微振量測設備為 AA222 也稱為三軸力平衡式加速度計 (FBA)，設計應用於土木工程、結構物健康診斷、地震監測，與振動監測。

- 1.配置地點：安裝配置於建築物地面層、中間樓層或結構特殊樓層、頂樓等，實際測量微振。

2.設備規格：

表 4-2 微振量測設備設備規格

Sensor Type	Tri-axial FBA accelerometer
Measuring Range	0.5, 1, 2, 4g
Selectable Sensitivities	20, 10, 5, 2.5 V/g
Dynamic Range	> 150dB from 0.1Hz to 20Hz with 2g full scale
Full Scale Output	±10V fully differential at 50 ohm
Power Consumption	80mA at 12 VDC
Power Supply	12 VDC
Operating Temperature	-20~+70 °C
Bandwidth	DC-200Hz
Waterproof	IP67
Weight	2.6 kg
Dimension (L x W x H)	205 x 160 x 80 mm

AA222 主機

配件



圖 4-6 AA222 及配件

三、設備安裝點位

(一)長期監測

本研究長期監測規劃於宜蘭實證場域 EPS1 管道間內之 B3 樓底板、挑高底層的樓板(2F 地板)跟頂樓(6F 頂板/7F 底板)分別配置

地震儀 1 顆量測加速度值。

其中安裝於 B3 樓的地震儀主要記錄地表的加速度值，安裝於挑高樓層的地震儀監測較有可能發生結構變化的樓層數據，頂樓則是記錄該建築可能出現的最大震動情形。

安裝示意圖如下：

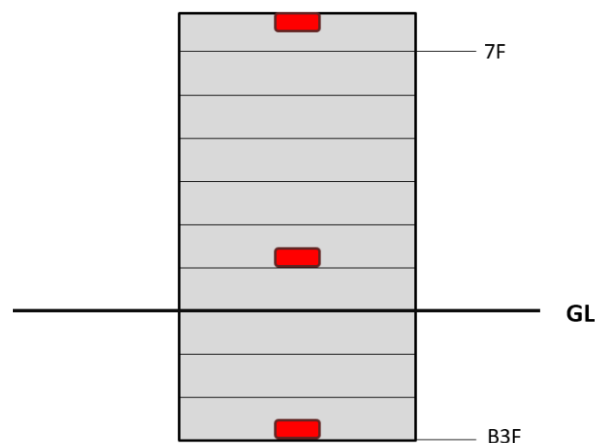


圖 4-7 長期監測地震儀安裝點位示意圖

資料來源：本研究繪製

所有地震儀都將連上網路，以 IoT 的形式自動蒐集數據，所蒐集的數據再經由 AI 處理後，得到結果。

(二)微振量測

微振量測則在研究初期先行進行一次微振量測作為基準，待地震事件或補強工程後再一次於建築相同位置進行監測，比較分析數據差異。

微振量測因無須長期安裝監測設備，可循環利用監測儀器，費用較低容易推廣。另因微振數據更為精細易受外部干擾，故建議微振量測採用的監測設備除敏感度較高，配置數量也較長期監測多。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

測量時也會測量多次，剔除極端值後，確認數據穩定無大幅差異，再取其平均值。監測過程費時約 1 工作天。

本研究微振量測所於宜蘭實證場域安置點位除了長期監測規劃於 EPS1 管道間，1 樓底板、挑高底層的樓板跟頂樓分別配置地震儀 1 顆外，另外於建築其他每一樓層垂直位置皆配置地震儀 1 顆，共計 7 顆，水平位置於頂樓分配三處進行量測

安裝示意圖如下：

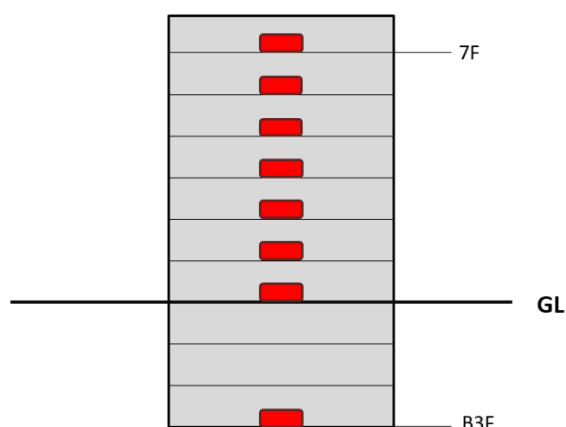


圖 4-8 微振量測地震儀安裝點位示意圖

資料來源：本研究繪製

四、分析項目

長期監測主要是紀錄地震當下結構物的反應，經由記錄結構物震幅、加速度是否超過預設值，或是換算層間變位是否超過法規來判別安全性。

本計畫長期監測地震儀安裝完成後，監測項目包含地表加速度、樓層加速度，並且進行後續分析。預計產出報表內容包含最大震度、

最大地表加速度、最大樓層加速度與結構安全評估。

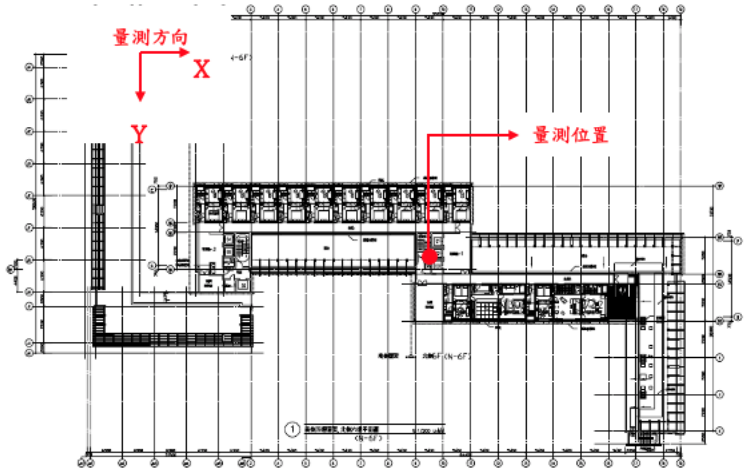

微振量測因為量測時間僅需一個工作天，設備可循環利用，故本研究設置較多點位，量測較細膩的數據，比較出地震前後、健康的差異。預計產出的為現況報告包含結構物頻率、振形，並於兩次量測比較分析後進行結構安全評估。

第三節 量測結果

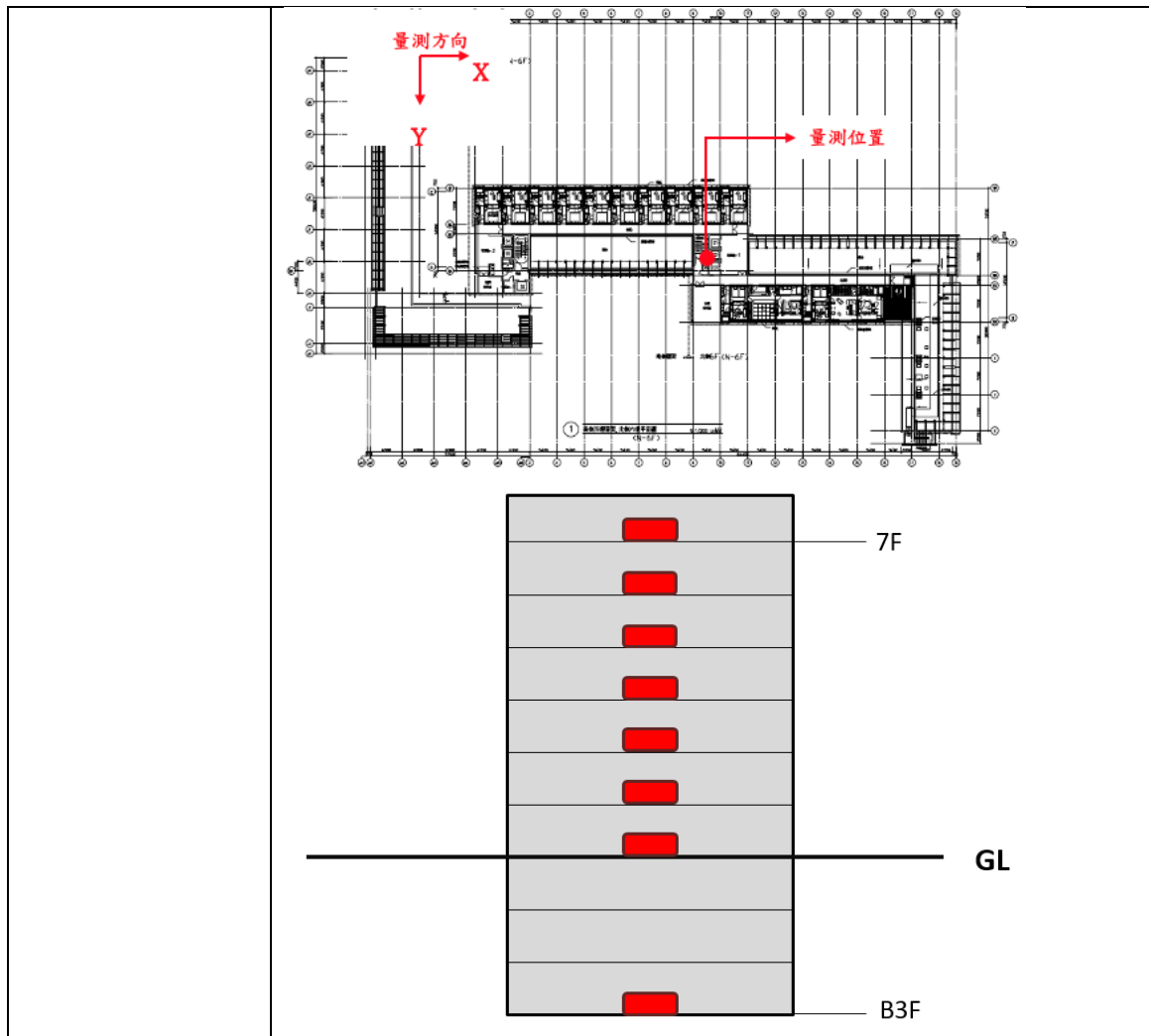
微振量測紀錄表

編號：

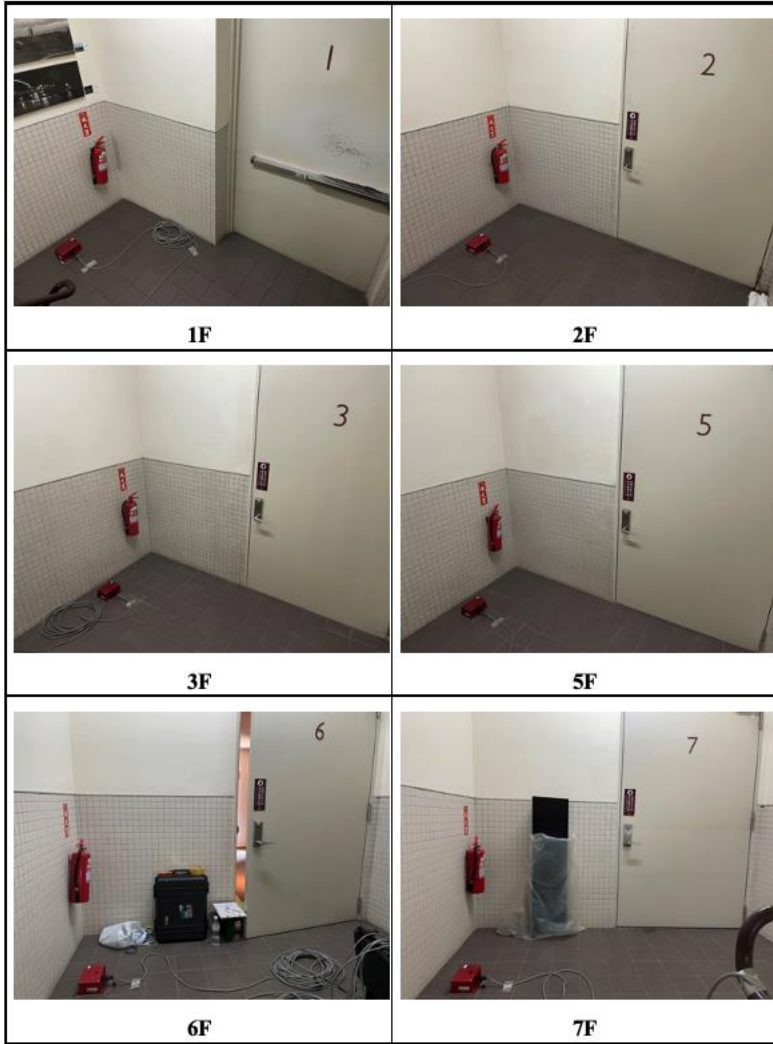
案件基本資料	
建築物名稱	XX 飯店
地址	宜蘭市礁溪鄉○○路○○號
地號	○○段○○○○○號
建築執照字號	○○○號
建築物類別	民間
樓層	地上：7 樓 地下：3 樓
構造方式	鋼筋混凝土
結構物外觀 照片	
量測規劃	
量測時間	110 年 7 月 ○○ 日 ○○ 時
量測總筆數	2 筆
每筆量測時間	2 分鐘
感測器類型	三軸向力平衡式加速度計
感測器型號	感測器：Salien AA222 轉錄器：NI Compact Rio
感測器取樣頻率	200hz

量測訊號正規化	
感測器固定方式	雙面膠
感測器裝置位置與方向	<p>共 7 個固定於 7 樓樓梯間地板</p> 
感測器配置照片	
感測器配置樓層及數量 (垂直)	1 樓、2 樓、3 樓、4 樓、5 樓、6 樓、7 樓各 1 個，共 7 個
垂直配置量測	
感測器固定方式	雙面膠
感測器裝置位置與方向	8 個固定於 1~7 樓樓梯間地板及 B3 樓

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查



感測器裝置照片



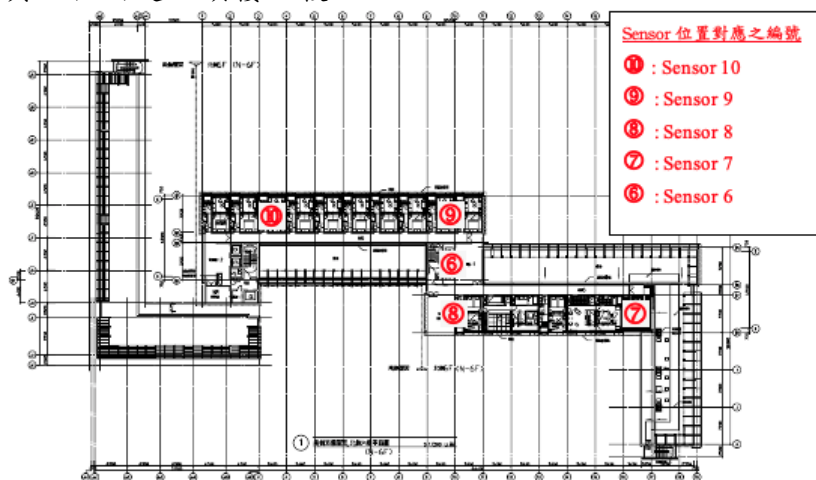
水平配置量測

感測器固定方式






雙面膠

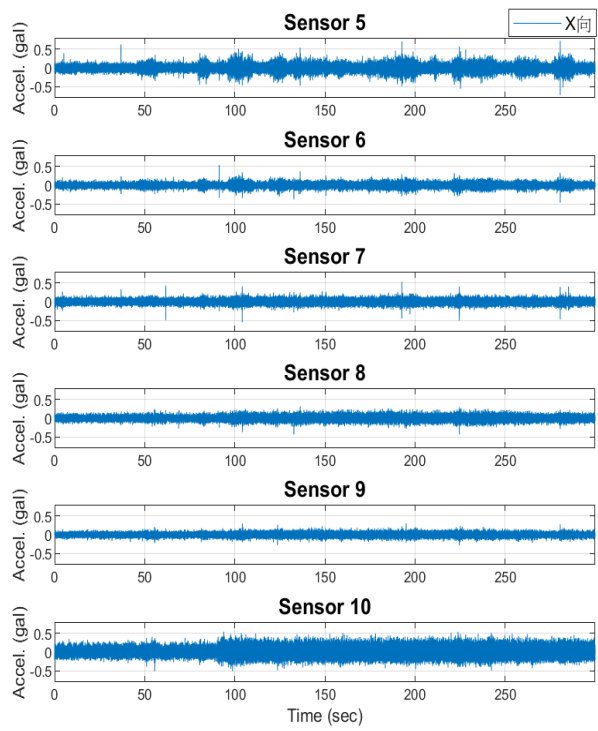
感測器裝置位置
與方向

共 5 個固定於頂樓地板

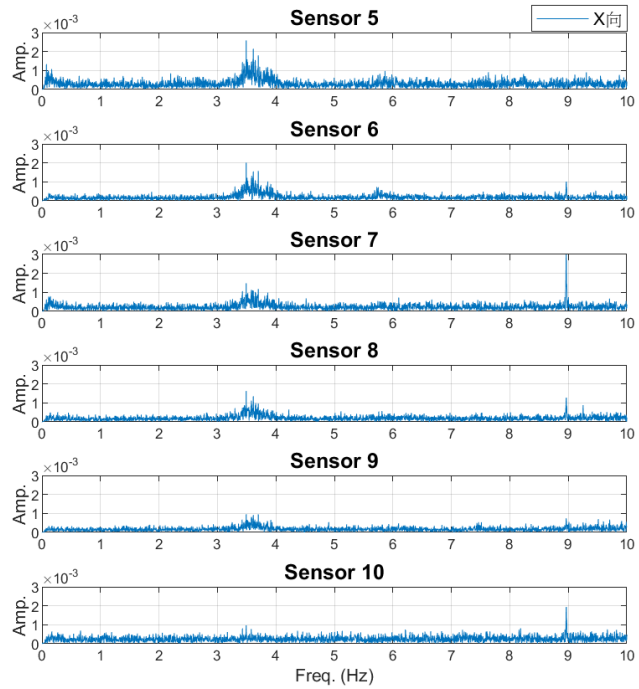


應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

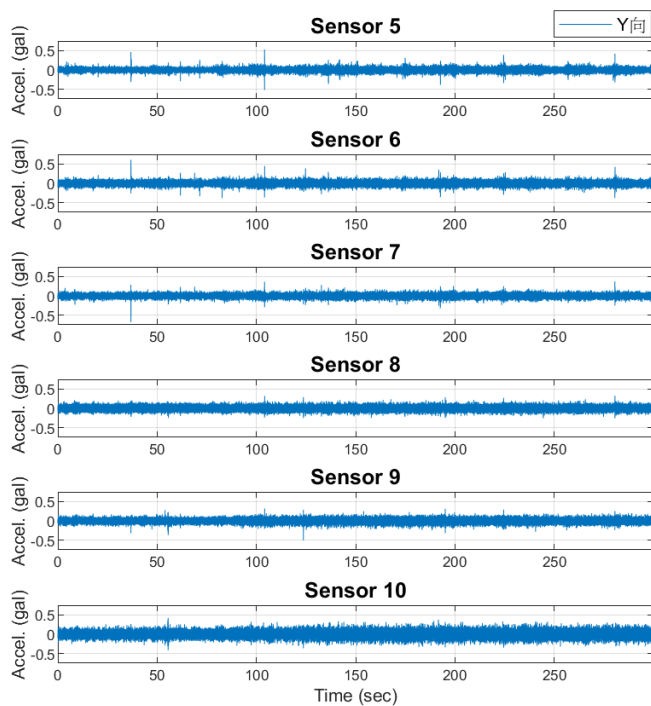
<p>感測器裝置照片</p>	 <p style="text-align: center;">Sensor 6</p>  <p style="text-align: center;">Sensor 7</p>  <p style="text-align: center;">Sensor 8</p>  <p style="text-align: center;">Sensor 9</p>  <p style="text-align: center;">Sensor 10</p>
<p>量測資料(第一次)</p>	
<p>垂直配置量測 (第一次)</p>	<p>加速度歷時圖(X向) - 第一次</p>



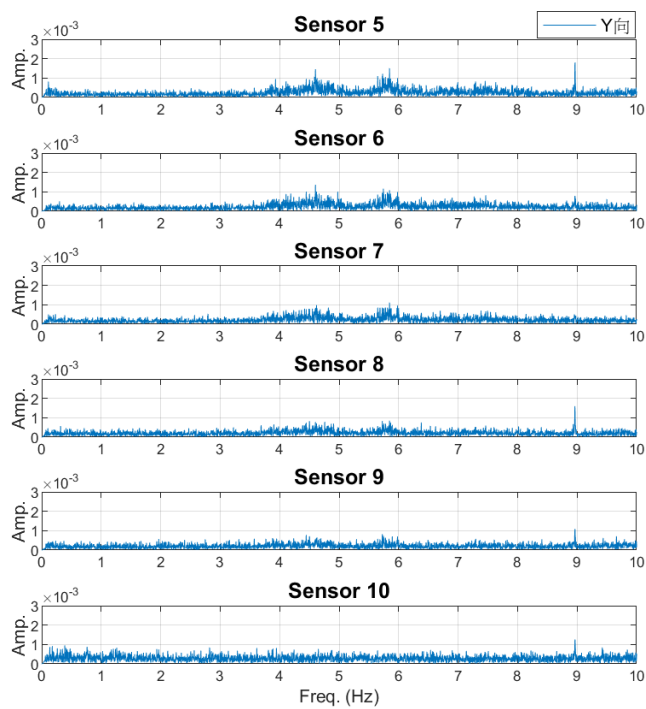
傅立葉頻譜圖(X向) - 第一次



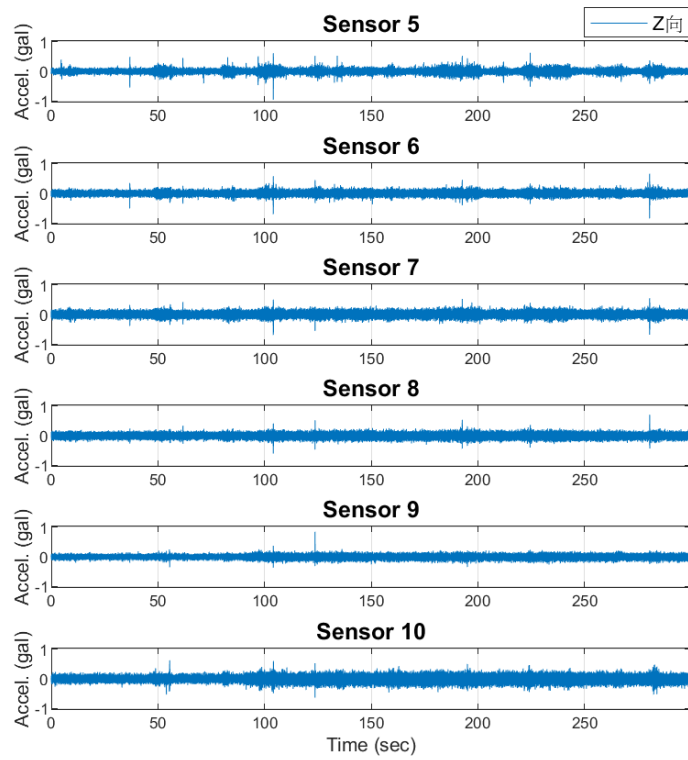
加速度歷時圖(Y向) - 第一次



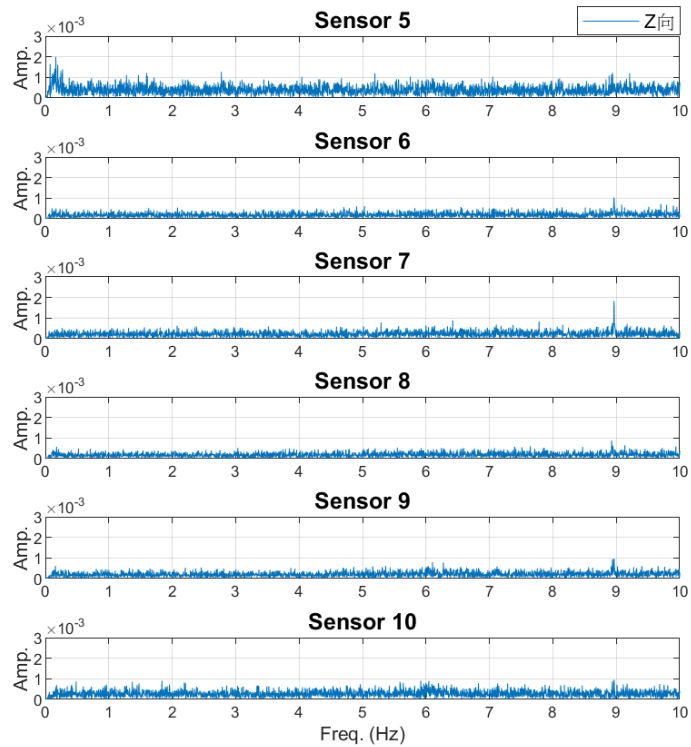
傅立葉頻譜圖(Y向) - 第一次



加速度歷時圖(Z向) - 第一次

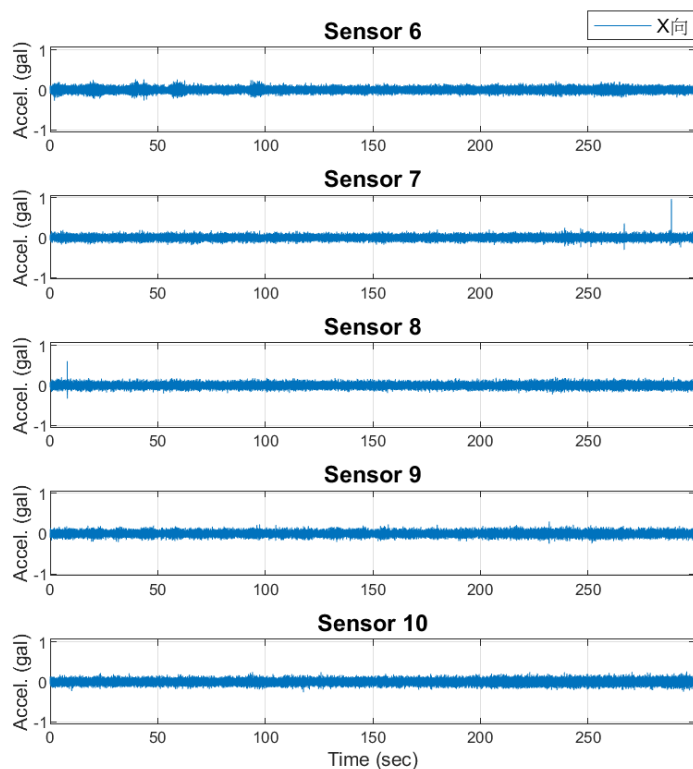


傅立葉頻譜圖(Z向) - 第一次

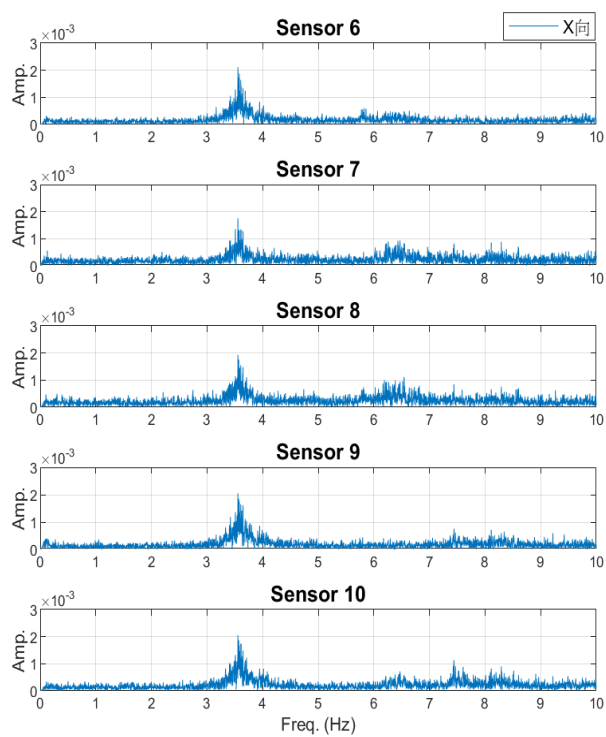


水平配置量測
(第一次)

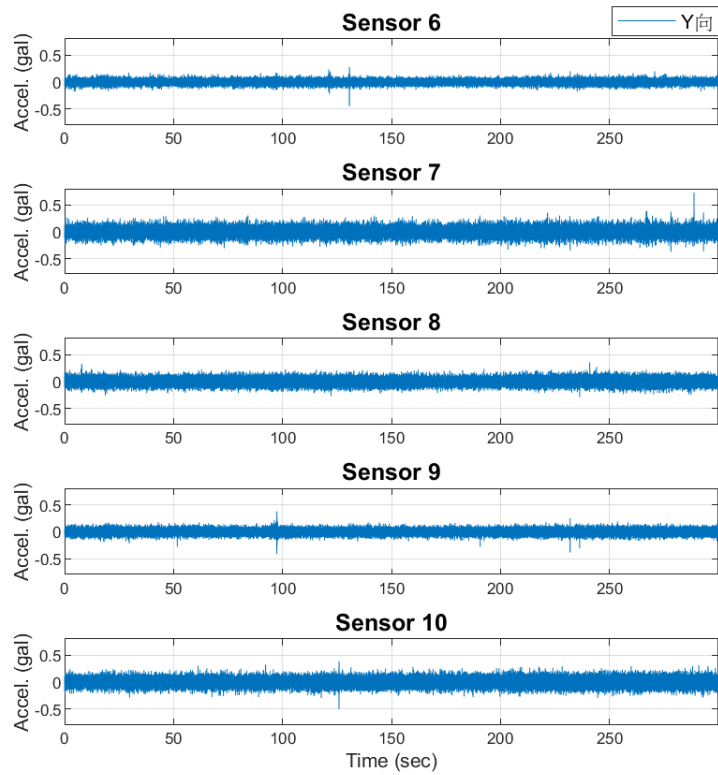
加速度歷時圖(X向) - 第一次



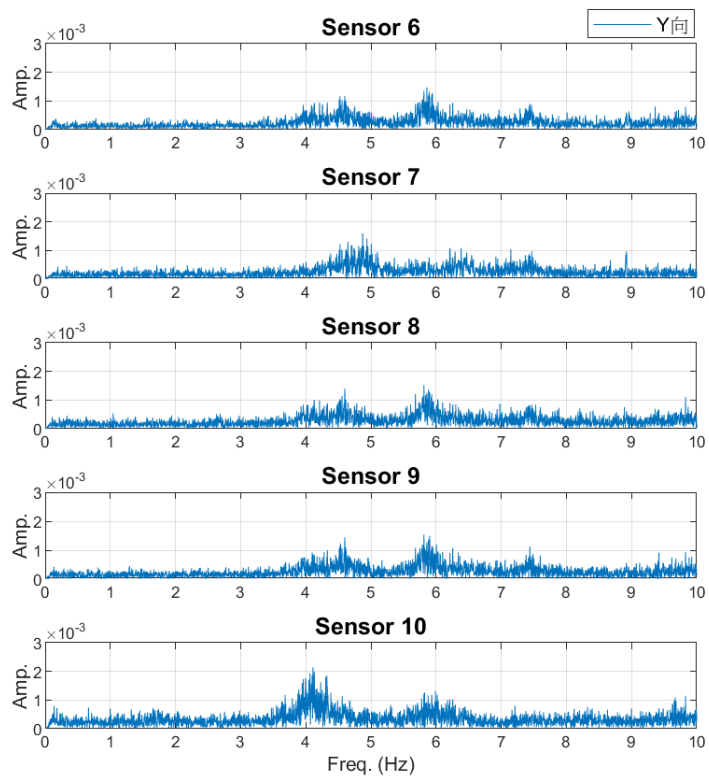
傅立葉頻譜圖(X向) - 第一次



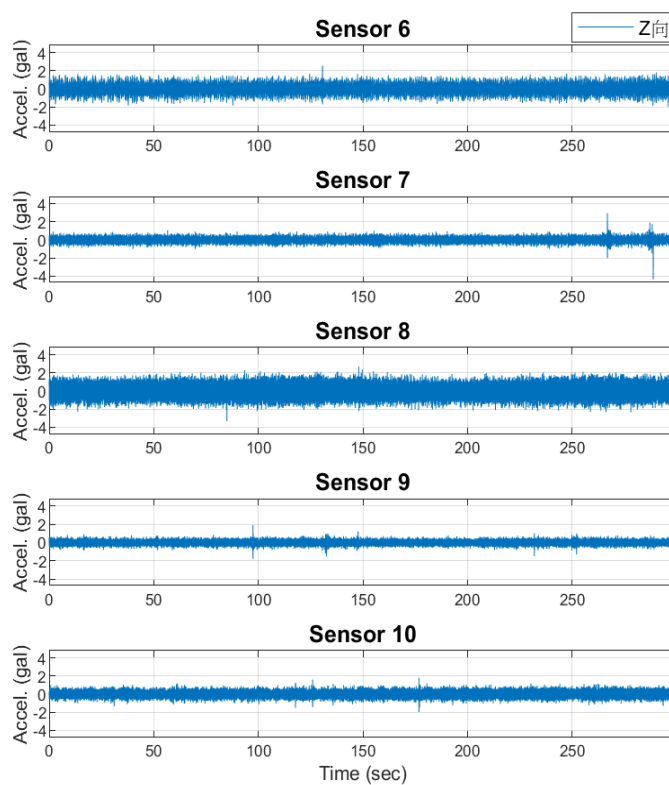
加速度歷時圖(Y向) - 第一次



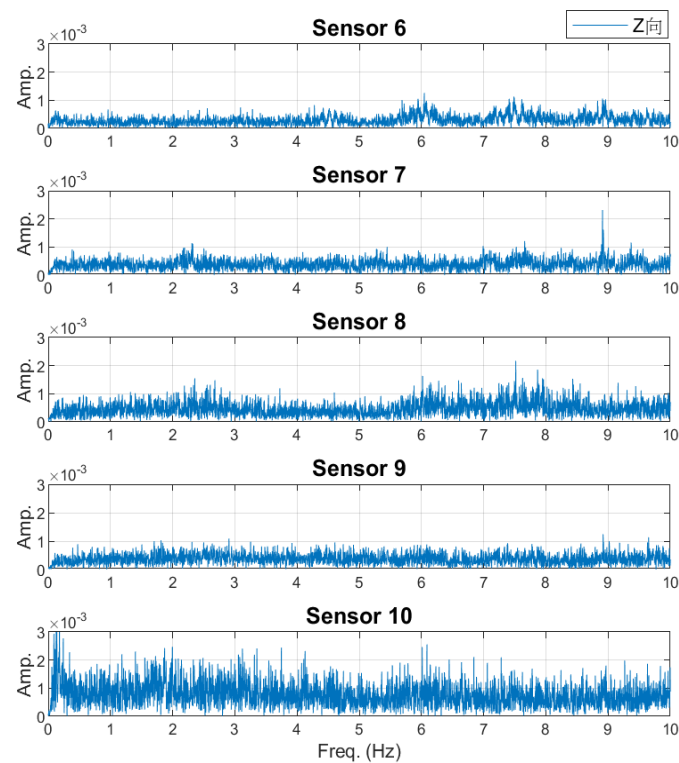
傅立葉頻譜圖(Y向) - 第一次



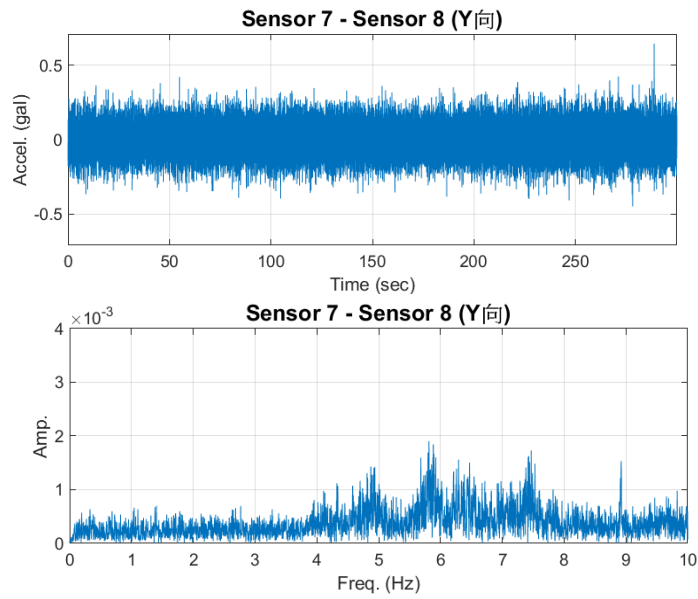
加速度歷時圖(Z向) - 第一次



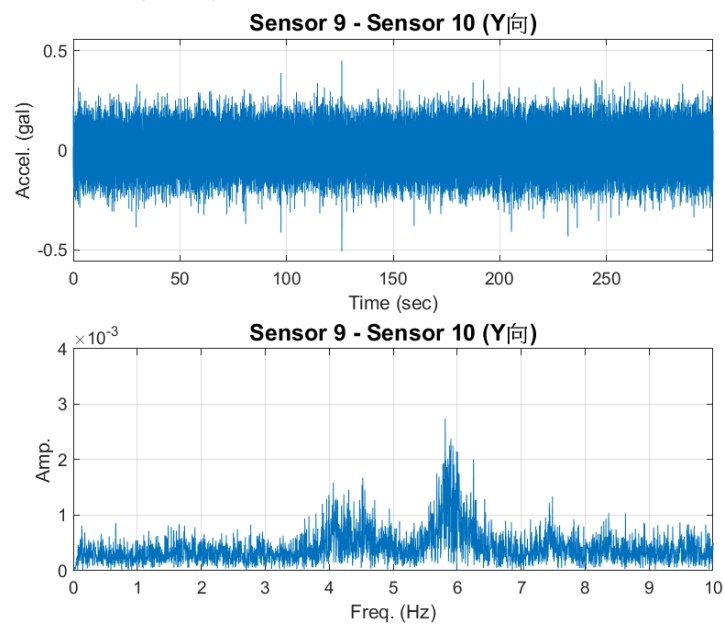
傅立葉頻譜圖(Z向) - 第一次



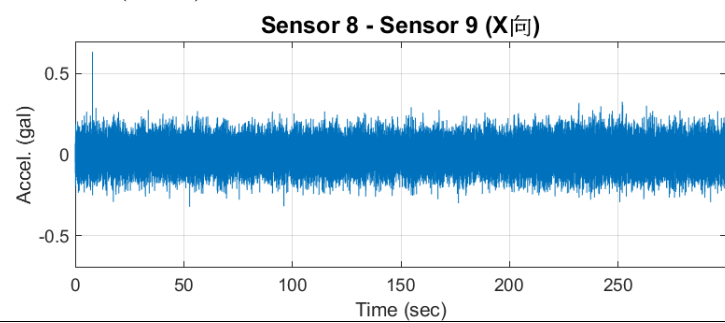
Sensor7-8(Y向)加速度歷時圖與傅立葉頻譜圖 - 第一次



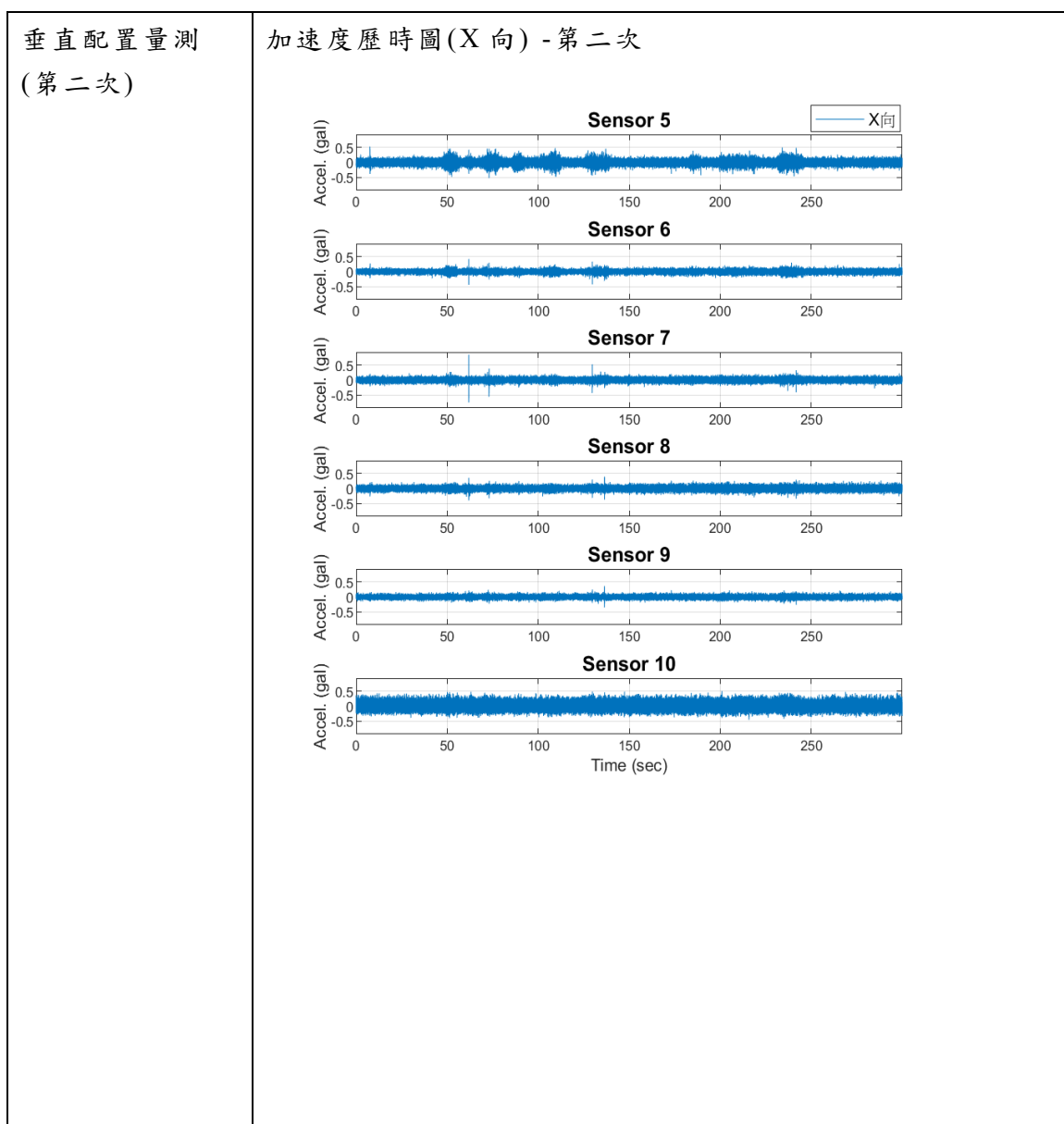
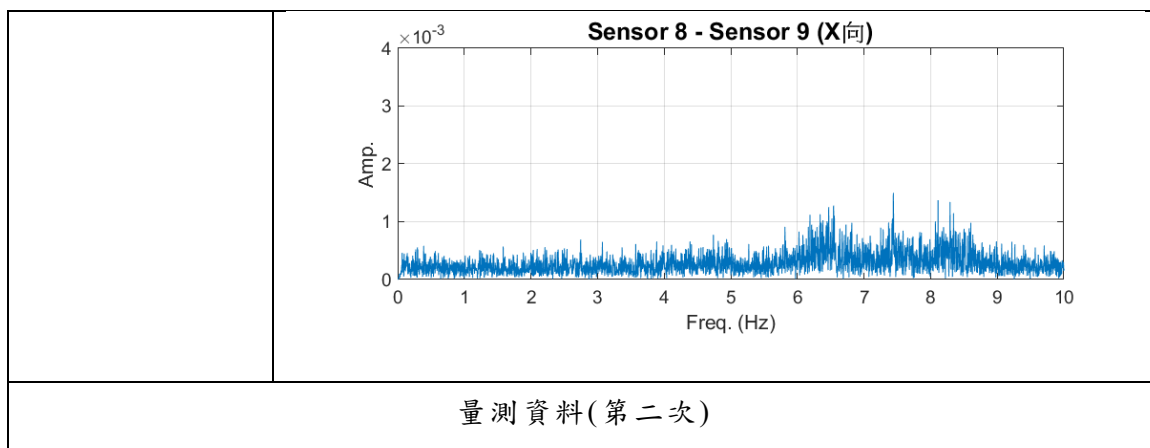
Sensor9-10(Y向)加速度歷時圖與傅立葉頻譜圖 - 第一次



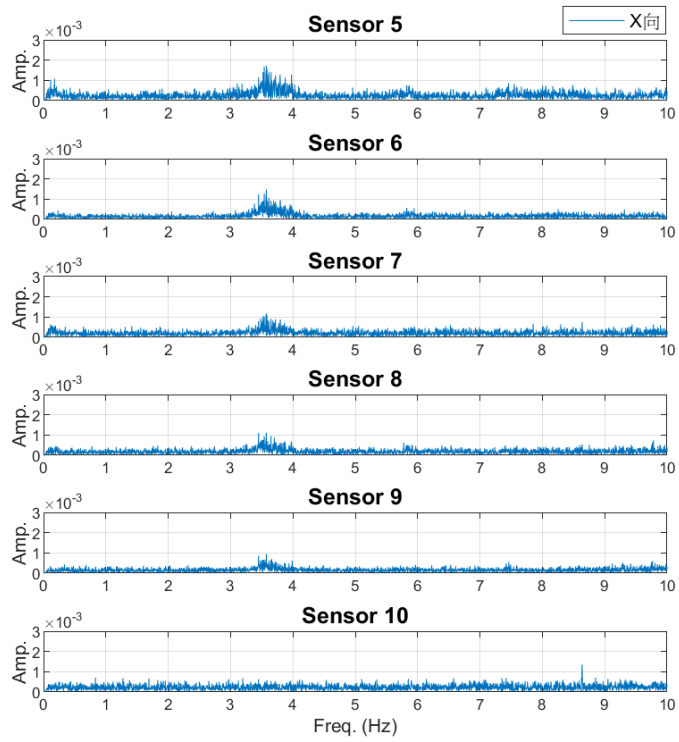
Sensor8-9(X向)加速度歷時圖與傅立葉頻譜圖 - 第一次



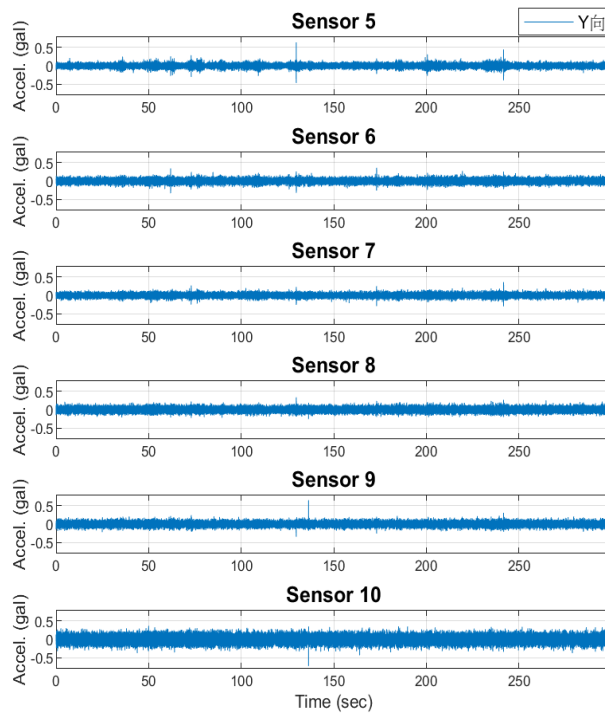
應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查



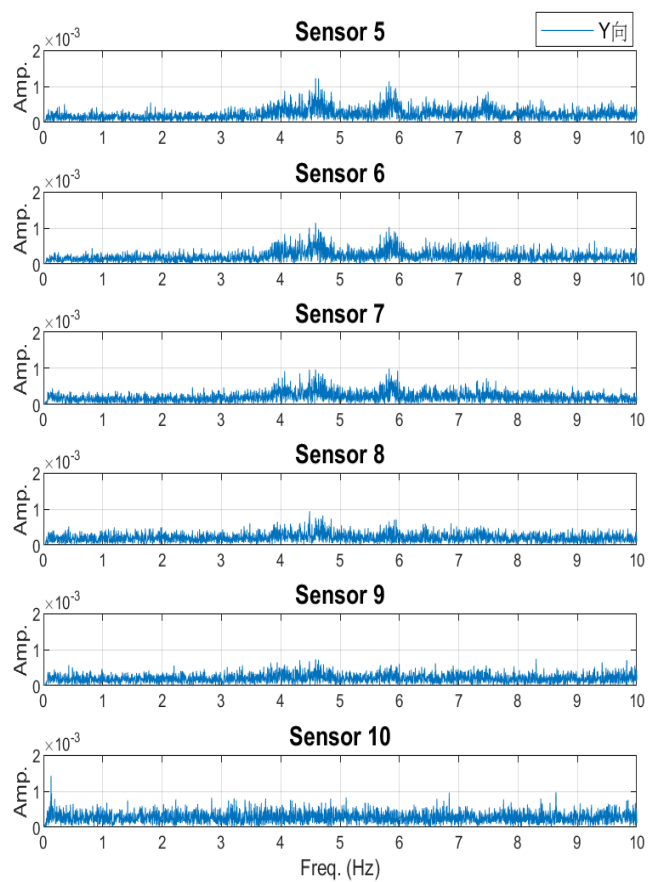
傅立葉頻譜圖(X向) - 第二次



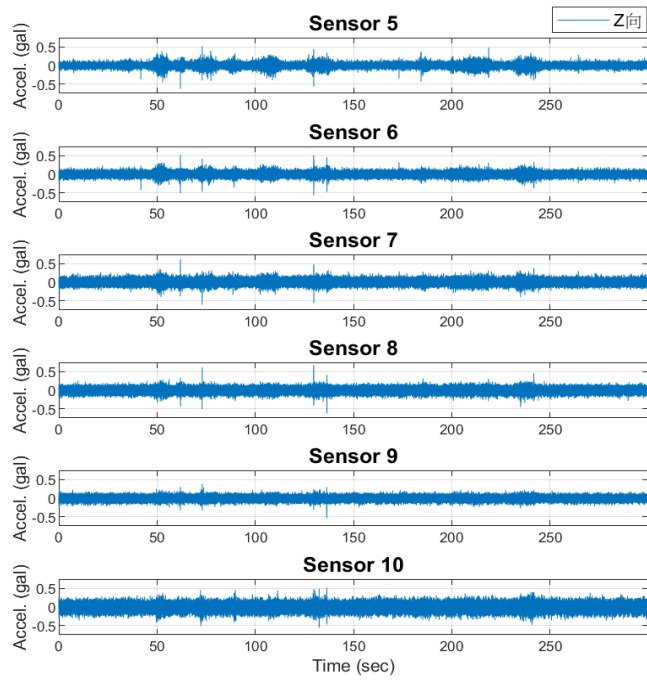
加速度歷時圖(Y向) - 第二次



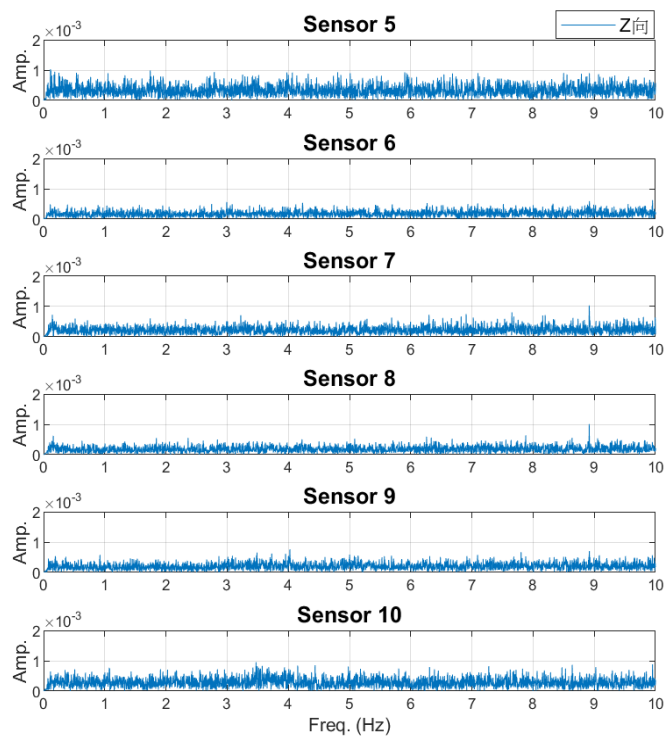
傅立葉頻譜圖(Y向) - 第二次



加速度歷時圖(Z向) - 第二次

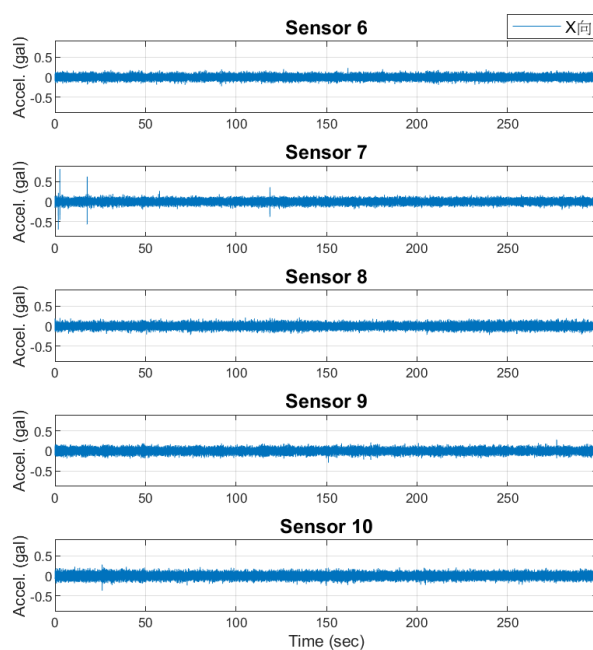


傅立葉頻譜圖(Z向) - 第二次

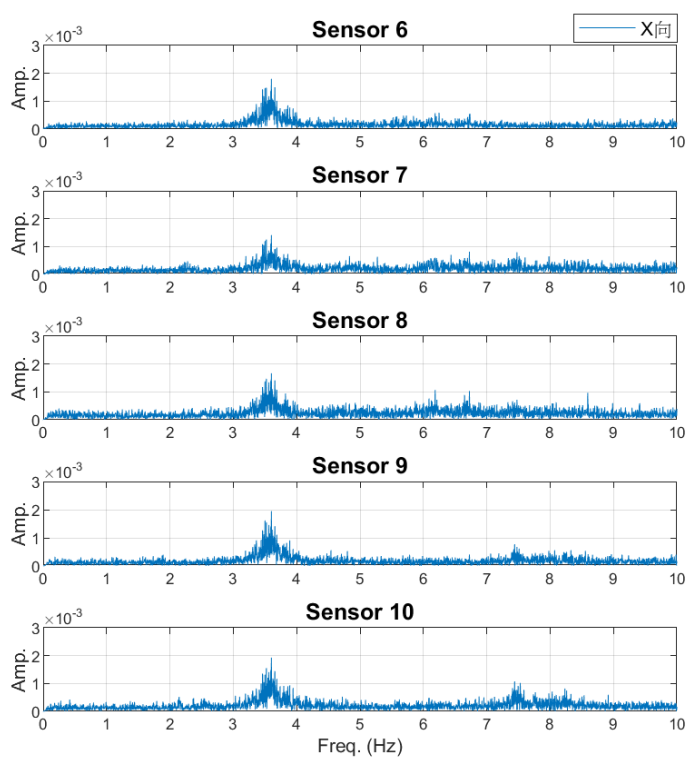


水平配置量測
(第二次)

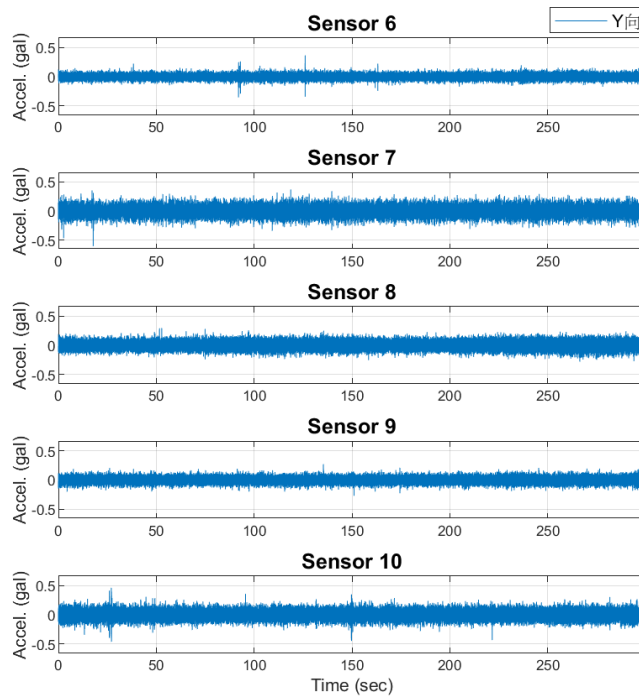
加速度歷時圖(X向) - 第二次



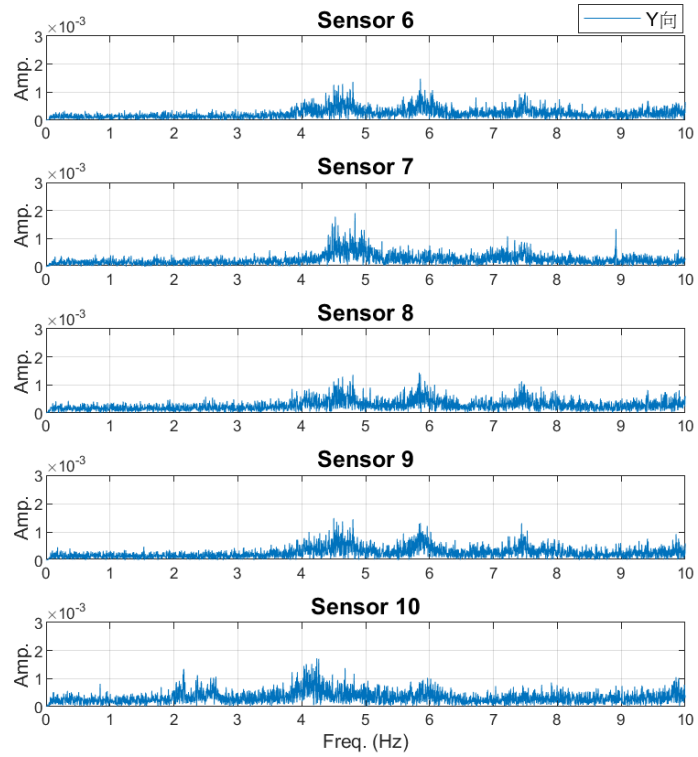
傅立葉頻譜圖(X向) - 第二次



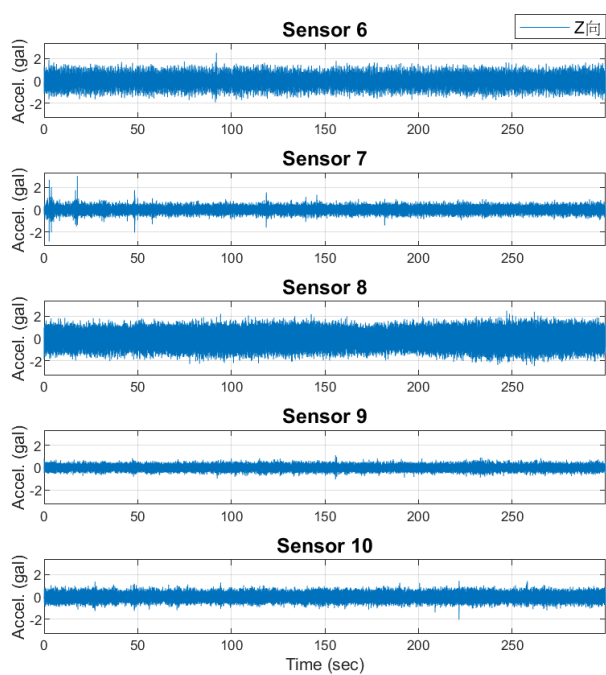
加速度歷時圖(Y向) - 第二次



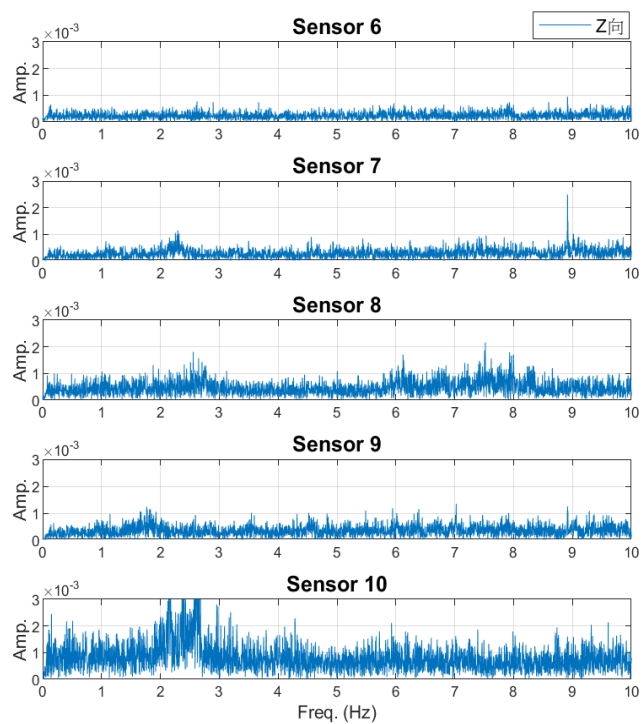
傅立葉頻譜圖(Y向) - 第二次



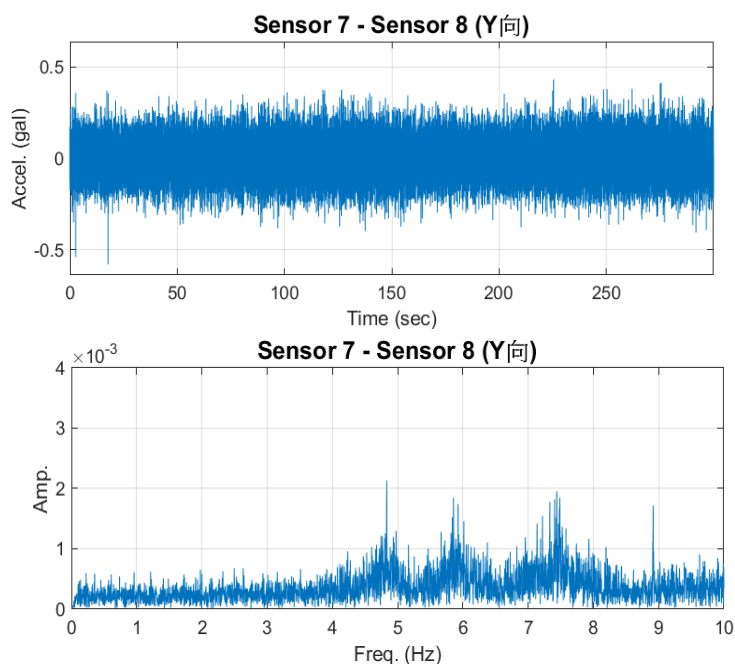
加速度歷時圖(Z向) - 第二次



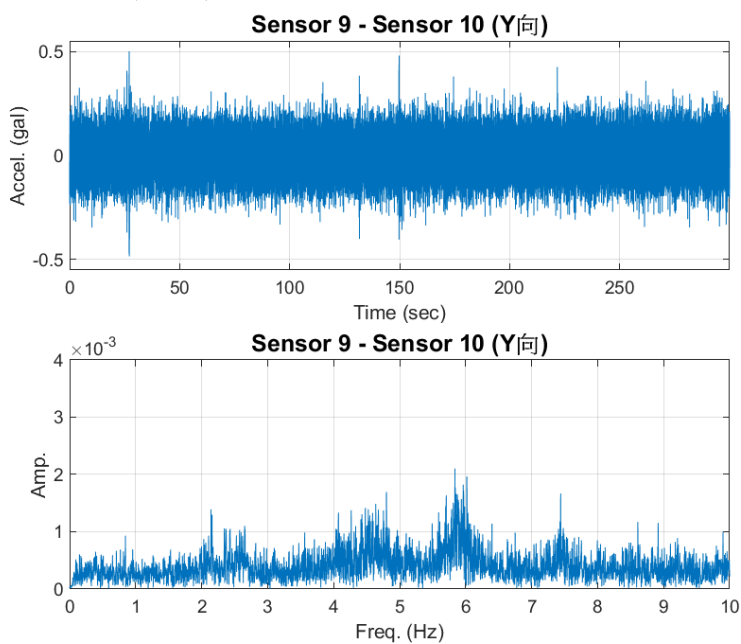
傅立葉頻譜圖(Z向) - 第二次



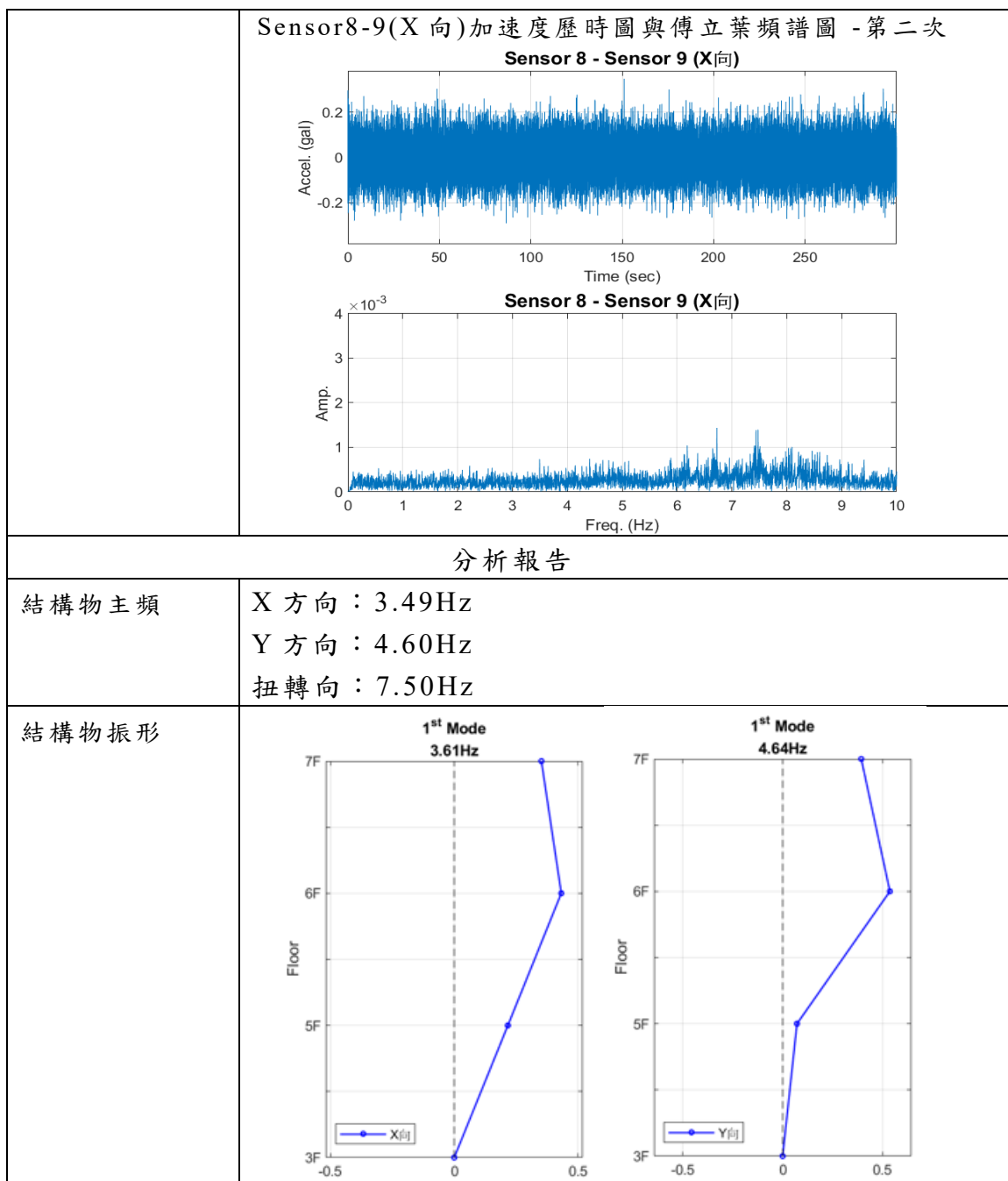
Sensor7-8(Y向)加速度歷時圖與傅立葉頻譜圖 -第二次



Sensor9-10(Y向)加速度歷時圖與傅立葉頻譜圖 -第二次



應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查



量測人員簽名：

單位負責人(大小印)：



長期監測紀錄表

編號：

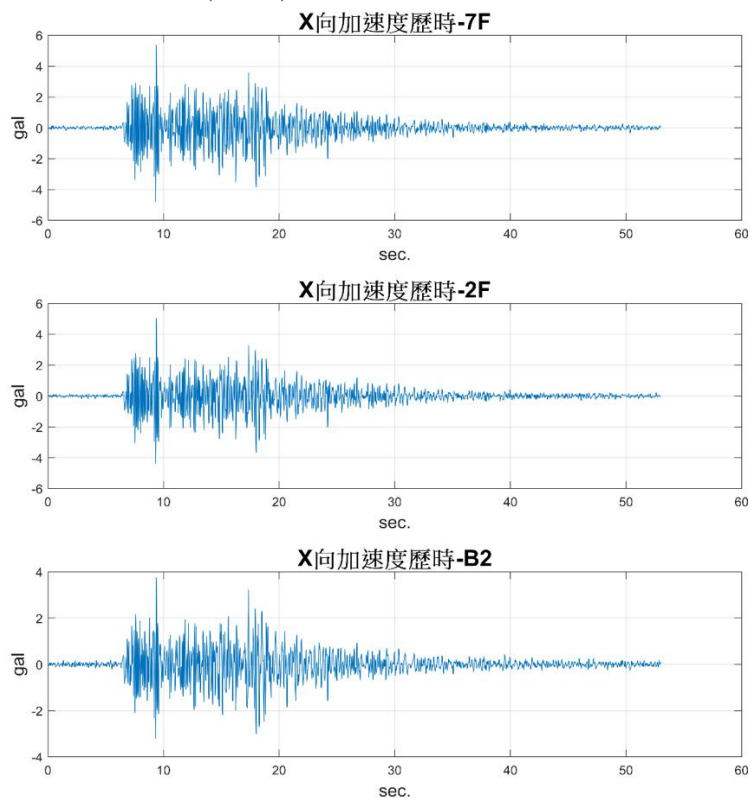
案件基本資料	
建築物名稱	XX 飯店
地址	宜蘭縣礁溪鄉○○路○○號
地號	○○段○○○○○號
建築執照字號	○○○號
建築物類別	民間
樓層	地上：7 樓 地下：3 樓
構造方式	鋼筋混凝土
結構物外觀照片	正面： 
量測規劃	
量測系統啟用時間	110 年 6 月 0 日 0 時
感測器類型	三軸向力平衡式加速度計
感測器型號	感測器：PALERT PULS 轉錄器：PX-01
感測器固定方式	膨脹螺絲
感測器配置樓層及數量	B3 樓、2 樓、7 樓各 1 個，共 3 個

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

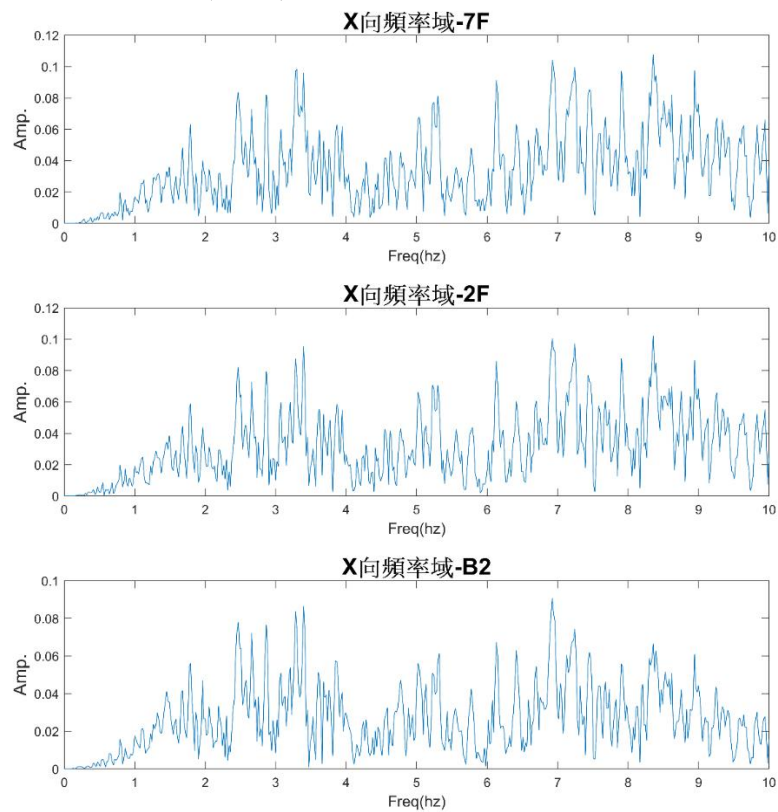
<p>感測器配置 圖說立面圖</p>	
<p>感測器配置 照片</p>	<p>B3底施工照片</p> <p>2F底施工照片</p> <p>7F頂施工照片</p>
<p>結構物量測</p>	
<p>地震事件資料</p>	
<p>時間</p>	<p>110年9月26日06:21:19</p>

量測資料

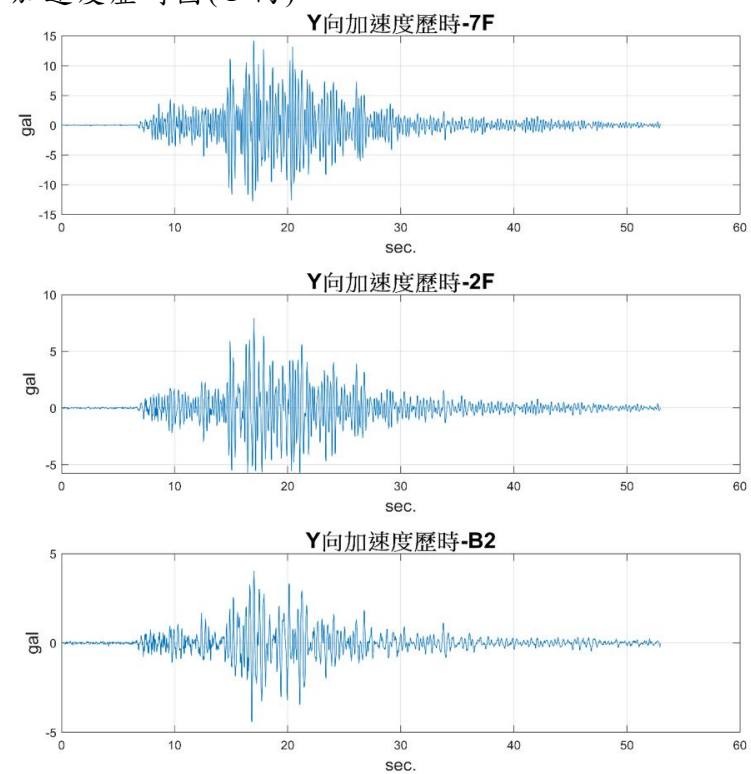
加速度歷時圖(X向)



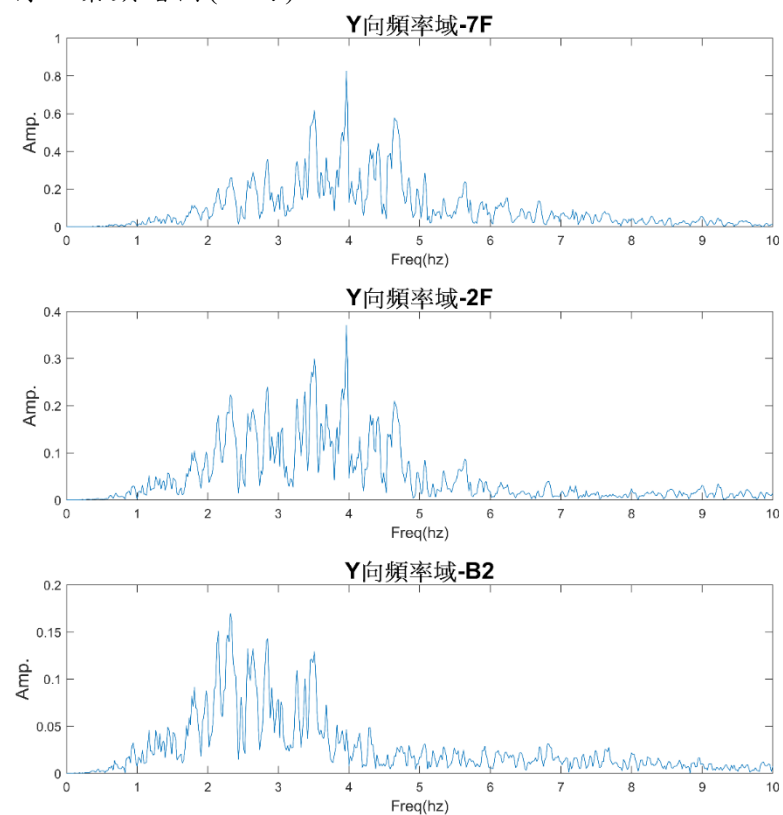
傅立葉頻譜圖(X向)



加速度歷時圖(Y向)

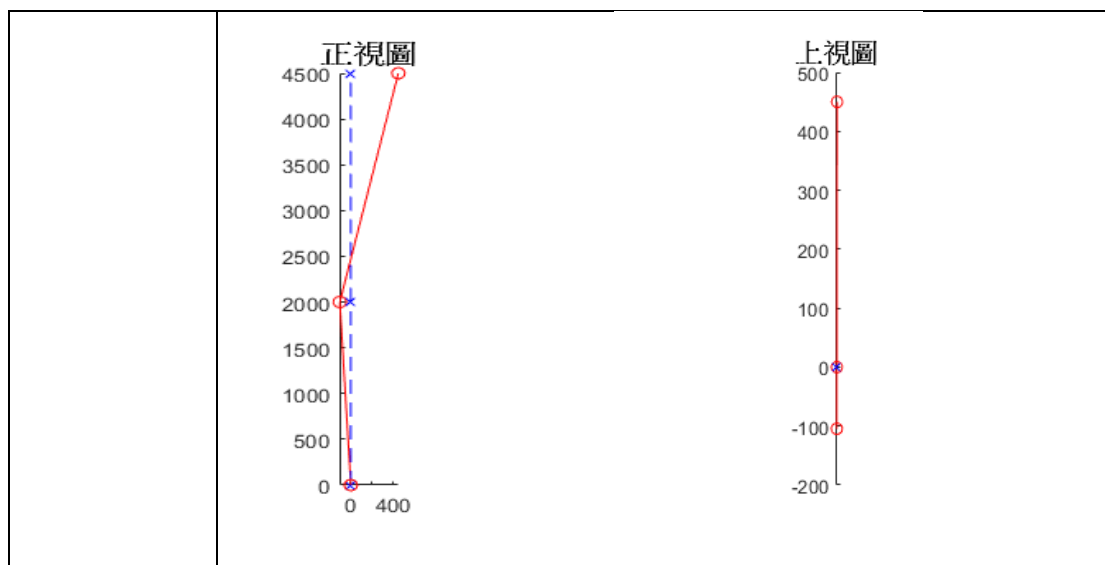


傅立葉頻譜圖(Y向)



分析報告	
<p>建物分析主頻與阻尼比 (X 向)</p>	<p>頻率：3.36Hz 阻尼比：1.2%</p>
<p>建物分析變形 (X 向)</p>	<p>Mode 1 Freq. = 3.36 Hz DR = 1.2%</p>
<p>建物分析主頻與阻尼比 (Y 向)</p>	<p>頻率：4.00Hz 阻尼比：3.1%</p>
<p>建物分析變形 (X 向)</p>	<p>Freq. = 4.00 Hz DR = 3.1%</p>

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查



量測人員簽名：

單位負責人(大小印)：

大章

小章

第五章 量測標準流程建立

第一節 長期監測流程

結構長期監測流程如圖 5-1 所示。首先必須先取得欲監測結構相關圖說，依據結構圖說、結構特性進行分析，規劃長期結構監測系統，結構監測系統的規劃，取決於結構特性、監測目的以及建置與維運成本，不同的結構監測系統規劃，其對應可使用的結構分析方法，以及分析成效會有所不同，圖 5-2 顯示特殊平面形狀建築以及建議感測器平面配置，圖 5-3 顯示一般平面形狀建築以及建議感測器平面配置。因應結構平面形狀以及樓層高度，將建築長期監測分為高端型建築長期監測、以及基本型建築長期監測兩類，以下針對這兩類說明：

高端型建築長期監測：當建築的複雜度較高、有扭轉的特性（如圖 5-2）、需要較詳細的分析、並可接受較高的建置與維運成本。建議可選擇圖 5-2 與圖 5-3（左）的方式。在五個樓層以上，於樓層版依照圖 5-2 與圖 5-4 方式配置感測器。以同時、有效監測結構水平與扭轉方向震動。監測系統規劃前，若可以搭配結構圖說、結構物有限分析分析模型(FEM)。分析結構振動特性，再來檢討規劃監測點位，可以有更好、更完善的成效。若成本考量，也可以依照圖 5-2、圖 5-4 方式進行配置。透過高端型建築長期監測系統，超過八個監測點位的配置。可以將建築結構的動態行為有較為完整的紀錄，也可以搭配多種結構分析方

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

法（多尺度交叉熵、卡式過濾法、RSI、CSI 等等）。監測資料需自動化擷取、上傳雲端、並自動分析。如此可以最詳實、精確的監測結構反應。並於震後十到二十分鐘，自動取得結構受震反應與安全評估報告。可以分析結構受損情況（無、輕度、中度、重度），以及可能受損位置（樓層、方位），可協助與加速技師震後查驗、後續補強規劃設計。此外搭配高階、力平衡式加速度計，在平時無地震下，也可以進行結構物長期監測與分析，分析結構物受到溫度、風力以及老化的因素所造成的結構特性（頻率、阻尼、振形）長期變化。作為結構長期老劣化的自動化觀察，如圖 5-5 流程圖所示。提供技師與委管單位相關資料，加速相關工作進行。

基本型結構長期監測：當結構的行為較簡單、扭轉的特性不明顯、對監測系統建置與維運成本敏感。建議可選擇圖 5-4（右）的方式。在地面層、挑高層地板與頂樓地板，三個樓層面配置合計三組感測器。感測器挑選基 MEMS 形式加速度計，著重地震事件監測，降低系統建置與維運成本。搭配結構主頻、阻尼與振形分析，以及挑高層、層間變位分析。監測資料自動化擷取、上傳雲端、自動分析。如此結構受震反應可以有效監測、於震後十到二十分鐘，自動取得結構受震反應與安全評估報告，如圖五流程圖所示。提供技師基本的結構受震反應數據（加速度歷時、分析頻率、阻尼、振形）。以及地震下挑高層的最大層間變位，避免維冠大樓事件重演。

監測系統規格：

高端型結構長期監測

- (一)量測型式：三軸向力平衡式加速度計，或速度計
- (二)量測範圍：加速度計($\pm 1g, \pm 2g$)
- (三)動態範圍： $>150\text{dB}$
- (四)工作溫度： $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ (或以上)
- (五)防水等級：IP67 (或以上)
- (六)AD 解析度：24 位元
- (七)取樣率：200Hz
- (八)監測資料：地震事件 (二級以上)、平時事件 (每日一筆)

基本型結構長期監測

- (一)量測型式：三軸向微機電式 (MEMS) 加速度計
- (二)量測範圍：加速度計($\pm 2g, \pm 4g$)
- (三)動態範圍： $>100\text{dB}$
- (四)工作溫度： $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ (或以上)
- (五)防水等級：IP67 (或以上)
- (六)AD 解析度：24 位元
- (七)取樣率：200Hz
- (八)監測資料：地震事件 (二級以上)

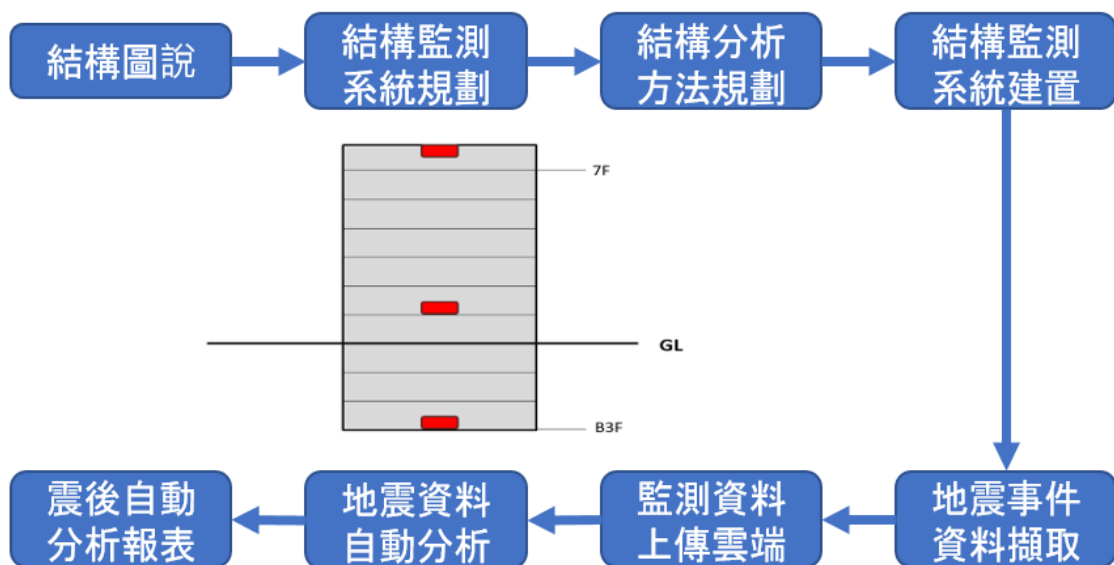


圖 5-1 結構長期監測作業流程圖

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

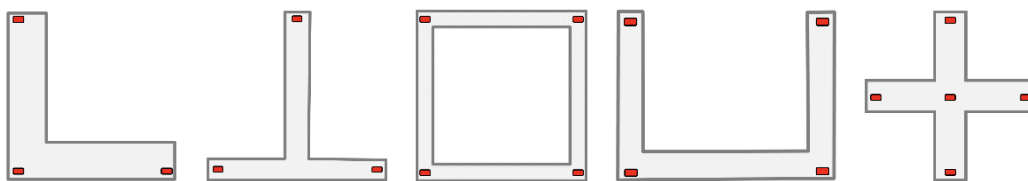


圖 5-2 特殊平面形狀建築，建議感測器平面配置說明圖

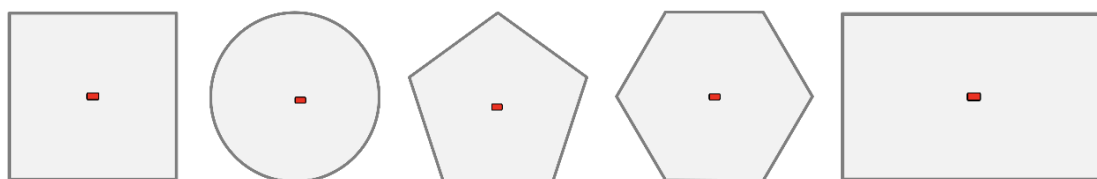


圖 5-3 一般平面形狀建築，建議感測器平面配置說明圖

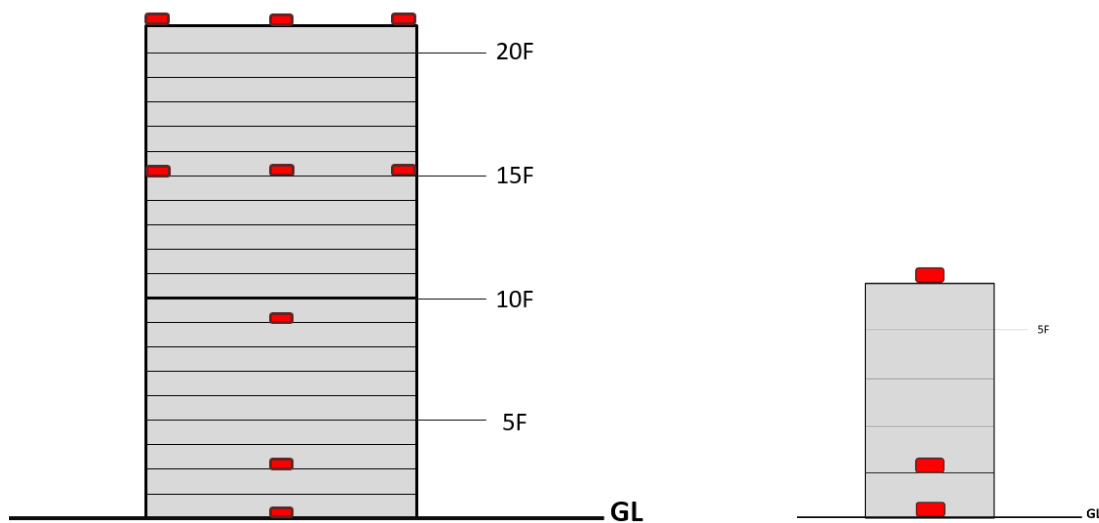


圖 5-4 高端型建築（左）、基本型建築（右）監測系統立面說明圖

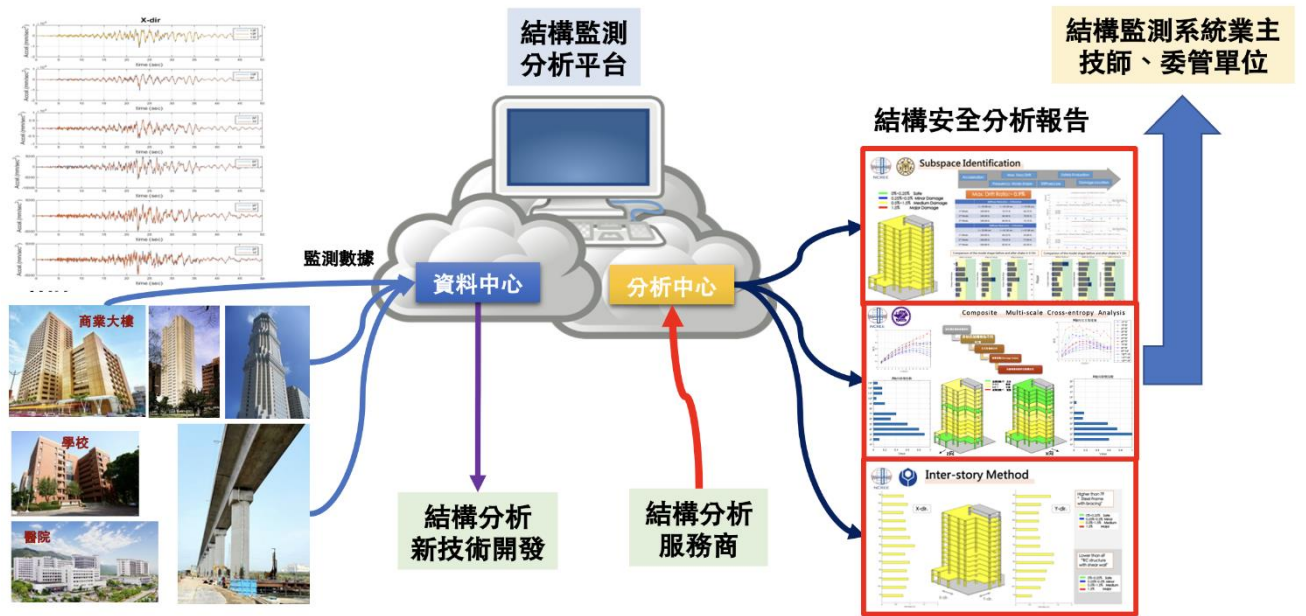


圖 5-5 結構安全監測系統雲端服務流程圖

第二節 微振量測流程

微振量測作業流程，大致可分為三部分。量測作業流程圖如 5-6。

第一部分為「量測訊號正規化」。於固定一個位置，將所有感測器、訊號線路與輯錄系統連結。量測一段時間（兩～五分鐘）的資料。因在同一位置量測，感測器若有良好固定，每一個量測頻道應該會有相近似的訊號。因此可以運用這一部分的測試資料，為各頻道作正規化，以消除感測器、訊號線路與輯錄頻道間些許的誤差。第二部分為「垂直配置量測」如圖 5-7：均勻於各樓層位置（同一水平位置），裝置八組感測器。感測器安裝位置，建議於樓板重心附近，也可以沿樓梯佈設。樓層選擇由一樓地板開始（自由場地面高程），到頂樓樓板（不含屋突）。均勻在八個高程的樓地板配置感測器。每一個樓層的位置盡可能保持都在同一個水平位置。每個量測配置，量測兩次以上，每次量測時間兩分

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

鐘以上 (Sampling Rate 200Hz)。兩筆資料需進行頻率分析，識別出結構主頻(Natural frequency)與振形 (mode shape)。第三部分為「水平配置量測」如圖 5-7：考量結構物水平方向頻率常會與扭轉方向耦合 (couple)，因此需針對結構的扭轉行為做量測分析。量測位置於結構頂樓，沿結構長向布設三組感測器。將兩端感測器的短向資料相減，進行頻率分析，識別出結構扭轉主頻(Natural frequency)與振形 (mode shape)。

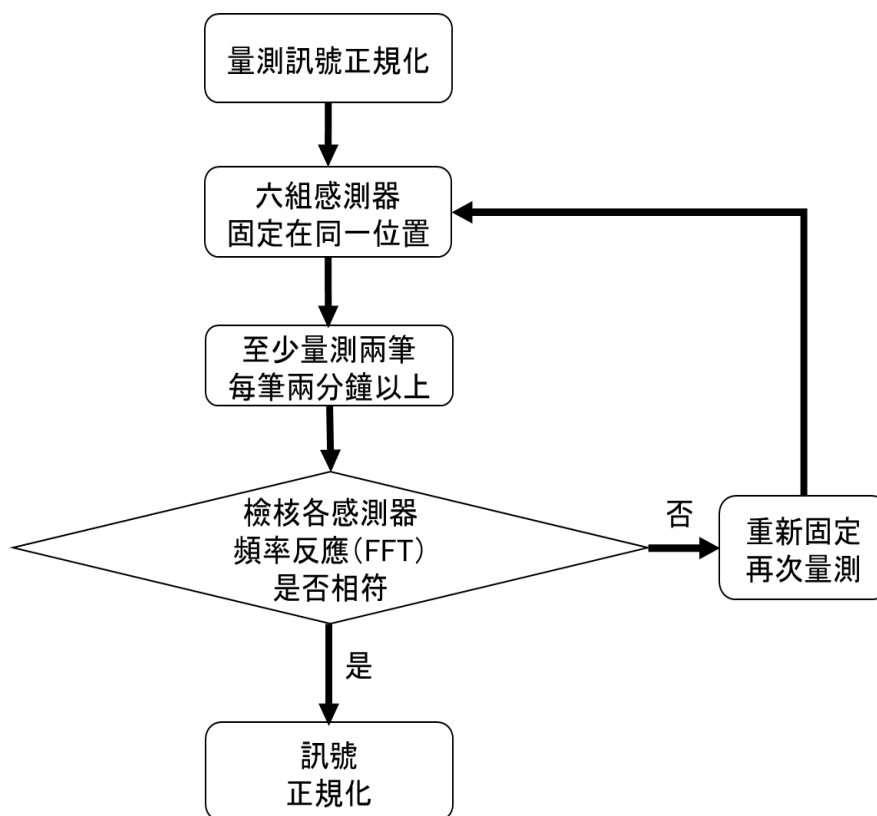


圖 5-6 微振量測訊號正規化流程圖

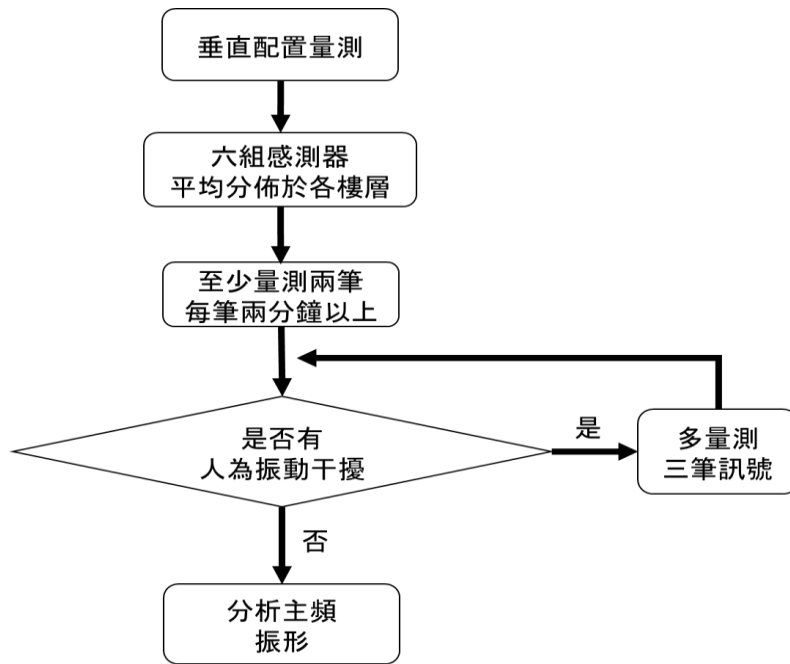


圖 5-7 垂直配置量測作業流程圖

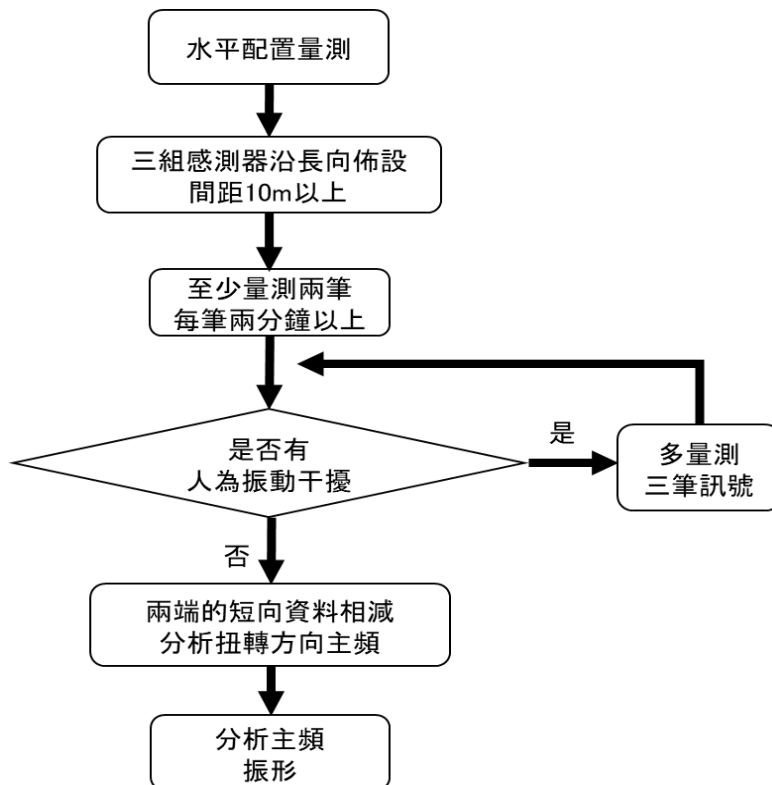


圖 5-8 水平量測作業流程圖

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

設備要求:微振量測儀器所需要的靈敏度較高，建議採用以下類型及規格進行量測，以達到足夠的準確度。

- (一)量測型式：三軸向力平衡式加速度計，或速度計
- (二)量測範圍：加速度計($\pm 0.5g, \pm 1g$)、速度計($\pm 0.1m/s$)
- (三)動態範圍： $>140dB$
- (四)工作溫度： $-20^{\circ}C \sim +70^{\circ}C$ (或以上)
- (五)防水等級：IP67 (或以上)
- (六)AD 解析度：24 位元
- (七)取樣率：200Hz

以下針對微振量測三部分作業流程，以實際操作案例詳細說明。

一、量測訊號正規化

為確認感測器之訊號一致性，需先將所有感測器、訊號線路、輯錄頻道進行正規化，把所有感測器相鄰的放在相同環境下進行量測如圖 5-9 所示。記錄一筆兩分鐘以上紀錄資料。感測器固定方式視環境狀況，在粗糙表面環境，建議使用蓋平石膏固定。並需確定石膏已經確實固化後（建議二十分鐘以上），方可進行量測紀錄。在光滑表面環境，建議使用雙面膠方式固定。雙面膠必須是薄型（厚度 1mm 以下）的雙面膠。感測器固定好後，拍照紀錄，並開始量測。量測時間長度 2~5 分鐘。各感測器量測資料、進行頻率域分析(FFT)。各個感測器所測得的震幅可有差異，但頻率需一致。若有不一致情形，需再檢視感測器固定方式，重新固定再次進行量測。待各感測器頻率一致後，即可進行正規化程序。

正規化程序：以其中一個感測器之訊號為標準值，分析出其他感測

器之訊號與標準值的倍數。各感測的倍數之倒數，即是該感測器之係數。之後感測器量測訊號都需乘上其對應的係數，並確認所有感測器之加速度歷時與傅立葉頻譜圖是否正規化完成如圖 5-10 所示。



圖 5-9 感測器正規化量測

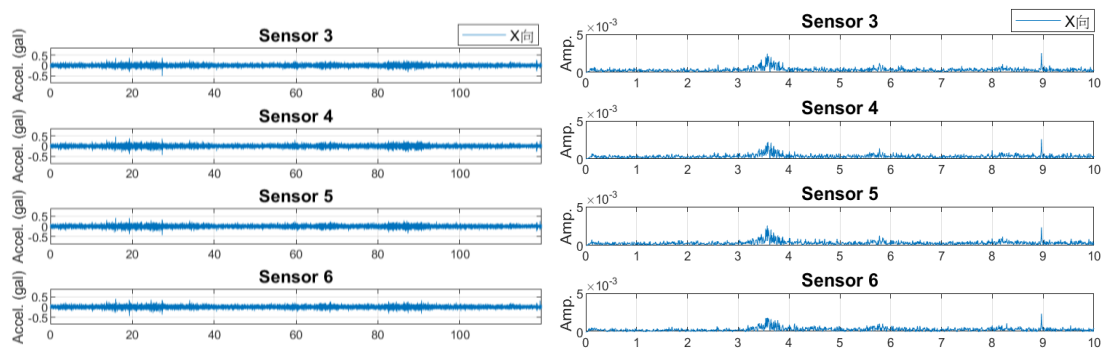


圖 5-10 正規化後各量測訊號歷時

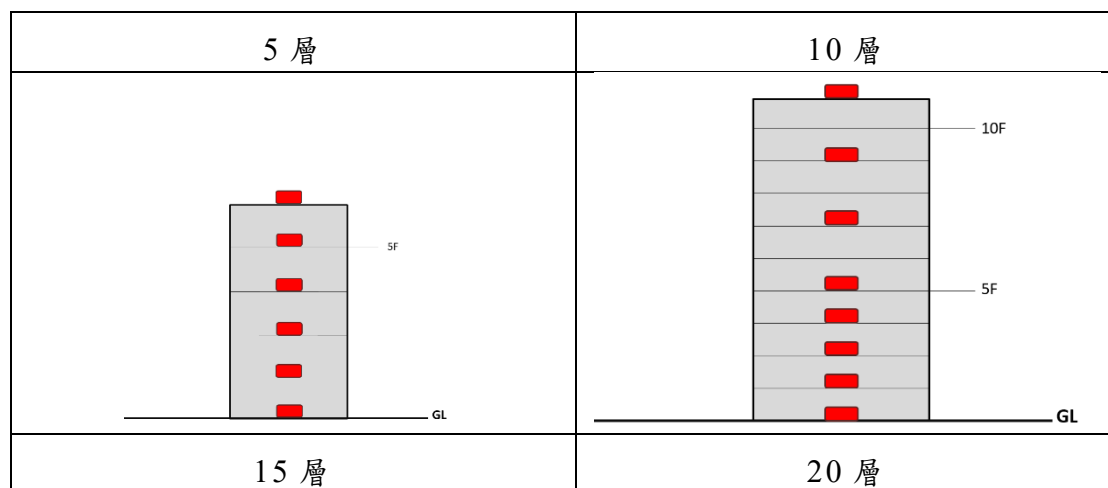
二、結構物垂直配置量測

先於目標結構物之同一垂直面選擇量測點，接著將感測器佈設各樓層如圖 5-11 所示，感測器佈設時需固定於結構物表面，可以確實與量

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

測面同步運動。並避免感測器滑動。感測器固定方式視環境狀況，在粗糙表面環境，建議使用蓋平石膏固定。並需確定石膏已經確實固化後（建議二十分鐘以上），方可進行量測紀錄。在光滑表面環境，建議使用雙面膠方式固定。雙面膠必須是薄型（厚度 1mm 以下）的雙面膠。感測器固定方式如圖 5-12 所示。

感測器佈設完成後，拍照紀錄，並開始量測，量測至少兩次，每次量測至少兩分鐘。量測過程盡量避免有環境干擾，如人行振動、機械振動。若環境干擾難以避免，增加量測次數到五次以上。提供後續分析較多的資料選擇。量測資料完善後，接著進行系統識別，識別出結構物之主要振動頻率並做繪出振形圖如圖 5-13、圖 5-14 所示。



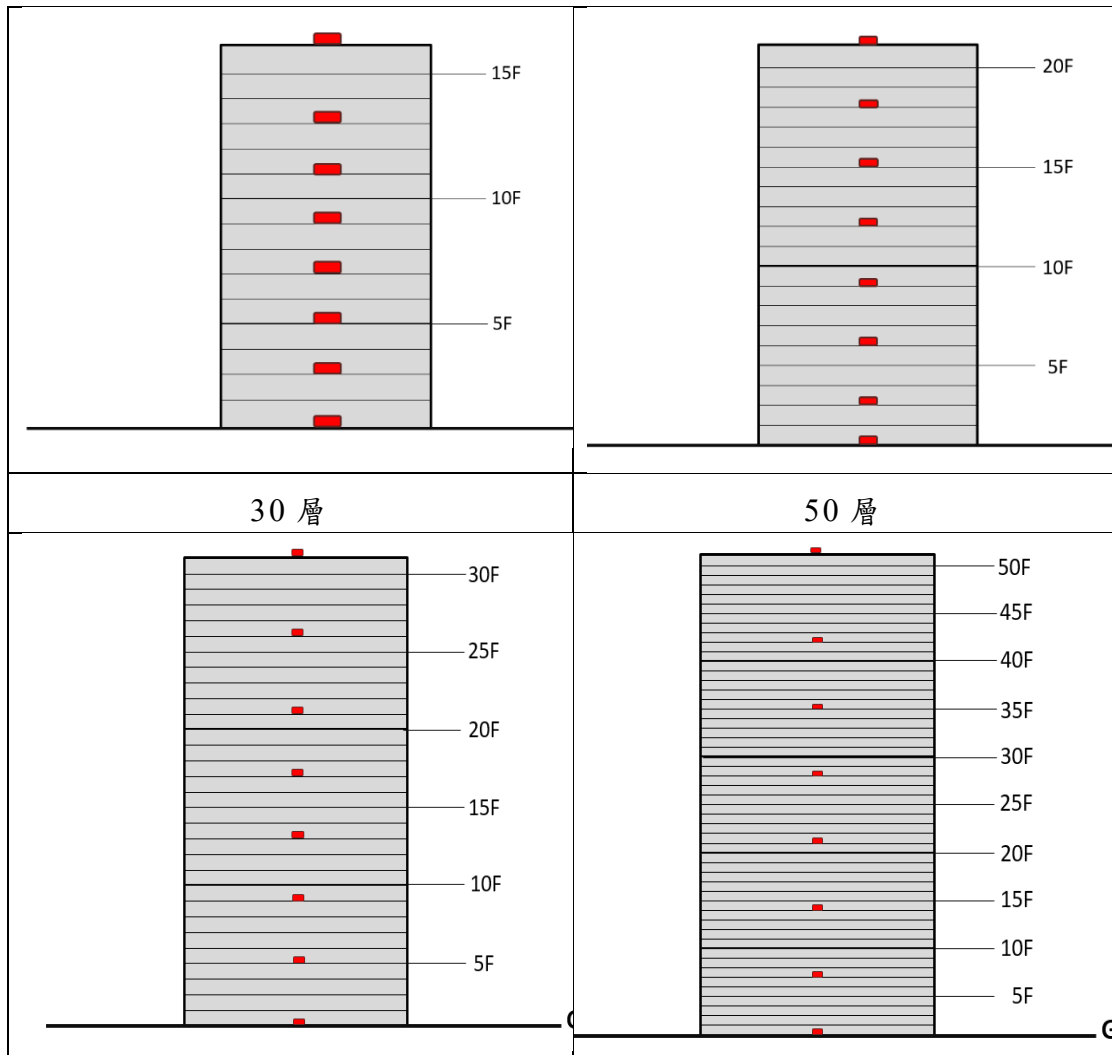


圖 5-11 感測器佈設示意圖(5, 10, 15, 20, 30, 50 層大樓)

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查



圖 5-12 感測器固定方式(左為石膏、右為強力雙面膠)

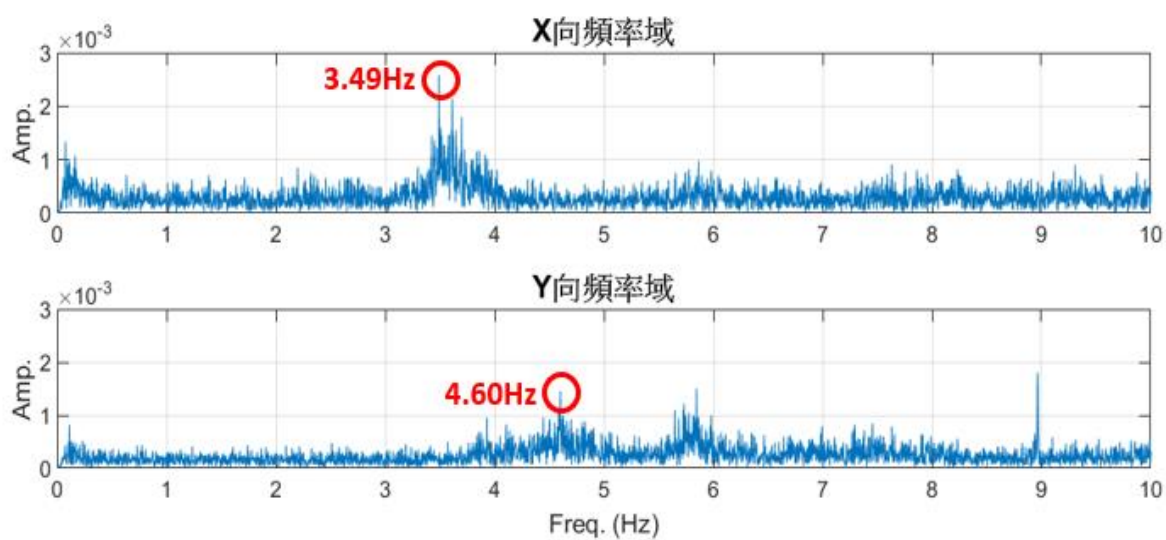


圖 5-13 系統識別振動頻率

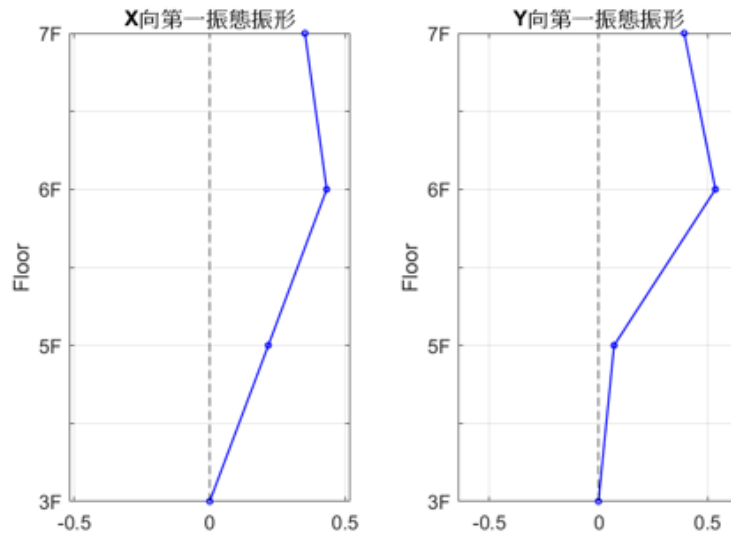


圖 5-14 系統識別振形圖

三、結構物水平配置（扭轉向）

視目標結構物平面形狀，選擇感測器量測位置。圖 5-15 顯示共 11 種平面形狀下的建築物，其水平配置量測時，感測器配置建議點位如圖中紅色方塊位置。三組感測器（或以上）沿建築物長向佈設，感測器間距 10m 以上。感測器固定方式視環境狀況，在粗糙表面環境，建議使用蓋平石膏固定。並需確定石膏已經確實固化後（建議二十分鐘以上），方可進行量測紀錄。在光滑表面環境，建議使用雙面膠方式固定。雙面膠必須是薄型（厚度 1mm 以下）的雙面膠。感測器佈設完成後，拍照紀錄，並開始量測，量測至少兩次，每次量測至少兩分鐘。接著將量測訊號後進行系統識別，識別結構物之扭轉向振動頻率如圖 5-14 所示。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

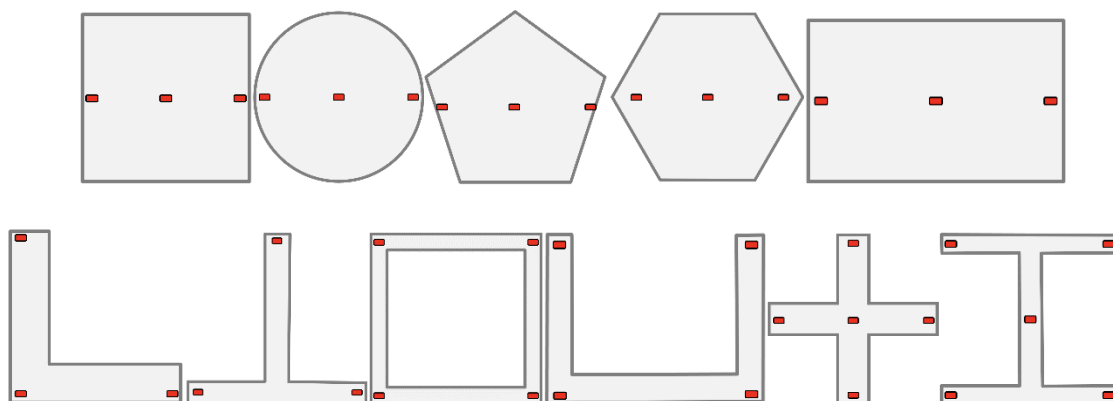


圖 5-15 各種結構平面形狀下，水平配置量測建議點位（紅色點）

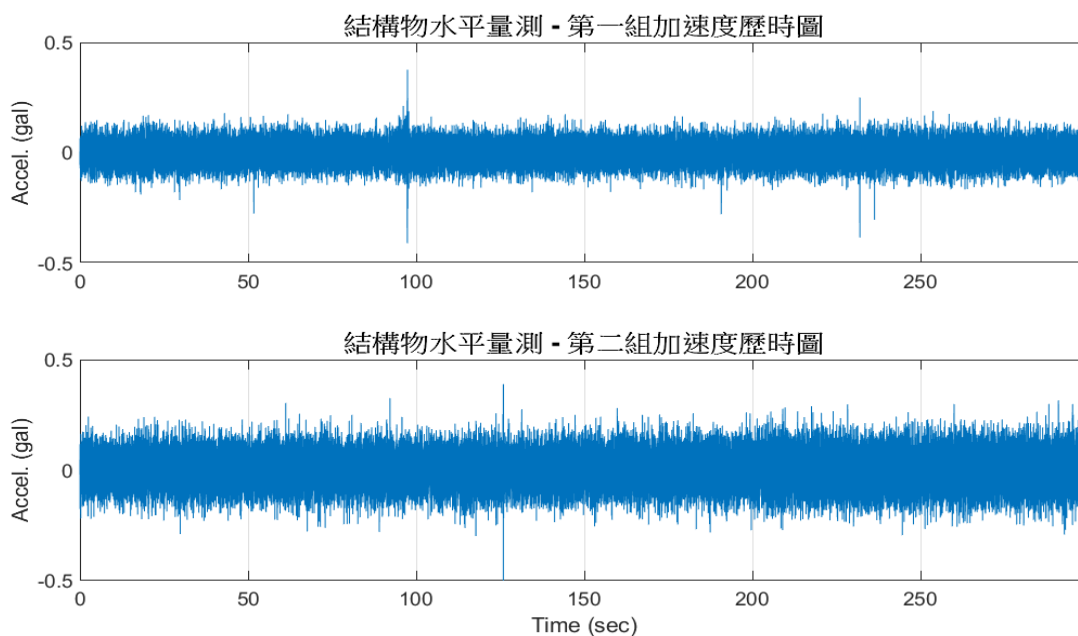


圖 5-16 系統識別扭轉向之時間歷時圖

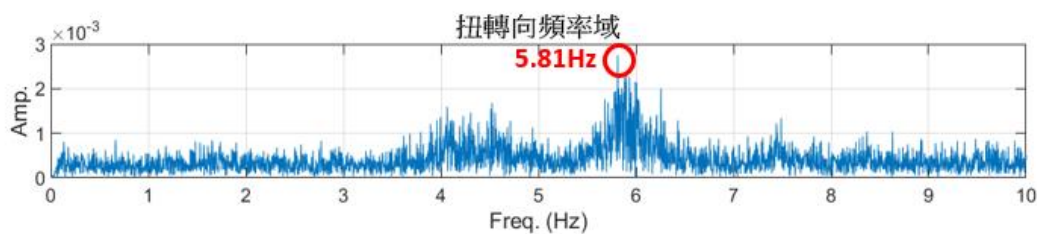


圖 5-17 系統識別扭轉向振動頻率

四、產出成果

本研究建議長期監測及微振量測皆須有統一之記錄表格，以利後續整合及分析，因此研究團隊設計表 5-1 及表 5-2。

表 5-1 長期監測紀錄表

長期監測紀錄表	
編號：	
案件基本資料	
建築物名稱	
地址	
地號	
建築執照字號	
建築物類別	
樓層	
構造方式	
結構物外觀 照片	
量測規劃	
量測系統啟用時間	
感測器類型	
感測器型號	
感測器固定方式	
感測器配置樓層 及數量	
感測器配置圖說 立面圖	
感測器配置照片	
結構物量測	
地震事件資料	
時間	

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

量測資料	
分析報告	
建物分析主頻與 阻尼比 (X 向)	
建物分析振形 (X 向)	
建物分析主頻與 阻尼比 (Y 向)	
建物分析振形 (X 向)	

量測人員簽名：

單位負責人(大小印)：



表 5-2 微振量測紀錄表

微振量測紀錄表	
編號：	
案件基本資料	
建築物名稱	
地址	
地號	
建築執照字號	
建築物類別	
樓層	
構造方式	
結構物外觀 照片	
量測規劃	
量測時間	
量測總筆數	
每筆量測時間	
感測器類型	
感測器型號	
感測器取樣頻率	
量測訊號正規化	
感測器固定方式	
感測器裝置位置與 方向	
感測器配置照片	
感測器配置樓層及 數量 (垂直)	
垂直配置量測	
感測器固定方式	
感測器裝置位置與 方向	

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

感測器裝置照片	
水平配置量測	
感測器固定方式	
感測器裝置位置與方向	
感測器裝置照片	
量測資料(第一次)	
垂直配置量測 (第一次)	
水平配置量測 (第一次)	
量測資料(第二次)	
垂直配置量測 (第二次)	

水平配置量測 (第二次)	
分析報告	
結構物主頻	
結構物振形	

量測人員簽名：

單位負責人(大小印)：



應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

第六章 AIoT 建築物安全監測應用及推動

第一節 AIoT 建築物安全監測技術

本計畫宗旨在於透過安裝監測儀器於結構物來達成即時安全評估。此概念並非首創，但從過往的應用來看，往往受到成本、房屋擁有者意願低的影響而窒礙難行。成功的案例多為政府單位合作所推動，如國家地震中心與中央氣象局長期監測之房屋。然而這些監測的資訊以及觀測的數據並無廣泛的被工程界與學術界使用，也間接使的在一般住宅安裝監測儀器的想法乏人問津。106年起前瞻計畫「建構民生公共物聯網」逐步開啟政府資料開放(Open Data)，有鑒於過去結構監測系統資料取得方式繁瑣、且需費用，導致使用率低、業界推廣不易，氣象局與國震中心已協議合作，共同開放結構監測資料庫，提供相關研發與產業應用。相信這對未來結構監測系統的推廣有一大助益。本計畫長遠之目標是為推動普及化結構加裝安全監測儀器，並利用物聯網(IOT)將數據即時反饋，而後透過自動化演算法或是人工智慧(AI)進行結構安全的評估。

由於地震發生的不可預測性以及計畫時程的限制，本次期末報告著重在方法論的建立，尤其是針對安裝儀器的初步微振測試訂定一建議流程，探討其分析的過程以及可以取得之參數。針對結合人工智慧神經網絡，主要是基於若後續能長期觀測，其所獲得之數據如何利用 AI 來輔助結構反應之判斷。當前由於量測到的數據有限，尚無法結論出一個具普遍性的代理模型來預測結構物在各類型地震中的反應。

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

然而就第三章所示神經網絡之初步訓練結果，其確實可以協助快速預測結構物受震反應，後續如何應用應針對下述幾點持續進行研究與討論：

- 一、礙於數據不足，無法訓練出具普遍性的模型，應持續監測以取得更多的資料。此外，應將各種結構類型都納入考量，如使用不同材料與不同抗側向力系統之建築。
- 二、結構安全等級的判斷需要經過多種方法之驗證並由專家學者們訂定。當前可預測之結果為樓層之反應歷時，如何由此推斷結構之安全等級應持續進行研究探討。建議可依據交大林子剛老師的多尺度交叉取樣熵分析法、台灣科技大學許丁友教授團隊所開發之層間位移法或是普遍使用之性能評估標準進行判斷，但後續仍須經由專家學者們決定，因為此一標準可能影響結構物修復補強之對策，進而影響相關的費用。且若與實際結構物之安全性有所落差，更可能導致近一步的生命財產損失。
- 三、倘若單一房屋之監測技術能夠完善普及，將可以利用其觀測之數據來推估區域的結構反應，並建立區域安全網。其適用的範圍、需要監測的房屋數量等均須要進一步的研究。最終希望能透過落實 AIoT 技術來建立智慧安全的環境。

第二節 AIoT 建築物安全監測應用方式

一、建物長期監測應用

(一) 震前預警與即時反應

為長期監測建築物於地震中的數據變化，需安裝可自動連接網路的地震記錄儀。利用其可連網的特性，可由該設備透過網路擷取來自中央氣象局地震速報網的即時地震速報訊息進行地震預警。民眾可藉此提前得到寶貴的數秒至數十秒時間進行緊急應變措施，降低地震災害的風險。對於公共區域而言，更應該利用寶貴的時間，引導民眾進行疏散或緊急應變，避免造成慌亂推擠或錯失寶貴應變時間。

而得到此地震預警時，另可將資訊聯繫到建築物設備，常見應用為自動連繫到電梯與天然氣的自動控制主機。電梯的控制主機可提早將電梯往最近的樓層停靠並且打開電梯門，避免民眾受困於電梯中。天然氣控制則可自動關閉總閥門，避免因為地震造成天然氣外洩，引發火警的風險。

(二) 震中記錄

地震儀隨時監控該建築物經歷所有的大小地震後產生的位移、旋轉和加速度等相關數據，所記錄的數據除了可以即時提供管理單位做緊急應變之外，也將會累積至資料庫中作為個案與整體的數據分析。

(三) 震後自動分析

高強度地震後 AI 自動分析建築物的監測數據，快速評估出數據異常的建築物交由專業技師進行進一步的檢測，取代過去由人力普查所有可能建物的方式，精準迅速地將專業人力投注於高

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

風險建築，降低建物在餘震受創的風險。

二、建物微振量測應用

(一) 新建築完工資料建置

微振量測方式是先進行一次微振量測作為基準，事件發生後重新依照相同的方式進行一次微振量測，將結果與之前測量的基準數值進行比較，便可了解結構是否有遭受損壞。因此微振量測十分適合於新建築物完工時先行測量數據做為基礎資料，已備未來發生地震或其他事件之後，與新測量的數據進行比對，快速得到結果。

(二) 施工後結構強度比較分析

建築物若需要進行結構補強或其他工程，可在工程前先行進行微振量測作為基準，並於工程後重新測量，確認補強工程否有達到預期的效益，或是其他工程沒有影響到結構的強度，作為工程是否順利的依據。

三、資料庫建檔與數據應用

個別建築物的地震儀於平時收集數據，建置該建築物於地震發生時的正常變動狀況。若當數據產生異常時，可依據數據變動的位置、項目及幅度協助專業人員進行進一步的分析評估該建物是否有老化、毀損或其他安全疑慮。

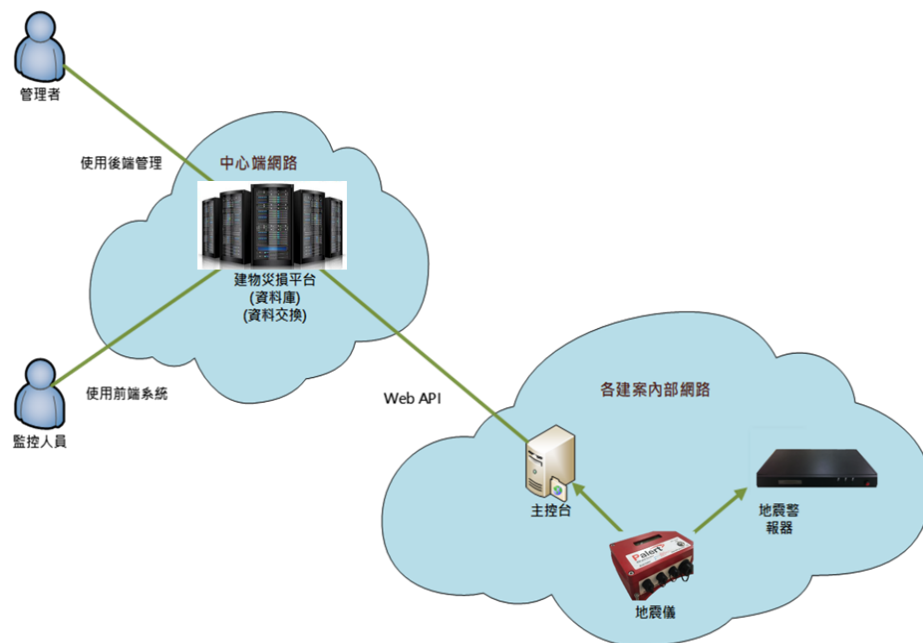
若在區域或是全國尺度上，政府端未來可藉由建立資料庫彙整區域或是全國的建築資訊進一步的分析與應用，並可定期邀集專家

學者舉行座談會議，針對設備裝設維護方式的優化、蒐集數據的判讀分析、資訊在其他面向應用的可行性、系統軟體開發等議題進行研討，擴大蒐集到的資訊所能帶來的效益。

四、維管端建置中控中心

地震儀結合 IoT 技術，擁有資料即時同步的特性。因此當地震儀設置於大規模的建築物，例如社會住宅、藝文場館等大型公共建設或是大型商辦設施，建置中控中心可協助場地管理單位或是物管公司即時了解所有建築物的結構狀況，並依據累積數據制定建築物長期的維護管理計畫。

中控系統架構初步規劃各建築物設置的地震儀，會將偵測到的數據經由 Web API 的服務，將數值回傳到中心端的建築物災損系統，系統依據檢核結果，在系統畫面上顯示狀態燈號及警示訊息。相關功能架構如下圖：



應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

圖 6-1 系統架構概念圖

五、監測資訊傳遞流程

長期監測中所量測的數據，將透過 IoT 設備迅速於觀測端(用戶)、技術分析端與政府端間傳遞，並完成分析成為可用的資訊。

當一定震度以上的地震發生時，觀測端的地震儀將被觸發開始記錄，並透過地震主機傳遞至分析端。分析端藉由 AI 分析快速在十分鐘至數十分鐘的時間內完成建築結構安全分析，並將結果回傳給用戶，並可將資料提供給政府主管機關建置資料庫。(如下圖)

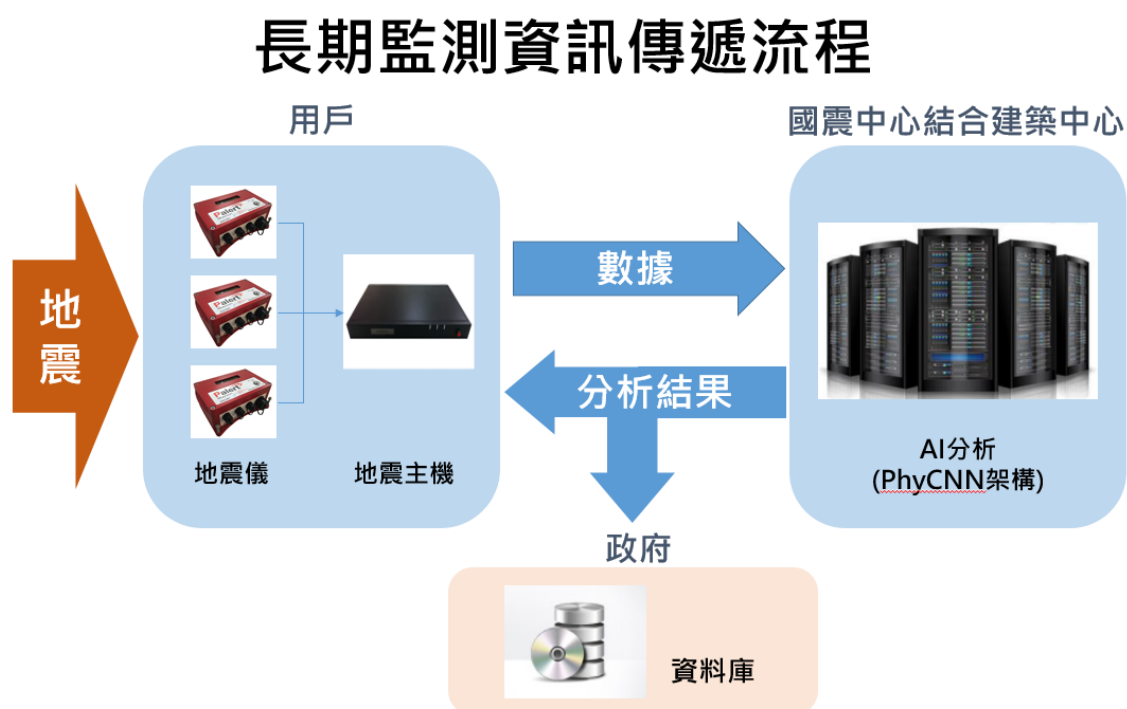


圖 6-2 長期監測資訊傳遞流程圖

本研究建議初步推廣期間，考慮服務到更多的民眾，建議以供公眾使用的大型建築為主要類型，例如商場、旅館、醫院、學校、政府單位或社會住宅等開始試辦。用戶於地震後收到即時分析結果，

第六章 AIOT 建築物安全監測應用及推動

可以判斷是否需要立即疏散建築內人員，或是於事後進行結構補強的工作。

分析端可由國內具公信力之地震與建築相關專業機構擔任，持續更新建築結構監測模式，如國家實驗研究院國家地震工程研究中心結合財團法人台灣建築中心，作為後續國內地震監測的後端分析單位。

政府端可分別由中央主管機關與地方主管機關管理。中央主管機關可藉由整體數據了解國內建築物的安全狀況，規劃相關政策引導建築結構安全提升。地方主管機關則可篩選資料中具風險之建築物，強制督導改善，保障人民生命財產安全。

第三節 相關規定檢討與推動

一、「建築物耐震設計規範及解說」相關規定

建築物的結構安全關係到人民生命財產，對位於環太平洋地震帶面臨高度地震風險的台灣，如何確保結構安全更是重要。若能從法規上要求新竣工之建築物或是特定結構類型、特定用途的建築物進行安全監測，相信能對我國建築安全帶來幫助。

目前已經有許多國家或地區，如紐西蘭、美國加州、菲律賓、印尼等，開始訂定相關法規，規定一定高度以上或特定用途的結構物必須裝置結構監測系統，記錄結構物的受震反應（林沛暘，2020）。

而我國在相關法律規範上，對於建築物安裝地震記錄儀亦有所規定。依據「建築物耐震設計規範及解說」第 11.3 條明定：「主管建築機關得

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

依地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構之請，規定建築業主於建築物設計建造時，應配合留出適當空間，供地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構設置地震記錄儀...興建完成之建築物需要設置地震儀者，得依照前項規定辦理。」

故如建築或地震相關研究機構提出申請經主管建築機關同意，即可在前述申請所提出特定結構或用途範圍的建築物上安裝地震記錄儀，並且不限定於新建房屋或是已經完成興建的建物，可據以全面推動 AIoT 建築物安全監測。

二、建築物公共安全相關規定

為確保民眾在公共場域的安全，建築法第 77 條規範建築物所有權人、使用人應維護建築物合法使用與其構造及設備安全。另直轄市、縣(市)(局)主管建築機關對於建築物得隨時派員檢查其有關公共安全與公共衛生之構造與設備。供公眾使用之建築物，應由建築物所有權人、使用人定期委託中央主管建築機關認可之專業機構或人員檢查簽證，其檢查簽證結果應向當地主管建築機關申報。非供公眾使用之建築物，經內政部認為必要時亦同。

而「建築物公共安全檢查簽證及申報辦法」進一步規範了應進行安全檢查與申報的範圍。依據「建築物公共安全檢查簽證及申報辦法」第 3 條規定：「建築物公共安全檢查申報範圍如下：一、防火避難設施及設備安全標準檢查。二、耐震能力評估檢查。」明定耐震能力評估檢查為我國建築物公共安全檢查申報範圍。

第六章 AIOT 建築物安全監測應用及推動

同辦法第 7 條，規範下列建築物應辦理耐震能力評估檢查：

(一)88年12月31日以前領得建造執照，供建築物使用類組A-1、A-2、B-2、B-4、D-1、D-3、D-4、F-1、F-2、F-3、F-4、H-1組使用之樓地板面積累計達一千平方公尺以上之建築物，且該建築物同屬一所有權人或使用人。

(二)經當地主管建築機關依法認定耐震能力具潛在危險疑慮之建築物。

前述條文明定表演集會場館、交通站、商場、旅館、運動娛樂場館、學校、醫院、福利機構、照護安養機構、收容中心、民宿長照等設施，樓地板面積累計達一千平方公尺以上，或經主管建築機關認定之建築物應辦理耐震能力評估檢查。相關範圍如可應用 AIoT 進行建築物安全監測，將可節省大量人力，並以更科學、數據化的方式，全面進行資料的蒐集與安全管控。

三、耐震標章相關規定、

內政部建築研究所積極透過學校及法人機構的協同研究計畫案與產官學研各界合作，結合各先進國家相關規範並參考國內外如日本「中間檢查」、日本「品確法」(Housing Quality Assurance Act)、美國IBC 2000(International Building Code 2000)特別監造與國內之「結構外審」等相關制度，已於九十二年度完成「耐震標章」認證制度之設置工作。

依據前述研究及「建築耐震設計規範與解說」等相關規定，財團法

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

人台灣建築中心積極推動耐震標章，並訂定「耐震標章使用作業要點」。

「耐震標章」認證制度適用於建築工程自規劃設計、興建至完工交屋及使用執照取得之結構物耐震性能的察證，察證要件包含「耐震設計品質(含規劃設計能力)」與「現場施工品質」兩大項。但自竣工取得耐震標章後，未來是否能持續保持竣工時的安全狀況同樣是耐震標章所關注的。因此「耐震標章使用作業要點」第 3 條第 1 項中說明，「耐震標章」的選用，應能考量下列特點：(略)... (f) 保固期間，對於建築物之耐震性能有計劃的予以檢核與維護。

然而實際執行狀況中，囿於設備及人力等現實因素，後續的檢核多未確實執行，無法了解建物在地震後是否有結構受損的狀況，亦無法即時採取維護措施。若能引進 AIoT 進行建築物自動安全監測，將可提供新的檢核方式，不受人力影響，落實後續檢核的執行。

四、耐震與容積獎勵相關規定

耐震在都市更新與危老重建等過程中，都有取得耐震標章或住宅性能評估之結構安全性能等級的容積獎勵辦法。如「都市更新建築容積獎勵辦法」第 13 條及「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」第 6 條皆規定，採建築物耐震設計者給予獎勵容積，兩辦法的獎勵額度相同：

(一)取得耐震設計標章：基準容積百分之十。

(二)依住宅性能評估實施辦法辦理新建住宅性能評估之結構安全性能：

1.第一級：基準容積百分之六。

第六章 AIOT 建築物安全監測應用及推動

2. 第二級：基準容積百分之四。

3. 第三級：基準容積百分之二。

此外，「都市更新建築容積獎勵辦法」第 18 條及「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」第 11 條規定，申請上述耐震容積獎勵者，應與直轄市、縣（市）主管機關簽訂協議書，並納入都市更新事業計畫，並於領得使用執照前向直轄市、縣（市）主管機關繳納保證金。

上述起造人與地方主管機關簽訂之協議書中，內容多有要求提列建築物耐震維護管理計畫。以新北市為例，申請耐震標章容積獎勵協議書範本第 7 條要求乙方應提列建築物耐震維護管理計畫，並由建築師或相關專業技師製作、簽證，另涉及都市設計審議案件應納入都市設計審議報告書內載明；其內容應包含下列項目：「(略)...二、耐震建築相關設施設備維護管理計畫：應以建築物生命週期為基礎，訂定各階段必要之維護事項、更新標準。」

目前在維護管理計畫部分尚未有具體內容規範，建議可要求定期或在一定震度以上地震後進行結構安全檢測，確保建築結構安全，並將 AIoT 長期自動監測及微振量測等方式納入，作為既有結構安全檢測方式外的選項。

五、全國建築物耐震安檢暨輔導重建補強計畫

為降低震災造成之危害，推動老舊及危險建築物安全盤點作業，加速危險老舊建築物重建及都市更新等相關措施，內政部訂定「全國建築物耐震安檢暨輔導重建補強計畫(108-110 年)」。其中主要工作項目除

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

了修訂建築物公共安全相關法令，另包含政府主動辦理大樓快篩措施、補助結構安全性能初步評估、補助結構安全性能詳細評估及補助老舊危險建築物辦理階段性補強措施。

前述快篩措施、結構安全性能初步評估及詳細評估皆可以利用 AIoT 建築物健康檢查方式進行。而經初步評估後有安全疑慮的建築物，在等待整合全數區分所有權人意見進行全面性補強或拆除重建之前，可藉由補助老舊危險建築物辦理階段性補強措施提供短期緊急性之處理措施，降低倒塌風險。

對於進行階段性補強的建築物，可在補強前、後進行微振量測，比較補強前後結構物的主頻、勁度，分析經過補強的位置是否在補強後真的有強化的效果，是否有達到補強工程前預訂的強度。甚至在補強工程完成後定期進行微振量測，了解建築結構狀況是否維持在容許的範圍。藉由微振量測的分析結果，確保階段性補強確實有提升民眾安全，讓補助的款項發揮具體效益。

六、後續推動

1. 監測類型選擇

建築物若安裝地震儀長期監測，可在地震發生時立即自動分析，且不易在大型震災後受到專業人力短缺的影響，處理速度快。但設備及其配線施工等成本較高，推動時可能有所影響。

相較於長期監測固定安裝地震儀，微振量測方式因不需要購入設備及施工，因此費用也較低。僅需要在房屋建成等時間先進

第六章 AIOT 建築物安全監測應用及推動

行一次微振量測作為基準，地震或結構補強後重新進行一次微振量測，將結果與之前測量的基準數值進行比較，便可了解結構是否有遭受損壞，但大型震災後易受人力不足的影響，需耗時較久才能得到分析結果。

因此建議可在地震頻繁的區域推動長期監測方式，而地震頻率較低的區域則可使用微振量測的方式推動。

2. 設備費用支出

對於需要長期監測的建築物，設備安裝負擔相對較高。對於不願意一次支出數十萬至上百萬費用買斷設備的單位或民眾，監測儀器可採用租賃方式提供業主使用，無須一次性買斷設備降低進入門檻與財務負擔，且由設備商負責設備之維修管理，確保服務品質並免去維護人力。使用完畢的儀器亦可回收再次使用，對整體環境資源使用效率也更高，實踐循環經濟的營運模式。

對於使用微振量測的建築物，因為設備本身即是由廠商所有持續循環使用，單次監測費用較低，較無費用負擔。對於平時地震風險較低的區域而言，可選用微振量測方式，在發生地震或需要施工時才進行量測，降低費用。

3. 地震相關保險

國內對於建築相關的地震險，常見的有「地震基本險」、「擴大地震險」、「輕損地震險」等，對於地震造成的損失理賠。對於有進行相關 AIoT 結構安全監測之建物，因為可提早及時發

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

現結構問題降低損失，對保險業者與民眾皆有助益，因此建議可邀請住宅地震保險基金會研商，針對安裝長期監測儀器或定期進行微振量測之建築物，降低地震險保費，增加民眾接受的誘因。

第七章 結論建議

第一節 結論

台灣位於環太平洋地震帶板塊交界處，地震發生頻繁，造成民眾生命財產巨大的威脅。本研究希望能結合 IoT 與 AI 技術，自動蒐集分析建築物在地震前後的結構相關數據，即時提供民眾及政府作為應變參考，並藉此技術降低人力需求，推廣監測技術應用，保障民眾生命財產安全。

本研究計畫經由收集國內外 AIoT 技術進行建築物結構安全監測之資料，並於宜蘭縣礁溪鄉選擇 1 處實證場域，進行建築結構監測分析的實證，透過實際監測與數據蒐集，實證以 AI 分析建物結構狀態之可行性，建立長期監測及微振量測之作業流程。最終並由法規政策及宣導推廣等面向，初步探討 AIoT 應用於建築結構結構監測於未來推動的方式，期盼能降低推動時的阻力。

本研究具體成果如下：

一、 AIoT 建築物結構自動監測與快速評估文獻整理

收集國內外 AIoT 技術進行建築物結構安全監測之資料，了解目前可行的建築結構監測與分析方式，並探討 AI 智慧及 IoT 技術結合結構監測與分析之應用範疇，減少監測時所需的人力。

二、 建立實證場域，蒐集建物結構長期監測及微振量測數據

本研究於宜蘭縣新建立 1 個實證場域，安裝 IoT 長期監控所

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

需設備，並進行微振量測。實際取得 1 次地震所得之監測數據，以及 2 筆微振量測所得資料。彙整分析長期監控所得之監測數據，實證以 AI 分析建物結構狀態之可行性。

三、神經網絡之初步訓練結果，確實可以協助快速預測建物結構受震反應

本研究神經網絡之初步訓練結果，確實可以協助快速預測建物結構受震反應。應持續監測以取得更多的資料，訓練出具普遍性的模型，並邀集專家學者訂定結構安全等級的判斷標準，且經由多種方法驗證確認。倘若單一房屋之監測技術能夠完善普及，將可以利用其觀測之數據來推估區域的結構反應，並建立區域安全網。

四、建置長期監測及微振量測之作業流程

本研究分別就建築物結構長期監測及微振量測之作業流程模式進行分析，就所需設備規格、安裝位置、量測方式、輸出資料形式等面向提出建議，並建置「長期監測紀錄表」與「微振量測紀錄表」兩種表單，供後續相關研究及推動作為依據。

五、AIoT 應用於建築結構結構監測應用範疇與推動

本研究由法規政策及宣導推廣等面向，探討 AIoT 應用於建築結構結構監測未來推動的方式，期盼藉由推動法規與宣導，降低推動時的阻力。

第二節 建議

建議一

擴大量測各類建築，增加 AI 模型應用範圍：立即可行建議

主辦機關：內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：國家地震工程研究中心

本研究主要以住宅類建築物進行 AI 模型訓練，若想最大化此 AI 模型之適用範圍，應盡可能針對不同結構形式(如抗彎構架、剪力牆)與材料(如鋼筋混凝土造、鋼構造)進行量測，且需要長時間的觀測以確保地震規模由小至大的紀錄均能被 AI 考量。考慮到大地震發生的頻率較低，也可以透過過往各種強震之數值模擬結果來訓練神經網絡。如此訓練出來的模型將可以作為代理模型用於即時的結構安全監測與評估。

建議二

耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書加入地震監測相關規範：
中長期建議

主辦機關：內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：各縣市政府、財團法人台灣建築中心

耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書，或是都市更新、都市危險及老舊建築物重建契約範本中，加入 AIoT 長期地震監測相關規範，快速了解建築物結構狀況確保民眾生命財產安全。此外可於相關文件中加入地震速報瓦斯遮斷功能以及電梯自動連動控制，於接收地震速報訊號後啟動連動服務。

建議三

編列預算補助社會住宅、防災用途建物優先推動：中長期建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所、各縣市政府

建議中央單位(營建署)優先補助社會住宅、校舍、警政消防

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

(防災用途)等建築，安裝長期監測儀器監測作為示範推廣，確保建築物安全並蒐集實際資料，進一步累積 AI 訓練分析之數據。

建議四

推動建物耐震階段性補強加入微振量測：中長期建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所、各縣市政府

補助建物耐震階段性補強之案件，在工程前後進行微振量測，檢測結構強度是否有所增加。

建議五

推動降低地震險保費：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：住宅地震保險基金會

邀請住宅地震保險基金會研商，推動對安裝長期監測儀器或定期進行微振量測之建築物，降低地震險保費。

附錄一 期中審查意見回覆對照表

審議意見	修正辦理情形
陳正平技師	
<p>1. 第3頁:二、AI及IOT技術進行耐震能力評估檢查；及第二節「本計畫旨在「建築物安全耐震能力評估」。請問原理為何?是否只得到勁度相關數據。</p>	<p>本計畫建議建物使用長期監測系統，定期量測，並記錄震時結構反應，配合自動化結構安全評估分析。可以於震後快速提供結構初步的安全評估報告。相關分析方法有經過國震中心與產學整合研究計畫，通過多次震動台非線性倒塌試驗驗證。</p> <p>另外，也提出定期微振量測與分析，定期提出建物主頻、震形與阻尼比。運用震前與震後量測數據，分析結構受損情況。提供多元的選擇。</p>
陳煥煒副總經理	
<p>1. 建議增加對既有建物之健檢方法回溯到過去的說明。僅能比較自系統建置以後的差異。</p>	<p>感謝委員建議，目前規劃是對結構目前現況做監測與分析，無法溯及既往。</p>
<p>2. 台電的變電所幾乎都由執行微振動量測包括素地建物完工初期，建議國內有救災功能的建築物完工初期，建議國內有救災功能的建築物(I=1.5)可考慮參考台電變電所</p>	<p>感謝委員建議，本計畫會參考台電變電所相關微振量測規範建議防救災等重要結構(I=1.5)比</p>

附錄一

審議意見	修正辦理情形
<p>建置素地及建議完工初期的微振動量測資料做微振後快篩評估的運用參考。</p>	<p>照辦理，也會鼓勵其他建築，可以參考與使用提供等同防救災建築的高度地震防災監測配置。</p>
歐教授昱辰	
<p>1. AIOT 對打造智慧化城市將有所助益。</p>	<p>謝謝委員認同。</p>
<p>2. 長期監控資料的傳遞方法、AI 即時分析自動學習方法，結構安全判斷方法應該是重點，建議本研究可對實證案例作較詳細說明。</p>	<p>本研究目前針對宜蘭示範建物進行地震紀錄長期監測，量測其受震時之樓層反應包含位移、速度與加速度。採用之 AI 將可透過輸入地震歷時來預測結構反應，並與量測之紀錄比對來修正 AI 模型中代表結構自身特性之參數。透過長期大量的數據來訓練 AI 模型，可取代複雜模型的建置，進而用於後續快速的安全判斷。判斷結構安全的標準目前不在本計畫之範圍，期望後續能透過專家諮詢委員會的方式來建立。</p>
廖教授文義	
<p>1. 本研究應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查研究，來使減少檢查人力，補強平時勘檢的頻率。並預期結合震前及震中利用地震預警系統，在強震來臨前提早預警，及運用紀錄震時建物數據，作為後續大數據之應用，及擬以震後運用</p>	<p>本計畫先透過安裝量測儀器於宜蘭示範建物，建立微振量測之標準程序以及統一之資料格式。長期監測是希望透過蒐集各式地震之數</p>

審議意見	修正辦理情形
<p>快篩評估系統，對結構監測結果進行評估。本研究成果豐碩可提供給業界運用，符合預期成果需求。但研究範圍過大不容易聚焦及提出顯著成果，建議應該以宜蘭示範建物為標地仔細進行研究來提供範例供參考。</p>	<p>據，開發一具代表性之 AI 模型來協助地震中的結構安全快速判斷。目前計畫期間所能蒐集到的地震紀錄對於 AI 模型訓練的幫助有限，期望後續能有持續性的觀測數據匯入來強化 AI 的開發，進而提升城市的防震抗災能力。</p>
王技師亭復	
<p>1. 本研究請列出研究計畫進度表及本期要達到目標。</p>	<p>本研究之研究進度列至期末簡報，另目標已更新於本次期末報告中。</p>
<p>2. 本研究理念相當先進,惟可能受限於分析軟體,電腦容量及客觀條件,預期需經多年經驗改善方能較好的成果。</p>	<p>委員所提實為本研究關鍵，訓練 AI 模型需要高效能之電腦與大量之數據輔佐，期望後續能有持續之補助研究計畫。</p>
<p>3. 查 Nonlinear Static Pushover Analysis, 為 2-D 軟體,假設限制條件相當多,以 AIoT 的精確度配合不上,ASCE 7-16 已不列該法求取結構物抗震特性. 建議採用較精確分析又有效方法,例如 NonlinearIncremental Analysis(IDA)或 SPO2IDA 之 3-D 軟件分析,應可經輪換結構部位或構材參數多次,經多次 interactive 比對或可找出缺陷的局部部位或構材。</p>	<p>本研究目的在於快速評估,透過量測到的數據直接進行災損預測,而不再進行詳細的結構模擬,當然日後可以用 IDA 預測出來的結果來比較快速評估的準確度,並未使用 Pushover, 是因其非常費時費力。</p>
<p>4. 強震儀在台北市有多棟建築物安裝且每達中度以上地震尚在讀取資料分析,如中正</p>	<p>國震中心大樓在一些非結構元件的量測包含電</p>

附錄一

審議意見	修正辦理情形
<p>紀念堂,台電大樓等,建議本研究案宜比照其在大樓外適當地點安裝至少 2 組以便讀取 free field 資料供上述軟件分析。</p>	<p>梯車廂、平衡錘有安裝加速度計。天花板有安裝加速度計與位移計。隔震高架地板有安裝加速度計與位移計。這部分的量測案例極為稀少，如果未來有機會可以支持這類量測，樂觀其成。</p>
<p>5. 地震前後的微振量測建議可採用強迫振動法(起振器或人力迫振)，無論自然週期，振幅及阻尼比均會有顯著的表現，台北國際大樓當時曾施行二者做比較。</p>	<p>強迫振動法確實比較容易偵測出結構特性，但安裝起振器進行測試也是一個不小的成本，近來隨著感測技術發達，高感度的力平衡式 FBA 地震儀，已經可以偵測環境微振，並分析出結構主頻、振形與阻尼比。因此近來已經比較少使用起振器進行試驗。</p>
<p>6. 內湖 14 層案例設有二道伸縮縫,因其添充材料及連接鈹干擾可能致使微振量測不準確。</p>	<p>感謝委員指教，伸縮縫區隔的兩個結構，需獨立分析考量。後續會做相關修正。</p>
<p>7. 強烈建議：在結構體安裝強震儀之同時,另在同一層樓版上選多處適當附屬建築物構體,非結構物或設備於適當位置也安裝強震儀,與本計畫同時觀測及數據分析推演,以為上述非結構物耐震行為研究,供修訂規範第四章重要參考.(可與國震中心合作另擬定新計畫,國外已以此法研究多年,尚在進行)</p>	<p>非結構物的動態監測近來也逐步受到重視，但考量非結構物的數量，需安裝眾多的監測設備，成本比結構監測還高，可能還需要一些時間推廣。</p>
<p>邱顧問昌平</p>	

審議意見	修正辦理情形
<p>1. 特定建築物尚屬完好如初時，做適當之「微振量測」(約 50 年前台大工學院地震研究中心，曾做過，採自製之偏心水平起震器加力)，災害級地震後或火害後，再做，由建築物震動週期等之改變(系統辨識)，快速瞭解建築物可能有內傷之程度(經費較少)。再以目前耐震初評；詳評技術進一步做診斷。長期裝置足夠數量之地震儀，連線至防災中控室，於中、強地震時啟動量測，再將數據連接到 AIOT 系統進行系統識別，這是花費大但較有效的作法。期中報告大致如此。</p>	<p>若可建置長期結構監測系統，定期量測，並記錄震時結構反應，並自動分析，花費較大，成效較好，若考量成本，也可改用定期微振量測，運用震前與震後量測數據，可分析結構受損情況。</p>
<p>中華民國全國建築師公會 江支川</p>	
<p>1. 對既有建築物安裝網路型加速度地震儀(Palert Plus)，就能檢測出建築物在地震力侵襲下的結構耐震能力反應，應該屬於非常先進的技術，期待普及發展。</p>	<p>網路型加速度計安裝簡便，量測精確。期待未來可以普及，甚至立法強制重要結構安裝。</p>
<p>2. 研究顯示原則一棟建築物放置三個監控設備(地震儀)，但是建築物高度越低，固有週期越短，地震儀的數據與建築物的高度是否有關?高度越高週期越長，約百米高的建築物，建議裝設多少個監控設備(地震儀)，才能夠獲得更精確的數據。</p>	<p>三個監測設備可以提供基本的結構週期以及關鍵層間變位數據，若結構較為複雜，需要監測較多的振態，就需要更多的監測設備，一般來說較複雜結構可能會安裝到數十組，要視需求以及可接受成本來決定。</p>
<p>3. 網路型加速度地震儀(Palert Plus)，是否有耐用年限?每隔多久應該矯正其精準度。</p>	<p>Palert Plus 與操作環境及使用習慣有關，新品出廠保固為一年，目前裝在建築物內的使用 3 年以上並沒有太多異常回覆，校正依業主需求，</p>

附錄一

審議意見	修正辦理情形
	<p>若業主無法自行判斷資料是否異常，建議定期校正。</p> <p>若為技師單位，可就事件判別各類地震儀表現，若有單顆特殊異常，就可以視為需回廠維修保養。</p>
<p>4. 期待對已經設置的監控設備(六處監測案例)，在發生有感或比較強烈地震時，公佈每棟建築物反映出的加速度與層間變位量，不僅能快速了解建築物的耐震能力，也能夠將此技術普及於全國各處。</p>	<p>建築物受震反應之監測與數據之公開在美國已有成功之案例。本計畫推動之目標亦是期盼未來監測儀器之安裝能普及化，進而建立一個完善之結構物受震反應資料庫供學界與業界使用。</p>
<p>王技師炤烈</p>	
<p>1. 將 IoT 技術應用在建築結構之評估、判斷是未來要走的方向，是不錯的研究題材，尤其結構性能的評估，但要完全用來評估「耐震能力」可能尚須有相關研究的佐證，但本項研究對震後評估建物損害情形、補強效果是應有幫助。</p>	<p>本研究旨在利用 AIoT 技術來輔助結構受震反應之快速評估，並未用來取代詳細耐震評估，然透過此一技術確實可以減少人為評估所需花費之成本。後續亦希望透果產官學界組成專家委員會來最大化此研究成果對於台灣耐震能力提升之效益。</p>
<p>2. 目前本研究之量測項目是辦理「微振量測」與「震動觀測」，此兩項之量測重點都以結構振動行為為主，不易反應材料品</p>	<p>結構長期監測部分，已經可以分析出關鍵層間變位。已在國震中心震</p>

審議意見	修正辦理情形
<p>質、斷面內之施工情形，是否可配合國內常見之震害案例或破壞案例，研究更能反應建築物安全性與耐震能力之監測項目，例如構件變形、接頭轉角變位、建築物下陷變位等項目，或許提供作為後續更進一步之研究方向。</p>	<p>動台進行過驗證測試（與實際位移計比對）。此外相關分析方法，也是透過氣象局 building array 長期資料，比對真實震害，此外也透過國震中心與產學界整合研究，進行多次震動台非線性倒塌試驗驗證通過。</p> <p>當然材料品質、老化以及斷面內之施工情況仍然不是振動量測可以達到的，但考量成本與市場接受度，本計畫著重在震動的監測與後續的自動化分析。</p>
<p>3. 以目前所做的量測項目，除本研究所量測的資料，目前國內亦有些建物與橋梁裝有振動儀，建議可先蒐集來評估實際振動行為與學理分析之差異性，以證實本項監測作業之有效性，以利後續推動本項工作。</p>	<p>感謝委員指教，後續會與國震中心合作，取得建物與橋樑監測資料，進行相關研究分析，以利後續推動。</p>
<p>陳組長建忠</p>	
<p>1. 若原已安裝之六個基地，應於期末報告將六基地及本案之基地都呈現出來。</p>	<p>關於原已安裝監測儀器之六個基地觀測數據，將會去跟各單位確認授權後，再行呈現，詳附錄三。</p>
<p>2. 報告中名詞要與法律用詞做連結。</p>	<p>感謝委員建議，將遵照辦理。</p>
<p>3. 本案是否還使用快篩這詞，若無請確認報</p>	<p>本研究團隊內部討論已</p>

附錄一

審議意見	修正辦理情形
告書中用詞。	不用快篩此詞，後續會將報告書中相關用詞刪除。

附錄二 應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查專家座談會意見表

會議名稱		
應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查第一次專家座談會		
討論內容		會議時間
<ol style="list-style-type: none"> 1. AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估的應用。 2. 結構安全演算法認證流程。 3. AI 訓練需大量資料累積，如何加速 AI 訓練流程讓判讀更精確？ 4. 推動 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估普及化，在成本及準確度間如何取得平衡。 		110/09/17(五) 10:00
編號	委員	專家意見
1.	林子剛	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議可將 AIoT 技術運用在危老建築的階段性補強，因應其經濟性，可客製化符合各式建築物安全耐震能力評估之需求。 2. 結構安全演算法認證流程可由國震中心擔任平台執行者，邀集國內相關學者利用實測資料進行結構安全演算法認證。 3. 建議於現有資料之構架下，可導入 AI 競爭式學習製造出更多相似之資料，進一步提升系統之可靠性與容錯性。 4. 建議可因應市場需求提出精簡版與高規格版，其中高規格版可因應客戶需求無預算限制，以符合快速變遷的市場需求。

附錄二

<p>2.</p>	<p>黃謝恭</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 相信在 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估上，除了推動相關法規來加速進展外，政府的態度亦會有決定性的影響。另外，在局勢還不明朗的當下，是否可以有一個相對公開且民眾可觸及的平台，讓一般民眾對相關技術的效果與限制有所了解，應也是推廣的一種手段。最後，第四點在成本以及準度之間的取捨也將對於應用有關鍵性的影響。 2. 在演算法的認證方面的確是個重大的問題，初步認為可能需要分為多階段認證。例如第一階段可以是試驗室內的驗證，利用國家地震工程研究中心擁有的實尺寸三軸向振動台與設計得宜的試體來對演算法進行最基本的驗證，第二階段可以將演算法應用於現地建物來進行更進一步的驗證，並且考量到現實的限制，可以更細分為兩個階段，第一步為結構異常的驗證，第二步才是完整的結構安全驗證。 3. 人工智慧這個領域的知識與技術還在蓬勃發展，傳統人工智慧的限制與缺點也逐漸被克服，如何加速訓練流程與縮小模型維度亦可望在不久的將來得到改善。相較於如何加速人工智慧的訓練過程，初步認為設立統一的目標與建立完善的情境來協助人工智慧進行判讀應才是土木結構應該努力的方向。 4. 標準化是工程界普遍用來減低成本與提高效率的方式，相信在 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估上面亦不可避免，透過一些研究與專家討論，設立標準化的情境，並在該情境中試圖降低成本與推動普及，預期將可一步一步達到目標。另外在準確度上面，可以考慮給予不同區間用戶不同功能與目標，分離客群後再搭配標準化的成果逐漸尋找平衡，應是一個可行的方式。
<p>3.</p>	<p>張家銘</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 目前結構健康監測方法中，大部分僅適用於判別結構常時狀態穩定性(如動態特徵之穩定性)，及特殊事件後之損傷診斷(如可提供相對損傷程度和大略損傷位置)，是可提供建物安全快速評估，但鮮少有方法直接與建物耐震能力有關。若要建立建物耐震能力評估與結構健康監測間之關係，少則需要簡化之數學模型，多則需要詳細之有限元模

		<p>型，才得以實現。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 目前演算法之認證流程可行辦法有二：1) 依賴國震中心實驗能量，藉由實驗之過程，直接驗證方法之可行性，但於實驗室成功之方法，不見得絕對可實現於真實建物中；2) 仰賴專業人員，利用數值模擬相關方法，產生人工量測數據，評估與驗證相關演算法於該特定建物中之可行性。 3. 針對特定建物，可利用過去量測的相關資料，採 digital twin 之概念，不但對數值模型(可為簡化模型或詳細模型，見第一點)進行更新，且將修正後之結果反覆帶入已被訓練之模型，該方法應有機會強化判讀之精確性。 4. 仍須依賴建物之重要程度而定。
<p>4.</p>	<p>許丁友</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 層間變位的方法對於工程師應用在安全評估應有一定之接受度。 2. 建議認證流程可以利用國震中心提供之試驗與場域平台進行。 3. AI 訓練需要產生足夠的實際建築損傷時資料使判讀更為精確。 4. 可提供高/低不同版本給消費者選擇，低成本之準確度較低，參數設定需要設定保守一點。

附錄二

內政部建築研究所
「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」
第一次專家座談會簽到表

名稱：「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」第一次專家座談會

時間：民國 110 年 9 月 17 日(星期五)上午 10 時 00 分

地點：Teams (<https://reurl.cc/xED6Mc>)

主持人：李協同主持人明濤

序號	單位名稱	簽到
1	內政部建築研究所 陳組長建忠	陳建忠
2	國立交通大學土木工程學系 林教授子剛	林子剛
3	國立臺灣大學土木工程學系 羅教授俊雄	羅俊雄
4	國立臺灣科技大學營建工程系 許副教授丁友	許丁友
5	國立臺灣大學土木工程學系 張副教授家銘	張家銘
6	國立中興大學土木工程學系 黃助理教授謝恭	黃謝恭
7	三聯科技 張經理龍忠	張龍忠
8	協同主持人 李明濤	李明濤
9	研究員 林沛陽	林沛陽
10	研究助理 陳鵬宇	陳鵬宇

會議名稱		
應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查第二次專家座談會		
討論內容		會議時間
1. AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估的應用。 2. 監測資料中有哪些資訊，有助於專業技師進行進一步分析？ 3. 推動 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估普及化，在實務操作上建議如何推廣？		110/10/18(一) 14:00
編號	委員	專家意見
1.	張育銘	1. 監測位置建議至少保留一組在最底層，拿來做為地表震動狀況 2. 因監測建築相關頻率受非結構構件影響甚鉅，初期較難應用於建築物安全耐震能力評估。長期而言或許可以依照構造物類別、受非結構構件型式分類做一些統計結果，可以在地震後依據量到的數據做初步快速的安全性判斷。 3. 另可以搭配目前有提供容積獎勵的結構性能評估或耐震標章在建築物完成所需之建築物結構性能維護計畫或建築物耐震標章維護計畫推廣或許可以達到事半功倍的效果。
2.	陳奕信	1. 利用加速度計進行監測時，通常可藉以提供建築物受震下的頻率識別、振形、阻尼比及樓層變位，對於 RC 結構物，因常有剛性非結構構材的存在，將頻率與阻尼比的變化做為量化評估的依據，較難區分其變化是受主結構抑或非結構的影響。而對於樓層變位若能針對軟弱樓層的層間位移進行評估，則較能建立量化評估標準，且可配合非線性側推來建立對應的性能等級。故建議主要以層間位移角建立建築物安全耐震能力評估的應用依據。 2. 對於 AIoT 的推廣，應建立一套費用的參考標準，包含基本建置費用、保固年期、管理、維護與校正等方式。也應能具體提供使用者一個即時的震

附錄二

		後資訊(例如結合預警系統、震度、以層間位移角建立建築物綠燈、黃燈或紅燈等警示訊號等)。
3.	羅遠智	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在判斷震後之結構行為是否有改變時，須有建築物初始之結構特性(如頻率等)，如何取得合理之初始值(包含非結構 RC 牆及質量變異等因素)。 2. 在比對後之結構行為時，如何區分結構桿件而非結構 RC 牆之影響。 3. 如何在此次研究成果中建立合理性之監測作法及應用效益，以利後續推廣。
4.	張盈智	<ol style="list-style-type: none"> 1. 長期監測跟短期監測，短期監測狀況地震前後監測相對較難，需要掌握好時間，且若非固定型容易操作為補強前後，應該要建立相關控制因素考量，可以持續規劃。 2. 長期監測關係到一次性建置費用，目前接觸有案子每層樓都有裝測，也有業主願意在特殊樓層加以裝設。 3. 希望未來可以做剛性比對，如果建物有特殊構件，才会有相關較特殊初始值。 4. 除非可以分別構件是否影響，未來應該要觀察頻率改變，了解是否影響結構體。 5. 震前預警非常是很好的，但是預警是多早可以通知，如何評估判斷結構體有問題要持續研擬。

內政部建築研究所
「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」
第二次專家座談會簽到表

名稱：「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」第二次專家座談會
時間：民國 110 年 10 月 18 日(星期一)下午 14 時 00 分
地點：Teams (<https://reurl.cc/Gbj3DA>)
主持人：李協同主持人明鴻

序號	單位名稱	簽到
1	內政部建築研究所 陳組長建忠	陳建忠
2	永峻工程顧問股份有限公司 陳董事長奕信	陳奕信
3	大彥工程顧問股份有限公司 羅副總經理遠智	羅遠智
4	凱巨工程顧問有限公司 張副總經理育銘	張育銘
5	聯邦工程顧問股份有限公司 陳副總經理煥焯	陳煥焯
6	築遠工程顧問有限公司 張總經理盈智	張盈智
7	三聯科技 張經理龍忠	張龍忠
8	協同主持人 李明鴻	李明鴻
9	研究員 林沛鳴	林沛鳴
10	研究助理 陳鵬宇	陳鵬宇

附錄二

會議名稱		
應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查第三次專家座談會		
討論內容		會議時間
1. 納入公共建設維護管理之效益與挑戰。 2. 容積獎勵協議書範本加入相關規定。 3. AIoT 技術進行耐震能力評估的應用。		110/11/15(一) 14:00
編號	委員	專家意見
1.	何志浩	1. 目前本處所辦理工程，針對結構部分已有安裝觀測儀器，以觀測，因時間、物理性產生之變化，如橋梁鋼構建築預測是否有沉陷，僅針對本體。 2. 對於公共建築藉由 AIOT 進行耐震能力評估 (1). 裝置地震儀監測儀器，應可納入工程預算執行，可行。 (2). 儀器設置後的日後維管，才是問題。權責、管理人員、資料、數據判讀、分析。 (3). 目前工程進行中，針對鄰近建物，會裝置傾斜、沉陷的觀測儀器。僅暫時性的。日後針對建築物本體是否需要，以觀測地震之影響，建議透過立法來執行。
2.	鄭健志	1. 因氣候變遷及天然災害，目前城市的規劃都在談韌性城市。韌性城市有 4 個面向，經濟、社會、治理、環境韌性。其中環境韌性包含強化基礎建設及住宅韌性、提升居住安全、建立住宅保險制度等。所以我們談的韌性住宅、韌性社區都是建構韌性城市的單位，AIOT 在建築的應用就是提升居住舒適性、智慧化及安全性，AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估也是建構韌性城市的一環。 2. 社會住宅有 2 個特性，其一是弱勢比例高於一般住宅社區，其二是與社會福利關設施如托老托幼、青創及商業使用共構，公共性高，應具備完善災害應變及防災意識、優質的建築設計及施工品質。故社會住宅在建築或社區防災及永續性上，必須具備居住韌性及承擔災害能力相對高的建築，故 AIOT 的應用在建築物安全耐震能力評

		<p>估，對於建築管理，及回饋當設計的驗證，均有正面意義，同時在維護管理上可確保建築結構安全性、監測預警降低災害發生。</p> <p>3. 都市計畫法新北市施行細則取得綠建築、智慧、耐震、無障礙建築等容積獎勵之開發案，應簽訂協議書，繳納相關保證金及維護費用，協議書規範維護費用金額、繳納時間及方式，該筆費用即是未來社區管委會用於維護該標章相關設施設備，若新增 AIoT 技術耐震能力評估長期監測之費用，應先確認監測之成本，以確保協議書開發單位提撥之維護費用是否足夠容納。若本計畫內容可納入相關標章必須通過之項目，對於未來管理維護費用之使用，將更具正當性。</p> <p>4. 應用方面，建議短期以公共建築可優先示範性推動，長期應建立制度及立法。</p>
<p>3.</p>	<p>魏國忠</p>	<p>1. 公有建物納入監測範圍再推廣並私人建物公安申報體系內。</p> <p>2. 訊號收集應由雲端統一收納分析，若結合技師公會及建管體系，對建物結構安全得評估做最有效率地進行。</p> <p>3. 設備在微型化，以方便設置，可考慮結合數位電錶傳輸設備，將資料上傳。</p> <p>4. 台北市社會住宅廣詞曲有高層建築群，I 值 1.5 的行政社福中心，適合進行監測方案。</p> <p>5. 新建物於法令規定範圍內設置地震儀，舊有建物於補助耐震補強計畫中納入強制要求設置。</p>
<p>4.</p>	<p>鄭立輝</p>	<p>1. 耐震監測其實就跟個人的健檢資料一樣，會涉及個資的披露，現在社區住宅的民眾都是命運共同體，結構耐震評估資料取得後，有的人願意公布，有的人不想公布，這牽涉到個資的問題，因此這些資料如何公開或應用，牽涉到法制化的問題，需要更多領域的專家來討論，所以，初期階段可能還是先朝公有建物進行試辦，公有建物資料不涉及個資，而且也跟公眾安全有關，公布資料比較不會引起爭議。</p> <p>2. 針對公有建物的標的，建議可先朝重要的公有建築物開始安裝，例如：災害應變中心、大型醫療院所、市政府大樓，再逐步推廣到 警消、學校等重</p>

	<p>要大樓，本府目前正在推動三重第二行政中心的工作，該大樓係由民間開發業者捐贈，預定明年動工，施工過程中，新工處會進行重點工進管理，該案目前還是由新北市政府秘書處擔任窗口，如果有需要，本人可以協助聯絡媒合，不過監測系統產出的資訊，畢竟涉及訊號處理或耐震評估等專業，因此設計合理易判別可遵循的指標也相當重要，設置設備的機關、大樓，後續的營運管理機制也必須同步建立，並不是只有安裝設備這麼單純的事情。</p> <p>3. 有關本次會中討論議題，再提供若干經驗供各與會先進參考：</p> <p>(1). (耐震監測設備的推廣，立意良善，不過推廣階段初期，可能還是會有相當大的困難，舉例，過去台北縣在林肯大郡災害發生後，曾調查列管 109 處 A 級山坡地社區，並且補助經費設置各項監測儀器，包含水位計、應變計……等等監測坡地穩定的設備，而且協助持續監測，但是民眾唯一關心的議題就是何時可解除 A 級山坡地列管，一旦解列之後，就不太關心監測設備的事情了，所以要讓民眾重視，可能這些議題、成效還是要跟房價有關聯，才比較有機會。</p> <p>(2). 另外耐震標章的議題，本人以綠建築標章為例，目前內政部規定公有建物必須取得綠建築標章，而且這件事跟公共工程辦理結案、包商取得驗收結算證明書的事情產生連結，因此現在大家還會認真取得綠建築標章，但是據我了解，綠建築後續是否能繼續維持，是個很大的疑問，因為維持綠建築指標的規定：包含通風、採光、透水、保水、綠化……，這些都跟後續的維護經費有關，很多公家機關在公有建物啟用後，也不願意再持續辦理或是再去認證，所以耐震標章的推廣，建議還是要想一套可長可久的機制，不要淪為噱頭或口號。</p>
--	---

5	林敏朝	<ol style="list-style-type: none"> 1. 於慈濟安裝監測系統確實發揮很大功能，尤其2020年大地震監測系統有起到相關修正功能，讓實際建築物安全度可以提升，非常贊同持續計畫進行。 2. 花蓮地質狀況跟市區又有所不同，花蓮四到五級地震相較快速晃動結束，因此建議台北地區，如：台大醫院或是慈濟醫院都需要裝設，因為醫院建築關乎人生安全，期望未來都可以規劃。 3. 另醫院的維生系統非常容易受損，建議建築中心可以推動讓醫院動力中心或維生系統能有監測系統，能使未來醫院維生系統有相對的幫助。 4. 台灣地區許多相關地震資料蒐集，建議可以分享相關數據，定期發表其成果，加大其推廣助力，利用媒體讓政府及人民重視，慈濟也非常願意致力於此推廣。
---	-----	---

附錄二

內政部建築研究所
「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」
第三次專家座談會簽到表

名稱：「應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」第一次專家座談會

時間：民國 110 年 11 月 15 日(星期一)下午 14 時 00 分

地點：Teams (<https://reurl.cc/43nQ0L>)

主持人：李協同主持人明鴻

序號	單位名稱	簽到
1	內政部營建署中區工程處 何處長志浩	何志浩
2	新北市城鄉發展局 鄭副總工程師健志	鄭健志
3	新北市政府新建工程處 鄭副處長立輝	鄭立輝
4	慈濟基金會 林主任敏朝	林敏朝
5	臺北市政府都市發展局 魏科長國忠	魏國忠
6	三聯科技 張經理龍忠	張龍忠
7	協同主持人 李明鴻	李明鴻
8	研究員 林沛陽	林沛陽
9	研究助理 陳鵬宇	陳鵬宇
10	研究助理 陳克宜	陳克宜

附錄三 期末審查會議審查意見回覆表

審議意見	修正辦理情形
陳正平技師	
<p>2. 本案內容為探討 AIOT 監測技術供結構安全評估使用。與本案題目「進行建築物安全耐震能力評估檢查」似有不合。</p>	<p>感謝委員指教，本計畫探討監測技術供結構安全評估使用，其中一小部分也探討監測技術是否可供建築物安全耐震能力評估檢查使用。</p>
陳澤修審查委員	
<p>1. 建築物長期監測非常值得鼓勵，讓我們能夠長期檢測建築物結構的安全狀況，提醒使用管理者，注意維護結構安全。</p>	<p>謝謝委員支持。</p>
<p>2. 本案地震儀的精準度即可信度是本案監測最重要的依據。</p>	<p>感謝委員指教。本研究使用之監測儀器 Palert Plus 已於 2018 年 5 月通過日本東京大學性能測試，確保技術可行性。</p>
<p>3. 地震儀的檢測值，如何應用在耐震評估上，請加以說明。</p>	<p>感謝委員指教。地震儀的可以記錄地震下結構物的加速度反應，透過適當的分析，可以解析出最大層間變位比、結構物主頻、振形與阻尼比，做為耐震評估的參考。</p>
<p>4. 地震儀安裝數量，除考慮 X,X 向的分析，並考慮垂直震波的檢測，所需數量及位置應補充說明。</p>	<p>感謝委員指教，本研究目前規劃的地震儀配置、均為三軸向加速度監測。只是在結構分析上僅使用兩個水平軸向分析。在真實地震下，若有二次彎距現象，垂直向資料就可以用來分析。</p>

附錄三

審議意見	修正辦理情形
王技師亭復	
1. 請比較 110 年 10 月 24 日宜蘭地震所收集到的水平及垂直振動歷時，並比較其 V/H 在時間域差異、加速度與振幅比例，包括宜蘭、臺北市的工址。	感謝委員指教。有關 110 年 10 月 24 日宜蘭地震資訊將於後續納入報告。
邱顧問昌平	
2. 本研究主要在做建築物的微震檢測(不是監測)及長期監測(獲取中強震發生前、後之必要數據)即含 IoT 與 AI 技術運用於建築物之可能震害分析。目前已在六處建築物設置好監測設備，如附錄三所示。成果尚稱良好，但實際之應用倒只有宜蘭○○飯店一處。	感謝委員指教。有關用詞錯誤部分將重新檢視報告書更正。其它六處設備將於後續共同納入報告。
3. 微震量測之應用，建議 106 年之建築為： 甲、 在新建築完工時做一次，有地震或其他事件後再做一次，互相比較。實務上是完工使用後未有明顯損傷時皆可做一次。 乙、 結構補強等工程之前後各做一次。	感謝委員寶貴意見，將納入本研究參考。
4. 如何應用，如何建置中控中心等仍只是概念性之說明。如何落實、可能之經費如何等，尚須進一步探討。	感謝委員指教。目前國震中心已經開始逐步建置結構安全監測平台，收集相關結構監測數據，提供學研使用。此外國家住都中心也將結構安全監測列入招標規範。未來每處社宅都至少安裝三組三軸向地震儀，並須自動分析層間變位，未來也將逐步規劃設計多元服務等級，以服務不同需求、逐步擴展。
5. 建議文字修正部分： 甲、 第 33 頁第一行，Nyguiet 為何？ 乙、 第 48 頁倒第三行，詳見附錄三才	1.感謝委員指正，文字誤植部分將於成果報告修正。 2.高端型建築係指建築的複

審議意見	修正辦理情形
<p>對。</p> <p>丙、第 49 頁，長期持續監測，多了”持續”二字，甚好。本案請說明設備如何設、如何保管、人力及費用如何等以釋疑。</p> <p>丁、第 87 頁至第 96 頁中許多文字修正、增加圖文之安排宜再檢討(建議寫在期末報告紙本上)。</p> <p>戊、第 86 頁，圖 5-4，何謂高”端”型建築。</p>	<p>雜度較高、有扭轉的特性、需要較詳細的分析、並可接受較高的建置與維運成本之建築。高端型結構安全監測系統，主要是以民間商辦大樓為主，其結構上安裝的地震儀十餘組以上，可以監測多個振態、扭轉以及多個層間的分析，搭配的分析方法也比較多元，不僅止於層間變位分析，目前已經在多個民間住辦大樓採用。</p>
<p>王技師炤烈</p>	
<p>1. 利用 AIoT 的技術於相關專業技術領域，應是目前各行業大家都在努力，要應用到建築物安全評估亦應是可預期與值得的，在使用上，本研究案尚屬適用，後續可再往如何能讓住戶更容易，更主動想裝設監測設備之方式。</p>	<p>謝謝委員支持。</p>
<p>2. 在所提出裝設監測儀器的是提議設在管道間，原則是可行的，惟要注意要避免開會受到如電梯，發電機等會產生振動設備的位置。</p>	<p>謝謝委員提醒。</p>
<p>3. 用量測數據來預測結構反應外，建議要考慮先用量測數據來應證原設計所設計之結構行為是對的，或是先用原設計資料來「教導」監測儀器「認識」結構系統。</p>	<p>感謝委員建議。後續可先依據量測數據修正設計結構之非線性模型參數，再利用校正完之模型進行大量的動力歷時分析來產生訓練用數據，隨後以分析之結果來教導 AI 模型。進而達到交叉驗證的目的，以確保 AI 模型的可靠度。</p>
<p>陳組長建忠</p>	

附錄三

審議意見	修正辦理情形
1. 昨日下午 1 時的南澳地震，請將 6 場地震量測結果納入報告。	感謝委員指教。有關其它 6 處場域於 110 年 10 月 24 日宜蘭地震之資訊，將於後續納入報告。
2. 建議考量國內是否有足夠設備廠商擁有本研究所需精度等相關專業能力，評估後續相關政策之推動，並可考量輔導設備商南向拓展商機。	感謝委員建議，未來實際推動政策時，將再盤點具能力之廠商，並協助拓展我國技術與設備之商機。
3. 地震無法預報，應該是測報，語詞宜再考量。	謝謝委員提醒，將於成果報告修正文字。
4. 其他 6 處的地震資訊亦請收集分析納入報告。	感謝委員指教。有關其它 6 處場域之資訊，將於後續納入分析。
5. AIoT 是否真能控制地震電梯停用？牽涉有無人使用，及有何因素考量？	感謝委員指教。關於地震電梯停梯，目前已經可以採用國震中心“複合式地震速報”，於當地僅需設置接收裝置接收地震速報，於震前連動控制電梯停梯。目前已有多个社會住宅、國研院所屬大樓採用，另外也已有多个電梯業者導入地震儀監測電梯位置地震震度，當實測震度超過預設門檻，就可以自動停梯。只是這種停梯時機較慢，也須多自費設置地震儀。
6. 本研究標題是耐震能力評估檢查，報告略偏移。	感謝委員指教。本研究探討 AIOT 監測技術供結構安全評估使用，包含長期監測搭配多種結構安全評估技術，以及微振量測，分析結構現

審議意見	修正辦理情形
	<p>況，相關的結果均顯示，透過監測可以藉由科學的方式提供結構物耐震安全資訊，透過適當的監測方式與分析方法，可以對結構物的耐震能力與震後安全，提供快速有效的評估。</p>

附錄四 六處長期監測場域監測設備及點位分布

一、監測設備

(一) Palert Plus 網路型加速度地震儀

1. 配置地點：安裝配置於建築物地面層、中間樓層或結構特殊樓層、頂樓等，實際測量地震。

2. 設備規格：

- 儀器：三軸向微機電加速度計、支援第四垂直軸速度計

可內建或外接

- 量測範圍：±2G

- 動態範圍：100 dB

- 解析度：4 通道 24 位元

- 輸出取樣率：50sps、100sps、200sps(可設定)

- 地震觸發邏輯：PD、PGA、STA/LTA

STA 範圍：0.1 – 120 秒(可設定)

LTA 範圍：0.1 – 120 秒(可設定)

地震事件記錄時間：200 秒(可設定)

- 資訊顯示：LCD 液晶螢幕顯示(2x20)，即時顯示儀器狀態

- 通訊：網路連接，相容 Modbus 通訊協定

- 軟體：即時波線展示與設定、地震事件記錄
- 記憶容量：16GB(可擴充至 64GB) 儲存儀器參數與地震記錄
- 內建時鐘精度(RTC)：±60 秒 / 年

(二) 網路型三軸向地震儀(AC-217)

1.安置地點：依建築物不同分布於不同樓層，原則一棟建築物放置含前述主機共三台記錄儀。

2.設備介紹：

- 儀器：三軸向微機電加速度計、支援第四垂直軸速度計，可內建或外接。
- 量測範圍：±2G
- 動態範圍：95 dB
- 輸出取樣率：50sps、100sps (可設定)



附錄四

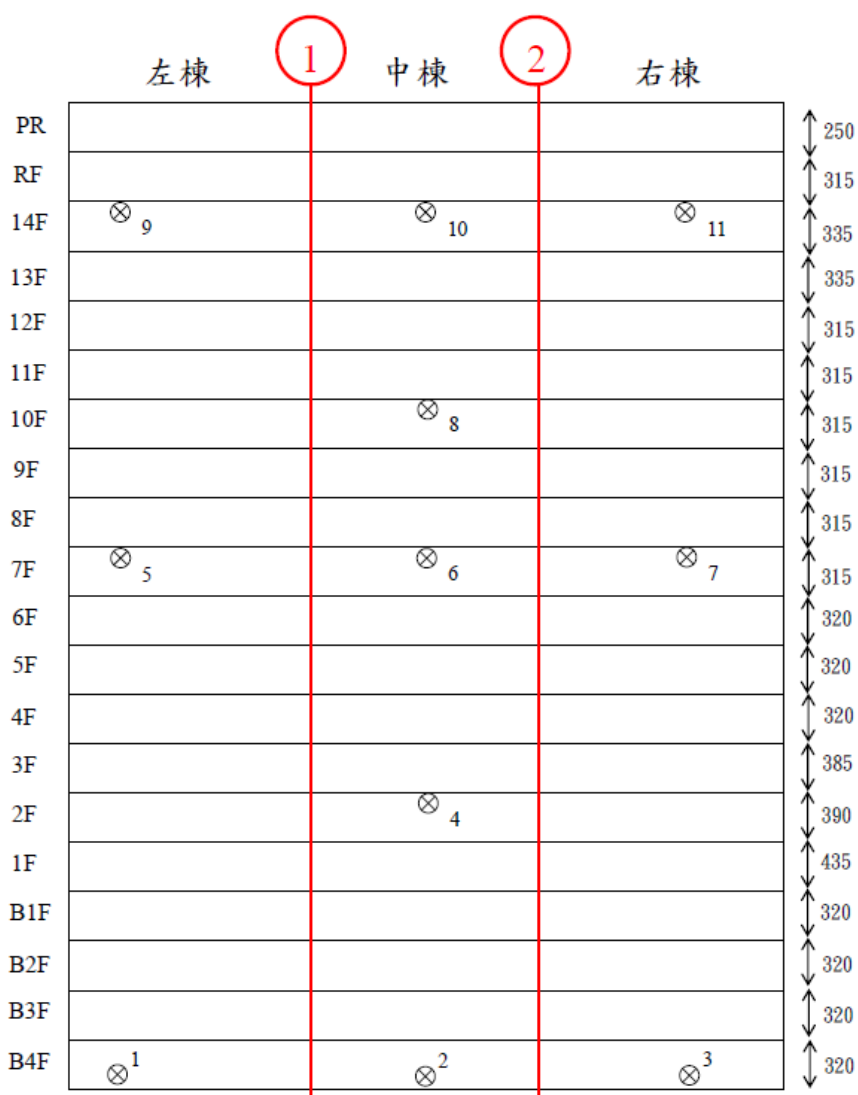
圖 1 網路型三軸向地震儀(AC-217)

二、各場域安裝點位

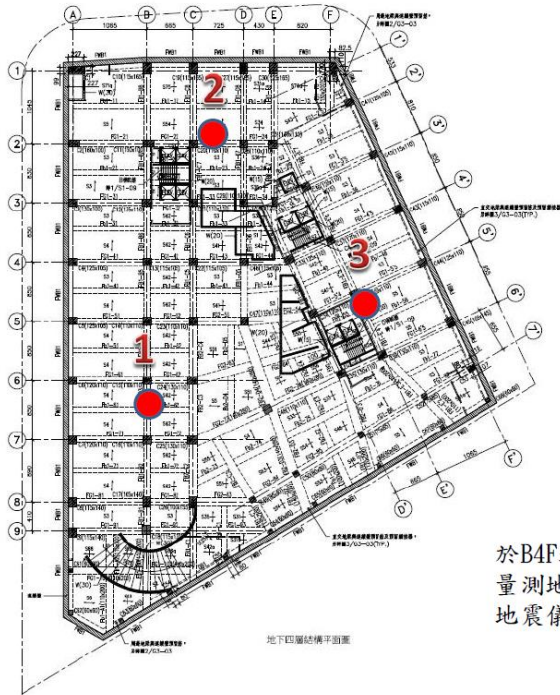
(一)臺北市 00 社會住宅地震記錄儀裝設點位圖

1.樓層示意圖

(本次記錄儀除 B4F 裝設在地板上，其餘皆裝設於天花板內)



2. B4F 地震記錄儀裝設點位圖



於B4F地板紅點處配置地震儀三顆
量測地表加速度歷時紀錄
地震儀位置為暫定，需現場實際場勘

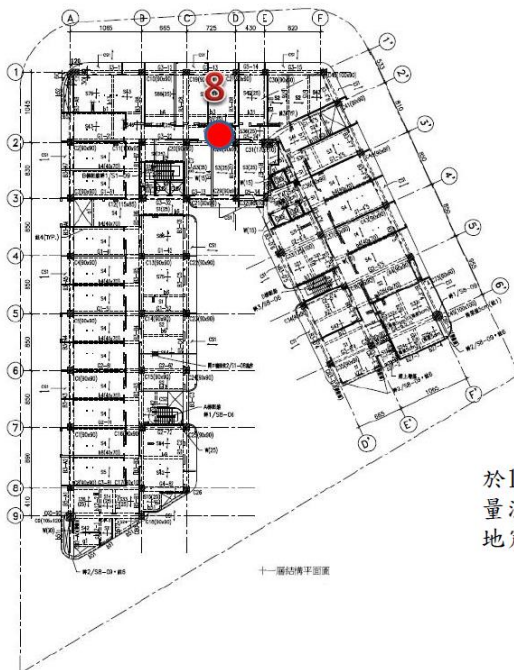
3. 7F 地震記錄儀裝設點位圖

附錄四



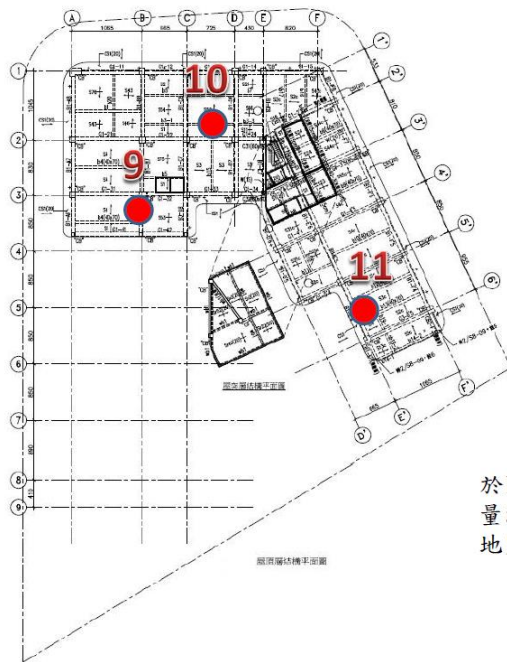
於2F天花板紅點處配置地震儀一顆
量測地表加速度歷時紀錄
地震儀位置為暫定，需現場實際場勘

4. 10F 地震記錄儀裝設點位圖



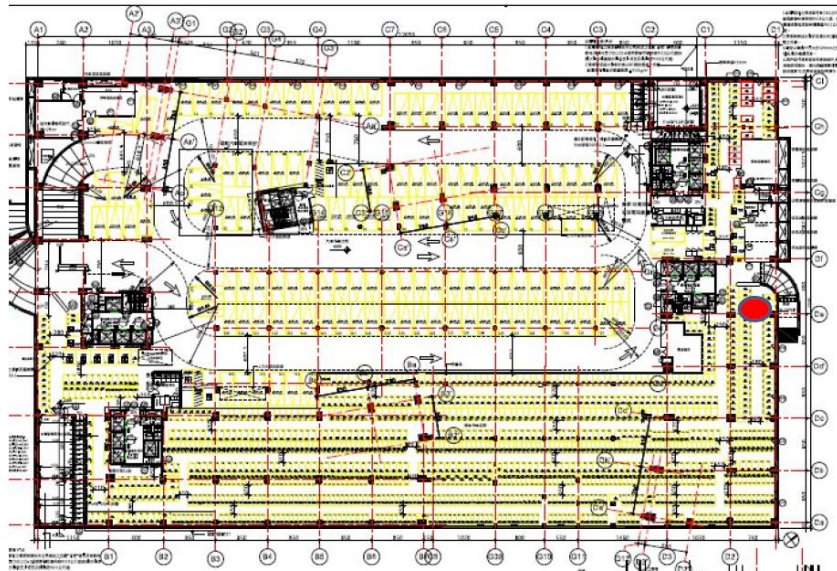
於10F天花板紅點處配置地震儀一顆
量測地表加速度歷時紀錄
地震儀位置為暫定，需現場實際場勘

5. 14F 地震記錄儀裝設點位圖



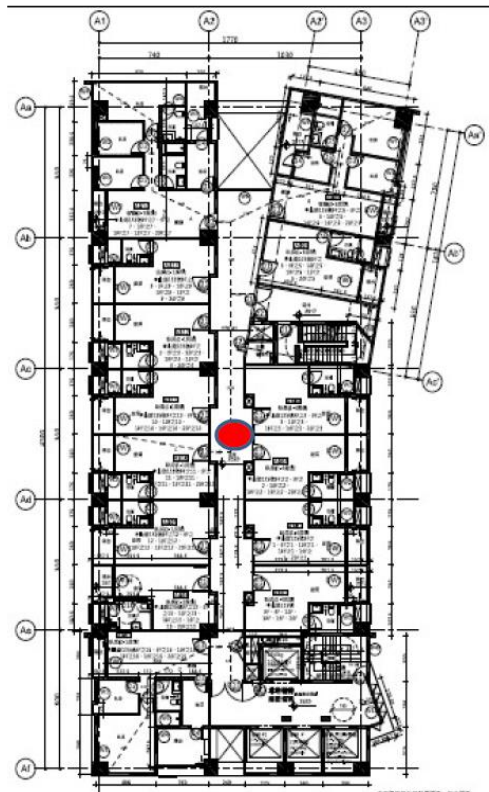
(二) 新北市 00 青年社會住宅地震記錄儀裝設點位圖

1. B1F 地震記錄儀裝設點位圖



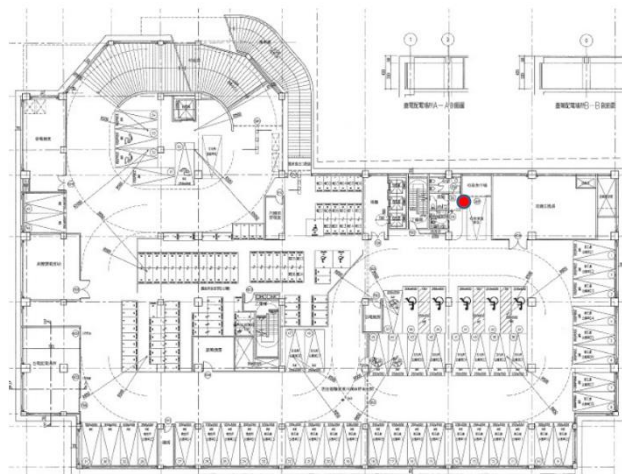
2. 10F、20F 地震記錄儀裝設點位圖

附錄四

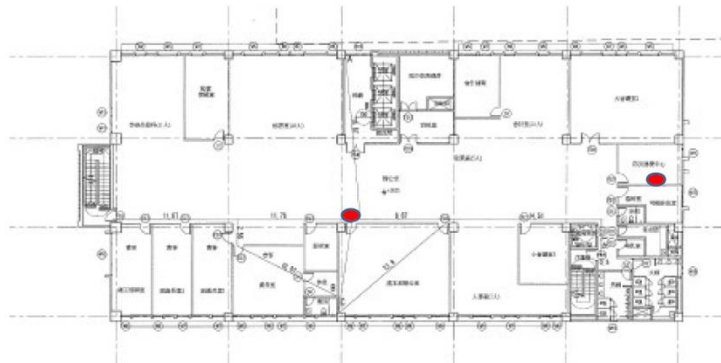


(三)新北市 00 藝文行政中心地震記錄儀裝設點位圖

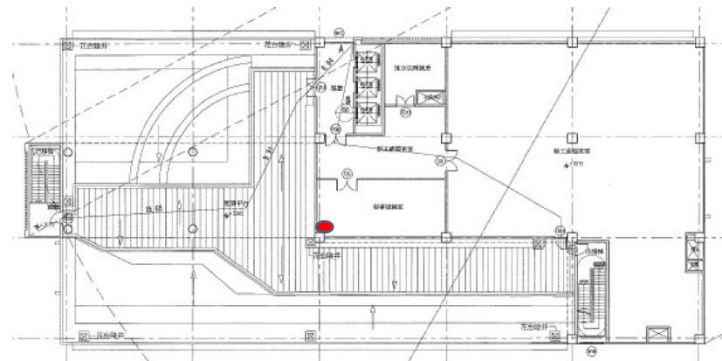
1. B1F 地震記錄儀裝設點位圖



2. 6F 地震記錄儀裝設點位圖



3. 7F 地震記錄儀裝設點位圖

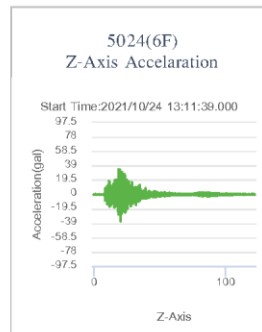
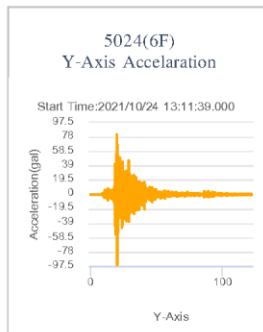
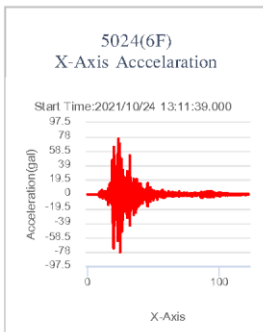


4. 地震儀數據呈現

附錄四

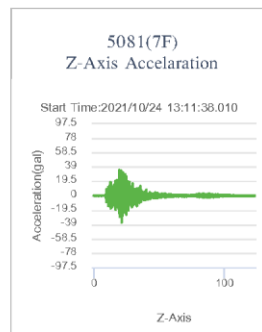
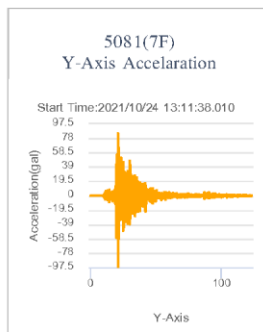
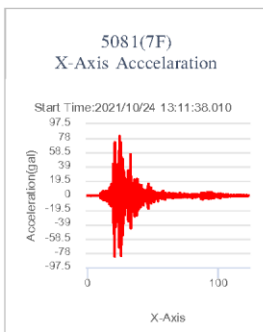
Project	
Start Time	2021/10/24 13:11:39.000
Station Code	5024
Record Length(sec)	122.00
Sampling Rate(Hz)	100

Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	-36.487~ 33.616
Amplitude MAX - Radial(x)	-78.237~ 75.605
Amplitude MAX - Transverse(y)	-96.122~ 81.288
Intensity	4.0



Project	
Start Time	2021/10/24 13:11:38.010
Station Code	5081
Record Length(sec)	123.00
Sampling Rate(Hz)	100

Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	-36.606~ 34.692
Amplitude MAX - Radial(x)	-82.305~ 80.869
Amplitude MAX - Transverse(y)	-96.122~ 81.288
Intensity	4.0



HAZUS REPORT

EVENT OF 2021/09/13 18:42:55

Pair	Height	Relative Displacement	Absolute Displacement	Average Drift Ratio
0_1	3075	0.0376942	0.0614327	1.22583e-05
0_2	3475	0.038439	0.051547	1.10616e-05
1_2	400	0.0270025	0.0614327	6.75062e-05

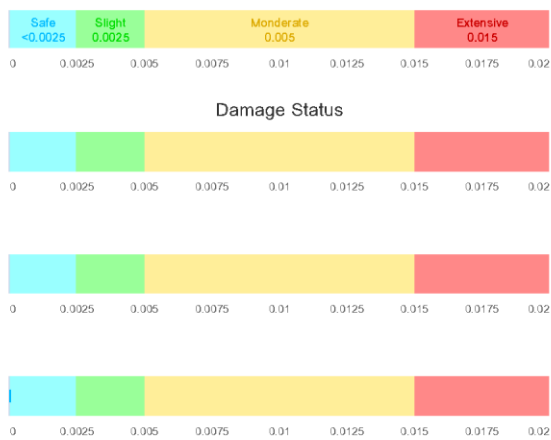
Damage Status



Safe

2021/09/13_18:42:55 Intensity

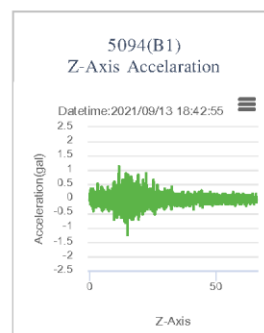
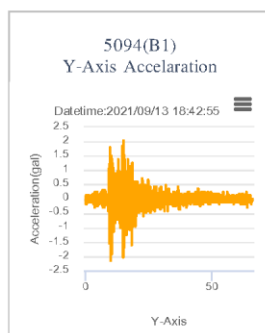
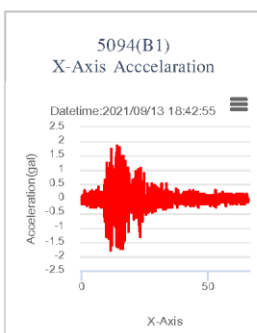
2



Drift Ratio	6.75062e-05
Abs disp.	0.0614327 cm
Rel disp.	0.0270025 cm

Project	
Event Time	2021/09/13 18:42:55
Station Code	5094
Record Length(sec)	66.00
Sampling Rate(Hz)	100

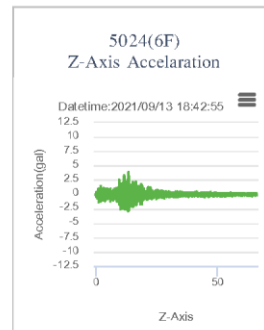
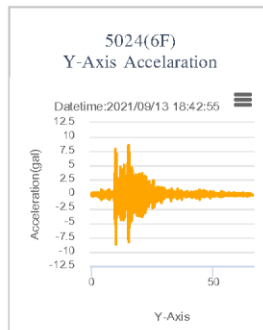
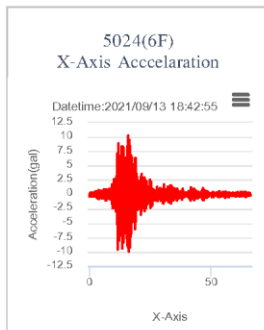
Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	1.136 ~ -1.256
Amplitude MAX - Radial(x)	1.854 ~ -1.794
Amplitude MAX - Transverse(y)	2.034 ~ -2.153
Intensity	2.0



附錄四

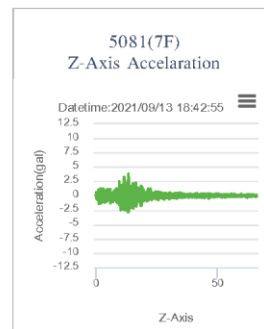
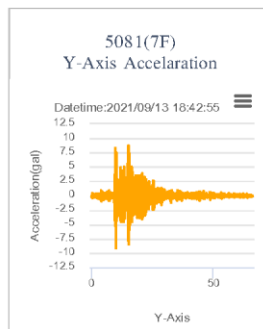
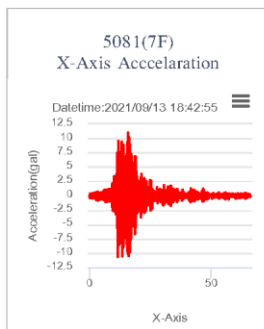
Project	
Event Time	2021/09/13 18:42:55
Station Code	5024
Record Length(sec)	66.00
Sampling Rate(Hz)	100

Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	3.888 ~ -2.931
Amplitude MAX - Radial(x)	10.228 ~ -9.929
Amplitude MAX - Transverse(y)	8.553 ~ -8.673
Intensity	3.0



Project	
Event Time	2021/09/13 18:42:55
Station Code	5081
Record Length(sec)	66.00
Sampling Rate(Hz)	100

Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	3.828 ~ -2.871
Amplitude MAX - Radial(x)	11.006 ~ -10.647
Amplitude MAX - Transverse(y)	8.553 ~ -8.673
Intensity	3.0



HAZUS REPORT

REPORT TIME: 2021/10/24 13:12:52

Pair	Height	Relative Displacement	Absolute Displacement	Average Drift Ratio
0_1	3075	0.2532000	0.8355000	0.0000823
0_2	3475	0.2623000	0.9504000	0.0000755
1_2	400	0.1402000	0.9582000	0.0003510

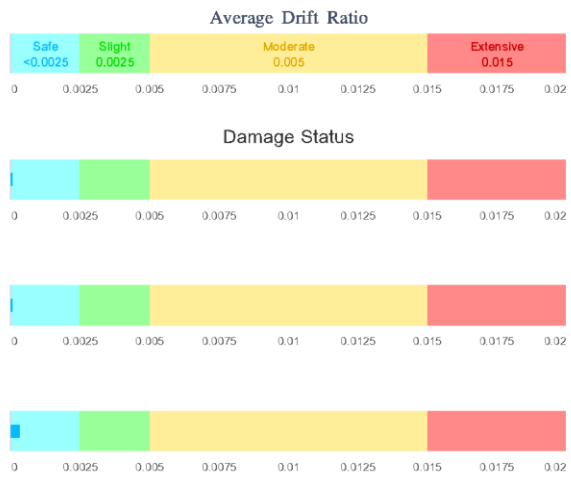
Damage Status



Safe

2021/10/24 13:11:48 Intensity

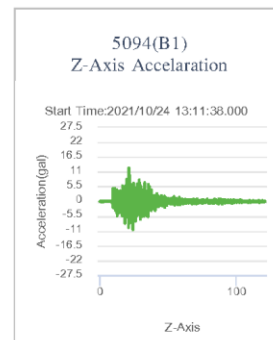
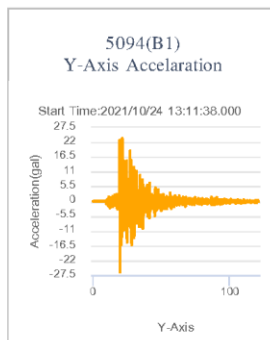
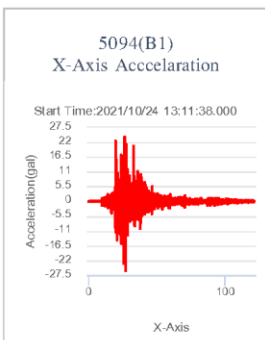
4



Drift Ratio	0.0003510
Abs disp.	0.9582000 cm
Rel disp.	0.1402000 cm

Project	
Start Time	2021/10/24 13:11:38.000
Station Code	5094
Record Length(sec)	121.00
Sampling Rate(Hz)	100

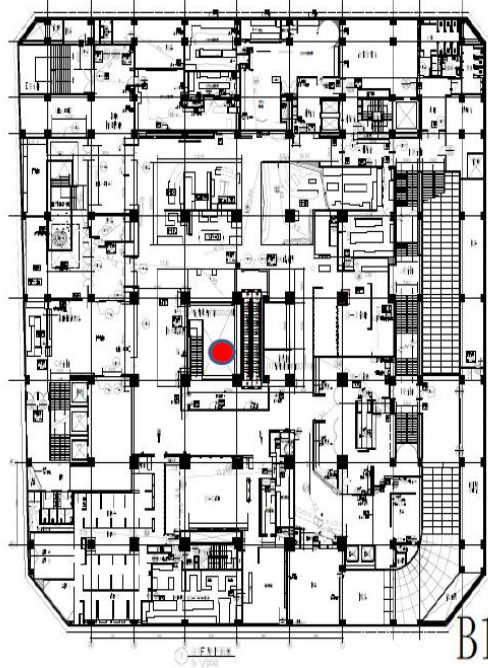
Item	
Amplitude MAX - Vertical(z)	-10.527~ 12.501
Amplitude MAX - Radial(x)	-25.840~ 24.045
Amplitude MAX - Transverse(y)	-26.318~ 23.447
Intensity	4.0



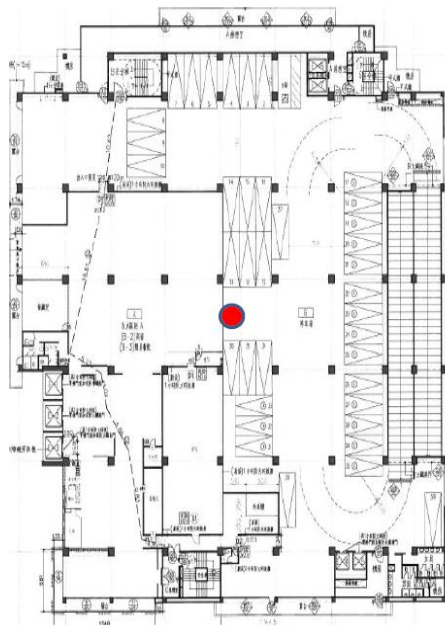
附錄四

(四)台中 00 商場地震記錄儀裝設點位圖

1. B1F 地震記錄儀裝設點位圖

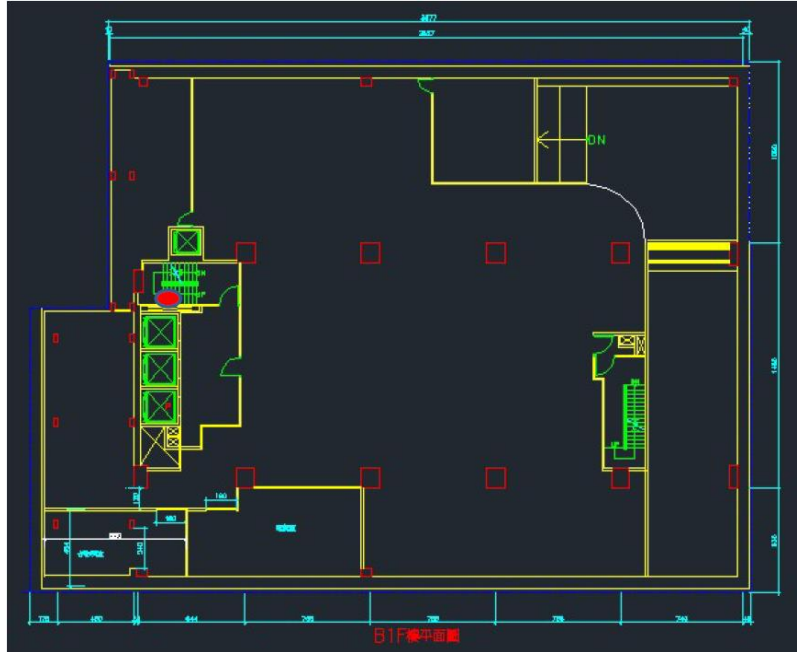


2. 7F、14F 地震記錄儀裝設點位圖



(五)高雄 00 飯店地震記錄儀裝設點位圖

1. B1F 地震記錄儀裝設點位圖



2. 9F、16F 地震記錄儀裝設點位圖

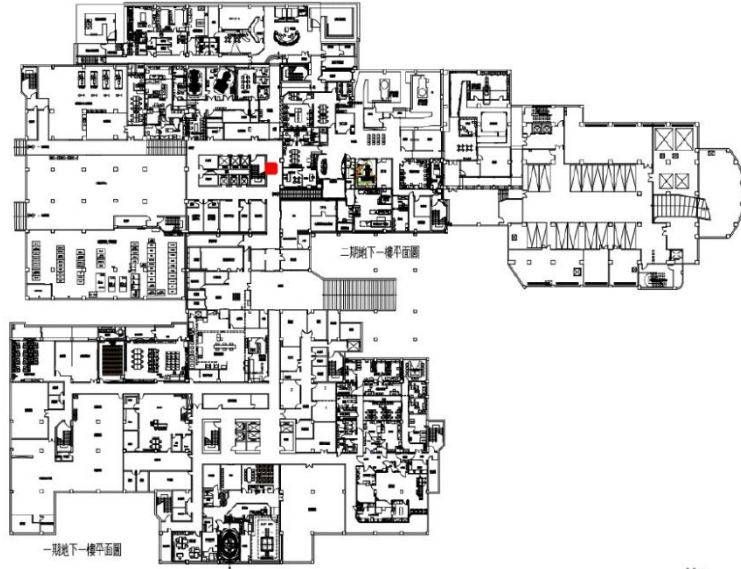
9F/16F天花板點位 ●
16F主機位置 ●



附錄四

00 醫院醫療大樓地震記錄儀裝設點位圖

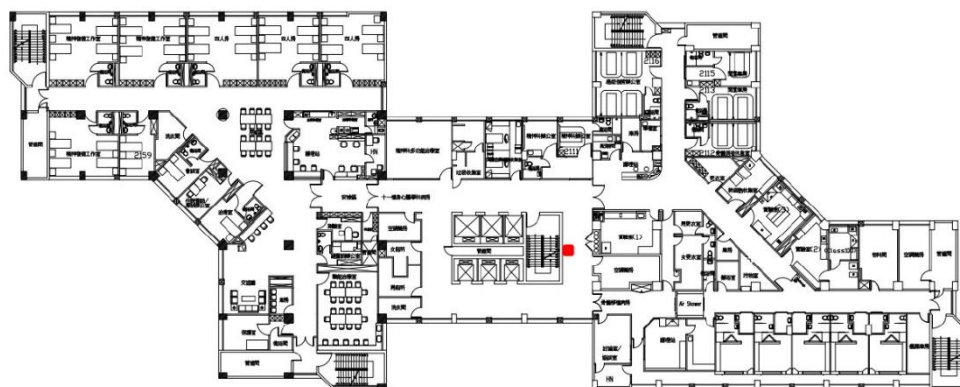
1. B1F 地震記錄儀裝設點位圖



2. 7F 地震記錄儀裝設點位圖



3. 11F 地震記錄儀裝設點位圖



二期十一樓平面圖

附錄五

附錄五 成果說明會

1. 活動日期：110年11月30日(二)
2. 活動時間：09:20 ~ 12:20
3. 活動地點：線上活動
4. 活動簡易說明：本次成果說明會計有122人次之建築業界、建築師、專業技師、學界等人士參與交流及討論，提出未來應先將公有建物納入監測範圍再行推廣並將私人建物納入公安申報體系中及新建物於法令規定範圍內設置地震儀且舊有建物於補助耐震補強計畫中納入強制要求設置等，將供修訂本案研究成果之參採，相關研究議題之建議，亦供本所未來建築耐震研究課題規劃之參考。
5. 活動海報：

「應用AIoT技術進行建築物安全耐震能力評估檢查」案 成果說明會

一、緣起 在台灣地震頻繁，而IoT與AI技術日趨成熟邁入應用階段，如能結合相關技術，自動蒐集建築物在地震前後的結構相關數據，同時自動快速評估可能發生問題的建物，協助用戶或管理單位進行事前準備、災後快速反應及復原措施的參考，將可以智慧化的技術保障人民生命財產安全，打造安居樂業的智慧城市。

二、議程

活動時間：
110年11月30日(二)
上午 9:00 ~ 12:30

活動地點：
採用線上會議形式辦理

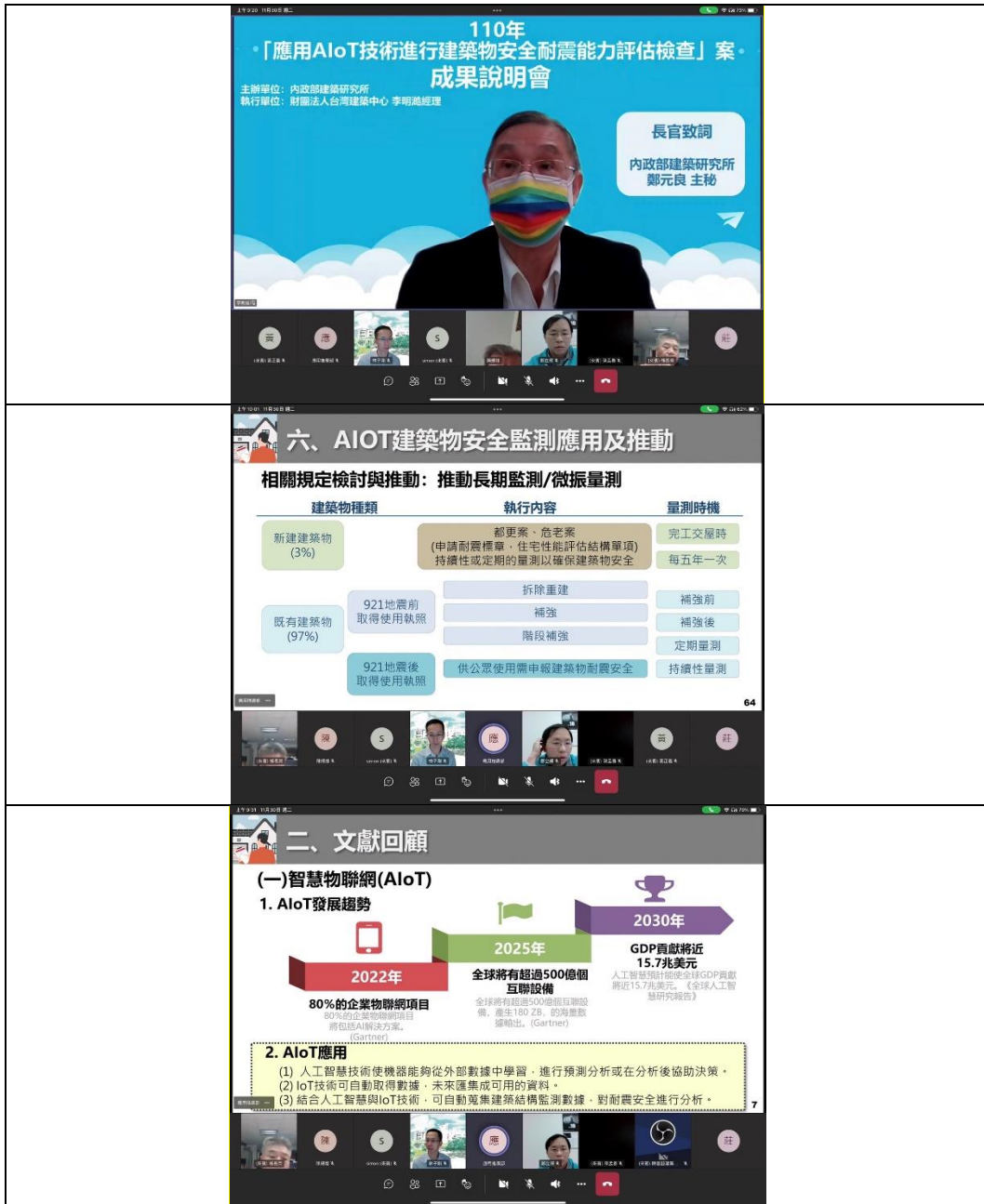
報名網址：
<https://forms.gle/WQjGjVL4U2pi31ap9>

報名截止： 110年11月29日

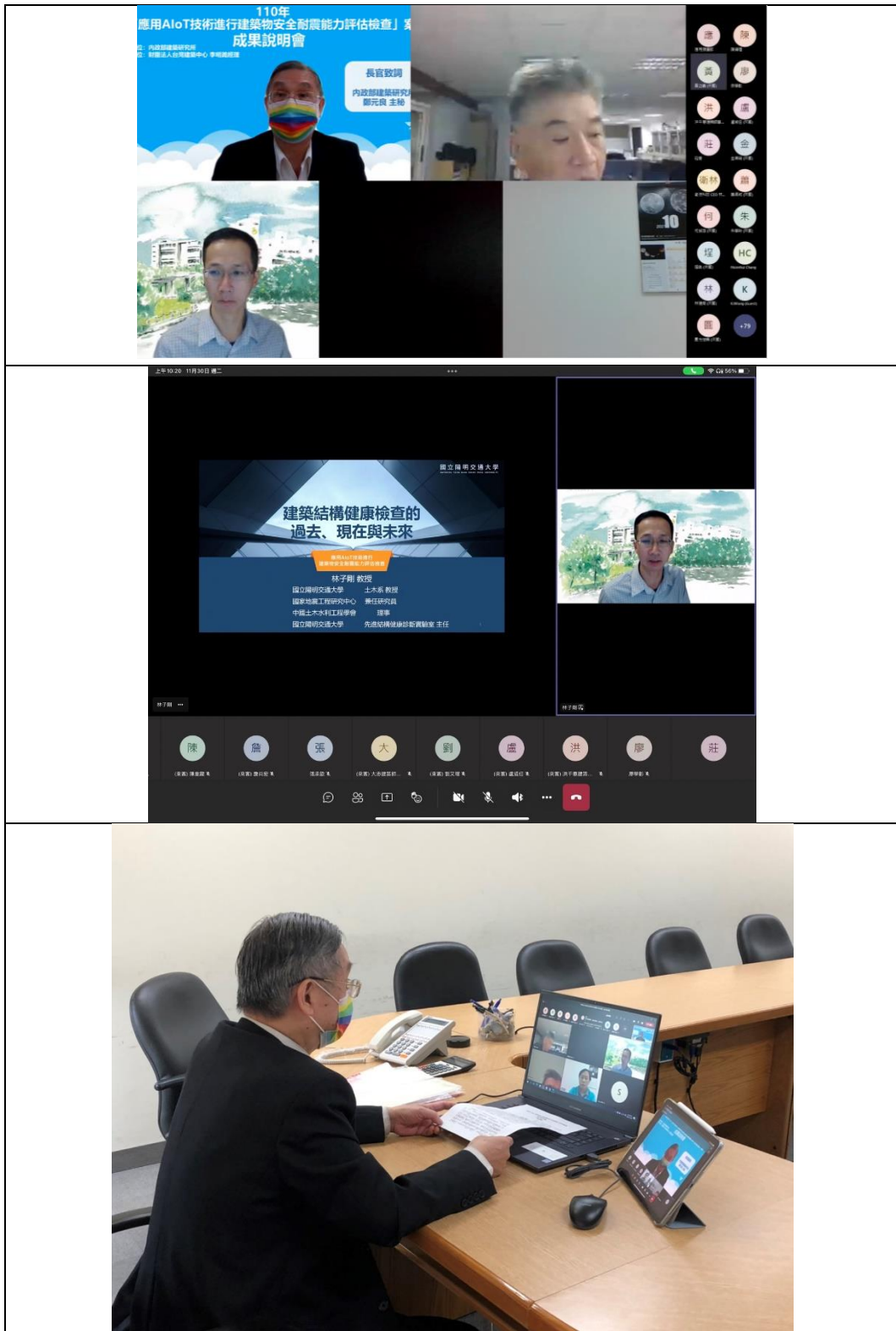
時間	議題	主講人
09:00~09:10	報到	
09:10~09:20	開幕及長官致詞	
09:20~10:20	「應用AIoT技術進行建築物安全結構自動監測」概況	台灣建築中心 李明淵 經理 衛波科技 林沛聰 負責人
10:20~11:20	建築結構健康檢查的過去、現在與未來	國立陽明交通大學 林子剛 教授
11:20~12:20	建築結構自動監測案例分享-樹林藝文中心為例	新北市政府新工處 陳立輝 副處長
12:20~12:30	綜合討論	台灣建築中心 李明淵 經理 衛波科技 林沛聰 負責人
12:30	散會	

主辦單位：內政部建築研究所 執行單位：財團法人台灣建築中心 李明淵經理

6. 活動截圖：



附錄五



7. 活動簡報：



「應用AIoT技術進行建築物安全結構自動監測」概述

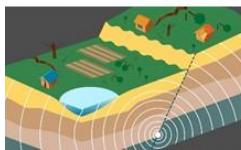


內政部建築研究所協同研究報告
台灣建築中心AIoT耐震評估團隊李明濤
中華民國110年11月30日

1

目錄 大綱

- 一 研究緣起與目的
- 二 文獻回顧
- 三 研究理論與方法
- 四 場域驗證
- 五 量測標準作業流程建立
- 六 AIOT建築物安全監測應用及推動
- 七 結論與建議





一、研究緣起與目的

2



一、研究緣起與目的

(一) 研究緣起

在台灣地震頻繁，同時IoT與AI技術日趨成熟邁入應用階段，如能結合IoT與AI技術，自動蒐集建築物在地震前後的結構相關數據，同時自動快速評估可能發生問題的建物，協助用戶或管理單位進行事前準備，及災後快速反應及復原措施的參考，將可以智慧化的技術保障人民生命財產安全，打造安居樂業的智慧城市。



1986年 花蓮地震



1999年 南投集集921大地震



1999年 南投集集921大地震



105年2月6日美濃大地震，造成台南市永康區維冠大樓倒塌，共115人罹難



107年2月6日花蓮地震造成雲門翠堤大樓倒塌造成大樓內14人死亡，花蓮地檢署認為設計不良與偷工減料是倒塌主因。

3



一、研究緣起與目的

(二) 研究目的

- 1. 以實證場域進行AloT地震長期監測及微振量測**
AloT建築物安全監測數值蒐集及通報流程之設置建議研究，將以實證場域進行AloT地震長期監測及微振量測，並建立監測數據蒐集格式與通報流程之建議。
- 2. 減少建築結構檢查所需人力，提升資料蒐集頻率及震後反應速度。**
確認AloT技術進行耐震能力評估檢查之應用範疇探討AI智慧及IoT技術進行耐震能力評估檢查之應用範疇，減少建築結構檢查所需人力，提升資料蒐集頻率及震後反應速度。
- 3. AloT長期監測可達到震前預報、震中紀錄、震後分析等效益。**
震前透過網路連線地震警報器進行地震預警，震中自動紀錄震時建物數據，震後運用AloT對結構監測結果進行評估，減少檢查人力，補強平時動檢的頻率。
- 4. 推動AloT技術推動與普及，擴大整體效益。**
推動AloT技術進行建築物安全耐震能力評估普及化應用IoT與AI技術與地震記錄儀自動蒐集數據與節省專業人力的效益，希望能進一步將相關技術推動與普及，擴大整體效益。

4



一、研究緣起與目的

(三) 研究流程

- 1. 文獻回顧/資料調查蒐集**
彙整建築物結構安全監測之研究資料，了解可行的建築結構監測與分析方式，並探討AI智慧及IoT技術結合結構監測與分析之應用範疇。
- 2. 實證場域監測數據蒐集分析**
 - 1) 長期監測：**裝設地震記錄儀監測地震發生時建築物結構加速度、位移等數據了解建築耐震狀況
 - 2) 微振量測：**於地震前後分別進行微振量測，比較數據。
- 3. 推廣方式探討與建議**
 - 1) 政策面：**探討目前耐震相關監測規定是否可補充，增加應用AloT方式作為另一個監測選項。
 - 2) 宣導面：**利用循環經濟探討具有財務可行性的方式，降低推動時的阻力。



5



二、文獻回顧

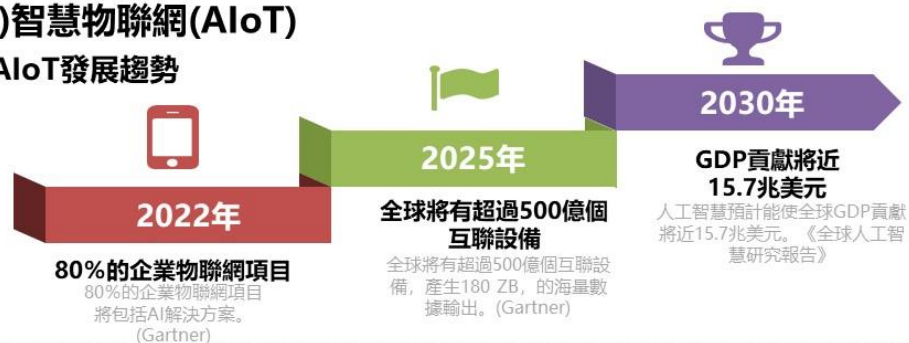
6



二、文獻回顧

(一)智慧物聯網(AIoT)

1. AIoT發展趨勢



2. AIoT應用

- (1) 人工智慧技術使機器能夠從外部數據中學習，進行預測分析或在分析後協助決策。
- (2) IoT技術可自動取得數據，未來匯集成可用的資料。
- (3) 結合人工智慧與IoT技術，可自動蒐集建築結構監測數據，對耐震安全進行分析。

7



二、文獻回顧

(二) 微振量測

1. 結構系統識別

若將結構物視為一個獨立系統，即可利用結構動力與結構矩陣等理論建立其等效之簡易數學模型。

系統識別為利用輸入訊號與輸出訊號之間的關係推演其等效的數值模型進而得到此結構物系統的模態參數。

2. 模型更新

模型更新是一種調整結構模型中所使用之參數以呈現該結構最新狀態的方法，透過處理結構的靜態或動態測量來獲得更新之參數，隨後更新後的模型將呈現結構的當前性能，以便更詳細地調查與探究整個結構系統，甚至可以定位結構損壞位置。

3. 隨機子空間系統識別

建立結構模型的過程中，系統識別技術扮演著重要的角色。

Van Overschee與De Moor在1991年提出的隨機子空間系統識別利用延伸可觀測性來推導模態參數，並成為目前最可靠之識別方法之一。

8



二、文獻回顧

(三) 長期監測

1. 熵分析

(1) 取樣熵(Sample Entropy, SampEn)

在分析時間序列方面，提供了各種參數調整之選擇，如樣板長度、訊號取樣長度，以及閾值，取樣熵在計算結果有更佳的一致性(relative consistency)，

(2) 多尺度熵(MSE)

藉由變更時間序列訊號之尺度，將只能適應單調系統之單尺度近似熵與取樣熵經由粗粒化的演算程序，轉為適應各種不同訊號之多尺度熵，可提升熵值對於不同訊號之準確性。

(3) 交叉取樣熵(Cross-Sample Entropy)

將熵發展為能夠表示訊號間之異步性(dissimilarity)以及非同步程度(asynchrony)，概念為當一時序訊號相較另一時序訊號有高之同步程度時，其交叉取樣熵值，會呈現較低之狀態，這意味著訊號之相似性與熵值關係密不可分。

(4) 複合多尺度熵(Composite multiscale entropy, CMSE)

Wu等人將過去在尺度因子很大時造成粗粒化後的時間序列訊號有熵值不穩定及不準確之問題改善。Yin等人於2016年提出CMSE，將複合多尺度與交叉熵結合，提升準確性

9



二、文獻回顧

(三) 長期監測

2. 建築特性與層間變位比

(1) 加速度量測

目前大部分的建築物監測系統，多使用量測加速度的方式，因其易於裝設，並提供穩定且可靠的量測資訊，產品眾多且價格合理。但加速度計應用於位移的量測亦有缺點，主要因為積分會造成基線漂移(baseline offsets)的問題。

(2) 接觸式的相對位移量測

方式有利用位移計(linear variable differential transducer, LVDT)和laser Doppler vibrometer (LDV)的技術，因須額外架設支撐構架，具有費用昂貴、安裝困難、佔據空間等缺點，導致實務上使用是有限的。

(3) 數位影像量測

數位影像量測層間變位的優勢在於位移的低頻訊號可以準確量測，補足加速度量測的不足之處。近期有雙監視器量測層間變位、去除相機旋轉效應造成之量測誤差、智慧單相機震後快速安全診斷系統等技術。

10

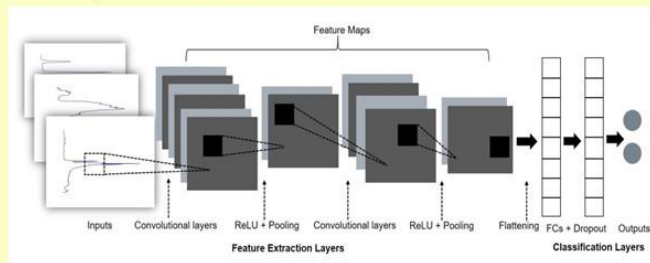


二、文獻回顧

(四) 採用人工智慧之結構物快速評估

1. 卷積神經網路(CNN · convolutional neural network)

為近幾年機器學習與深度學習(deep learning)發展的核心。其優勢在於深度的網路架構可以取代傳統結構健康監測中複雜的特徵選取(feature selection)。以數據驅動(data driven)模型學習並歸納出正確率最高的參數。



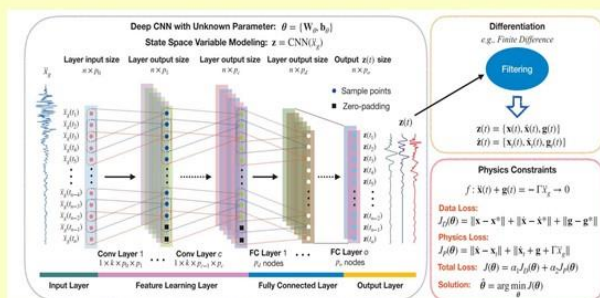
11

二、文獻回顧

(四)採用人工智慧之結構物快速評估

2.物理法則之CNN(PhyCNN)

可以準確且有效地預測結構的非線性動力歷時以及構件的遲滯反應外，更可以降低所需的訓練集並增加CNN模型的物理解釋性。



12

二、文獻回顧

(四)採用人工智慧之結構物快速評估

2.物理法則之CNN(PhyCNN)

- 1) 透過前述PhyCNN，不須大量訓練集依舊能達到一定的準確性。
- 2) 此一方法所預測之結果可與前述章節所提之熵分析作驗證。
- 3) 訓練完成之CNN模型僅需將新量測之地震紀錄輸入即可立即評估結構的安全性，可以達成真正的即時反饋(real-time feedback)。
- 4) 本研究為一示範案例，後續可針對區域範圍內多棟建物進行地震儀安裝與監測來強化數據集。一旦區域內具有代表性的建築與場址都納入訓練集後，便可以再次透過機器學習(如k平均數叢聚分析)來推測周遭所有房屋的受震反應與健康狀況。
- 5) 本研究可以此作為橋梁來連接物聯網、大數據及結構安全監測並提升都市耐震性。

13



14



(一) 微振量測方法

1. 隨機子空間識別法

利用隨機子空間識別法，將結構物量測之振動訊號識別其模態頻率、模態阻尼及模態形狀等動態參數。

(1) 方程式

考慮一個 n 維自由度之物理系統，該物理系統由透過彈簧及阻尼連接之質量組成。

$$M\ddot{x}(t) + C_1\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) = B_1u(t)$$

$x(t) \in R^{n \times 1}$ 為在連續時間 t 時之位移向量

$M, C_1, K \in R^{n \times n}$ 為質量、阻尼及勁度矩陣；

在時間函數上的點表示為時間之導數

$f(t) \in R^n$ 為激發力，可用 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量與轉換矩陣 $B_1 \in R^{n \times m}$ 表示，亦即 m 個輸入的 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 向量根據轉換矩陣 $B_1 \in R^{n \times m}$ 所指定的自由度施加於該物理系統上。

15

三、研究理論與方法

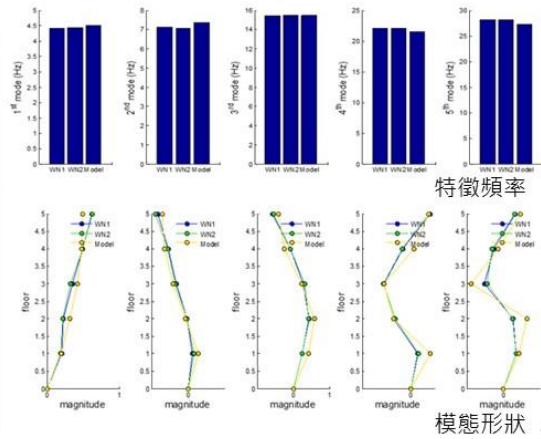
(一)微振量測方法

1.隨機子空間識別法

前述公式可識別得系統之 A 、 C ，再根據系統模態參數運算求得無阻尼之特徵頻率、阻尼比和模態形狀和模態參數如右圖。

(2)微振量測操作方式

- A. 取樣頻率：將訂為 200Hz，亦即使 Nyquist Frequency 為 100Hz 以涵蓋上述頻率範圍
- B. 量測時間：每次微振量測時間至少 2 分鐘。



模態形狀 16

三、研究理論與方法

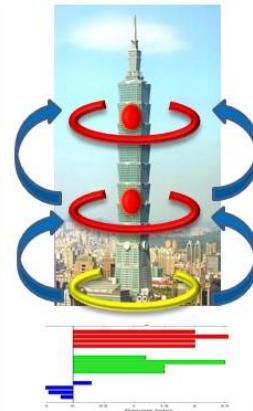
(二)長期震動預測結構反應

交叉取樣熵分析

本研究主要結合國家地震中心研究與交大林子剛老師的多尺度交叉取樣熵分析。透過結合多尺度熵、複合多尺度熵及複合多尺度交叉取樣熵，基於微振動反應之快速結構健康診斷系統，可針對結構平面破壞狀態與位置初步掃描及快速評估。

層間位移法

本研究同時透過台灣科技大學許丁友教授團隊所開發之層間位移法進行長期監測。根據建築結構系統、建築材料樓層高度、耐震設計等級等特性，客製化設定該建築損傷級別之門檻值並將地震發生時，各樓層所量測到之加速度紀錄進行適當之積分與濾波分析，得到各樓層之最大層間變位角 (Drift ratio)，進而判斷各樓層之損傷程度。



17



三、研究理論與方法

(三) AIoT導入方法

一、代理模型(surrogate model)

透過現場量測之數據搭配新近發展之人工智慧神經網絡，開發代理模型(surrogate model)來輔助結構物受震反應之快速預測

1. 所需之數據

三軸力平衡式加速度計紀錄之加速度歷時，當中以一樓數據作為該建築之輸入地震力時，其餘樓層數據作為結構反應來訓練神經網絡。

2. 數據傳輸方式

現場加速度計傳輸給現場主機(CUBE)後,透過外網上傳至雲端網路，再載至本地電腦進行使用。

18

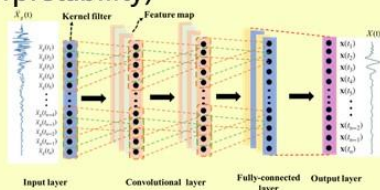


三、研究理論與方法

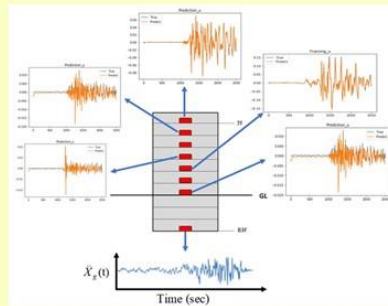
(三) AIoT導入方法

二、神經網路架構

本計畫之神經網路架構使用了捲積神經層(convolutional layer)進行自動化特徵的選取，並透過結構動力之運動方程式約束並強化所選取參數的物理意義與解釋性(interpretability)。



本計畫所訓練之神經網路架構



本計畫欲導入AIOT之成果

19

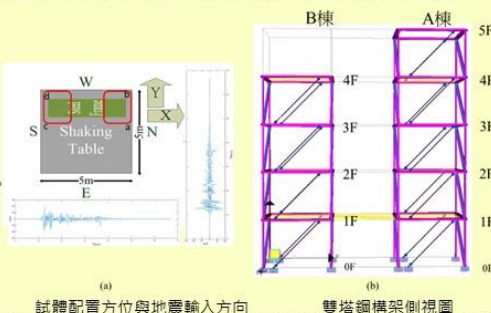
三、研究理論與方法

(三) AIoT導入方法

三、AI輔助預測結構受震反應之可行性

本計畫利用國家地震工程研究中心過往完成之振動台實驗數據來訓練上述之深度神經網絡。

1. **實驗試體** 結合一棟五層以及一棟四層樓之鋼構抗彎構架。
2. **量測的數據** 每層樓兩台加速度規所紀錄之樓層加速度以及在北側每層樓兩台雷射位移計所紀錄之樓層位移。
3. **輸入地震歷時** 以真實地震紀錄，由小至大依序將PGA調整為50gal、200gal、300gal、400gal、500gal及800gal後輸入。



(a) 試體配置方位與地震輸入方向

(b) 雙塔鋼構架側視圖

20

三、研究理論與方法

(三) AIoT導入方法

四、AI訓練方式及成果

1. **神經網絡輸入**
振動台面加速度。
2. **神經網路輸出**
各樓層之加速度，並利用前述物理運動方程式預測樓層位移歷時。
3. **訓練方式**
每次訓練均會先由地表加速度預測樓層加速度與位移，此為一次前向傳遞。而後透過與實際量測數據之差進行後向傳遞來修正此次訓練之參數。一次訓練共有5000次前向與後向傳遞，在進行後向傳遞時所用之隨機梯度下降法(stochastic gradient descent)採用0.0001之學習率(learning rate)來搜尋可以最小化損失函數之參數。
4. **軟硬體設備**
使用TensorFlow深度學習架構及NVIDIA高階圖像顯示卡RTX2080來加速訓練。

21



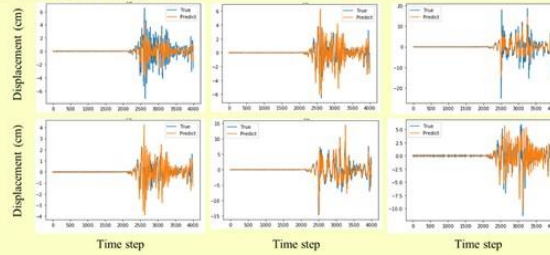
三、研究理論與方法

(三) AIoT導入方法

四、AI訓練成果

成果顯示可以利用AI從量測到之數據來預測結構反應進而可以減少結構在進行詳細評估時因為建模所花費的時間。

此模型僅考慮一個地震事件(1940年El Centro地震紀錄)，且也僅適用於此鋼構試體，但結果確實顯示了可以利用AI從量測到之數據來預測結構反應，進而可以減少結構在進行詳細評估時因為建模所花費的時間。



神經網絡預測之樓層位移與實際位移比較



四、場域驗證

四、場域驗證

(一) 實證場域選擇

1. 本研究實證場域

- (1) 場域案名：宜蘭礁溪OO飯店
- (2) 使用用途：旅館
- (3) 建築區位：宜蘭縣礁溪鄉
- (4) 建築規模：地下3層，地上7層
- (5) 構造類型：混凝土（含鋼筋混凝土）構造
- (6) 是否有挑高樓層：有

2.(台建補充)長期監測資料案例

編號	案例	安裝位置(樓層、數量)
1	臺北市OO住宅	B4F(3)、2F(1)、7F(3)、10F(1)、14F(3)
2	新北市OO住宅	B1F(1)、10F(1)、20F(1)
3	新北市OO行政中心	B1F(1)、6F(2)、7F(1)
4	台中市OO商場	B1F(1)、7F(1)、14F(1)
5	高雄市OO飯店	B1F(1)、9F(1)、16F(1)
6	花蓮市OO醫院	B1F(1)、7F(2)、11F(1)

24

四、場域驗證

(二) 安裝規劃

1. 長期持續監測設備

(1) Palert Plus網路型加速度地震儀

安裝配置於建築物地面層、中間樓層或結構特殊樓層、頂樓等實際測量地震。

- 儀器：三軸向微機電加速度計、支援第四垂直軸速度計
- 量測範圍：±2G
- 動態範圍：100 dB
- 輸出取樣率：50sps、100sps、200sps(可設定)
- 地震觸發邏輯：PD、PGA、STA/LTA

(2) 地震早期預警控制主機 PX-01

PX-01 為一多功能的資料處理與記錄器，適用於連接Palert地震P波感測儀，作為現地預警三取二架構中的地震判斷智慧控制器。

- 中央處理器(CPU): ARM1176JZF-S 700MHz
- RTC準確度: ±30 seconds / year, 支援NTP校正動態範圍: 100 dB



Palert Plus網路型加速度地震儀



地震早期預警控制主機 PX-01

25



四、場域驗證

(二)安裝規劃

2. 微振量測設備

AA222三軸力平衡式加速度計 (FBA) 。

設計應用於土木工程、結構物健康診斷、地震監測，與振動監測。配置於建築物地面層、中間樓層或結構特殊樓層、頂樓等，實際測量微振。

- 儀器：三軸力平衡式加速度計 (FBA) 。
- 量測範圍：0.5, 1, 2, 4g
- 靈敏度選擇：20, 10, 5, 2.5 V/g
- 動態範圍：> 150dB from 0.1Hz to 20Hz with 2g full scale



AA222三軸力平衡式加速度計 (FBA)



AA222配件

26

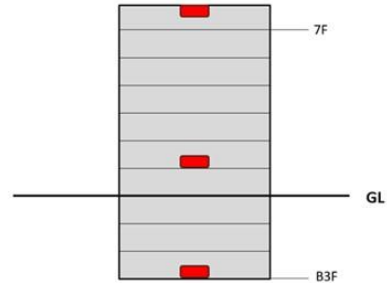


四、場域驗證

(三)設備安裝點位

1. 長期監測場域

- (1)場域：宜蘭礁溪OO飯店
- (2)位置：EPS1管道間分別配置地震儀1顆進行量測
B3地板
2F地板 (板挑高底層的樓板)
7樓天花板 (頂樓)



長期監測地震儀安裝點位示意圖

27

四、場域驗證

(三)設備安裝點位

1. 長期監測場域 (3) 施工照片



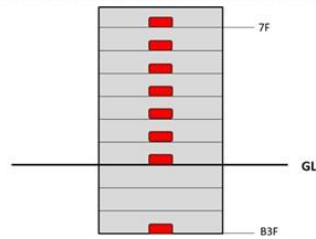
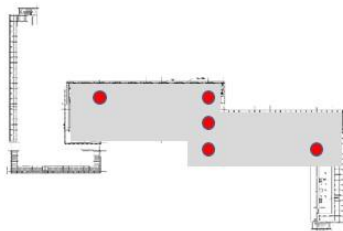
28

四、場域驗證

(三)設備安裝點位

2. 微振量測場域

- (1) 場域：宜蘭礁溪OO飯店
- (2) 水平位置：於頂樓分配三處進行量測
- (3) 垂直位置：於B3、1F~7樓各樓層分別配置進行量測



29

四、場域驗證

(三)設備安裝點位

2. 微振量測場域 (3) 施工照片



30

四、場域驗證

(四)偵測數據

1. 複合式地震速報資訊

(1) 第53號 110年7月7日 19時24分58秒

接收時間	縣市	鄉鎮市	來源
19:25:04.013	花蓮縣	花蓮市、新城鄉、吉安鄉、壽豐鄉、秀林鄉	國震中心
19:25:13.539	花蓮縣 南投縣	花蓮市、新城鄉、吉安鄉、壽豐鄉、秀林鄉 埔里鎮、魚池鄉、仁愛鄉	國震中心

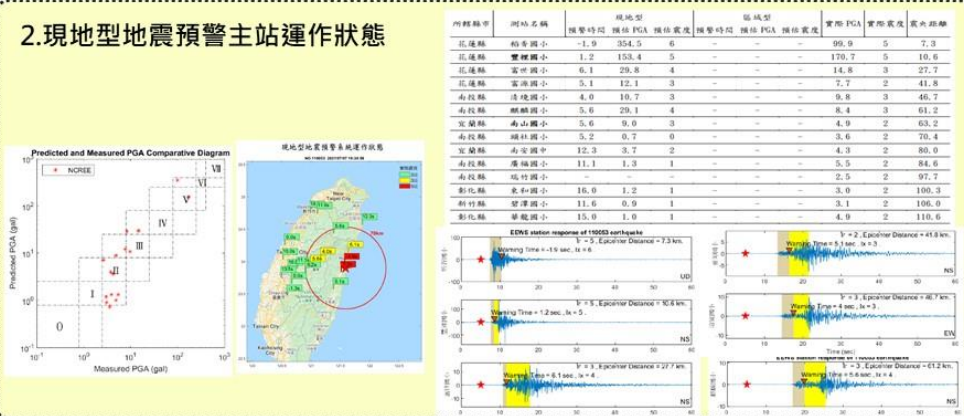


31

四、場域驗證

(四)偵測數據

2.現地型地震預警主站運作狀態



32

四、場域驗證

(五)量測成果

1.長期監測：基本資料及量測規劃

案件基本資料		量測規劃	
建築物名稱	○○飯店	量測系統啟用時間	110年6月0日0時
地址	宜蘭縣礁溪鄉○○路○○號	感測器類型	三軸向力平衡式加速度計
地號	○○段○○○○○號	感測器型號	感測器：PALERT PULS 轉錄器：PX-01
建築執照字號	○○○號	感測器固定方式	膨脹螺絲
建築物類別	民間	感測器配置樓層及數量	B3樓、2樓、7樓各1個，共3個
樓層	地上：7樓 地下：3樓	感測器配置圖說立面圖	
構造方式	鋼筋混凝土		
結構物外觀照片			

(示意圖，資料來源：臺北市政府安屋處組)

33

四、場域驗證

(五) 量測成果

1. 長期監測：量測規劃 (續)

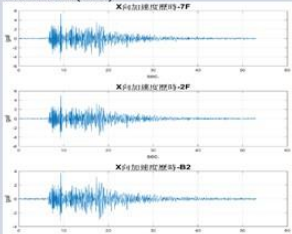
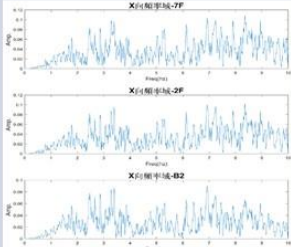
量測規劃			
感測器配置照片	B3底施工照片	2F底施工照片	7F頂施工照片
			

34

四、場域驗證

(五) 量測成果

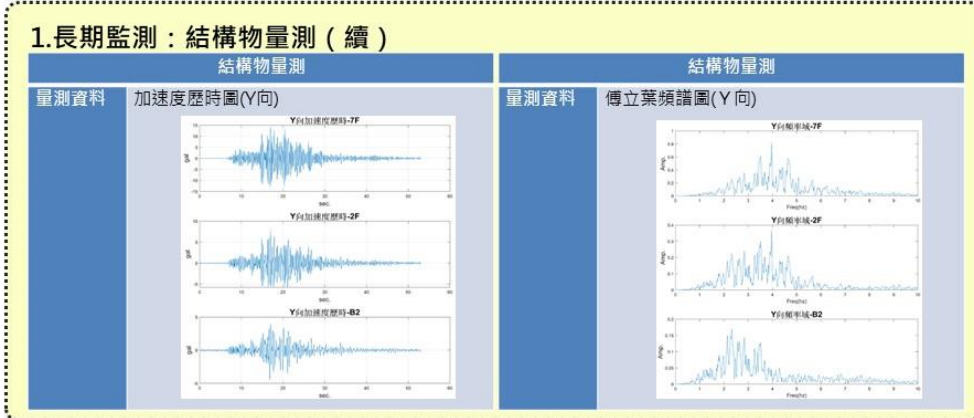
1. 長期監測：結構物量測

結構物量測		結構物量測	
地震事件資料		量測資料	傅立葉頻譜圖(X向)
時間	110年9月26日06:21:19		
量測資料	加速度歷時圖(X向)		
			

35

四、場域驗證

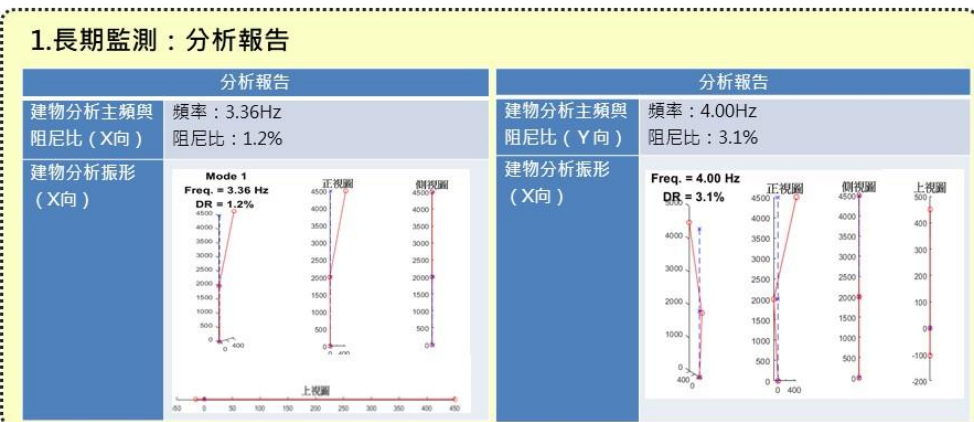
(五) 量測成果



36

四、場域驗證

(五) 量測成果



37

四、場域驗證

(五) 量測成果

2.微振量測：基本資料、量測規劃


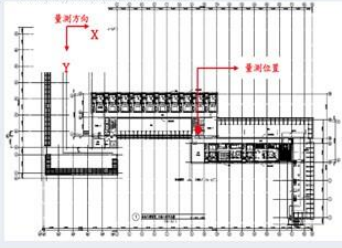
案件基本資料		量測規劃	
建築物名稱	○○飯店	量測時間	110年7月○○日○○時
地址	宜蘭市礁溪鄉○○路○○號	量測總筆數	2筆
地號	○○段○○○○○號	每筆量測時間	2分鐘
建築執照字號	○○○號	感測器類型	三軸向力平衡式加速度計
建築物類別	民間	感測器型號	感測器：Salien AA222 轉錄器：NI Compact Rio
樓層	地上：7樓 地下：3樓	感測器取樣頻率	200hz
構造方式	鋼筋混凝土		
結構外觀照片	 <p>(示意圖，資料來源：臺北市政府安居樂租組)</p>		

38

四、場域驗證

(五) 量測成果

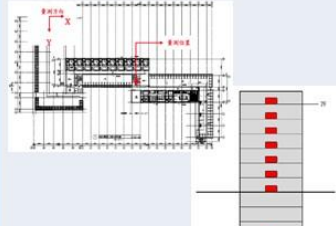
2.微振量測：正規化

量測訊號正規化		量測訊號正規化	
感測器固定方式	雙面膠	感測器配置照片	
感測器裝置位置與方向	<p>共7個固定於7樓樓梯間地板</p> 	感測器配置樓層及數量(垂直)	

39



四、場域驗證

(五) 量測成果

2.微振量測：垂直量測配置		垂直量測配置	
<p>垂直量測配置</p> <p>感測器固定方式：雙面膠</p> <p>感測器裝置位置與方向：8個固定於1~7樓樓梯間地板及B3樓</p> 		<p>感測器裝置照片</p> 	40

四、場域驗證

(五) 量測成果

2.微振量測：水平量測配置		水平量測配置	
<p>水平量測配置</p> <p>感測器固定方式：雙面膠</p> <p>感測器裝置位置與方向：共5個固定於頂樓地板</p> 		<p>感測器裝置照片</p> 	41

四、場域驗證

(五) 量測成果



四、場域驗證

(五) 量測成果



四、場域驗證

(五) 量測成果



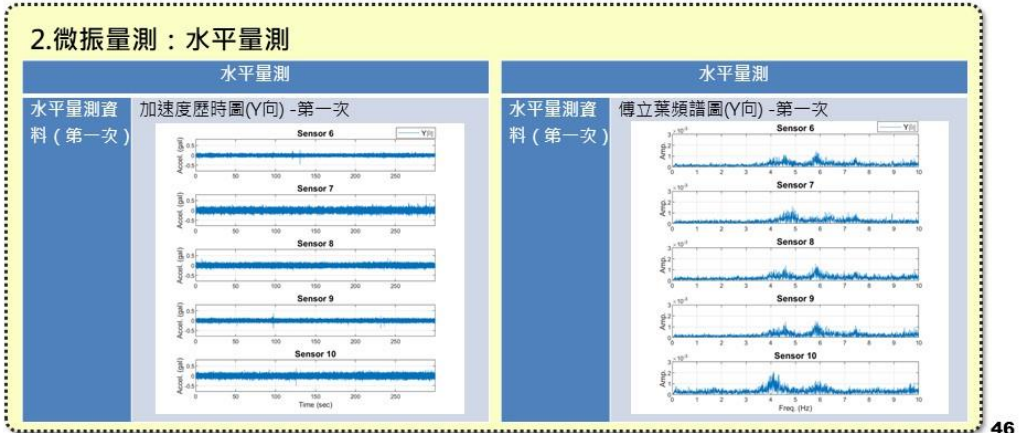
四、場域驗證

(五) 量測成果



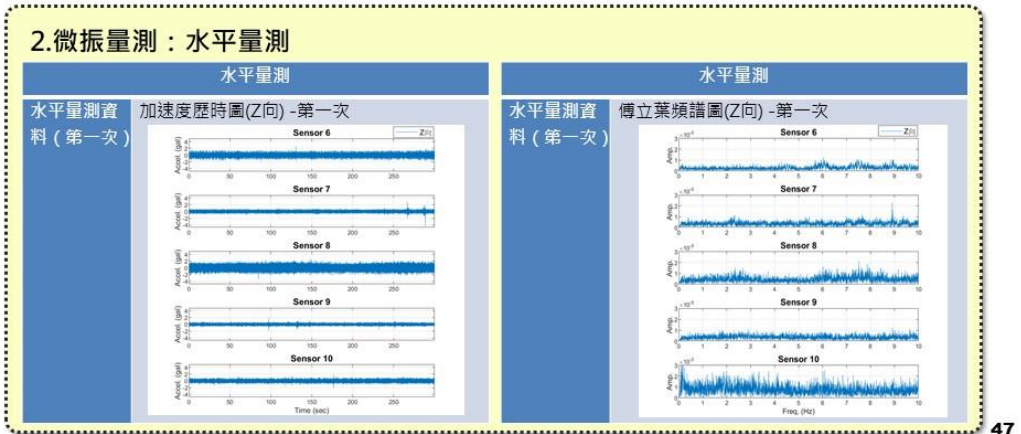
四、場域驗證

(五) 量測成果



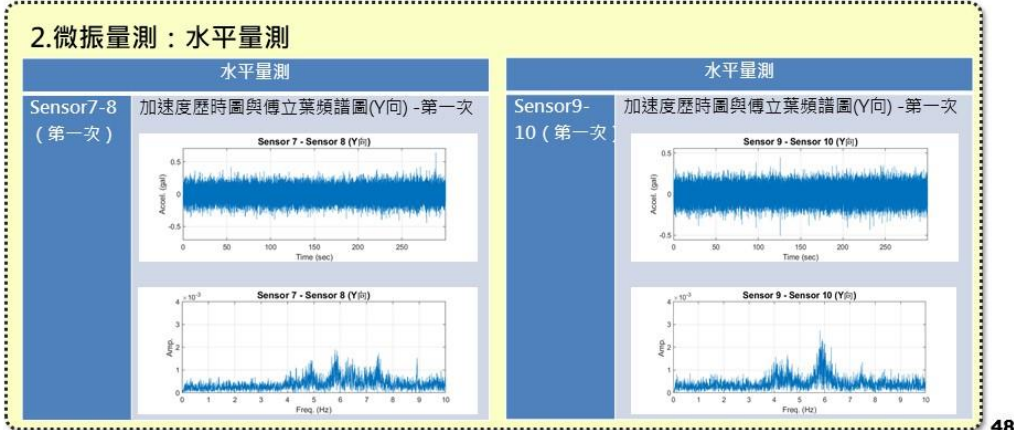
四、場域驗證

(五) 量測成果



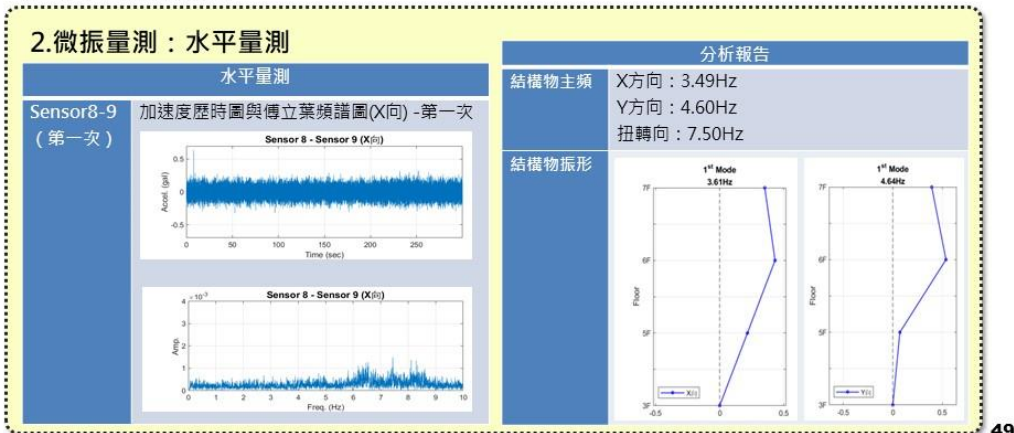
四、場域驗證

(五) 量測成果



四、場域驗證

(五) 量測成果

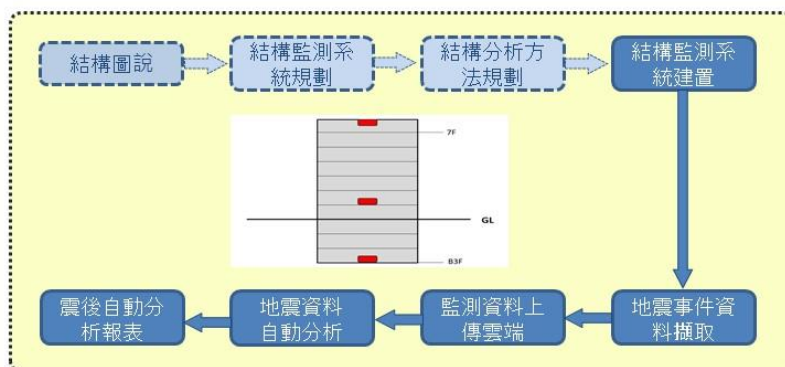


五、量測標準作業流程建立

50

五、量測標準作業流程建立

(一) 長期監測：作業流程

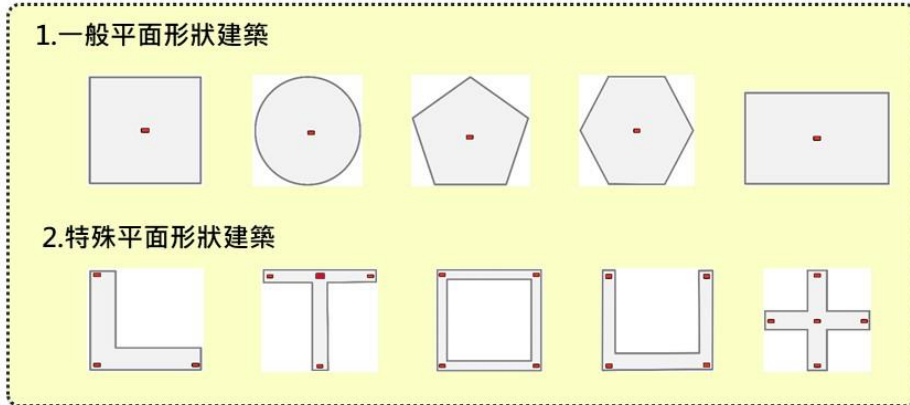


長期監測作業流程圖

51

五、量測標準作業流程建立

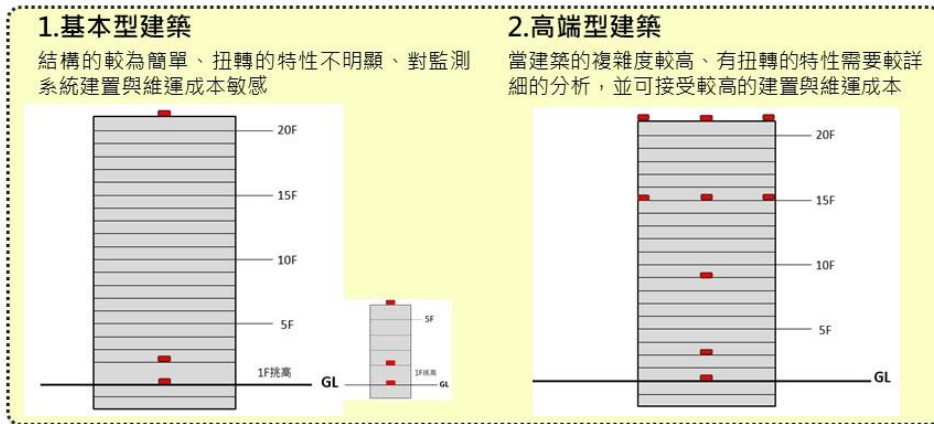
(二)長期監測：感測器建議平面配置



52

五、量測標準作業流程建立

(三)長期監測：感測器建議垂直配置



53

五、量測標準作業流程建立

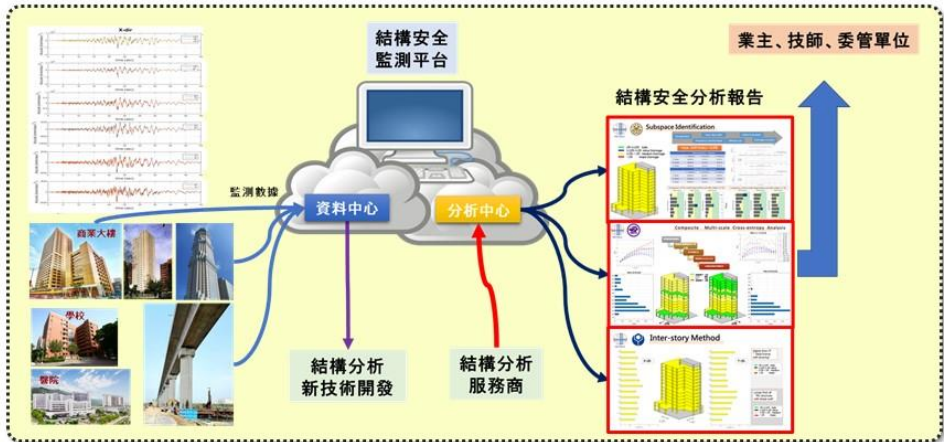
(四)長期監測：監測系統規格

1.基本型建築		2.高端型建築	
量測型式	三軸向微機電式 (MEMS) 加速度計	量測型式	三軸向力平衡式加速度計，或速度計
量測範圍	加速度計(±2g,±4g)	量測範圍	加速度計(±1g,±2g)
動態範圍	>100dB	動態範圍	>150dB
工作溫度	-20°C ~ +70°C (或以上)	工作溫度	-20°C ~ +70°C (或以上)
防水等級	IP67 (或以上)	防水等級	IP67 (或以上)
AD解析度	24位元	AD解析度	24位元
取樣率	200Hz	取樣率	200Hz
監測資料	地震事件 (二級以上)	監測資料	地震事件 (二級以上) 平時事件 (每日一筆)

54

五、量測標準作業流程建立

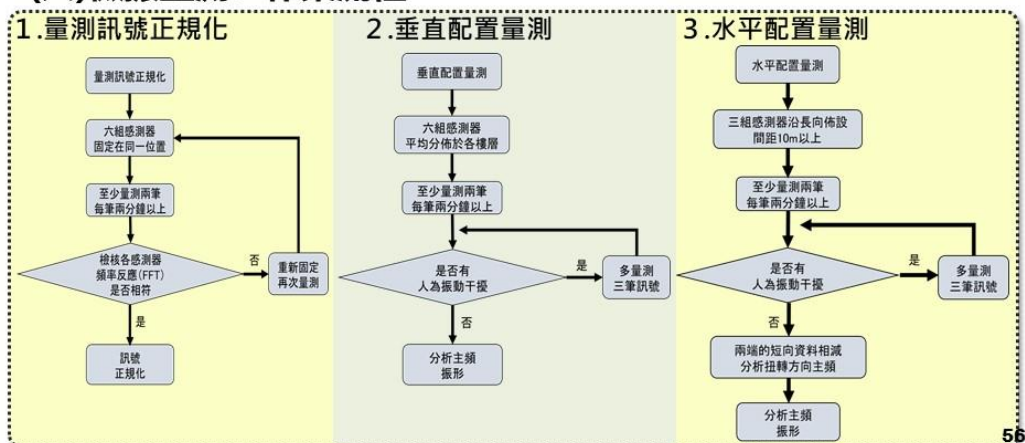
(五)長期監測：結構安全監測系統雲端服務



55

五、量測標準作業流程建立

(六)微振量測：作業流程



五、量測標準作業流程建立

(七)微振量測：量測系統規格

1. 量測系統規格

微振量測儀器所需要的靈敏度較高，建議採用以下類型及規格進行量測，以達到足夠的準確度。

量測型式	三軸向力平衡式加速度計或速度計
量測範圍	加速度計(±0.5g, ±1g) 速度計(±0.1m/s)
動態範圍	> 140dB
工作溫度	-20°C ~ +70°C (或以上)
防水等級	IP67 (或以上)
AD解析度	24位元
取樣率	200Hz



五、量測標準作業流程建立

(八)微振量測：量測訊號正規化

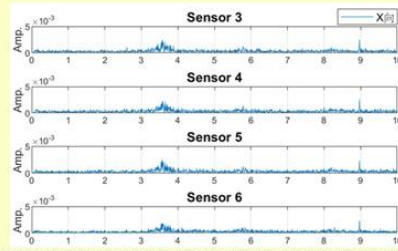
1. 感測器固定方式

- 1) 粗糙表面：建議使用蓋平石膏固定，並需確定石膏已經確實固化後（建議20分鐘以上），方可進行量測紀錄。
- 2) 光滑表面：建議使用雙面膠固定。雙面膠必須是薄型（厚度1mm以下）。



感測器固定方式(左為石膏、右為強力雙面膠)

2. 正規化後各量測訊號歷時



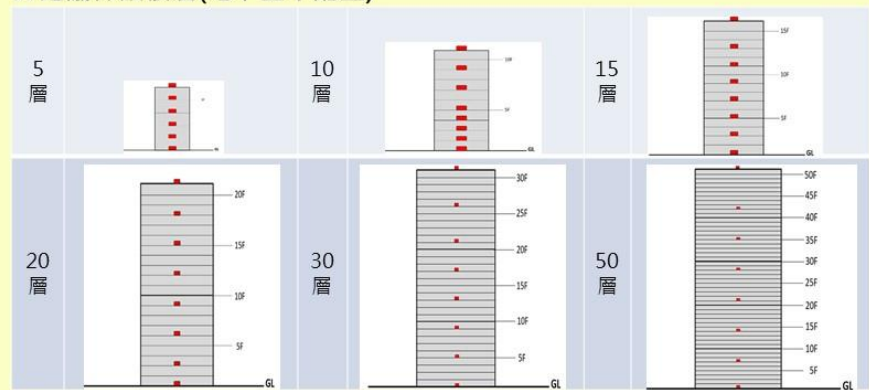
58



五、量測標準作業流程建立

(九)微振量測：垂直配置量測

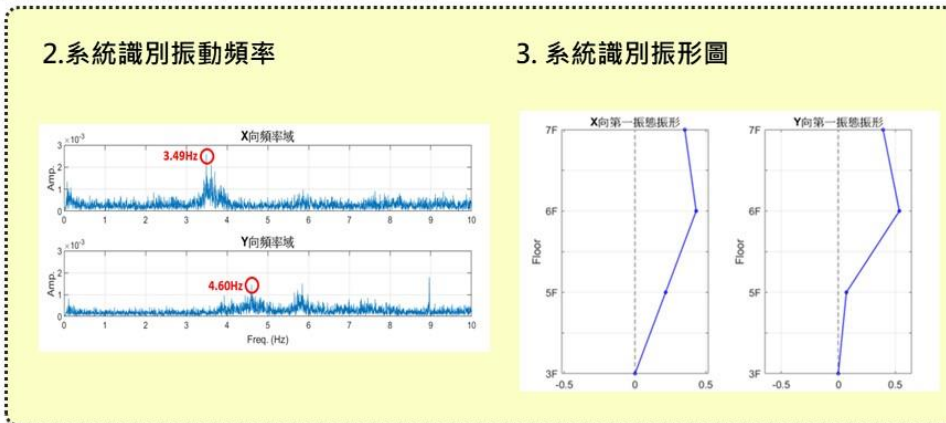
1. 建議佈設樓層(地下室不配置)



59

五、量測標準作業流程建立

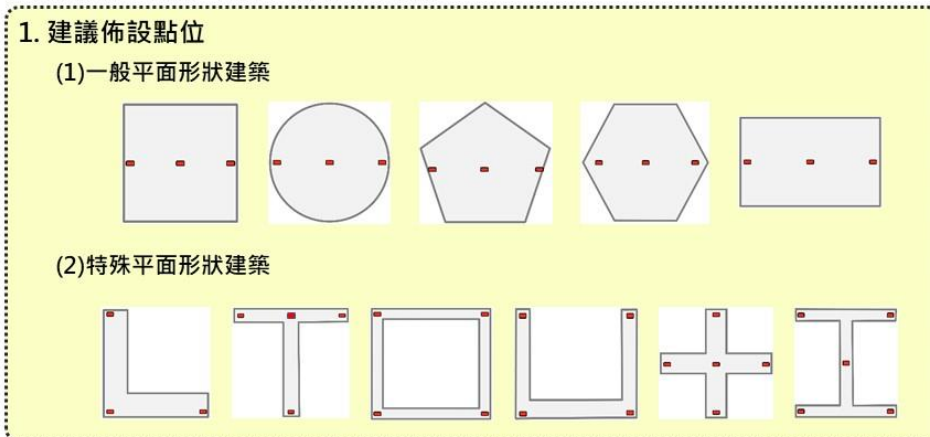
(九)微振量測：垂直配置量測



60

五、量測標準作業流程建立

(十)微振量測：水平配置量測



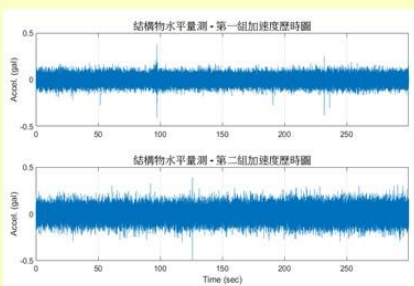
61



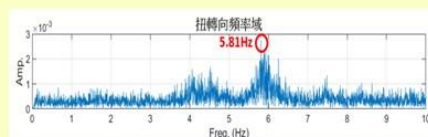
五、量測標準作業流程建立

(十)微振量測：水平配置量測

2.系統識別扭轉向之時間歷時圖



3.系統識別扭轉向振動頻率



62



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

63

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

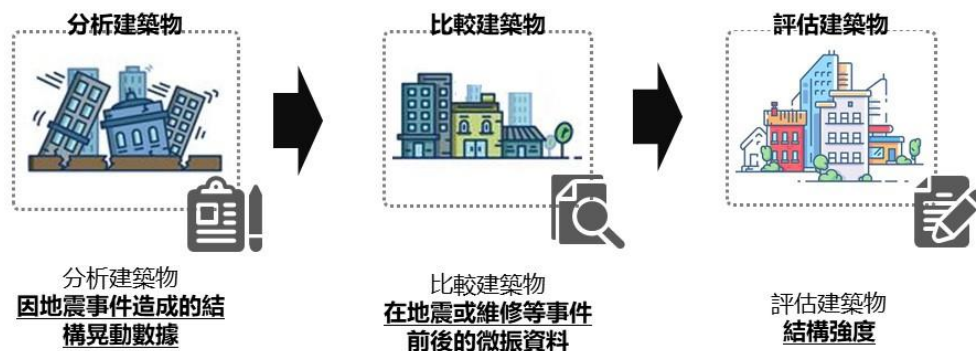
相關規定檢討與推動：推動長期監測/微振量測

建築物種類	執行內容	量測時機
新建建築物 (3%)	都更案、危老案 (申請耐震標章，住宅性能評估結構單項) 持續性或定期的量測以確保建築物安全	完工交屋時 每五年一次
既有建築物 (97%)	921地震前 取得使用執照	拆除重建 補強 階段補強
	921地震後 取得使用執照	供公眾使用需申報建築物耐震安全
		補強前 補強後 定期量測
		持續性量測

64

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式



65

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式

1. 建物長期監測應用



震前

預報與即時反應

利用其可連網的特性，可由該設備透過網路擷取來自中央氣象局地震速報網的即時地震速報訊息進行地震預警，而得到此地震預警時，另可將資訊聯繫到建築物設備，常見應用為自動連繫到電梯與天然氣的自動控制主機。



震中

震中記錄

地震儀記錄的數據除了可以即時提供管理單位做緊急應變之外，也將會累積至資料庫中作為個案與整體的數據分析。



震後

震後自動分析

高強度地震後AI自動分析建築物的監測數據，快速評估出數據異常的建築物交由專業技師進行進一步的檢測。

66

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式

2. 建物微振量測應用

方式一、“新建築完工”資料建置



方式二“施工前後結構”強度比較分析



67

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式

3. 維管端建置中控中心



中控系統架構初步規劃各建築物設置的地震儀，會將偵測到的數據經由Web API的服務，將數值回傳到中心端的建築物災損系統，系統依據檢核結果，在系統畫面上顯示狀態燈號及警示訊息。

系統架構概念圖

68

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

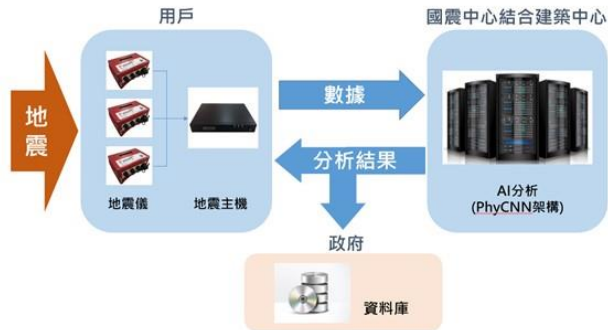
(一) AIoT建築物安全監測應用方式

4. 監測資訊傳遞流程

長期監測中所量測的數據，將透過IoT設備迅速於觀測端(用戶)、技術分析端與政府端間傳遞，並完成分析成為可用的資訊。

當一定震度以上的地震發生時，觀測端的地震儀將被觸發開始記錄，並透過地震主機傳遞至分析端，並將結果回傳給用戶，並可將資料提供給政府主管機關建置資料庫。

長期監測資訊傳遞流程



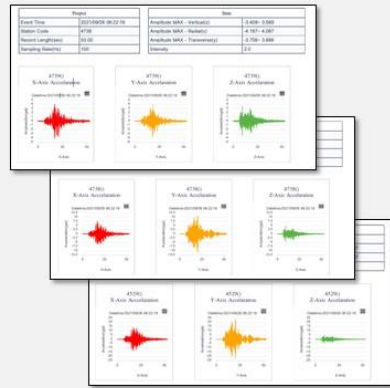
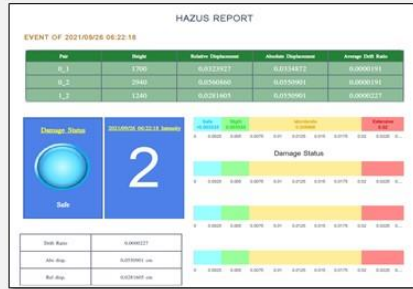
長期監測資訊傳遞流程圖

69

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式

5. 通報燈號



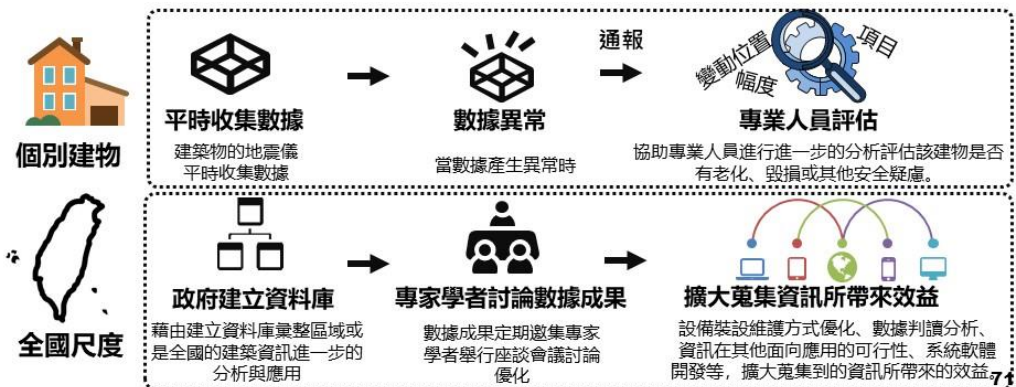
結構安全等級的判斷建議經過多種方法之驗證並由專家學者們訂定。

70

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(一) AIoT建築物安全監測應用方式

6. 資料庫建檔與數據應用說明





六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

1.「建築物耐震設計規範及解說」相關規定

目前已經有許多國家或地區，如紐西蘭、美國加州、菲律賓、印尼等，開始訂定相關法規，規定一定高度以上或特定用途的結構物必須裝置結構監測系統，記錄結構物的受震反應。

「建築物耐震設計規範及解說」第11.3條

「主管建築機關得依地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構之請，規定建築業主於建築物設計建造時，應配合留出適當空間，供地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構設置地震記錄儀 ... 興建完成之建築物需要設置地震儀者，得依照前項規定辦理。」

本研究如經主管建築機關同意，後續可據以推動，針對一定規模以上建築物安裝地震紀錄儀。

72



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

2.建築物公共安全相關規定

「建築法」第77條

建築物所有權人、使用人應維護建築物合法使用與其構造及設備安全。供公眾使用之建築物，應由建築物所有權人、使用人定期委託中央主管建築機關認可之專業機構或人員檢查簽證，其檢查簽證結果應向當地主管建築機關申報。
非供公眾使用之建築物，經內政部認有必要時亦同。

建築物公共安全檢查簽證及申報辦法

第3條 「建築物公共安全檢查申報範圍如下：一、防火避難設施及設備安全標準檢查二、耐震能力評估檢查。」

第7條 明定表演集會場館、交通站、商場、旅館、運動娛樂場館、學校、醫院、福利機構、照護安養機構、民宿長照等設施，樓地板面積累計達一千平方公尺以上，或經主管建築機關認定之建築物應辦理耐震能力評估檢查。

法規明定建築物所有權人、使用人應維護建築物構造安全。特定類型建築並應辦理耐震能力評估檢查。

73



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

3.耐震標章相關規定

內政部建築研究所於九十二年度完成「耐震標章」認證制度之設置工作。
財團法人台灣建築中心依據前述研究及「建築耐震設計規範與解說」等相關規定，訂定「耐震標章使用作業要點」。

「耐震標章使用作業要點」第3條第1項

「耐震標章」的選用，應能考量下列特點：(略)... (f) 保固期間，對於建築物之耐震性能有計劃的予以檢核與維護。

囿於設備及人力等現實因素，後續的檢核多未確實執行，無法了解建物在地震後是否有結構受損的狀況，亦無法即時採取維護措施。

74



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

4.耐震與容積獎勵相關規定

「都市更新建築容積獎勵辦法」第13條

「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」第6條

- (一)取得耐震設計標章：基準容積百分之十。
- (二)依住宅性能評估實施辦法辦理新建住宅性能評估之結構安全性能：
 - 1.第一級：基準容積百分之六。
 - 2.第二級：基準容積百分之四。
 - 3.第三級：基準容積百分之二。

「都市更新建築容積獎勵辦法」第18條

「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」第11條

申請上述耐震容積獎勵者，應與直轄市、縣(市)主管機關簽訂協議書。

協議書之內容多有要求建築物耐震維護管理計畫。

目前在維護管理計畫部分尚未有具體內容規範，建議可要求定期或在一定震度以上地震後進行結構安全檢測，確保建築結構安全，並將AIoT長期自動監測及微振量測等方式納入作為既有結構安全檢測方式外的選項

75



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

5.全國建築物耐震安檢暨輔導重建補強計畫

全國建築物耐震安檢暨輔導重建補強計畫

政府主動辦理大樓快篩措施、補助結構安全性能初步評估、補助結構安全性能詳細評估及補助老舊危險建築物辦理階段性補強措施。
初步評估後有安全疑慮的建築物，在等待整合全數區分所有權人意見進行全面性補強或拆除重建之前，可藉由補助老舊危險建築物辦理階段性補強措施提供短期緊急性之處理措施，降低倒塌風險。



進行階段性補強的建築物可在補強前、後進行微振量測，比較補強前後結構物的主頻、勁度，分析經過補強的位置是否在補強後真的有強化的效果

76



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(二)相關規定檢討與推動_政策面

建議行動方案：

耐震標章、住宅性能評估 (以新北市容積獎勵協議書範本為例)

- 1) 第六條規定繳交維護費用金額及方式
- 2) 第七條規定應提列**建築物耐震維護管理計畫**，內容包含費用、設備維護管理計畫等



加入地震監測及自動反應功能

長期地震監測

- (1) 藉長期地震監測快速了解建築物結構狀況。

地震速報瓦斯遮斷：

- (1) 連接複合式地震速報訊號，於接收地震速報訊號後2秒內啟動連動服務。

地震速報電梯自動連動控制：

- (1) 連接複合式地震速報訊號，於接收地震速報訊號後2秒內啟動連動控制服務，強制電梯收到警報時自動停至最近樓層、並開啟梯門。
- (2) 震後，若為強震，通知中控室以便災後巡檢。若為弱震，則自動復歸。

77



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(三) 相關規定檢討與推動_宣導面

1. 監測類型選擇

長期監測

- 可在地震發生時立即自動分析處理速度快。
- 不易在大型震災後受到專業人力短缺的影響。
- 設備及其配線施工等成本較高。

可在地震頻繁的區域推動

微振量測

- 可在特定工程或地震前後進行比較分析。
- 易在大型震災後受到專業人力短缺的影響。
- 無設備及其配線施工，成本較低。

可在地震頻率較低的區域推動

78



六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(三) 相關規定檢討與推動_宣導面

2. 設備費用支出

長期監測

設備安裝負擔相對較高

循環
經濟

採用租賃方式，無須一次性買斷設備降低進入門檻與財務負擔，且由設備商負責設備之維修管理，確保服務品質並免去維護人力。

微振量測

廠商攜設備至現場監測後提供數據

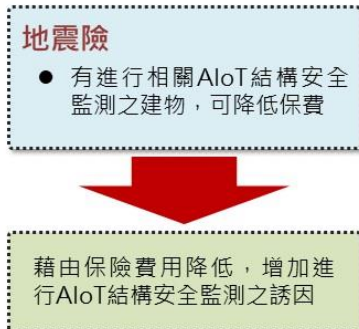
設備安裝及監測儀器由廠商提供，廠商可重複使用設備進行不同建物微振量測。

79

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(三) 相關規定檢討與推動_宣導面

3. 地震相關保險



項目	地震基本險	擴大地震險	輕損地震險
說明	投保「住宅火險及地震基本保險」即自動附加	必須先投保「住宅火險及地震基本保險」後才可加保	投保「住宅綜合保險」即涵蓋在內
承保事故	因地震或地震引起之火災、爆炸、山崩、地層下陷、滑動、崩裂、決口、海嘯、海潮高漲、洪水等	不保地震引起洪水導致之毀損，其餘承保事故與「地震基本險」相同。	不保地震引起洪水導致之毀損，其餘承保事故與「地震基本險」相同。
理賠認定	建築物全倒或半倒(鑑定全損)	因承保事故所致之損失(不受全倒或半倒限制)	同擴大地震險(實損實賠)
保險金額	建築物以重置成本計算，最高150萬元	建築物以重置成本、動產依實際價值計算。	動產及不動產合併計算，但有保額的限制
參考年保費	1,350元	以保額300萬元為例，保費5,000元以上	視各家保險公司報價

資料來源：華南產險

單位：新臺幣 製表：黃惠玲

資料來源：工商時報 黃惠玲 2021.04.25

80

六、AIOT建築物安全監測應用及推動

(三) 相關規定檢討與推動_宣導面

建議行動方案：

1. 針對防災用途建築物，社會住宅編列預算推動示範案例
 - 編列預算補助警政消防建築(防災用途)、社會住宅、校舍等推動示範案例
2. 推動降低地震險保費
 - 邀請住宅地震保險基金會研商，推動對安裝長期監測儀器或定期進行微振量測之建築物，降低地震險保費。
3. 辦理宣導說明會
 - 針對校園、相關技師及產業公會辦理說明會，推廣AIoT建築物安全監測

81



82



研究成果與結論

一、AIoT建築物結構自動監測與快速評估文獻整理

收集國內外AIoT技術進行建築物結構安全監測之資料，了解目前可行的建築結構監測與分析方式，並探討AI智慧及IoT技術結合結構監測與分析之應用範疇，減少監測時所需的人力。

二、建立實證場域，蒐集建物結構長期監測及微振量測數據

本研究於宜蘭縣新建立1個實證場域，安裝IoT長期監控所需設備，並進行微振量測。實際取得地震所得之監測數據，以及微振量測所得資料。彙整分析長期監控所得之監測數據，實證以AI分析建物結構狀態之可行性。

三、神經網絡之初步訓練結果，確實可以協助快速預測建物結構受震反應

1. 礙於數據不足，無法訓練出具普遍性的模型，應持續監測以取得更多的資料。
2. 結構安全等級的判斷需要經過多種方法之驗證並由專家學者們訂定。
3. 倘若單一房屋之監測技術能夠完善普及，將可以利用其觀測之數據來推估區域的結構反應，並建立區域安全網。

83



七、結論與建議

研究成果與結論

四、建置長期監測及微振量測之作業流程

本研究分別就建築物結構長期監測及微振量測之作業流程模式進行分析，就所需設備規格、安裝位置、量測方式、輸出資料形式等面向提出建議，並建置「長期監測紀錄表」與「微振量測紀錄表」兩種表單，供後續相關研究及推動作為依據。

五、AIoT應用於建築結構監測應用範疇與推動

本研究由法規政策及宣導推廣等面向，探討AIoT應用於建築結構監測未來推動的方式，期盼藉由推動法規與宣導，降低推動時的阻力。

84



七、結論與建議

建議

一、擴大量測各類建築，增加AI模型應用範圍(立即可行)

主辦機關	內政部營建署、內政部建築研究所
協辦機關	國家地震工程研究中心
建議	本研究主要以住宅類建築物進行AI模型訓練，若想最大化此AI模型之適用範圍，應盡可能針對不同結構形式(如抗彎構架、剪力牆)與材料(如鋼筋混凝土造、鋼構造)進行量測，且需要長時間的觀測以確保地震規模由小至大的紀錄均能被AI考量。考慮到大地震發生的頻率較低，也可以透過過往各種強震之數值模擬結果來訓練神經網絡。如此訓練出來的模型將可以作為代理模型用於即時的結構安全監測與評估。

二、耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書加入地震監測相關規範(中長期)

主辦機關	內政部營建署、內政部建築研究所
協辦機關	各縣市政府、財團法人台灣建築中心
建議	耐震標章、住宅性能評估容積獎勵協議書，或是都市更新、都市危險及老舊建築物重建契約範本中，加入AIoT長期地震監測相關規範，快速了解建築物結構狀況確保民眾生命財產安全。此外可於相關文件中加入地震速報瓦斯遮斷功能以及電梯自動運動控制，於接收地震速報訊號後啟動運動服務。

35



七、結論與建議

三、編列預算補助社會住宅、防災用途建物優先推動(中長期)

主辦機關	內政部營建署
協辦機關	內政部建築研究所、各縣市政府
建議	建議中央單位(營建署)優先補助社會住宅、校舍、警政消防(防災用途)等建築，安裝長期監測儀器監測作為示範推廣，確保建築物安全並蒐集實際資料，進一步累積AI訓練分析之數據。

四、推動建物耐震階段性補強加入微振量測(中長期)

主辦機關	內政部營建署
協辦機關	內政部建築研究所、各縣市政府
建議	補助建物耐震階段性補強之案件，在工程前後進行微振量測，檢測結構強度是否有所增加。

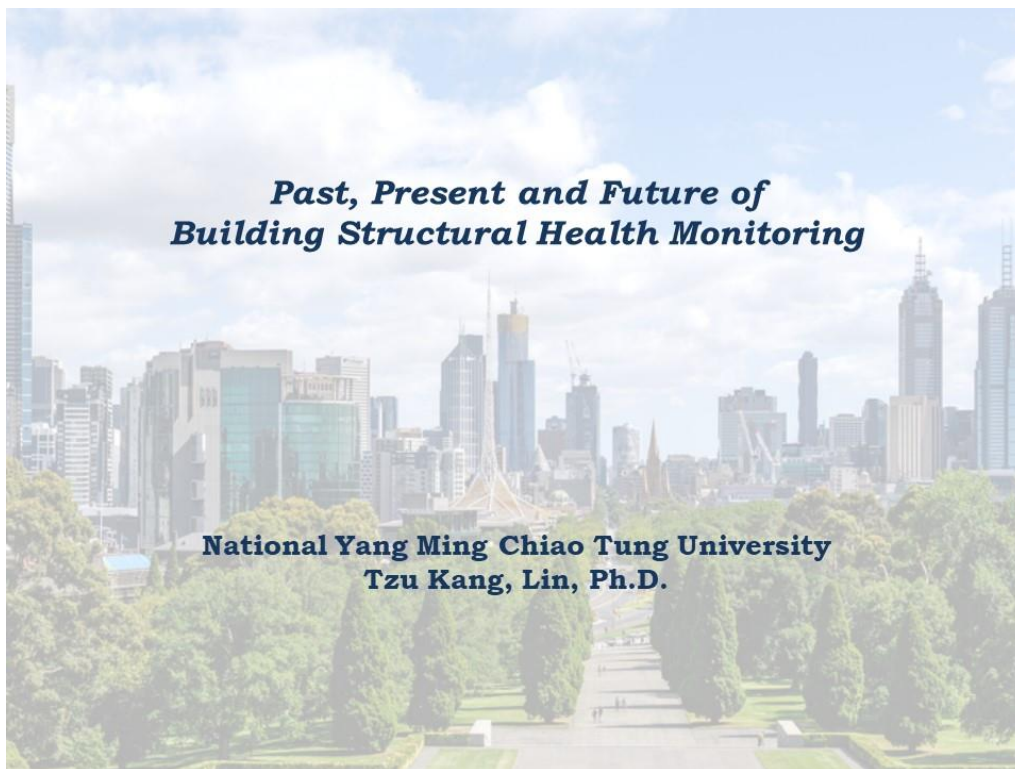
五、推動降低地震險保費(中長期)

主辦機關	內政部建築研究所
協辦機關	住宅地震保險基金會
建議	邀請住宅地震保險基金會研商，推動對安裝長期監測儀器或定期進行微振量測之建築物，降低地震險保費。

86



簡報結束 謝謝聆聽



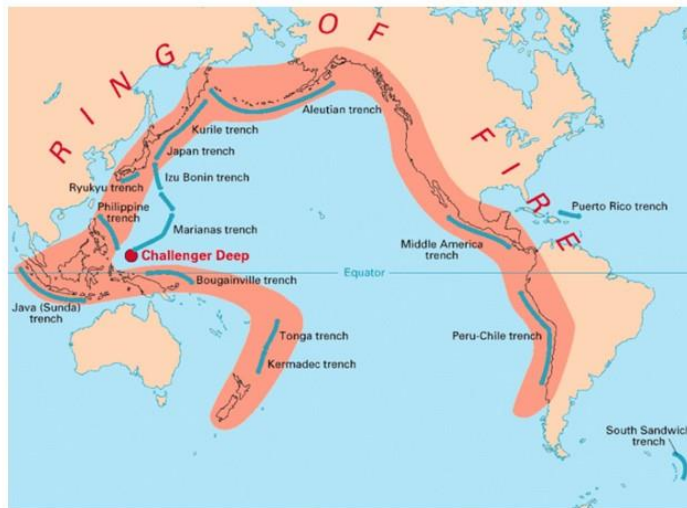
Outline

- *Introduction*
- *Methodology*
- *CMSCE Analysis for Structural Health Monitoring*
- *Integration of SHM and EEWS*
- *Conclusions*



Introduction

- Taiwan is located in the Pacific "Ring of Fire," which makes it vulnerable to intense earthquake events.



(Source: USGS)



3

Introduction

- Multi-hazard in Civil Engineering



Civil Infrastructures



Japan EQ/Tsunami 2011



M 7.7 EARTHQUAKE
PERU-ECUADOR

Peru-Ecuador EQ 2019



Hurricane Harvey 2017



4

Introduction

- As the **structural performance** of the building which frequently subjected to **natural hazards** or the **use of human** was likely to lose its original strength over time.
- Taiwan is an important industrial center for semiconductor foundry. When the structure of the **High-Tech Factories** is damaged, the **production line may stop or delay**.



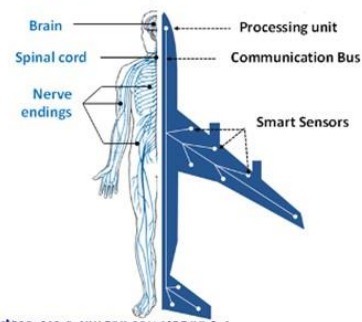
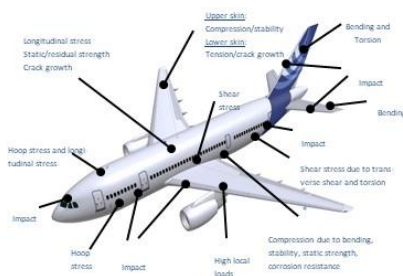
How to evaluate whether the building is safe or not has become an important issue!



5

Introduction : SHM

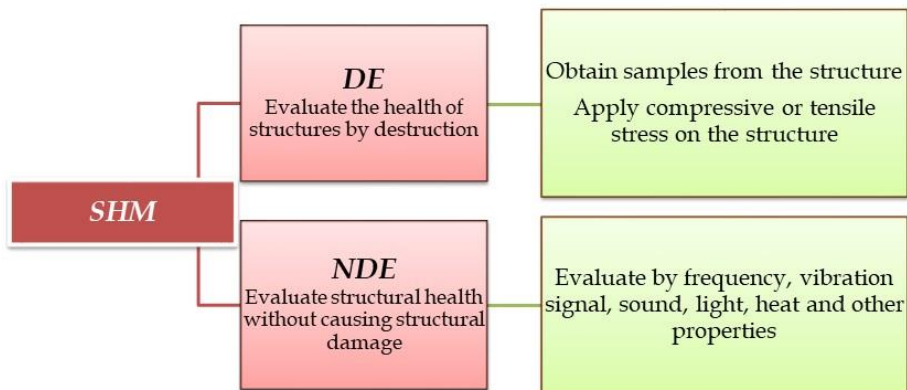
- *The process of implementing a damage detection strategy for **aerospace**, **civil** and **mechanical** engineering infrastructure is referred to as **Structural Health Monitoring (SHM)**.*
- *The SHM process involves 1. the observation of a system over time using **periodically sampled dynamic response** measurements from an array of sensors; 2. the extraction of **damage-sensitive features** from these measurements, and 3. the **statistical analysis** of these features to determine the **current state** of system health.*



6

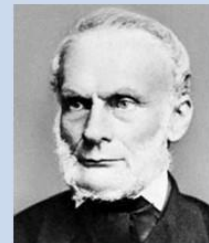
Structural Health Monitoring (SHM)

- Structural health monitoring is a strategy of damage identification for infrastructures, including the bridges, dams, and buildings.
- The Operation method of SHM can be divided into **Destructive Evaluation(DE)** and **Non Destructive Evaluation(NDE)**.



Introduction : Entropy

- In *thermodynamics*, entropy is a measure of the number of specific ways, commonly understood as a measure of *disorder*.
- In *information theory*, entropy (more specifically, *Shannon entropy*) is the expected value(average) of the information contained in each *message* received.
- *Messages* don't have to be text; a message is simply any *flow of information*.
- The entropy of the message is its amount of *uncertainty*; it increases when the message is closer to *random*, and decreases when it is less random.



Rudolf Clausius
(1822–1888)



Claude Elwood
Shannon (1916–2001)

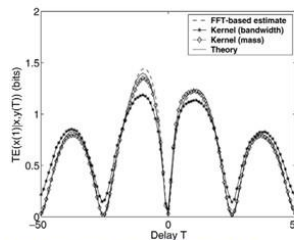


Introduction : Information Flow

- Information flow in an information theoretical context is the *transfer of information* from a variable x to a variable y in a given process.
- *Transfer entropy*: a non-parametric statistic measuring the amount of directed (time-asymmetric) transfer of information between two random processes.



Nichols J M Examining structural dynamics using information flow *Probabilistic Eng. Mech.* 21 420–33 (2006)



9

Introduction : Multi-scale Entropy

- *Detrended fluctuation analysis (DFA)* is based on statistical physics, measures *fractal properties* of physiological signals.
- *Multiscale entropy (MSE)* measures the *complexity* of a (physiological) time-series.
- *Information-based similarity (IBS)* is an algorithm based on *information theory* and statistical physics for linguistic analysis of symbolic sequences. It has been applied to bio-medical signals.
- ECG-based *cardiopulmonary coupling (CPC)* analysis for the study of sleep



Chung-Kang Peng

Beth Israel
Deaconess Medical
Center / Harvard
Medical School

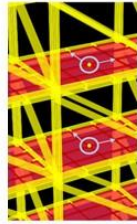
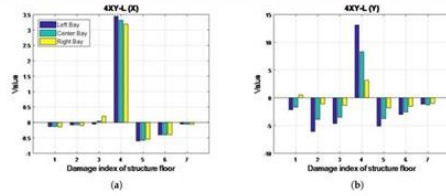


Beth Israel Deaconess
Medical Center

10

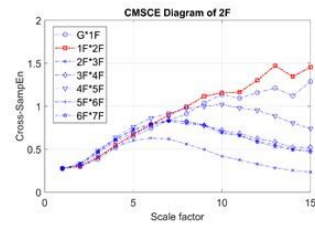
Previous Research

- T.K. Lin, *et al.* " Three-dimensional structural health monitoring based on multiscale cross-sample entropy, " *Earthquakes and Structures*, vol. 12, pp. 673-687, 2017.



- T.K. Lin and A.G. Lainez, " Entropy-Based Structural Health Monitoring System for Damage Detection in Multi-Bay Three-Dimensional Structures, " *Entropy*, vol. 20, p. 49, 2018.

- T.K. Lin and Y.H Chien, " Entropy-Based Structural Health Monitoring System for Damage Detection in Multi-Bay Three-Dimensional Structures, " *Entropy*, 21(1), 41, 2019.

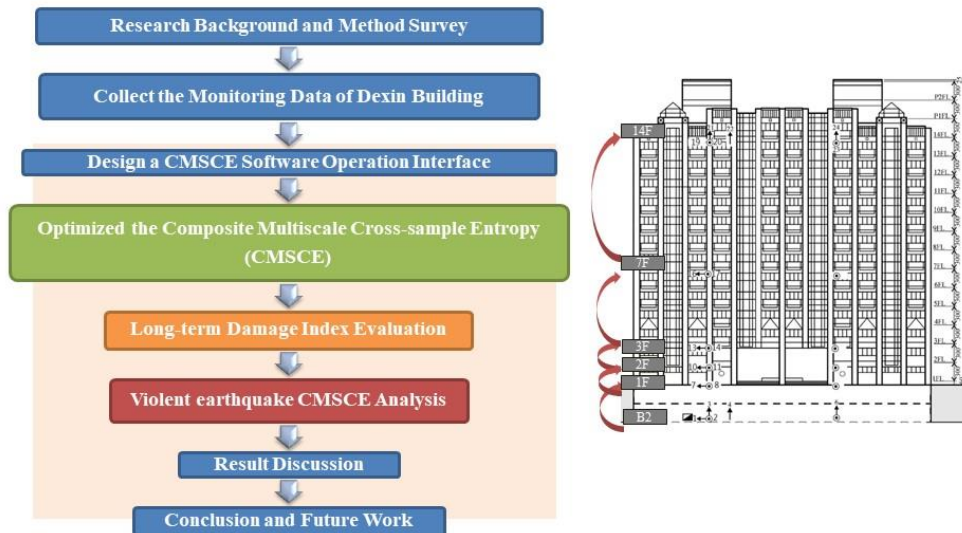


Outline

- *Introduction*
- *Methodology*
- *CMSCE Analysis for Structural Health Monitoring*
- *Integration of SHM and EEWS*
- *Conclusions*

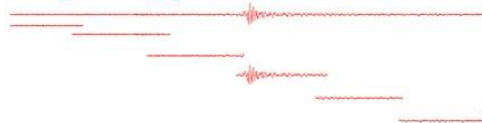


Thesis Flowchart



Coarse-graining Procedure

- In the concept of multiscale entropy (MSE) proposed by Costa, an original signal is transformed into various scales through **coarse graining**; thus, the signal can be accurately analyzed.
- To construct **multiple time series** at different time scales, a time series undergoes a **coarse-graining procedure**.



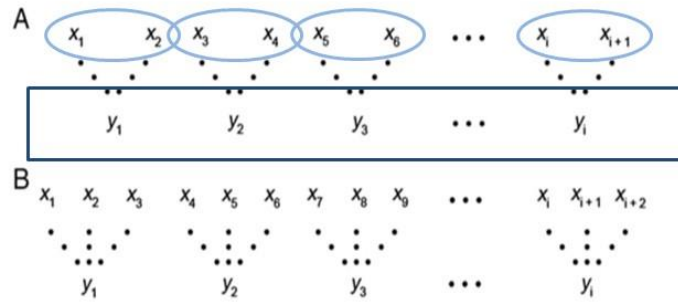
- The original time series can be divided into nonoverlapping windows with a **scale factor** τ ranging from 1 to N ; the length of each coarse-grained time series is N/τ
- Next, a new time series $\{y_j^{(\tau)}\}$ is constructed by taking **the arithmetic mean** of each set of data values.

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, 1 \leq j \leq N/\tau$$



Coarse-graining Procedure (cont'd)

Example of the construction of new time series with $\tau=2, \tau=3$:



Composite Coarse-graining Procedure

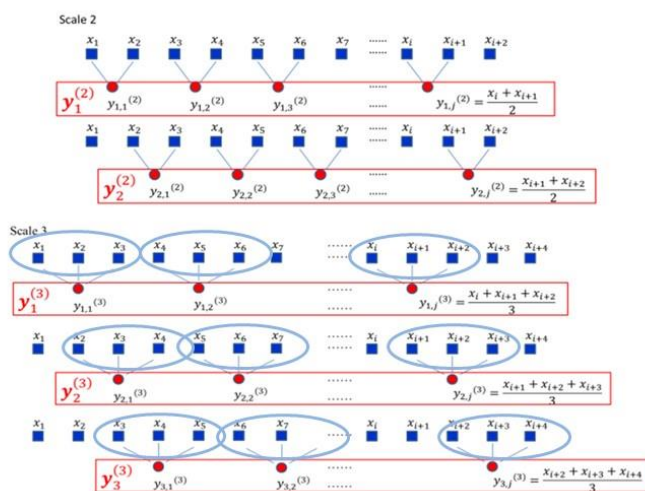
- Wu et al. proposed the concept of composite MSE (CMSE) to improve the accuracy of MSE by **increasing the number of coarse-grained time series**.
- the k th coarse-grained series $y_k^{(\tau)} = \{y_{k,1}^{(\tau)}, y_{k,2}^{(\tau)}, \dots, y_{k,j}^{(\tau)}\}$ is constructed, $y_{k,j}^{(\tau)}$ is obtained by taking **the arithmetic mean** of each set of data values.

$$y_{k,j}^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+k}^{j\tau+k-1} x_i, 1 \leq j \leq N/\tau, 1 \leq k \leq \tau$$



Composite Coarse-graining Procedure (cont'd)

- Example of the construction of new time series with $\tau=2, \tau=3$:



17

Cross-sample Entropy

- Cross-sample entropy (cross-SampEn) primarily entails evaluating the degree of **asynchrony** and **dissimilarity** between two time series from the same system.

The procedure to calculate Cross-SampEn is as follows:

- Take **two** individual time series $\{X_i\} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ and $\{Y_j\} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_N\}$ with length N .
- The signals are segmented into $N-m+1$ templates of length m .

$$T_x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-m+1} & x_{N-m+2} & \dots & x_N \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \text{Template 1, } u_m(1) \\ \rightarrow \text{Template 2, } u_m(2) \\ \vdots \\ \rightarrow \text{Template } N-m+1, u_m(i) \end{matrix}$$

$$T_y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_m \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-m+1} & y_{N-m+2} & \dots & y_N \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \text{Template 1, } v_m(1) \\ \rightarrow \text{Template 2, } v_m(2) \\ \vdots \\ \rightarrow \text{Template } N-m+1, v_m(i) \end{matrix}$$

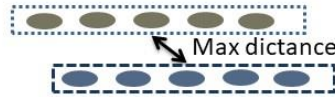


18

Cross-sample Entropy (cont'd)

- The maximum distance $d[u_m(i), v_m(j)]$ between two templates $u_m(i)$ and $v_m(j)$ is expressed as

$$d[u_m(i), v_m(j)] = \max\{|x(i+k) - y(j+k)| : 0 \leq k \leq m-1\}$$



- If the maximum distance is within r , which is a predetermined threshold, $n_i^m(r)$ can be calculated.

$$d[u_m(i), v_m(j)] \leq r, 1 \leq j \leq N-m$$

$$n_i^m(r) = \sum_{j=1}^{N-m} d[u_m(i), v_m(j)]$$

- The similarity probability of the templates is evaluated as

$$U_i^m(r)(v||u) = \frac{n_i^m(r)}{(N-m)}$$



Cross-sample Entropy (cont'd)

- Then, the average probability of similarity is

$$U^m(r)(v||u) = \frac{1}{(N-m)} \sum_{i=1}^{N-m} U_i^m(r)(v||u)$$

- Subsequently, the procedure is repeated by assembling new templates with length $m+1$.

- The Cross-SampEn values can then be calculated by

$$CS_E(m, r, N) = -\ln \left\{ \frac{U^{m+1}(r)(v||u)}{U^m(r)(v||u)} \right\}$$

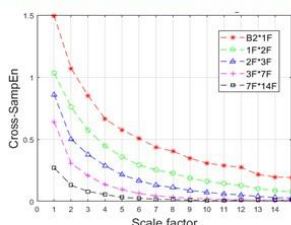


Composite Multiscale Cross-sample Entropy (CMSCE)

- SampEn values can be calculated for all coarse-grained time series.
- Composite Multi-scale Cross-sample Entropy (CMSCE) can be expressed as:

$$CMSCE(x, y, \tau, m, r) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{\tau} SampEn(x_k^{(\tau)}, y_k^{(\tau)}, m, r)$$

- CMSCE values can be derived for the two time series. The derived values can then be plotted as a function of scale factor ($f(\tau)=S_E$)



21

Damage Index

- For a structure with F floors, the following matrices can be used to derive CMSCE curves for evaluated and reference floors; F is the total floor.

$$CMSCE_{reference} = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_F \end{Bmatrix} \quad CMSCE_{evaluated} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_F \end{Bmatrix}$$

- H_N and D_N can expressed as

$$H_N = \{CS_E^{HF1}, CS_E^{HF2}, CS_E^{HF3}, \dots, CS_E^{HF\tau}\} \quad D_N = \{CS_E^{DF1}, CS_E^{DF2}, CS_E^{DF3}, \dots, CS_E^{DF\tau}\}$$

- The Damage Index (DI) of each floor is calculated as

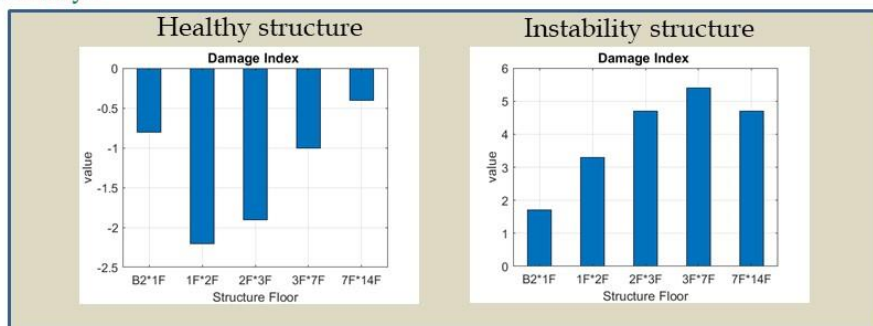
$$DI_F = \sum_{q=1}^{\tau} (CS_E^{DFq} - CS_E^{HFq})$$



22

Damage Index (cont'd)

- The DI of each floor can be calculated by subtracting the entropy value of the **damaged(to be analyze) structure** from the **reference entropy** value of the **healthy structure** on the same floor and then adding the values up.
- A **positive DI** value indicates that the floor is **damaged(structural instability)**, whereas a **negative DI** value indicates that the floor is **healthy**.

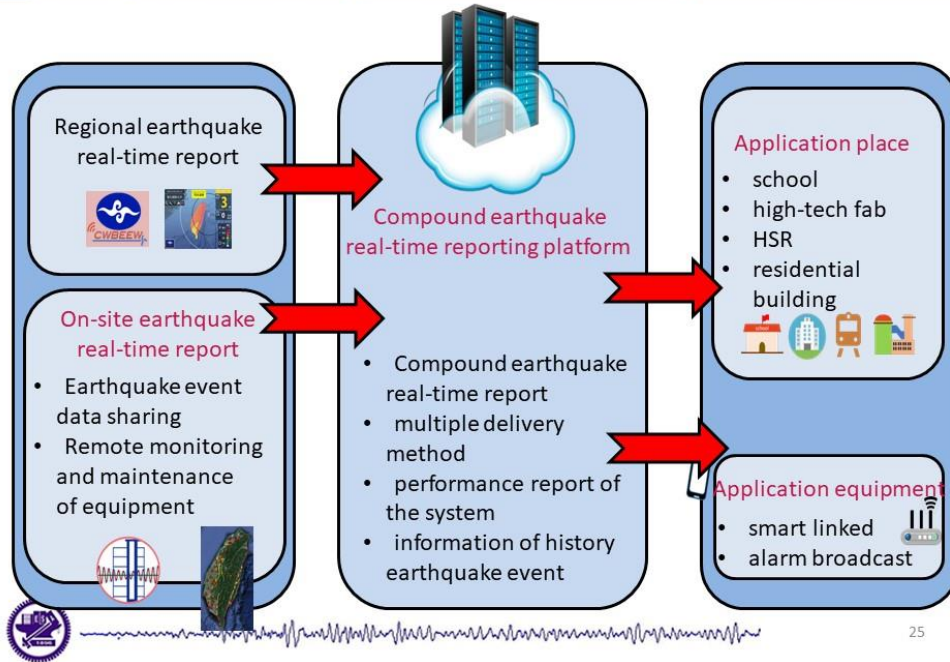


Outline

- *Introduction*
- *Methodology*
- *CMSCE Analysis for Structural Health Monitoring*
- *Integration of SHM and EEWS*
- *Conclusions*



Compound Earthquake Real-time Report Service



Compound Earthquake Real-time Report Service

- 97 campus on-site earthquake rapid report (main station)
- 3509 Campus EEWS (secondary station)
- 20 Kindergarten (secondary station)
- 21 Fire department
- 1 Earthquake education park
- 2 Science park
- 6 High-tech fab
- 1 HSR



Compound Earthquake Real-time Report Service



Compound Earthquake Real-time Report Service

- Eight buildings of Guang-Fu campus in NYCU was taken as demonstration sites.
- Applying earthquake disaster prevention and EEWs.
- Earthquake disaster prevention integration platform.
- Expected benefits :
 - As the **first campus to install EEWs**, NYCU can provide relevant supervisors with **earthquake disaster prevention information**.
 - After the development of structural safety monitoring tech, it can be **extended to science park** near by.



Dexin residential building

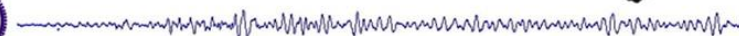
- Dexin residential building located in Hsinchu City, Taiwan.
- Constructed in October 1991, a reinforced concrete structure with 14 aboveground floors and 2 underground floors.
- structure was designed in accordance with the ACI-318-77 and UBC.



29

Sensor Location

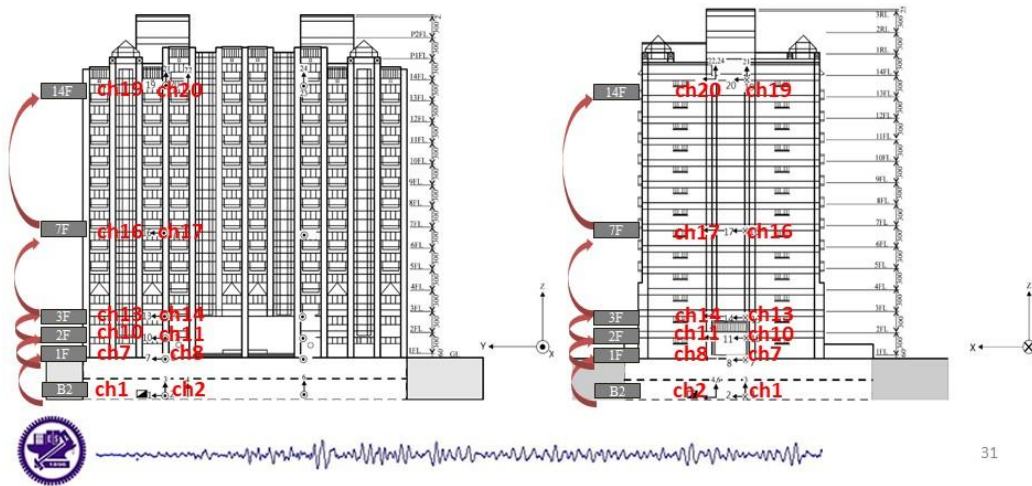
- Acceleration data for each floor were measured using strong-motion seismometers (FBA-11).
- When the measured peak ground acceleration (PGA) exceeded 4 gal, a trigger mechanism will activate the monitoring system to collect data.
- Acceleration data were mainly recorded by the sensors in channels 2, 8, 11, 14, 17, 20 (X-axis) and channels 1, 7, 10, 13, 16, 19 (Y-axis) on the 2nd basement floor (B2), 1st floor (1F), 2nd floor (2F), 3rd floor (3F), 7th floor (7F), 14th floor (14F).



30

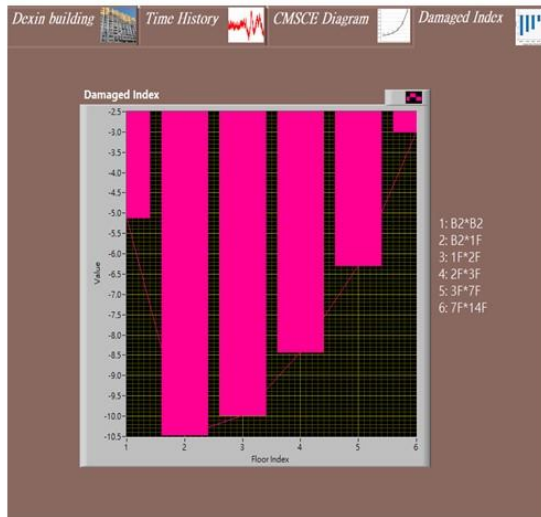
Sensor Location (cont'd)

Floor	B2	1F	2F	3F	7F	14F
X-axis Sensor channel	2	8	11	14	17	20
Y-axis Sensor channel	1	7	10	13	16	19



CMSCE User Interface

- The SHM interface integrated the complex operation and visualized the building information, time history, CMSCE curves, and DI graphs.



CMSCE Analysis Procedure



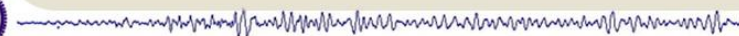
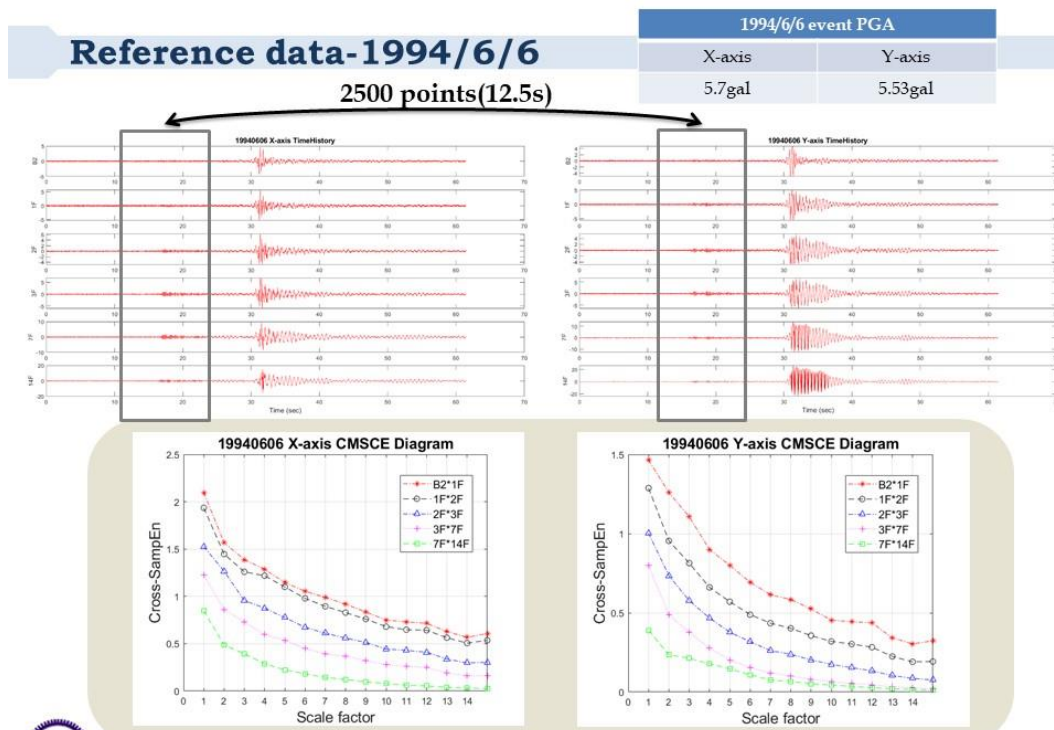
- Four parameters are needed to calculate CMSCE.
- The parameters were chosen after a series of optimization searches

Parameters for calculation of CMSCE	
Template length m	4
Threshold r	0.1
Signal length N	2500
Scale factor τ	15

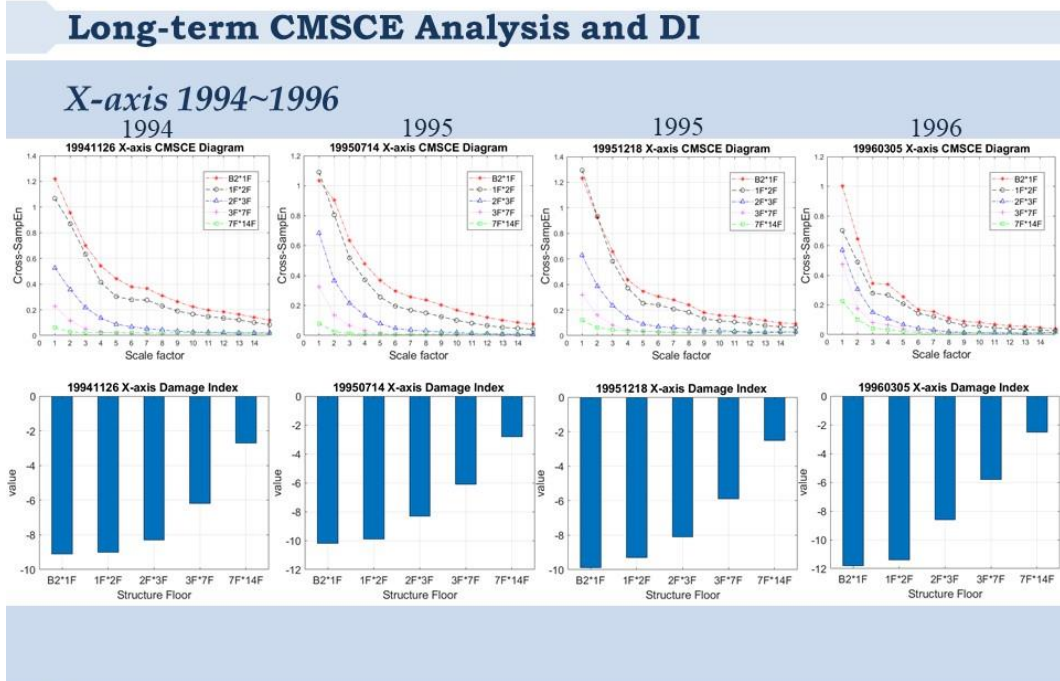
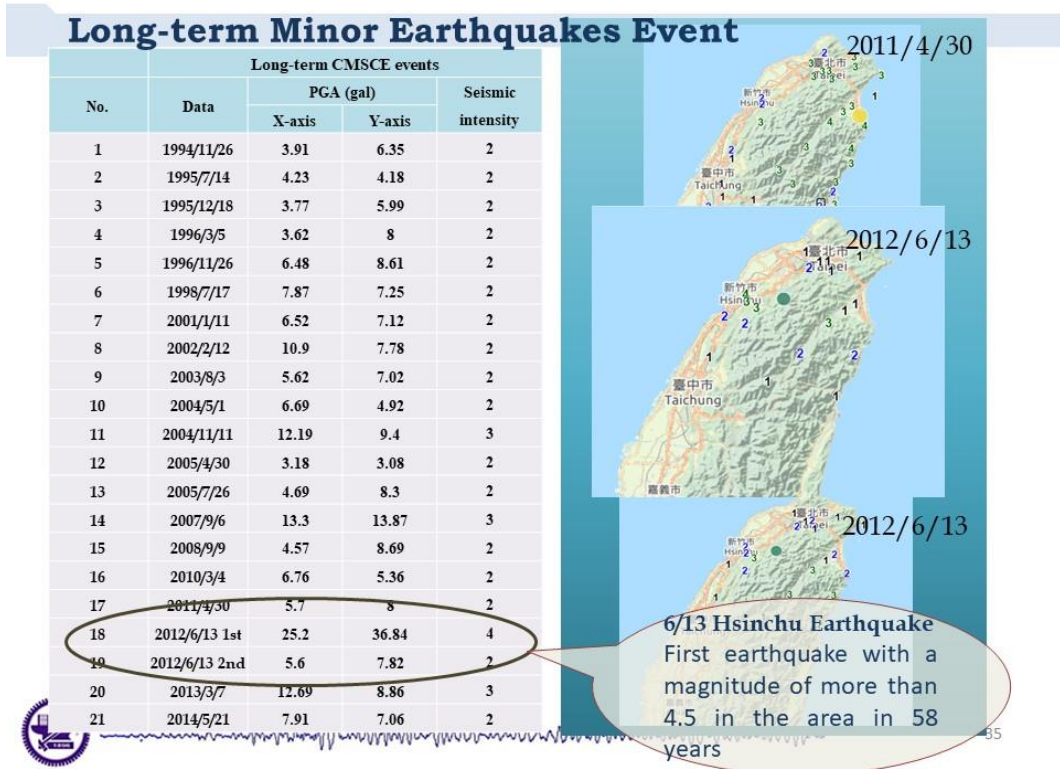
- Damage Index 0 is used as the alert level.



33

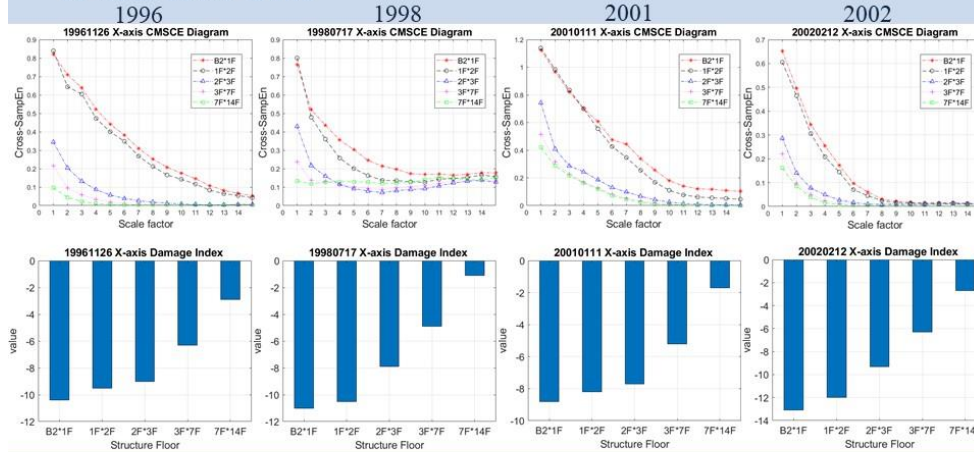


34



Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

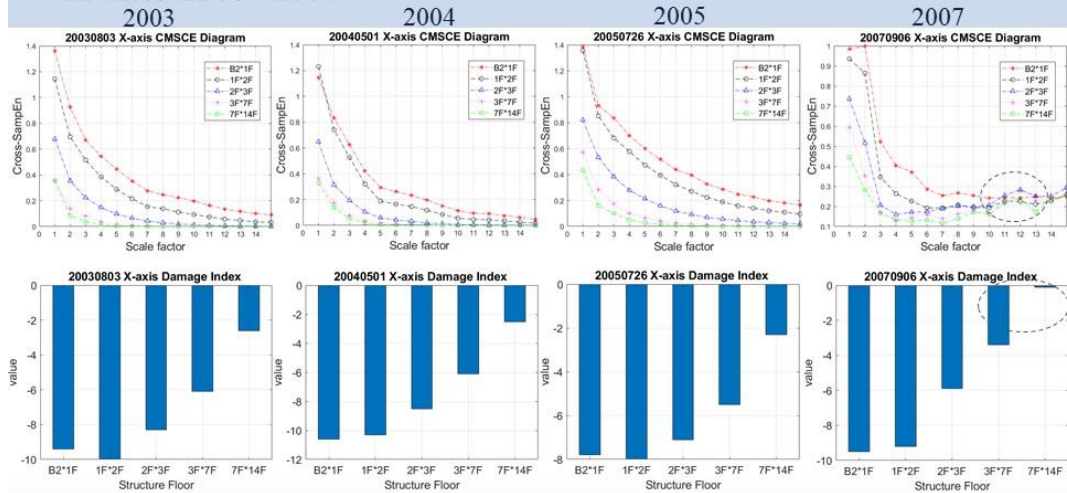
X-axis 1996~2002



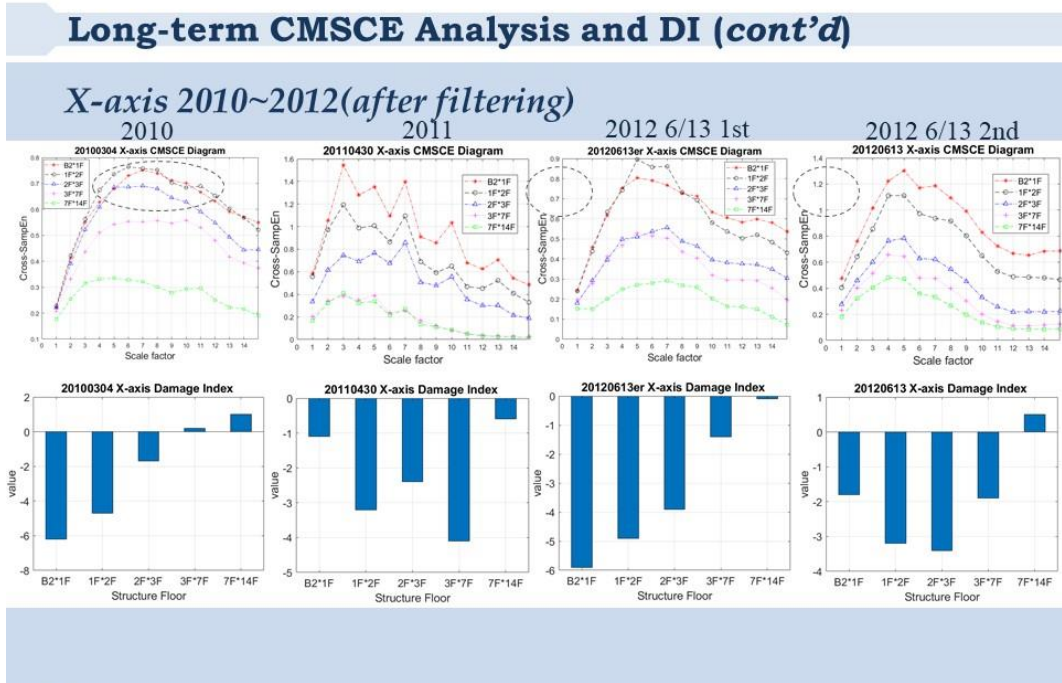
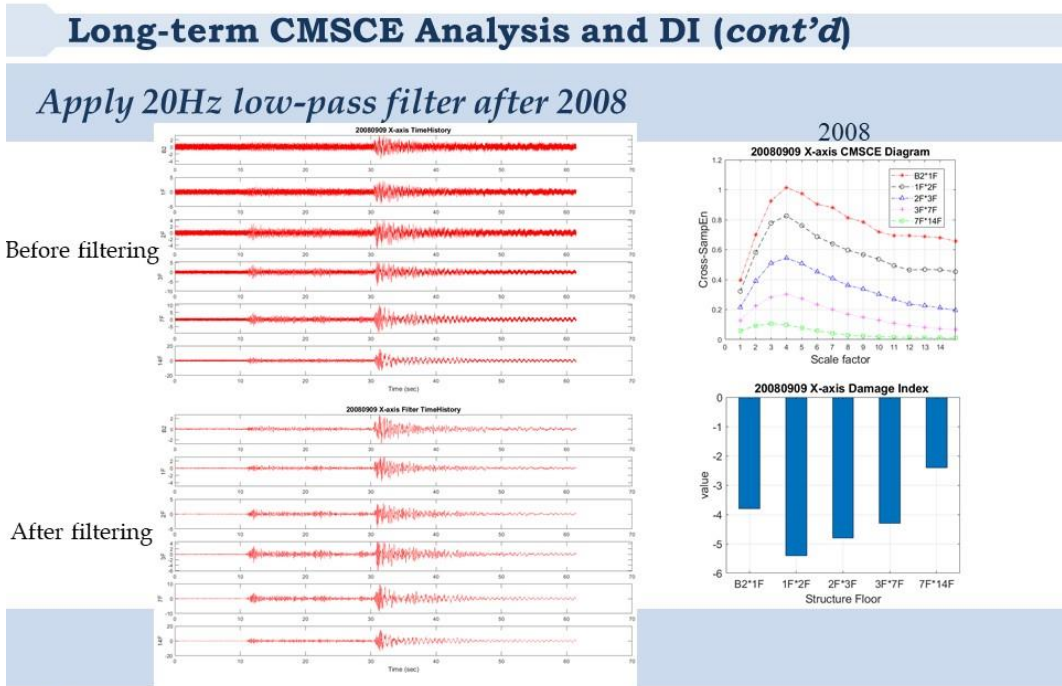
37

Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

X-axis 2003~2007

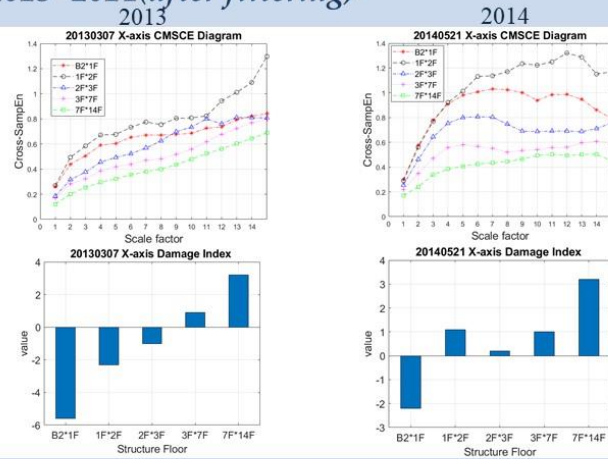


38



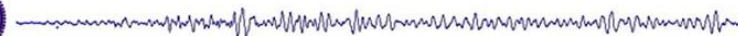
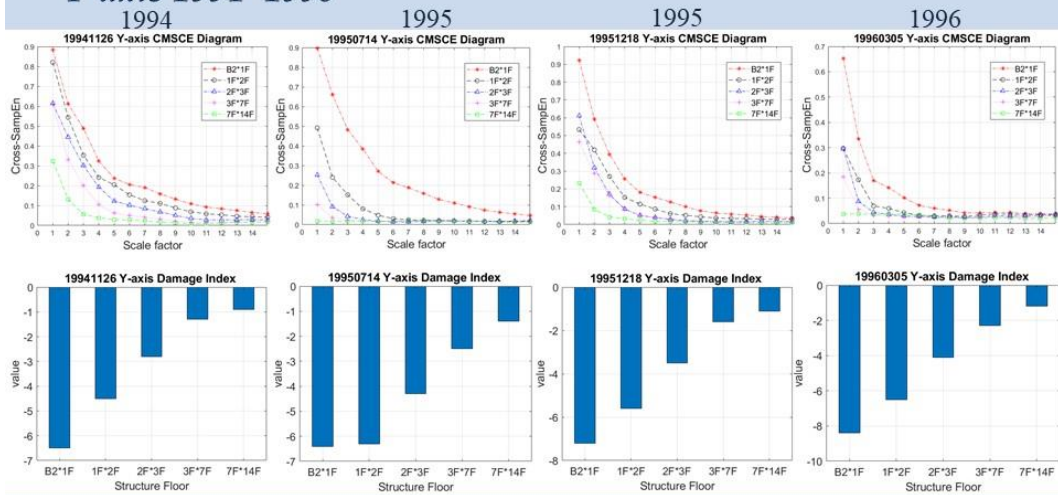
Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

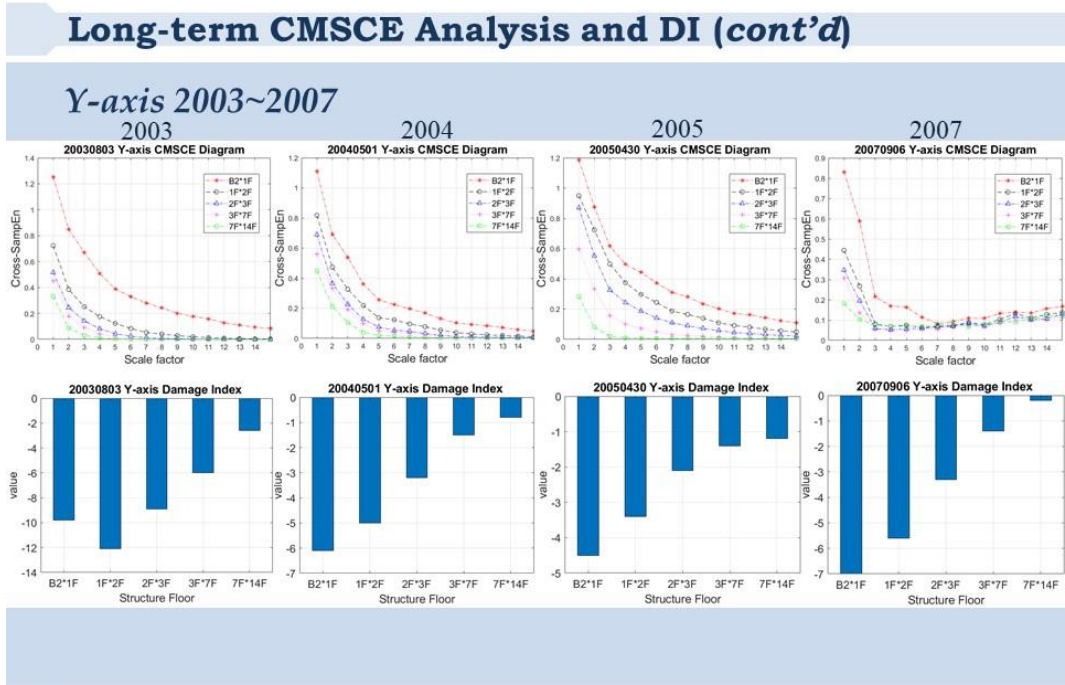
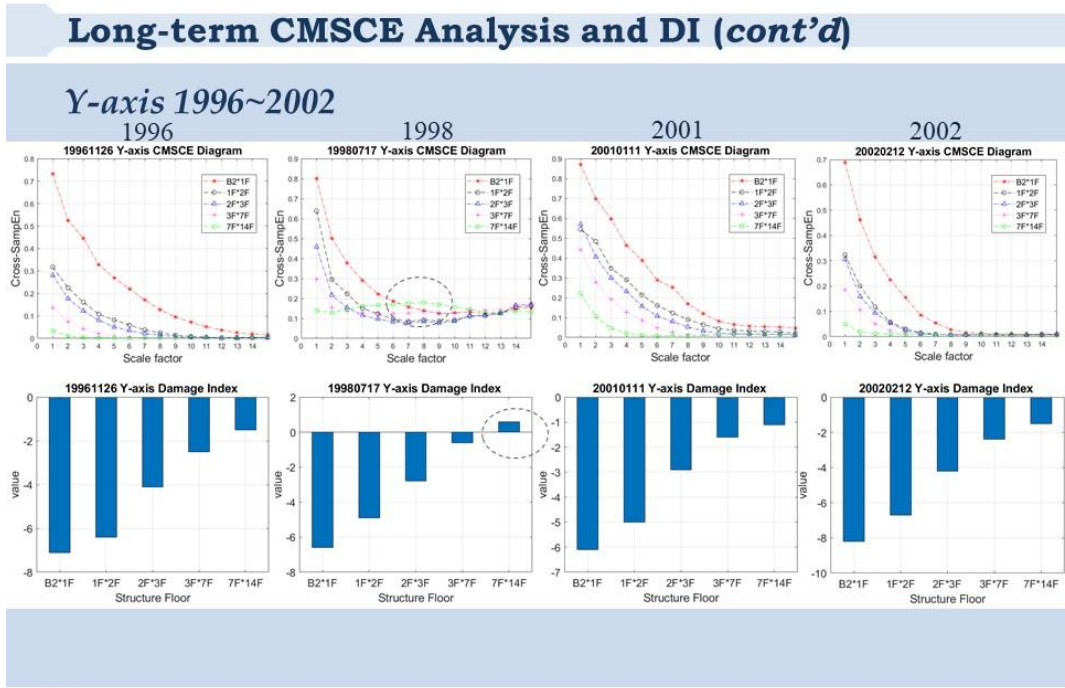
X-axis 2013~2014(after filtering)



Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

Y-axis 1994~1996

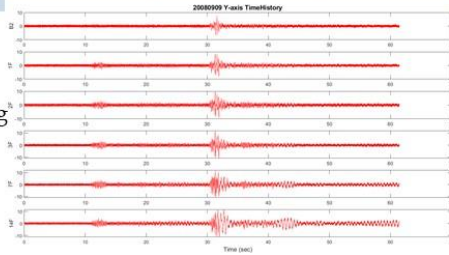




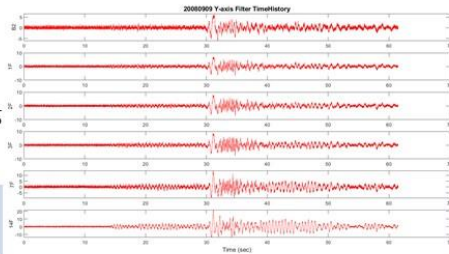
Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

Apply 20Hz low-pass filter after 2008

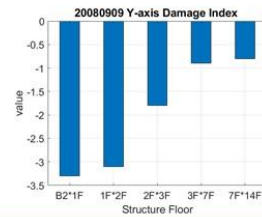
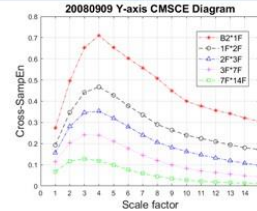
Before filtering



After filtering



2008



Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

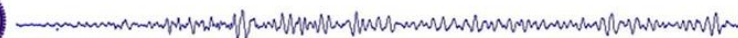
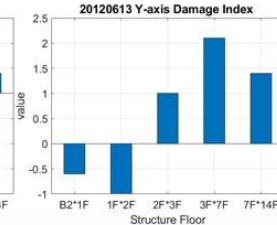
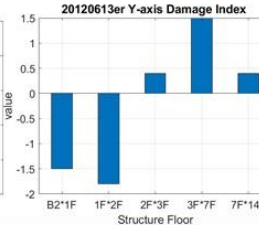
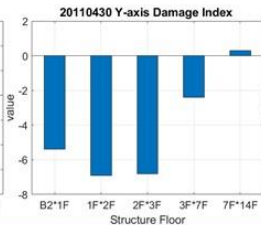
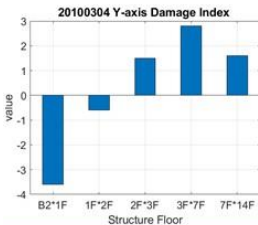
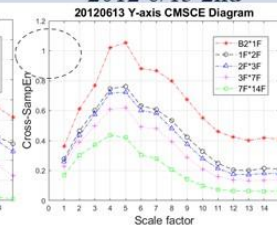
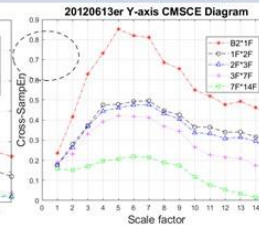
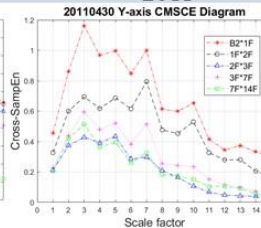
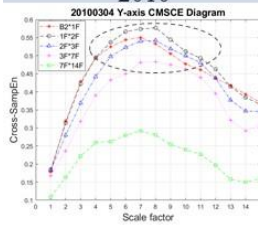
Y-axis 2010~2012(after filtering)

2010

2011

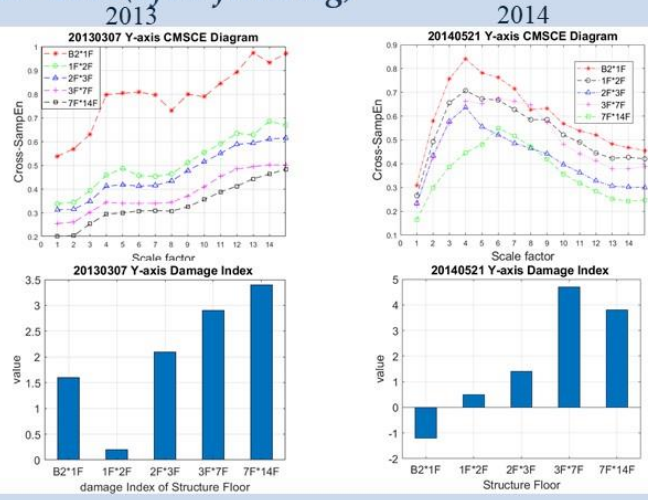
2012 6/13 1st

2012 6/13 2nd

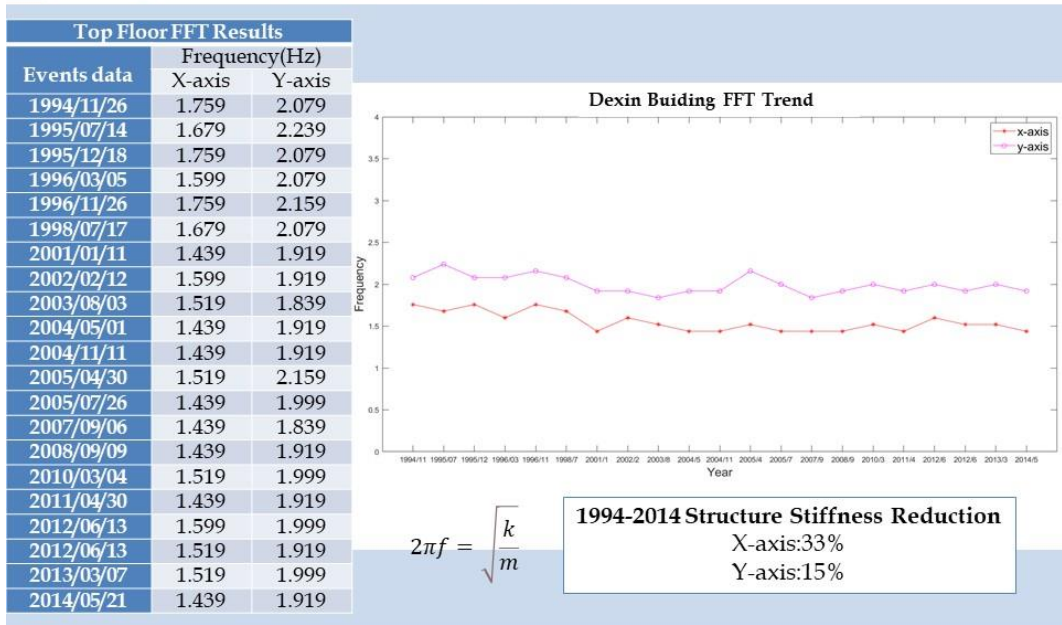


Long-term CMSCE Analysis and DI (cont'd)

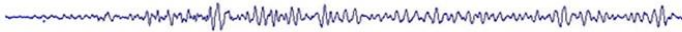
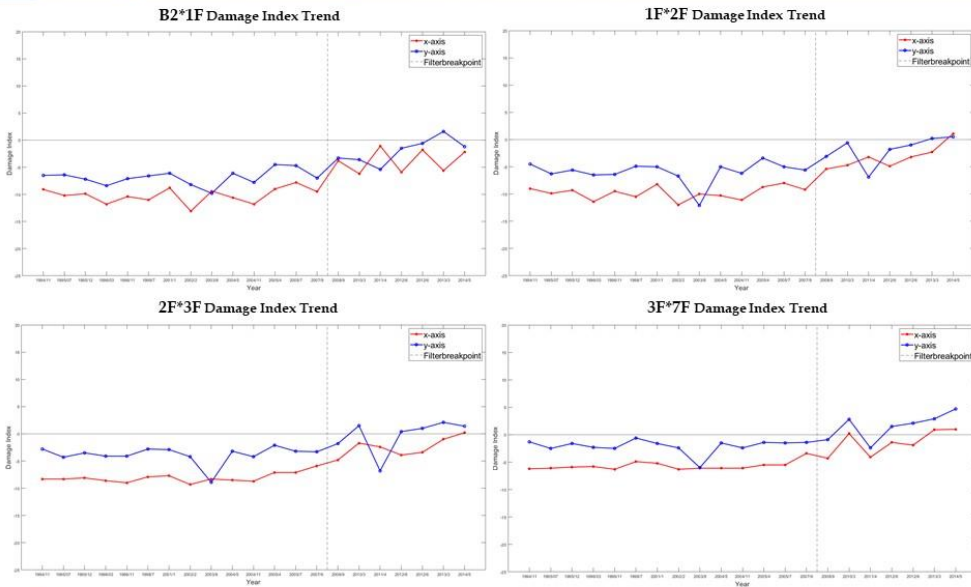
Y-axis 2013~2014(after filtering)



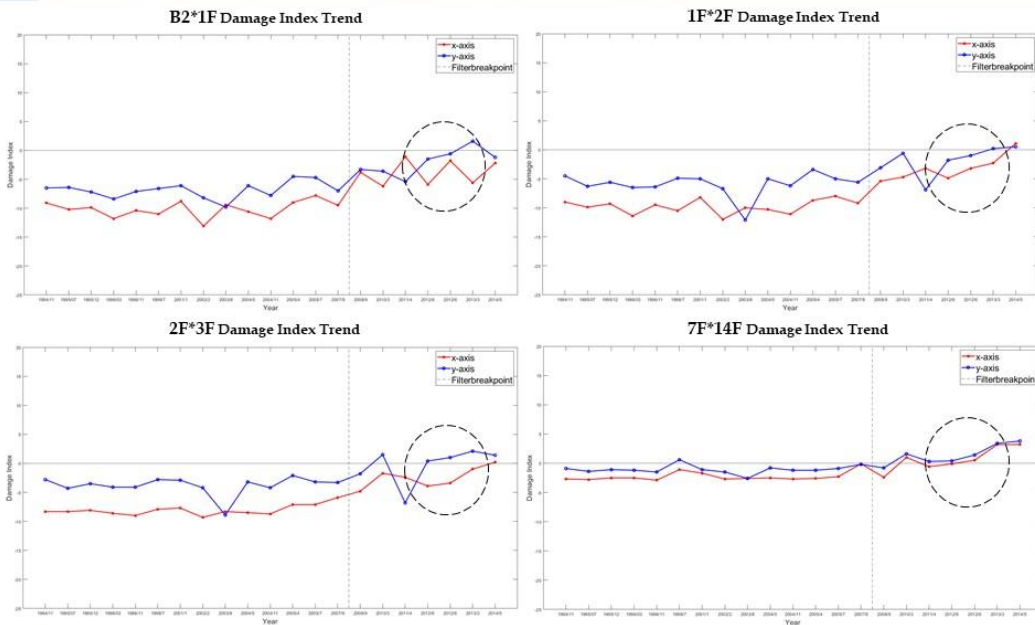
Long-term FFT Trend Chart



Long-term Damage Index Trend Chart



Long-term Damage Index Trend Chart



Long-term analysis results evaluation

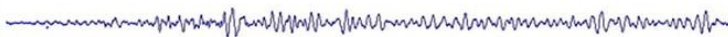
- The entropy curve will change in different signal environments, CMSCE value is very **sensitive** to signal changes.
- The **long-term damage index** of each floor is **slightly upward**. Based on this result, it is inferred that the structure has **ageing** due to **long-term use** and **minor earthquakes**.
- From the DI analysis of 2012/6/13 events, it can be seen that when the structure is **close to the epicenter** and the **earthquake depth is shallow**, the DI in subsequent years will show more **positive values**.



51

Long-term analysis results evaluation (cont'd)

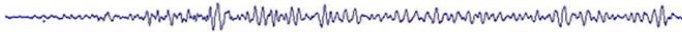
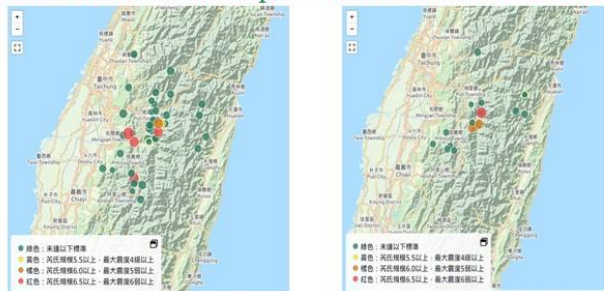
- When positive **DI values occur frequently**, it means that **the structure is relatively unhealthy compared to the reference**.
- In practice, it can be said that the structure needs to be **maintained** and **strengthened** or the sensor equipment needs to be **updated** and **replaced**.
- The long-term CMSCE SHM results further verify the feasibility to bring the entropy analysis experimental theory to practical application.



52

921 Major Earthquakes

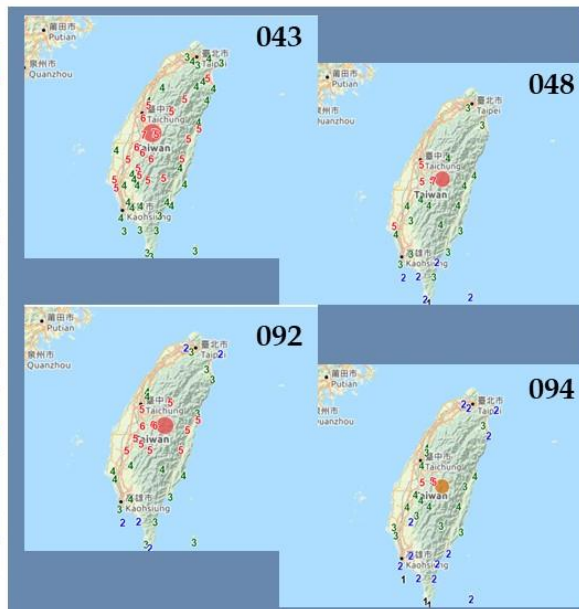
- The 921 earthquake occurred on September 21, 1999 in Jiji township, Nantou City.
- The earthquake intensity was recorded to be 7.3 on the Richter scale. The epicenter of the earthquake was at 23.85°N (latitude) and 120.82°E (longitude), with a depth of focus of approximately 8 km.
- According to the records of the Central Weather Bureau, 44 significant earthquakes occurred on September 21 and 18 occurred on September 22.



53

921 Major Earthquakes Dexin Event

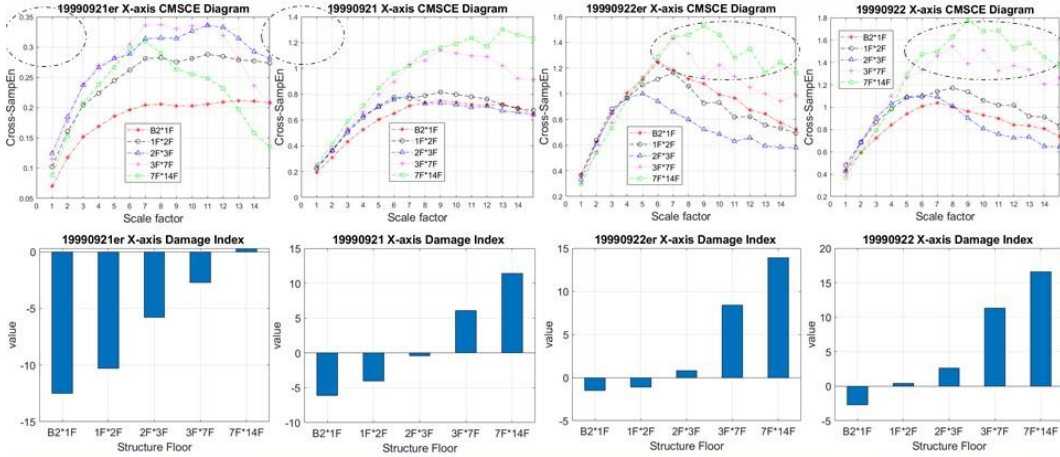
1999/9/21 Dexin Earthquake Events				
CWB no.	Time	PGA(gal)		Seismic intensity
		X-axis	Y-axis	
043	01:47	131.77	94.14	5
	01:49	3.18	5.05	2
	01:51	9.46	10.39	3
044	01:57	17.95	18.4	3
	01:59	4.22	5.79	2
047	02:03	11.53	15.15	3
	02:05	9.07	12.51	3
	02:11	77.4	60.86	4
048	02:16	121.49	65.81	5
1999/9/22 Dexin Earthquake Events				
CWB no.	Time	PGA(gal)		Seismic intensity
		X-axis	Y-axis	
092	08:14	50.56	41.45	4
094	08:49	30.17	32.42	4



54

Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

X-axis 9/21 043,048 and 9/22 092,094 events

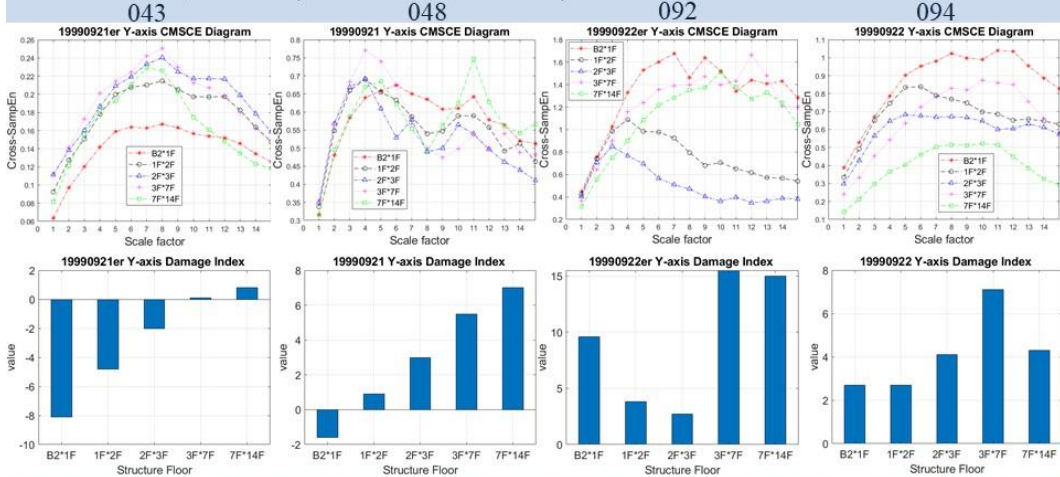


CWB no.	043			044		047			048	092	094
Time	01:47	01:49	01:51	01:57	01:59	02:03	02:05	02:11	02:16	08:14	08:49
Seismic intensity	5	2	3	3	2	3	3	4	5	4	4



Major Earthquake CMSCE Analysis and DI(cont'd)

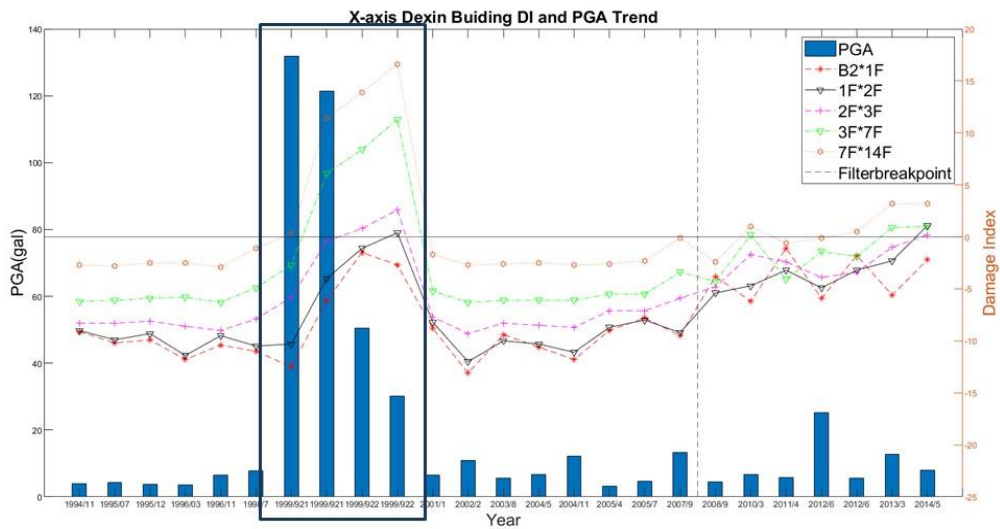
Y-axis 9/21 043,048 and 9/22 092,094 events



CWB no.	043			044		047			048	092	094
Time	01:47	01:49	01:51	01:57	01:59	02:03	02:05	02:11	02:16	08:14	08:49
Seismic intensity	5	2	3	3	2	3	3	4	5	4	4



X-axis Damage Index and PGA Chart

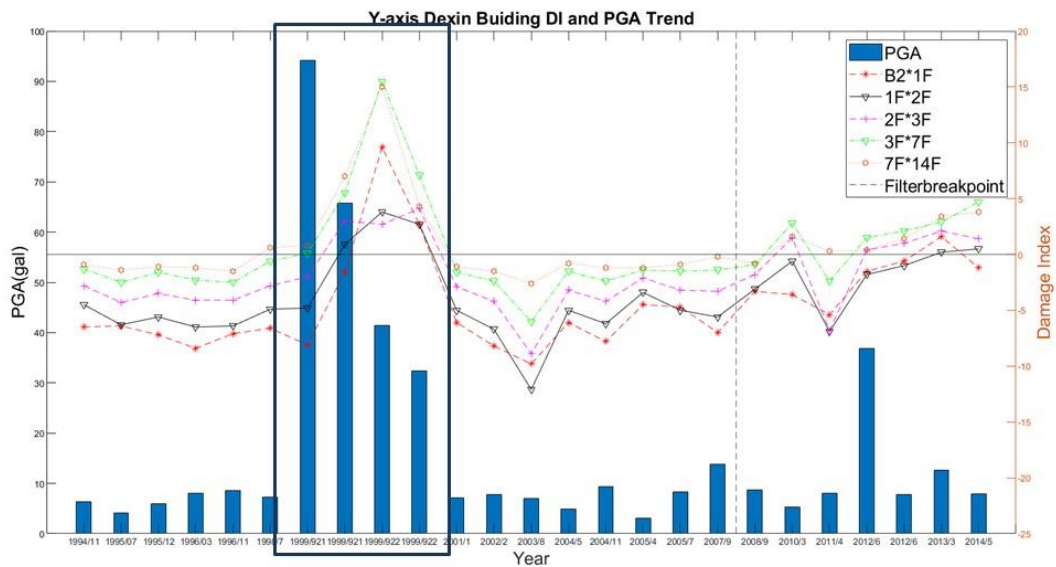


major earthquake in 921 and 922



57

Y-axis Damage Index and PGA Chart



major earthquake in 921 and 922



58

Relationship between Major Earthquake and DI

The trend of abnormal increase DI coincides with the protrusion of the PGA histogram in continuous violent earthquakes. Based on the analysis results, the inference is as follows:

- In the short time, **intensive and frequent earthquakes** occur in the same monitoring building, which will **increase the signal complexity** and then **increase the entropy value**.

CWB no.	043			044		047			048	092	094
Time	01:47	01:49	01:51	01:57	01:59	02:03	02:05	02:11	02:16	08:14	08:49
Seismic intensity	5	2	3	3	2	3	3	4	5	4	4

- When experiencing a very **strong earthquake** to make the structure unstable, the **DI value** will **rise sharply**.



Relationship between Major Earthquake and DI

The entropy characteristics mentioned in the field of biomedicine are as follows:

- Richman developed Cross Sample entropy in 2000. The results indicated that **time series is more synchronized than the other pair of time series, then cross sample entropy are lower**.
- In 1991, Pincus improved the Kolmogorov entropy with Approximate entropy (ApEn). **The larger the ApEn, the more irregular or more complex. Conversely, the smaller the ApEn is, the more regular is.**

The results of the research using CMSCE in violent earthquake for SHM correspond to the previous entropy analysis in the biomedical field.



Outline

- *Introduction*
- *Methodology*
- *CMSCE Analysis for Structural Health Monitoring*
- *Integration of SHM and EEWS*
- *Conclusions*



61

NCREE Building

- Apply SHM and CMSCE analysis to the structural analysis of NCREE building.
- Extend SHM system to long-term monitoring; besides, EEWS is also applied for future monitoring.



62

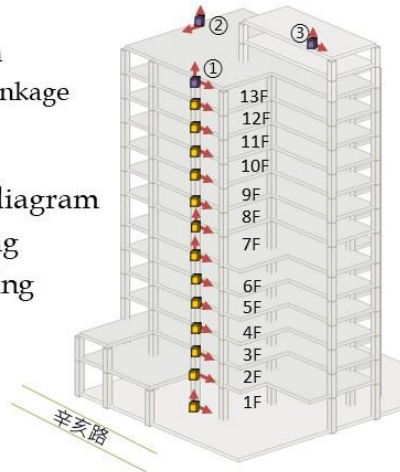
Sensor Location

Structural Safety Monitoring System

- ✓ Rapid
- ✓ Automatic evaluation
- ✓ Disaster prevention linkage

Sensor configuration diagram

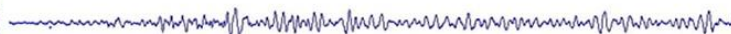
- ✓ Earthquake warning
- ✓ Structural monitoring
- ✓ Safety evaluation



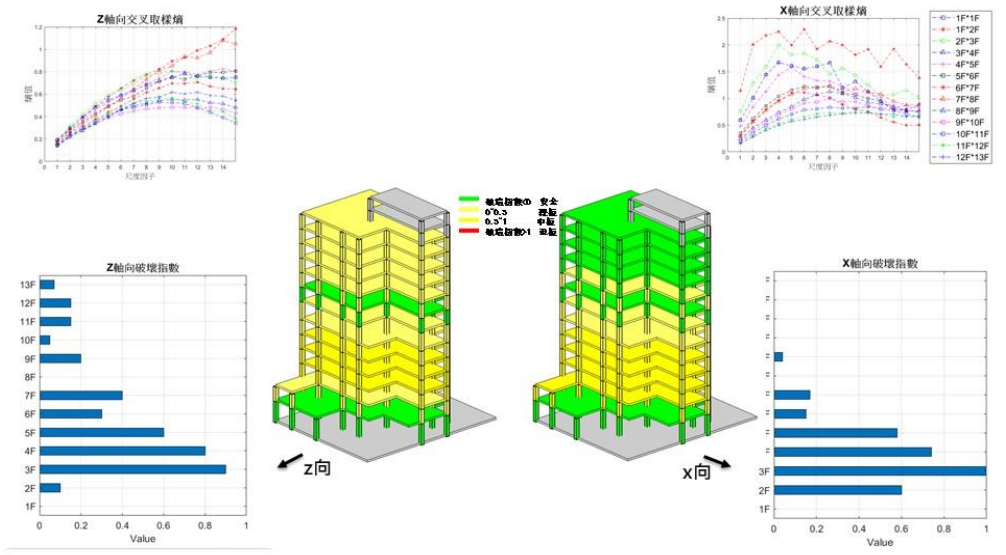
	Total:57Ch			加速度計		
	Channel	①	②	③		
13F 天花板	6	XZ	YZ	XZ		
12F 天花板	3	X	Y	X		
11F 天花板	3	X	Y	X		
10F 天花板	3	X	Y	X		
9F 天花板	3	X	Y	X		
8F 天花板	3	X	Y	X		
7F 天花板	6	XZ	YZ	XZ		
6F 天花板	6	XZ	YZ	XZ		
5F 天花板	3	X	Y	X		
4F 天花板	3	X	Y	X		
3F 天花板	3	X	Y	X		
2F 天花板	3	X	Y	X		
1F 天花板	3	X	Y	X		
B1 天花板	6	XZ	YZ	XZ		
B1 地板	3			XYZ		



Acceleration time chart



CMSCE Analysis and DI






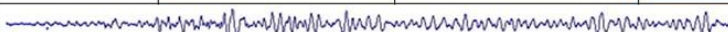
SHM automatically generates reports

<p>國家地震工程研究中心 國家地震工程研究中心 National Center for Research in Earthquake Engineering</p> <p>TAPBAF-國家地震工程研究中心大樓 結構安全監測系統自動生成報告</p> <p>地震編號： 110104 地震日期： 2021/10/24 地震時間： 13:12:43</p> <p style="font-size: small;">第 1 頁</p>	<p>國家地震工程研究中心 國家地震工程研究中心 National Center for Research in Earthquake Engineering</p> <p>TAPBAF-國家地震工程研究中心大樓 結構安全監測系統自動生成報告</p> <p>地震編號： 110055 地震日期： 2021/07/08 地震時間： 06:11:56</p> <p style="font-size: small;">第 1 頁</p>	<p>國家地震工程研究中心 國家地震工程研究中心 National Center for Research in Earthquake Engineering</p> <p>TAPBAF-國家地震工程研究中心大樓 結構安全監測系統自動生成報告</p> <p>地震編號： 110077 地震日期： 2021/08/05 地震時間： 05:50:45</p> <p style="font-size: small;">第 1 頁</p>
---	---	---





Major Earthquake Events

No.	110026	110055	110077
Date	110.04.18	110.07.08	110.08.05
Time	22:14:38	06:11:55	05:50:45
Location	23.86N,121.48E	23.89N,121.57E	24.8N,122.32E
Deep	14.4km	8.2km	7.0km
Richter scale	6.2	5.5	6.0
			



Major Earthquake Events

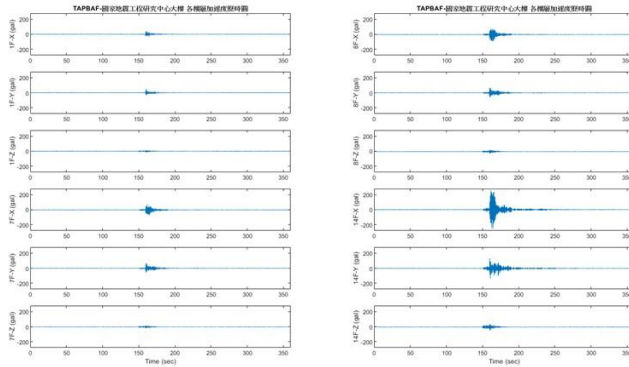
No.	110103	110104
Date	110.10.24	110.10.24
Time	13:11:34	13:12:42
Location	24.57N,121.78E	24.57N,121.78E
Deep	65.6km	64.1km
Richter scale	6.5	5.5
		



Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

Case 110103 Acceleration time chart

Date : 2021.10.24
Time : 13:11:35

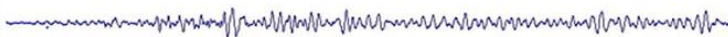
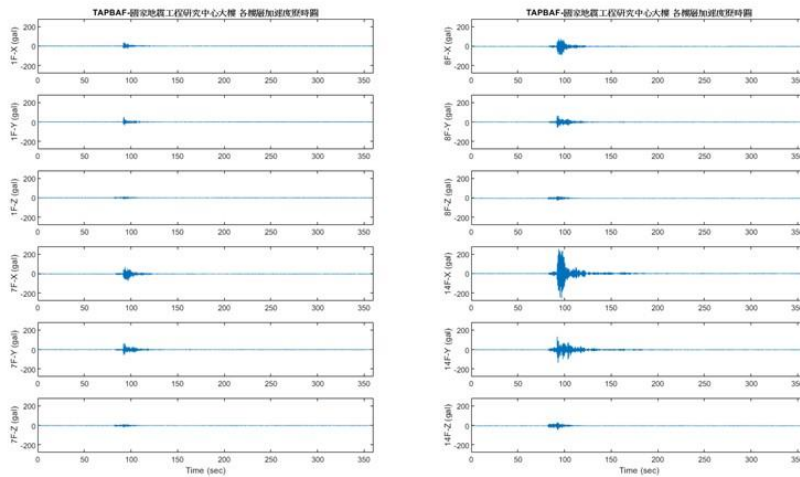


69

Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

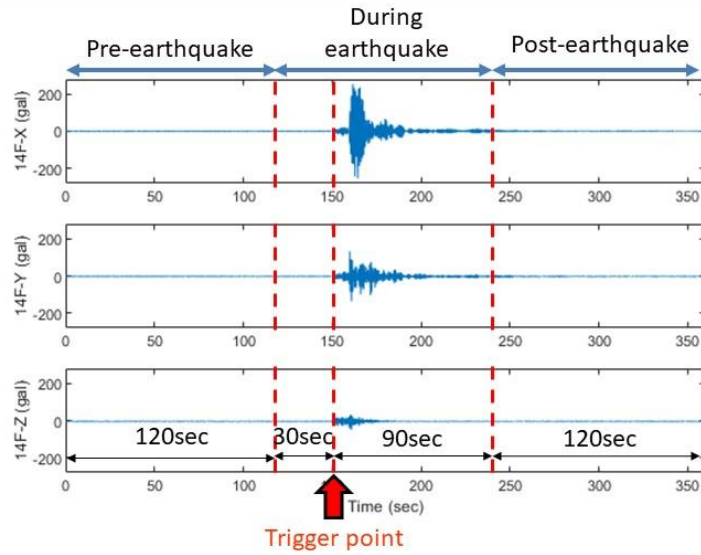
Case 110104 Acceleration time chart

Date : 2021.10.24
Time : 13:12:43

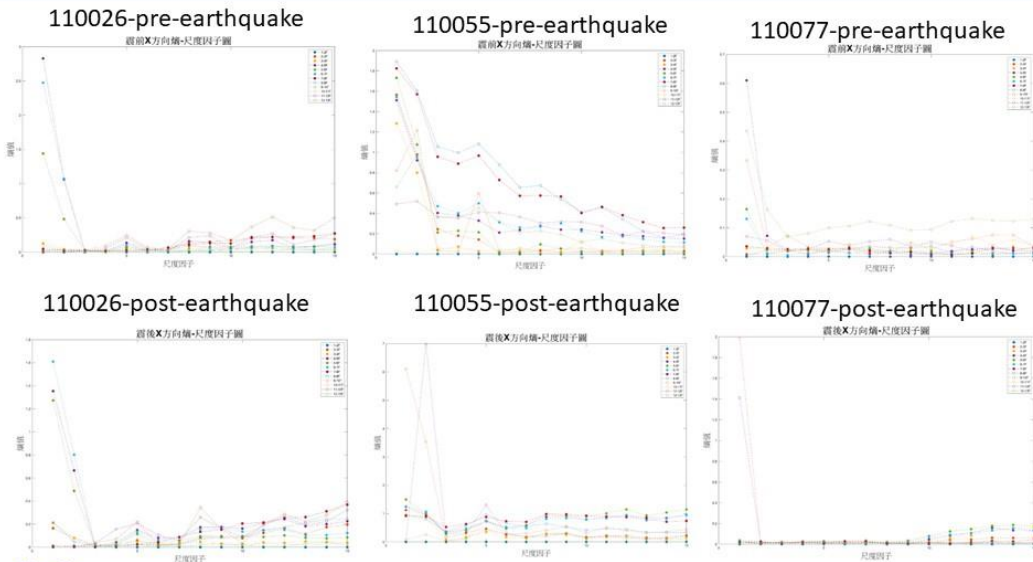


70

Pre-processing
Case 110103



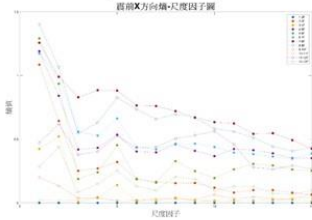
Major Earthquake CMSCE Analysis and DI
X-axis 110026, 110055, 110077



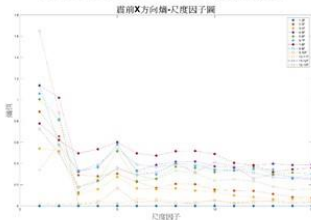
Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

X-axis 110103, 110104

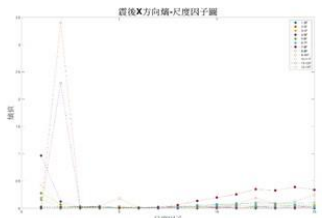
110103-pre-earthquake



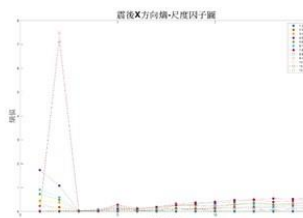
110104-pre-earthquake



110103-post-earthquake



110104-post-earthquake

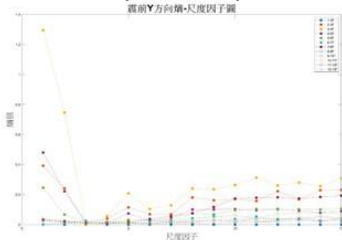


73

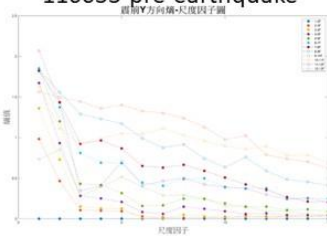
Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

Y-axis 110026, 110055, 110077

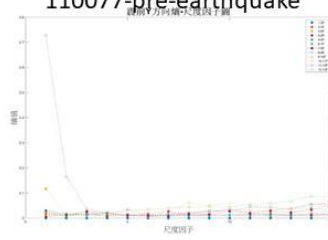
110026-pre-earthquake



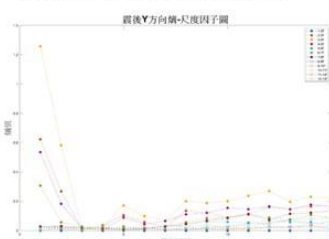
110055-pre-earthquake



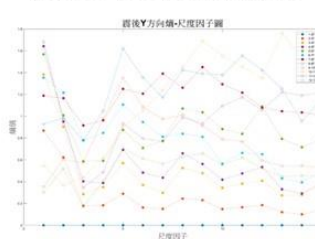
110077-pre-earthquake



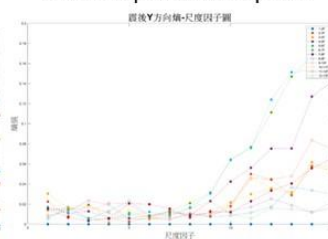
110026-post-earthquake



110055-post-earthquake



110077-post-earthquake

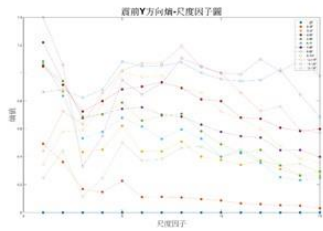


74

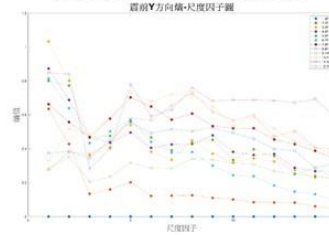
Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

Y-axis 110103, 110104

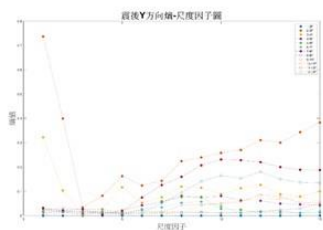
110103-pre-earthquake



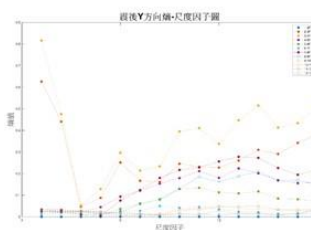
110104-pre-earthquake



110103-post-earthquake



110104-post-earthquake



Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

DI and SHM result

色階	破壞指數	結構安全狀況
綠色	0 < 指數 ≤ 0.3	安全
藍色	0.3 < 指數 ≤ 0.6	輕損
黃色	0.6 < 指數 ≤ 1.0	中損
紅色	1.0 < 指數	重損

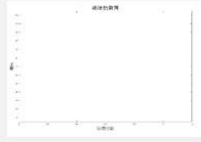
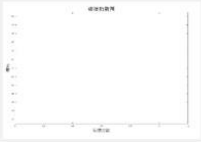
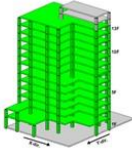
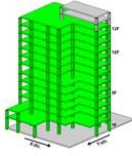
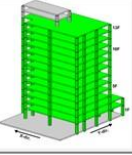
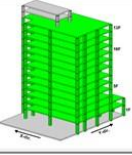
No.	110026	110055	110077
Damage Index			
SHM result (left-rear view)			
SHM result (right-front view)			



Major Earthquake CMSCE Analysis and DI

DI and SHM result

色階	破壞指數	結構安全狀況
綠色	0 < 指數 ≤ 0.3	安全
藍色	0.3 < 指數 ≤ 0.6	輕損
黃色	0.6 < 指數 ≤ 1.0	中損
紅色	1.0 < 指數	重損

No.	110103	110104
Damage Index		
SHM result (left-rear view)		
SHM result (right-front view)		



77

Outline

- *Introduction*
- *Methodology*
- *CMSCE Analysis for Structural Health Monitoring*
- *Integration of SHM and EEWs*
- *Conclusions*



78

Conclusions

- The analysis results show that **DI** increases to the **positive value frequently**, which can determine that the structure is in an **unstable state** relative to the reference events. The values could provide an **early and efficient warning** of structural instability.
- From the analysis results of the **serious seismic event** on 921 and 922, the **abnormally high DI** shows the advantage of the entropy analysis of this research.
- **real-time monitoring** : When the **real structure has not been destructively damaged**, the **signal similarity** can be used to **determine whether the structure is unstable or unhealthy**.
- Applying **CMSCE** into **EEW** system can accelerate the process of analyzing, which offer an reliable alarm system and integral structural safety information.



建築結構自動監測案例分享 -樹林藝文中心為例

新北市政府新建工程處
副處長 鄭立輝
2021/11/30

2

簡報大綱

- 地震災害案例與致災成因
- 地震儀系統簡介
- 樹林藝文大樓監測系統簡介
- 地震儀資訊、分析方法與結果應用
- 結論

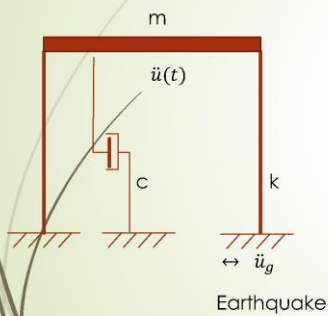
3

地震對於房屋結構致災成因

結構物的隱性損傷 可否提前得知?

4

地震對於房屋結構致災成因



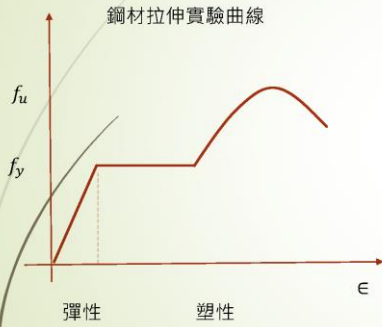
結構動力 方程式

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$

慣性力	阻尼力	彈簧力	地震力
-----	-----	-----	-----

5

地震對於房屋結構致災成因

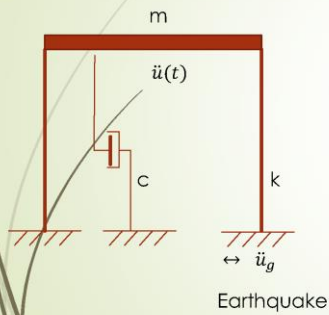


房屋結構行為 也跟 材料行為類似



6

地震對於房屋結構致災成因說明



$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$

- 在 m 不變也沒有其他隔震設施保護的前提下，如果 \ddot{u}_g 增加，只能增加 k 或 c 來 增加結構耐震能力
- 結構物勁度 K 值 量測不易，通常是以測量振動頻率來替代

7

結構耐震補強(加強)原理

鋼板包覆 (增加 k 值)



<https://www.archi.net.tw/company/136262/project-detail-44069.html>

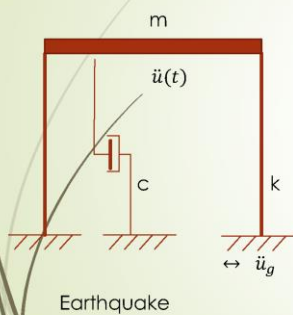
減震器 (增加 c 值)



<http://www.ncree.org/safehome/nccr05/nccr2.htm>

8

地震對於房屋結構致災成因說明



$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$

$$\omega_n \cong \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{自然振動頻率})$$

如何測得 自然振動頻率?

➡ Ans: 高速攝影、地震儀量測....

9

結構振動頻率與受震反應淺談

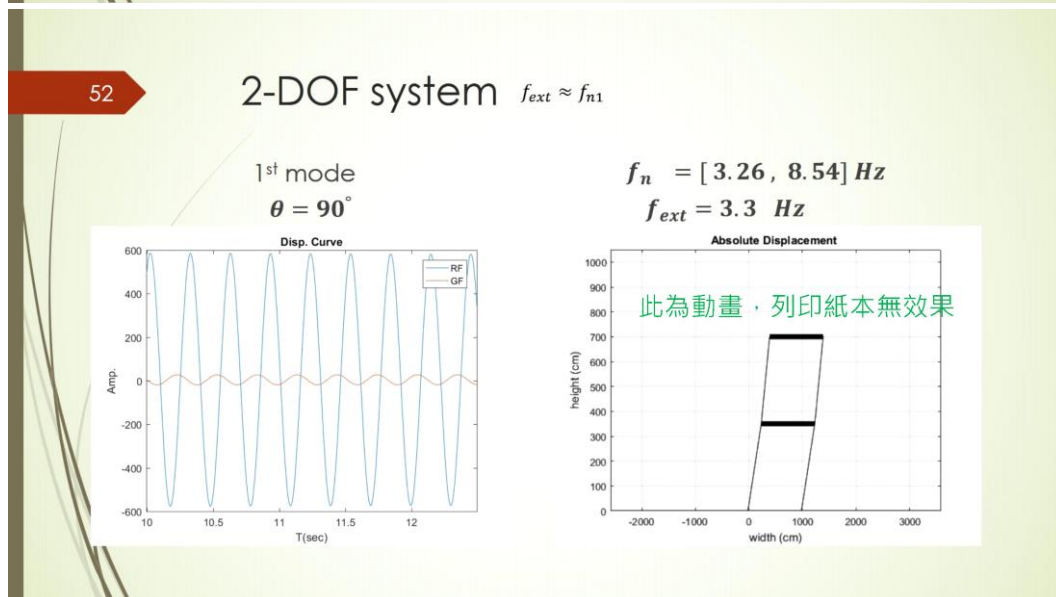
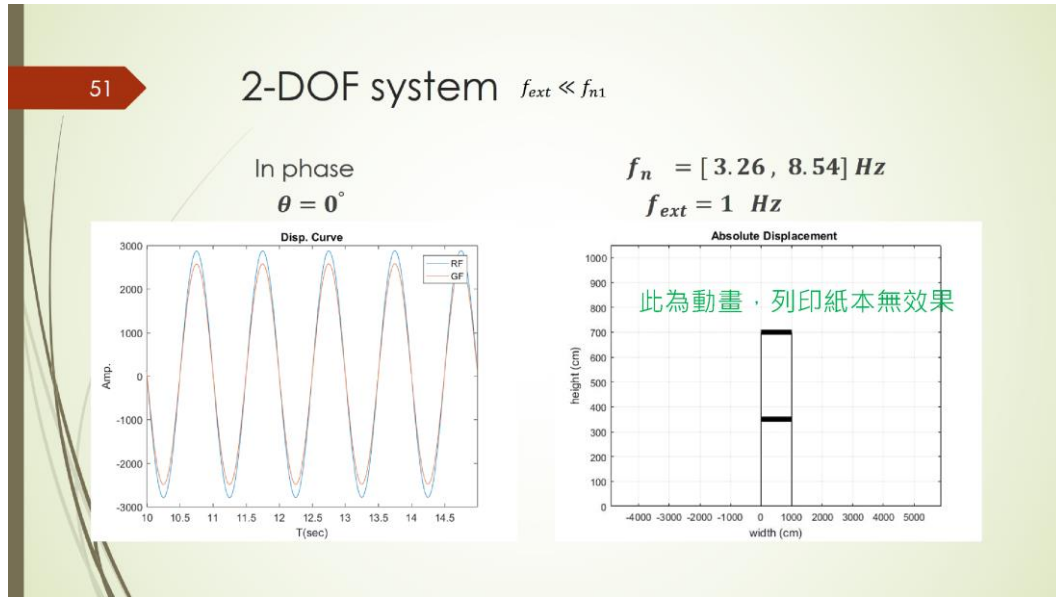
從學理上來說

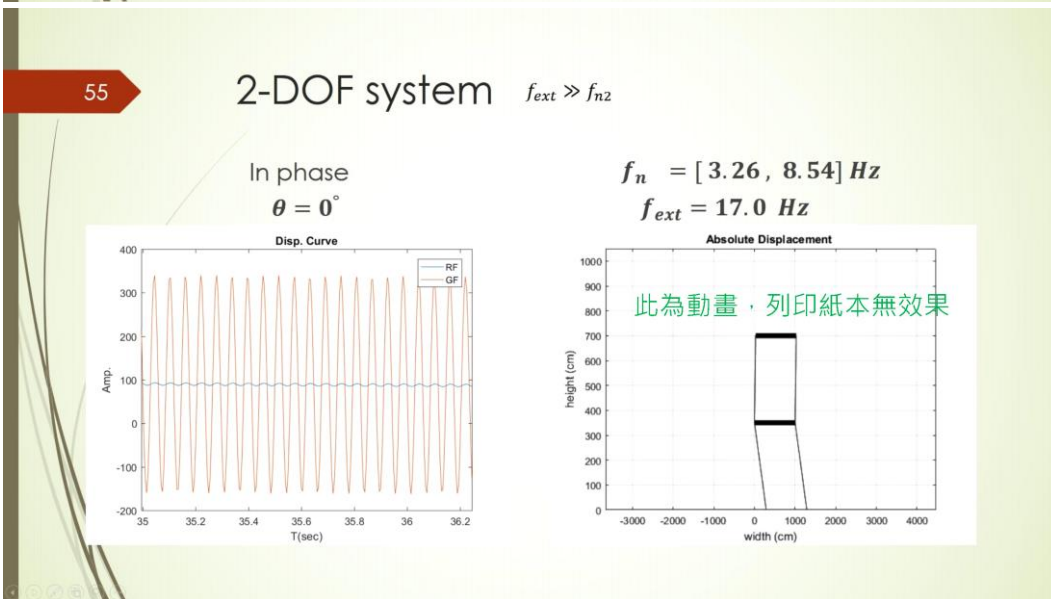
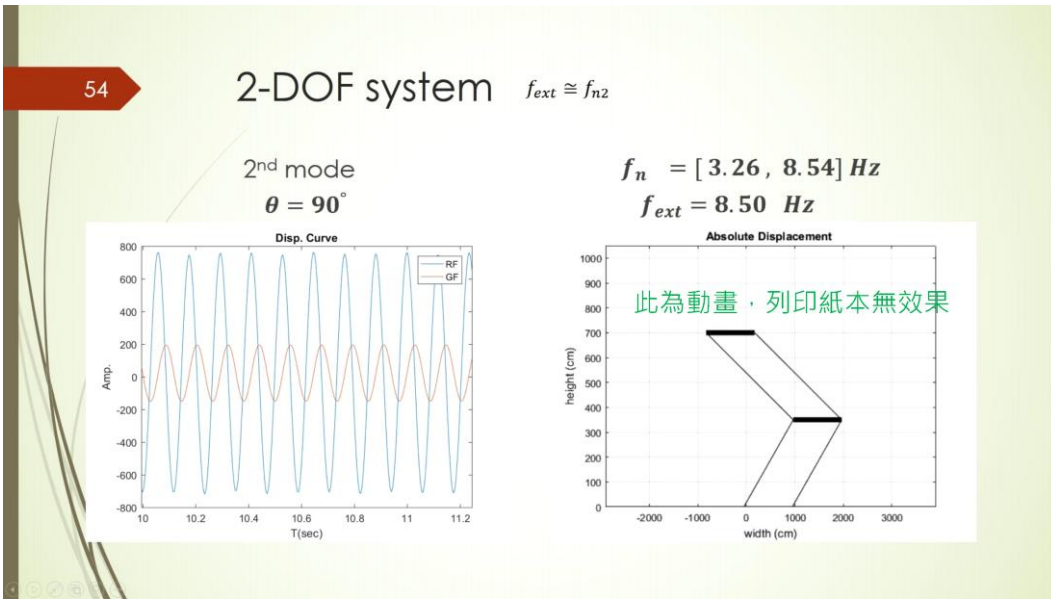
10

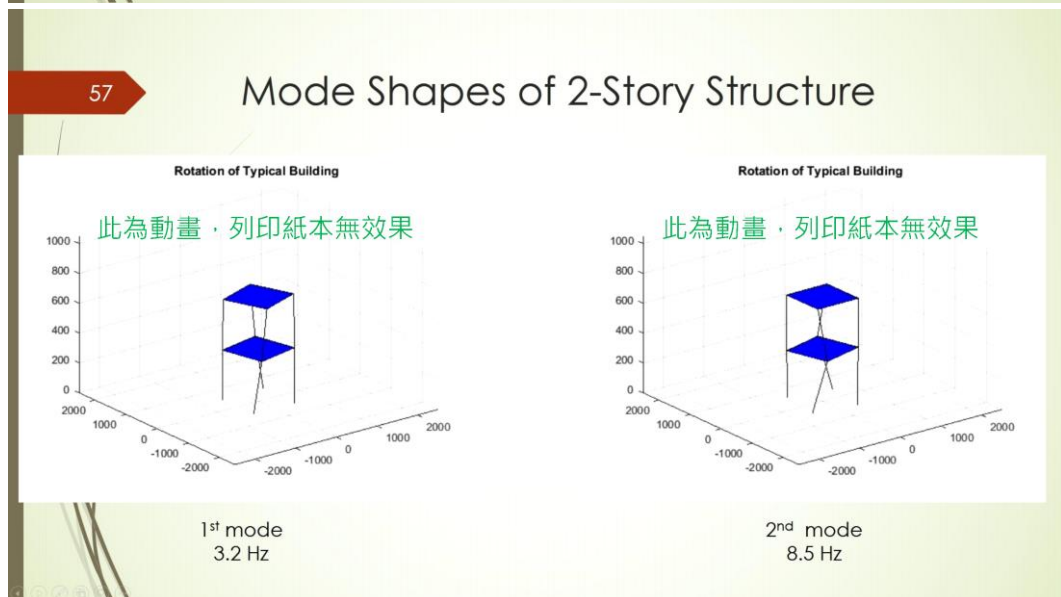
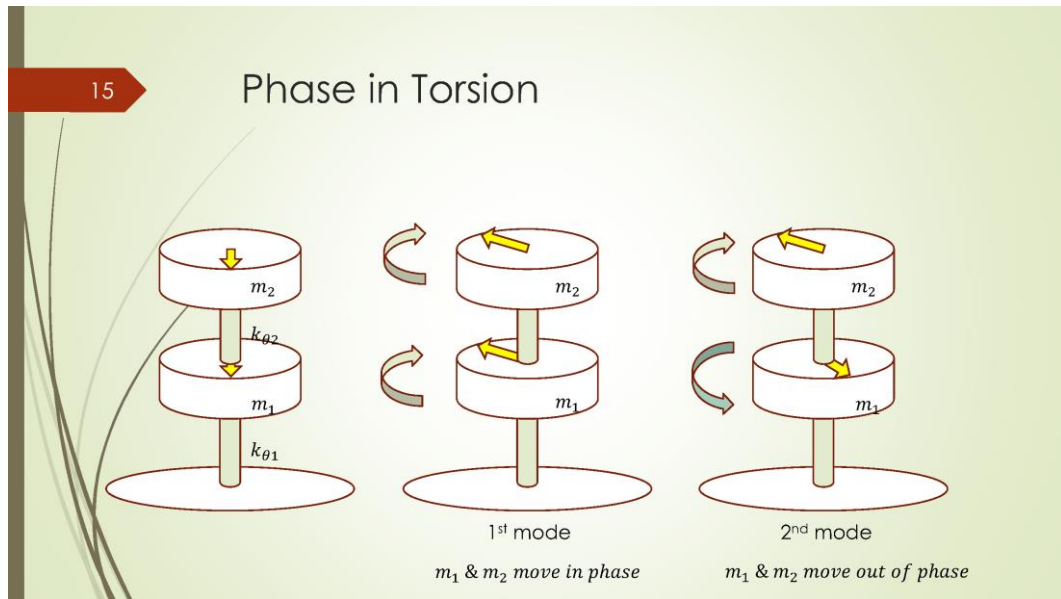
Dynamic Response of 2DOF Structure

The diagram illustrates the dynamic response of a 2DOF structure at three different frequency conditions:

- Left Diagram ($\omega/\omega_n \ll 1$):** Shows a structure with two masses m on each of two levels. At low frequencies, the structure moves as a rigid body, with all masses moving in the same direction and magnitude. The ground is also shown moving in the same direction.
- Middle Diagram ($\omega = \omega_{n1}$):** Shows the structure at its first natural frequency. The top two masses move in opposite directions (one left, one right), while the bottom two masses move in the same direction as the ground. The ground is shown moving in the same direction.
- Right Diagram ($\omega = \omega_{n2}$):** Shows the structure at its second natural frequency. The top two masses move in the same direction, while the bottom two masses move in the opposite direction to the top masses. The ground is shown moving in the same direction as the top masses.







17

外力頻率跟結構受震反應關聯

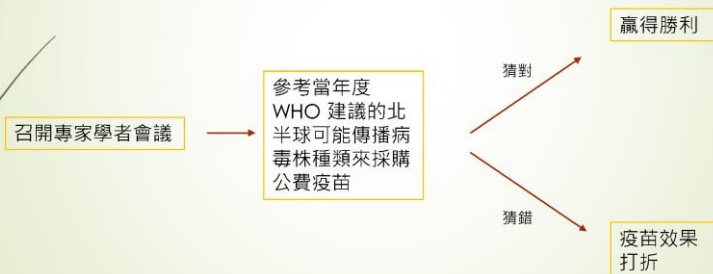
- 當外力作用的頻率與結構物的自然振動頻率相同時，會發生**共振效應**，即便外力很小，結構物也會有很大的反應。
- 地震力是多重頻率組合的外力，跟地震震源位置、本地的地盤種類、地形有關；如何知道地震來臨時地震力的頻率是多少？

18

敵人是誰？

- 流感疫苗種類的決定

- 流感病毒百百種，衛福部怎知今年要採購哪種公費疫苗？

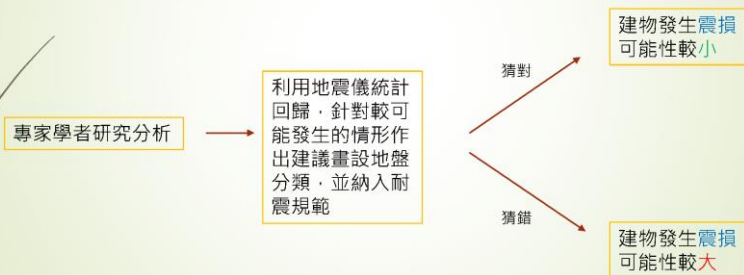


19

敵人是誰？

- 地震力外力頻率的決定[地盤分類]

- 利用各地布設的地震儀，蒐集過去地震分布的大致狀況並統計回歸



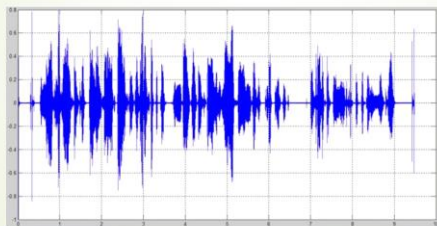
20

以樹林藝文大樓蒐集到的地盤加速度資料為例

21

頻譜分析簡介

- 今天假設我在聽一首周結輪的歌，他的音訊如下圖所示

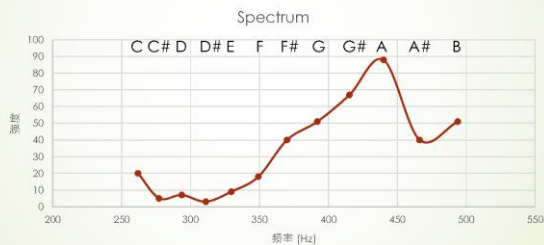


- 我想知道 這首歌裡面有幾個 Do、幾個Re、幾個Mi.....，要如何處理？

22

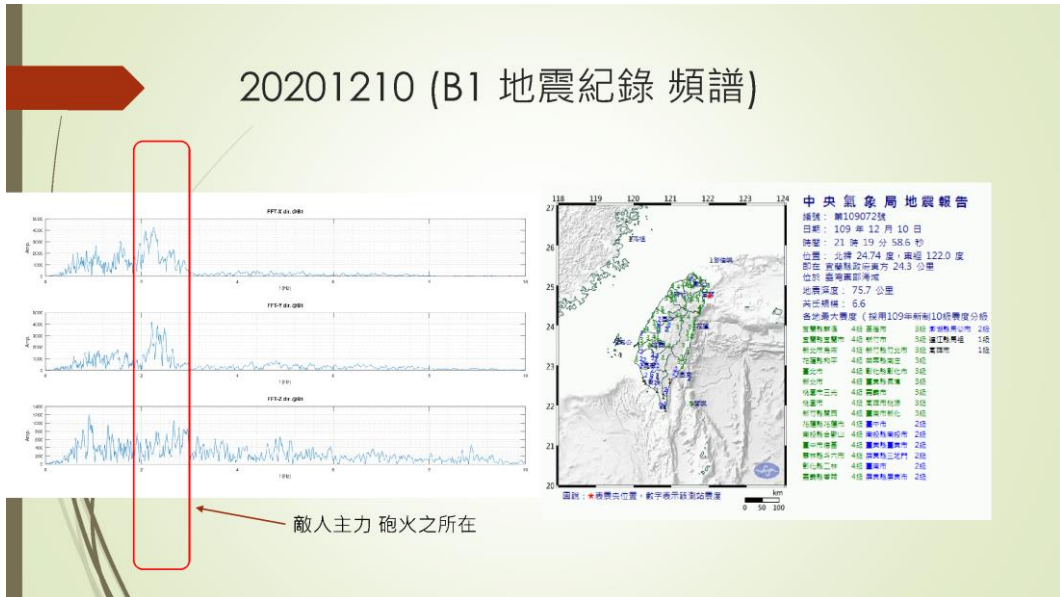
頻譜分析簡介

- 我們把上一頁的音樂訊號，利用 **傅立葉轉換**，可以轉換成頻譜的訊號

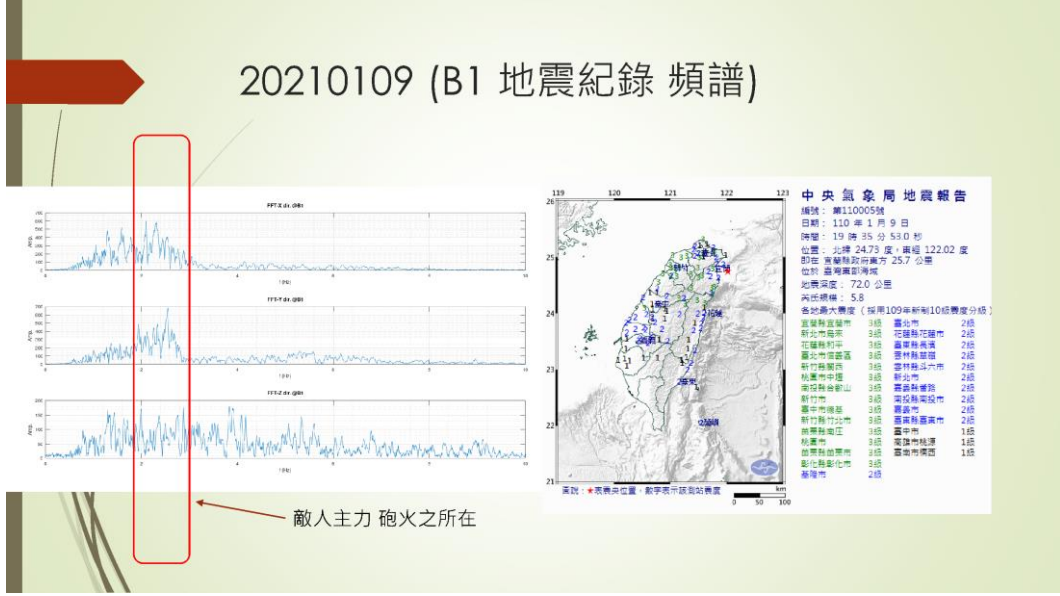


如果 我有一種特殊疾病，對於 La 聲音特別過敏，那聽這首歌對我健康有害

20201210 (B1 地震紀錄 頻譜)



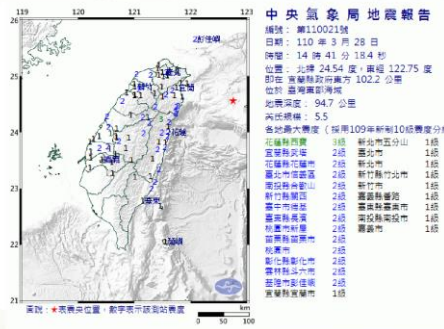
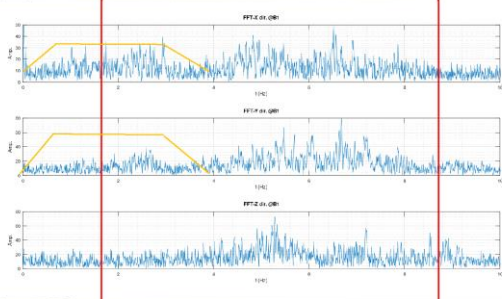
20210109 (B1 地震紀錄 頻譜)



20210328 (B1 地震紀錄 頻譜)

專家也有猜錯的時候，這就是人生

這次地震 樹林地區的低矮樓房 應該 晃得蠻厲害的



28

小結： 求人不如求己

- ▶ 耐震設計不可能完美周全，地震來臨的時間、方向、頻率、大小種類無法盡知
- ▶ 「知己知彼、百戰不殆」→ 定期調查、監測自身建築結構本身的狀況才是上策

29

樹林藝文大樓的地震監測系統簡介

30

樹林藝文大樓簡介



31

樹林藝文大樓基本資料

- 地址：新北市樹林區樹新路40-7號
- 基地面積： 5098.99 m²
- 樓地板面積： 21204.04 m²
- 樓高： 34.75 m
- 規模：地上七層、地下三層
- 用途：
 - 一樓為樹林區衛生所
 - 一樓文化局展演廳(展演廳挑高一至四樓)
 - 二樓為長照中心
 - 三~四樓為新北市立圖書館樹林分館
 - 五~七樓為新工處辦公廳舍
 - B1~B3則為收費地下停車場



32

樹林藝文大樓基本資料

- 主辦機關： 新北市政府新建工程處
- 規劃監造： 林同棧工程顧問公司 & 林智灝建築師事務所
- 統包團隊： 中華工程公司 & 許伯元建築師事務所

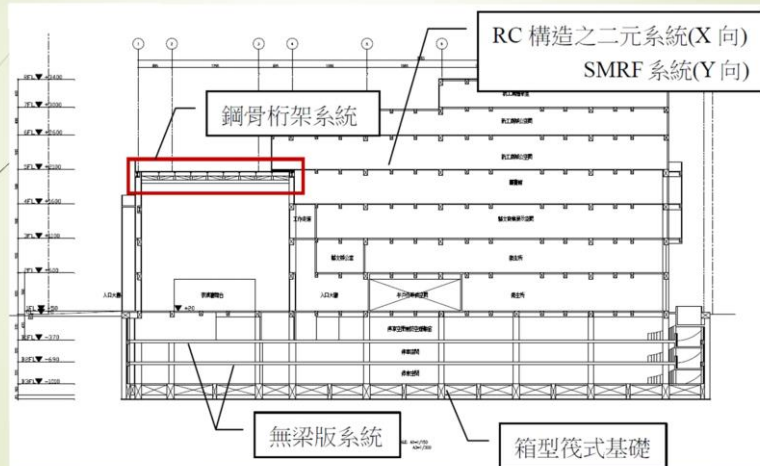
- 開工： 105年8月
- 完工： 108年3月
- 啟用： 108年7月

- 招標模式： 統包
- 總經費： 約 8.45 億元



33

樹林藝文大樓結構系統



34

地震儀型號

網路型三軸向地震儀
AC-217



儀器：三軸向微機電加速度計、支援第四垂直軸速度計

可內建或外接

量測範圍： $\pm 2G$

動態範圍：100 dB

解析度：4通道24位元

輸出取樣率：50sps、100sps、200sps(可設定)

地震觸發邏輯：PD、PGA、STA/LTA

STA範圍：0.1 – 120秒(可設定)

LTA範圍：0.1 – 120秒(可設定)

地震事件記錄時間：200秒(可設定)

資訊顯示：LCD液晶螢幕顯示(2x20)，即時顯示儀器狀態

通訊：網路連接，相容Modbus通訊協定

軟體：即時波線展示與設定、地震事件記錄

記憶容量：16GB(可擴充至64GB) 儲存儀器參數

與地震記錄

內建時鐘精度(RTC)： ± 60 秒 / 年

35

終端機型號

地震終端警報器 CUBE



配置於一樓中央監控室
現場業主需提供連外網路

設備介紹

Cube是應地震預警系統後端需求而產生的警報裝置。整合中央氣象局地震速報網、PX-01監控主機與Paleri(P皮地震儀)，提供一個完整的地震預警解決方案。形成區域預警及現地地震警報器自動化系統。

Cube是一組智慧化的壁掛式地震警報器，可以單獨運作，透過網路連結中央氣象局地震速報發布主機，於地震發生第一時間發布地震預警訊息。

PX-01地震監控主機(以下簡稱監控主機)透過網路擷取來自中央氣象局地震速報網的即時地震速報訊息，同時透過網路連線本區Cube地震警報器，進行地震預警。強震到達秒數計時或是現地P皮預警，S波告警顯示地震度。此外，本機亦可顯示接收到的文字信息，如氣象局有關地震緊急等相關信息，例如強震後可能引發海嘯信息和餘震信息。現地地震事件告警、通知、驅動警報作地震二次災害、減災告警控制。

系統特色

- 工業等級大尺寸彩色觸控顯示介面及高亮度三色LED指示燈，提高警示辨識性
- 區域預警：可直接接收氣象局傳遞之詳細地震預警，收到CWB EEWWS訊息可轉發給其他Cube(一個大單位僅需有一組CEB的帳號即可)，大幅增加預警涵蓋範圍
- 具備高分貝喇叭，可以播放預錄語音或是高分貝警告音
- 本機配備三組繼電器輸出接點，作為外部設備控制或驅動警示燈，告警門檻可依實際需求設定
- 可發送MQTT警報訊息(IoT)

設備規格

- 內建7"工業等級網路型觸控介面
- 高分貝喇叭(4Ω)
- 高辨識度三色60ΦLED(RYG)
- 內建時鐘精度(RTC)：±60秒/年
- 電源：12 Watt @24VDC

使用環境

- 操作溫度：-20°C ~ +70°C
- 相對濕度：5 ~ 90% RH, 未凝結
- 外觀尺寸(W x H x D)：300mm x 350mm x 122mm
- 重量：5.8公斤

36

樹林藝文大樓地震儀安裝位置(長向立面)

(紅色儀器係由建築中心無償借用，黃色儀器係由新工處另籌經費增設)



37

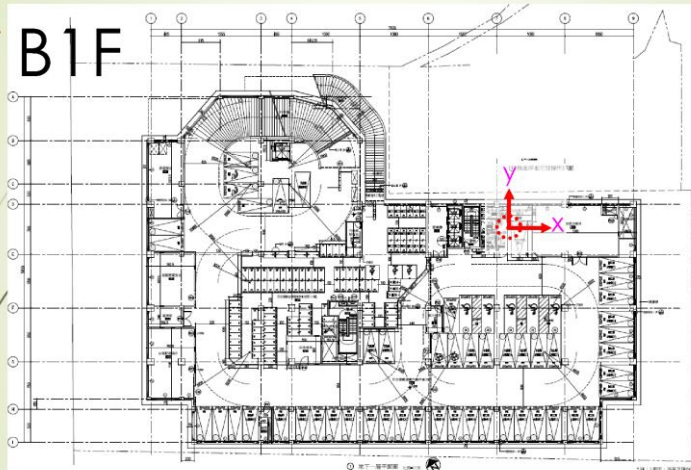
樹林藝文大樓地震儀安裝位置(短向立面)

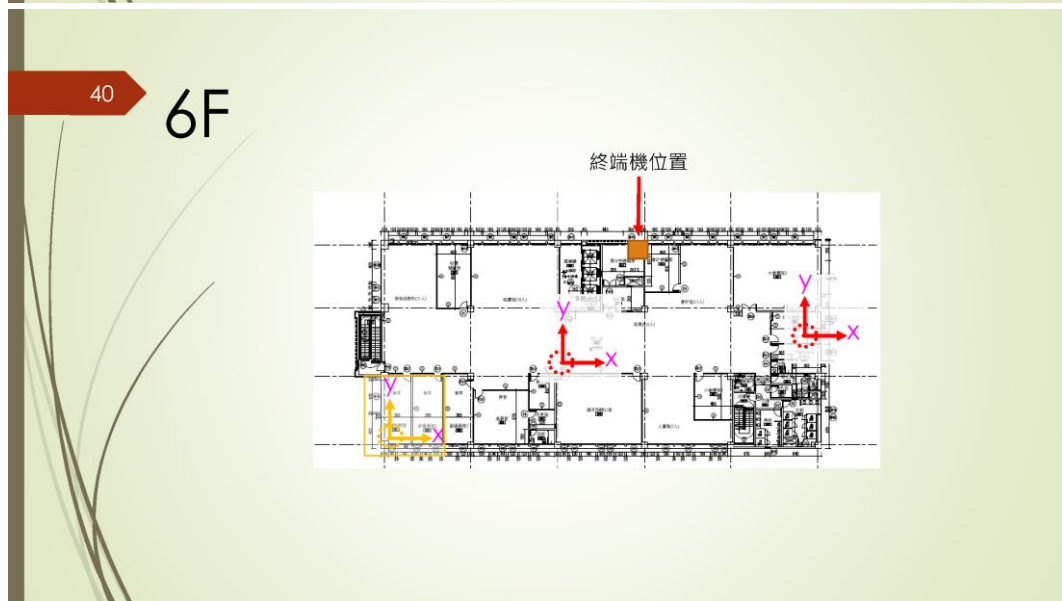
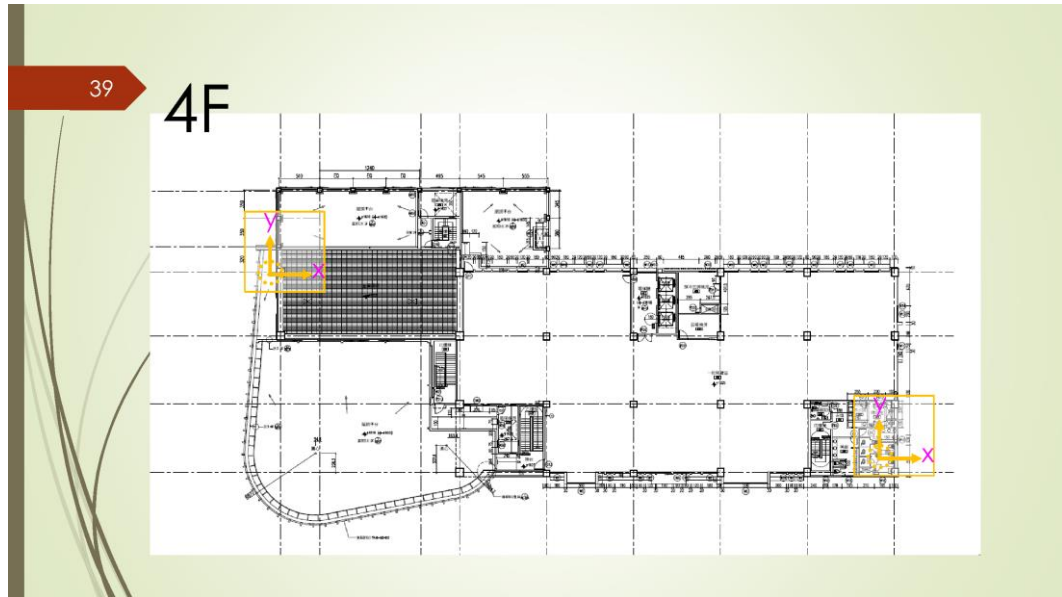
(紅色儀器係由建築中心無償借用，黃色儀器係由新工處另籌經費增設)



38

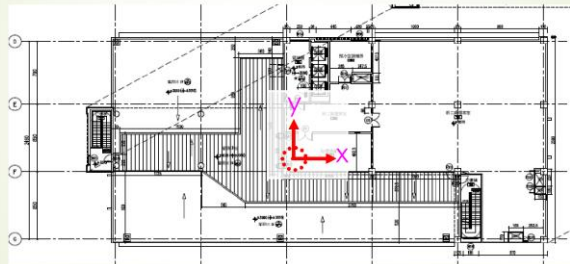
B1F





41

7F



42

我們從地震儀得到什麼資訊？

43

資訊種類

- 直接得到
 - 地表**加速度** XYZ
 - 樓層**加速度** XYZ
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 **速度** XYZ
 - 樓層、地表 **位移** XYZ
 - **加速度的頻譜**
- 進一步分析得到
 - 結構 **振動頻率** f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 **扭轉頻率** f_t

Earthquake

44

地震儀提供 加速度資料格式 *.CSV 檔

45

資訊種類

- 直接得到
 - 地表**加速度** XYZ
 - 樓層**加速度** XYZ
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 速度 XYZ
 - 樓層、地表 位移 XYZ
 - 加速度的頻譜
- 進一步分析得到
 - 結構 振動頻率 f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 扭轉頻率 f_t

積分 + 簡易訊號處理
(本系統亦可計算提供)

46

資訊種類

- 直接得到
 - 地表**加速度** XYZ
 - 樓層**加速度** XYZ
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 速度 XYZ
 - 樓層、地表 位移 XYZ
 - 加速度的頻譜
- 進一步分析得到
 - 結構 振動頻率 f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 扭轉頻率 f_t

訊號處理+ 系統識別

這是專家學者的工作

47

這些資訊有什麼用途?

48

資訊用途

- 直接得到
 - 地表**加速度** X Y Z
 - 樓層**加速度** X Y Z
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 速度 X Y Z
 - 樓層、地表 位移 X Y Z
 - 加速度的頻譜
- 進一步分析得到
 - 結構 振動頻率 f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 扭轉頻率 f_t

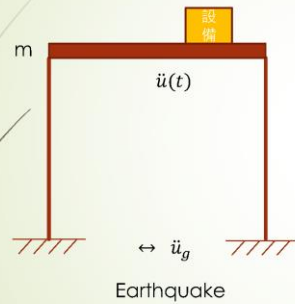
➔

- 本地 地表**加速度**資訊
 - 本次地震規模 (是否可能致災)
- 樓層的**加速度**資訊
 - 本次結構受力狀況(是否可能致災)
- 頂層**加速度**的放大情形
 - 作為設備安裝設計參考用

49

屋頂放大倍數的作用

重要設備安裝於高樓層時，必須考慮地震被放大的效應



100年版的耐震規範建議公式:

$$\frac{A_x}{A_g} = 1 + \frac{2h_x}{h_n}$$

現行耐震公式:

$$F_{ph} = 0.4S_{DS}I_p \left(\frac{a_p}{R_{pa}} \right) \left(1 + \frac{2h_x}{h_n} \right) W_p$$

**規範建議，重要設備安裝屋頂時，放大倍數為 3 倍 地表設計地震力

50

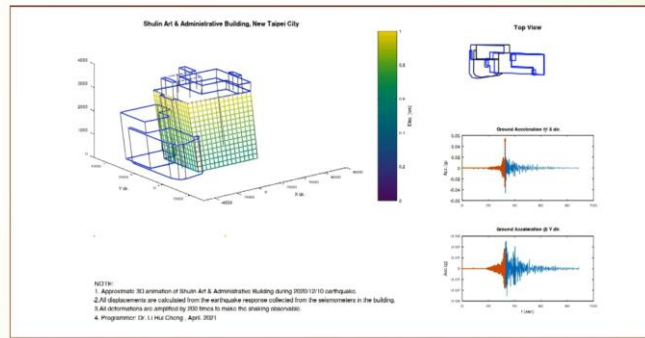
資訊用途

- 直接得到
 - 地表**加速度** XYZ
 - 樓層**加速度** XYZ
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 **速度** XYZ
 - 樓層、地表 **位移** XYZ
 - 加速度的頻譜**
- 進一步分析得到
 - 結構 振動頻率 f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 扭轉頻率 f_t

- 樓層層間位移
 - 評估弱層的存在?
 - 評估整體勁度變化
 - 層間變位 < 0.005
- 結構的 動態 位移情形
- 地表加速度的頻譜(地形效應、盆地效應)

63

結構受震反應 - 樹林藝文大樓 2020/12/10 地震



此為動畫，列印紙本無效果

54

資訊用途

- 直接得到
 - 地表**加速度** X Y Z
 - 樓層**加速度** X Y Z
- 初步分析得到
 - 樓層、地表 **速度** X Y Z
 - 樓層、地表 **位移** X Y Z
 - **加速度的頻譜**
- 進一步分析得到
 - 結構 **振動頻率** f_x 、 f_y 、 f_z
 - 結構 **扭轉頻率** f_t

- 樓層 **振動特性參數**
- 長期觀測 - 振動參數是否改變
- 結構物可能損傷的位置(理想)



55


結構振動頻率是內在的固有屬性

頻率顯著改變表示結構物可能遭到損傷

56

如何 求出 結構振動頻率？

系統識別方式簡介



```
graph LR; input --> BlackBox[Black Box]; BlackBox --> output;
```

57

分析方法

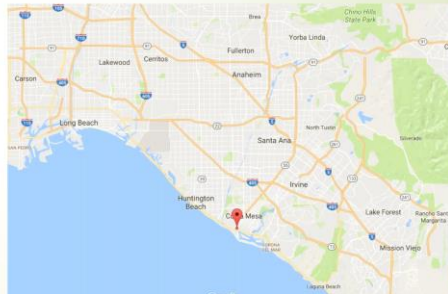
- ▶ 峰值法 (Peak picking)
- ▶ 子空間識別法(Subspace Identification)
- ▶ 相位差指數法(Phase difference index method)

- ▶ 族繁不及備載.....

以下 以美國Newport Beach 醫院大樓 為例 簡單介紹

58

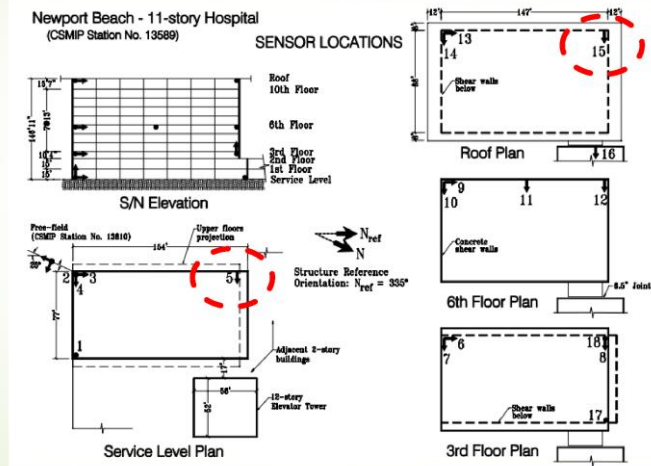
Newport Beach - 11 Story Hospital Location



59

Sensor Locations

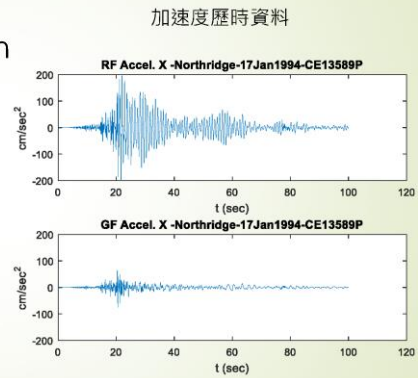
- ▶ X direction(E-W):
 - ▶ RF: 15
 - ▶ GF: 5
- ▶ Northridge-17/Jan/1994
 - ▶ Accel. Max:
 - ▶ Ground: 0.08 g
 - ▶ Building: 0.26 g

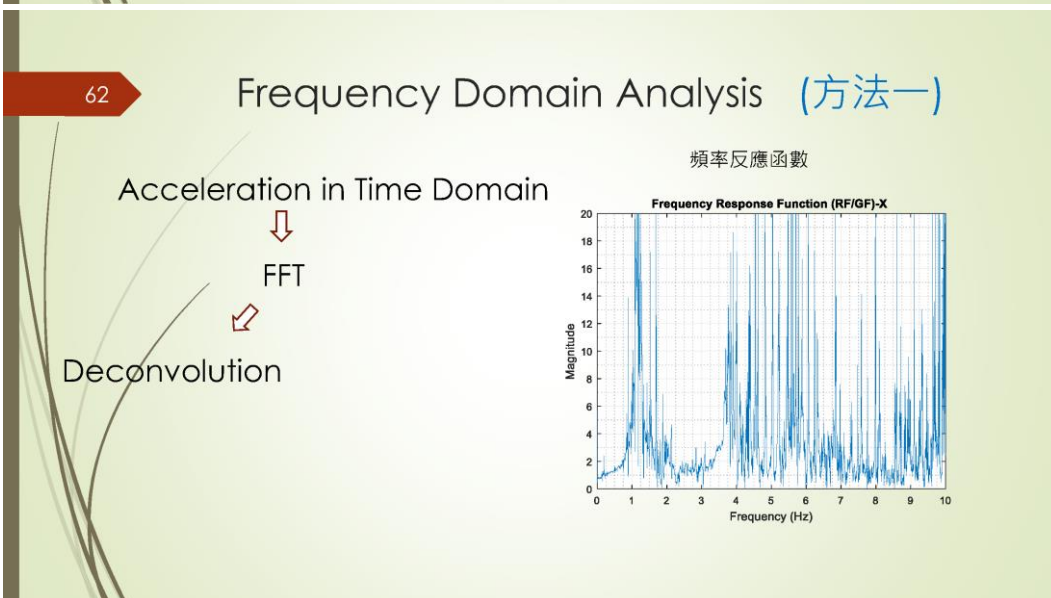
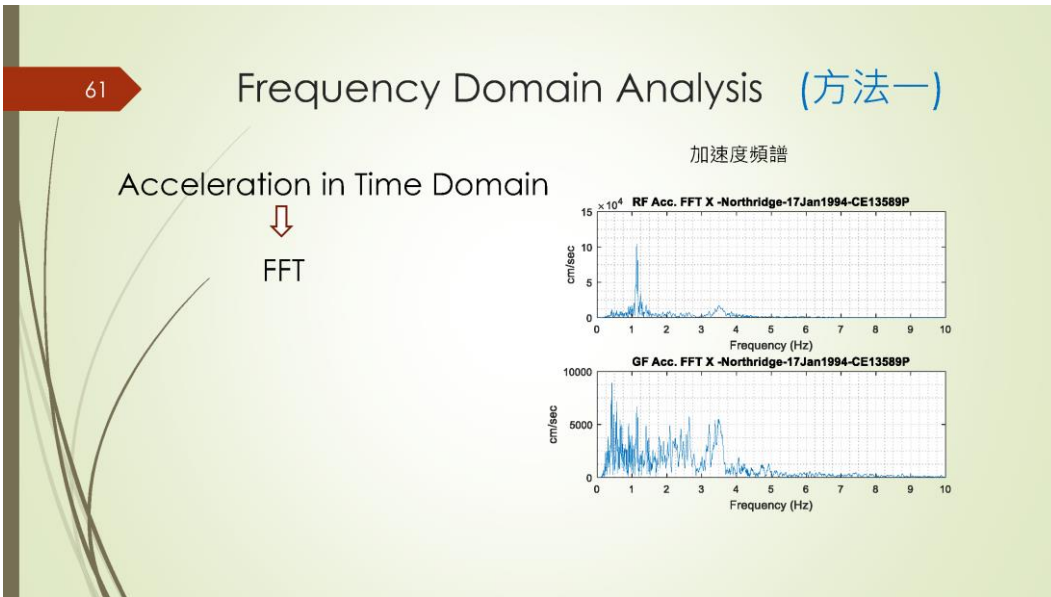


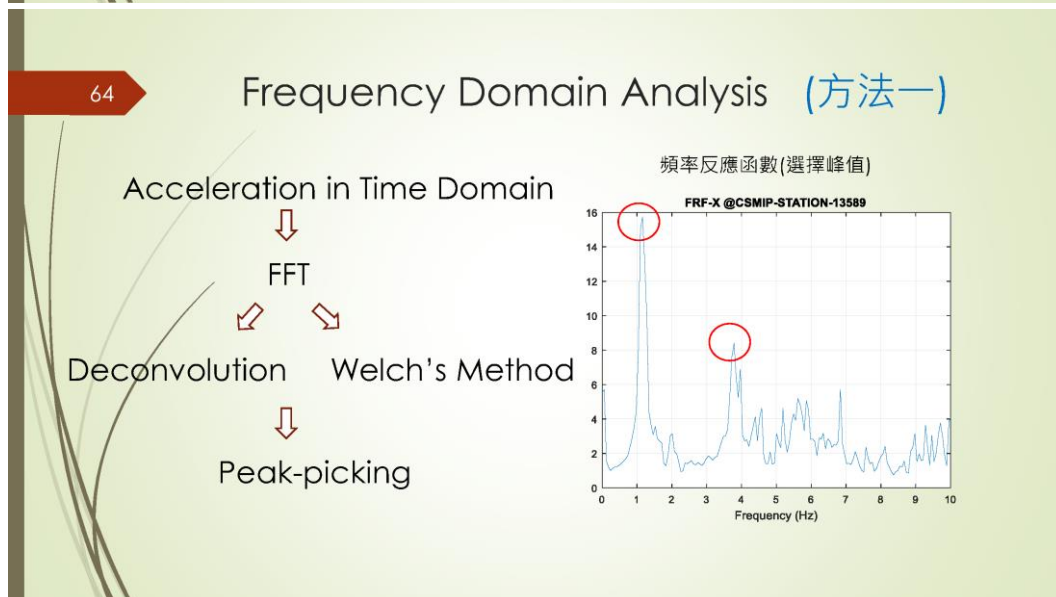
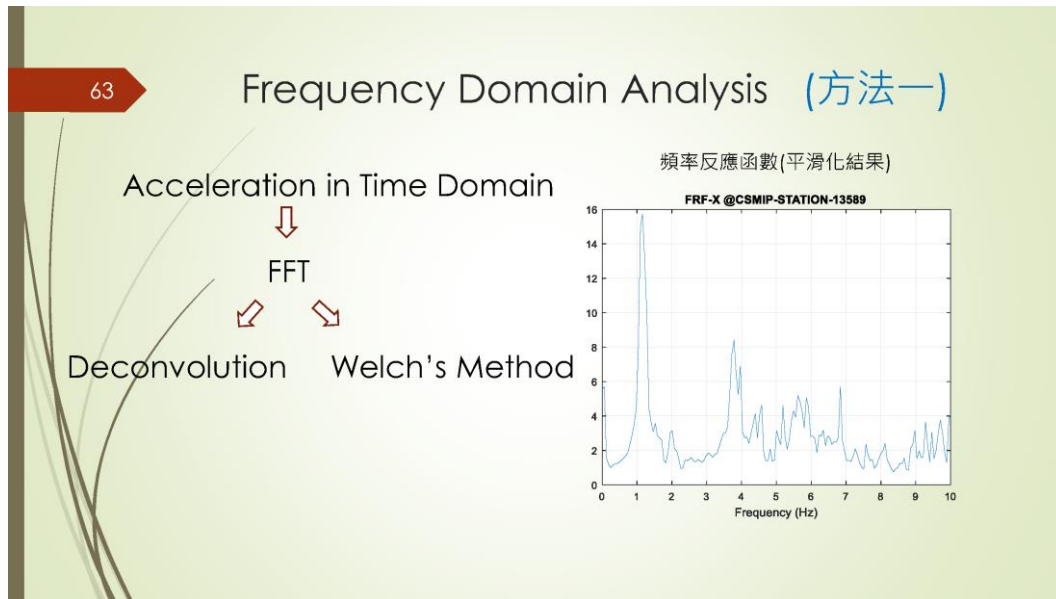
60

Frequency Domain Analysis (方法一)

Acceleration in Time Domain







65 Time Domain Analysis (方法二)

加速度歷時資料

Acceleration in Time Domain

↓

Assume Model Order and Size of Hankel Matrix

66 Time Domain Analysis (方法二)

子空間識別法

Order = 16

Acceleration in Time Domain

↓

Assume Model Order and Size of Hankel Matrix

↓

SubSpace Method (n4sid)

↓

Repeated Eigenvalues Selection

67

識別結果

- $f_{x1} \approx 1.1 \text{ Hz}$
- $f_{x2} \approx 3.8 \text{ Hz}$

↓

平、立面 規則 單純的建物，易設計、
易預測受震反應，耐震性亦較佳

- 依據美國規範 ASCE (7-16)
- 公式 12.8-7
(all other structural systems)

$$T_a \approx 0.02 \times h^{0.75} = 0.84 \text{ (sec)}$$
$$f_a = 1.18 \text{ Hz}$$

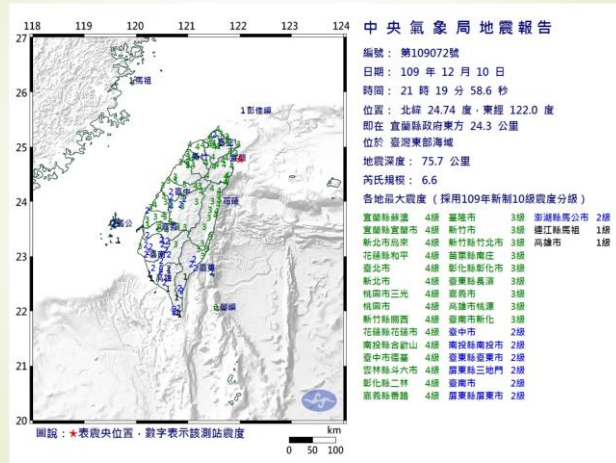
↑ 蠻接近的

68

樹林藝文大樓案例分享

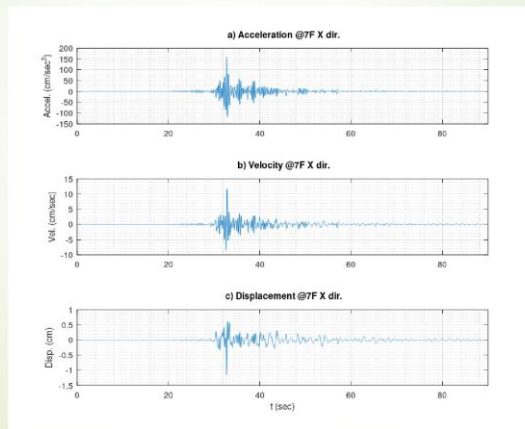
69

單一事件分析



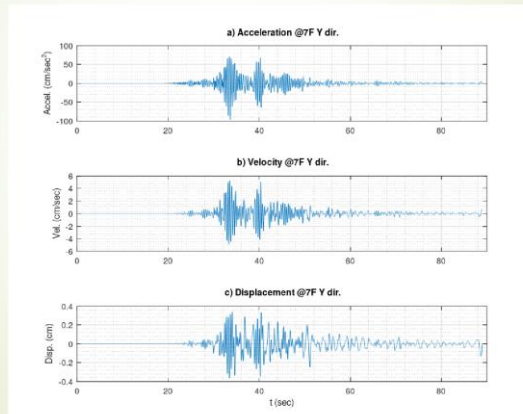
70

2020/12/10 No.72 顯著有感地震 7 F X 向 加速度、速度、位移



71

2020/12/10 No.72 顯著有感地震
7F Y 向 加速度、速度、位移



72

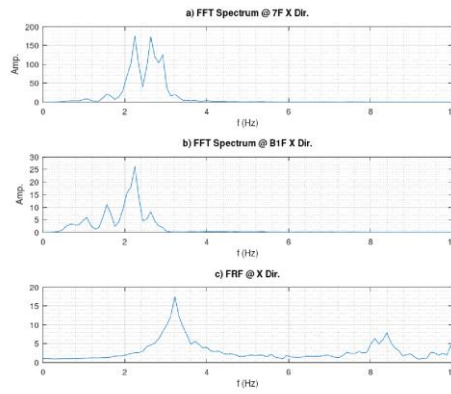
2020/12/10 No.72 顯著有感地震

樓層 方向	7F (gal)	B1 (gal)	放大倍數
X 向	159.764	52.158	3.06
Y 向	96.002	25.002	3.84
Z 向	29.728	10.228	2.91

地盤 加速度 傳遞到屋頂 會有放大作用

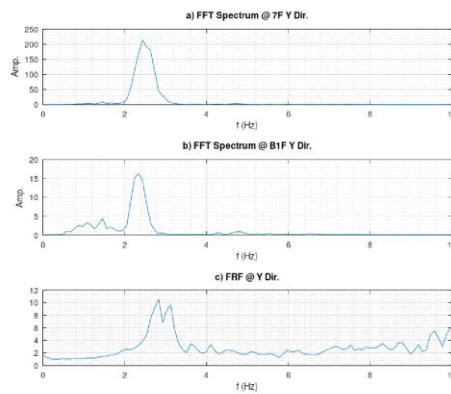
73

2020/12/10 No.72 顯著有感地震 X 向 頻譜 & 頻率反應函數



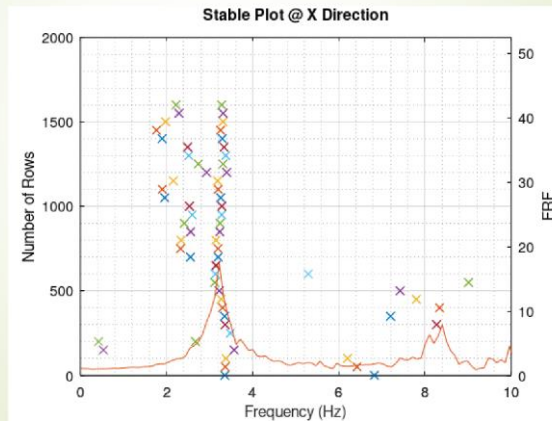
74

2020/12/10 No.72 顯著有感地震 Y 向 頻譜 & 頻率反應函數



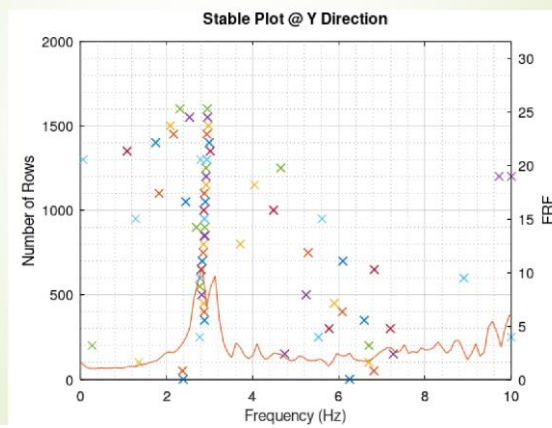
75

2020/12/10 No.72 顯著有感地震
X 向 穩態圖



76

2020/12/10 No.72 顯著有感地震
Y 向 穩態圖



77 2020/12/10 No.72 顯著有感地震

$f_{x1}=3.223\text{ Hz}$ 、 $f_{y1}=2.832\text{ Hz}$

週期	X向(sec)	Y向(sec)	扭轉(sec)
耐震(風力)規範	0.7156	1.0019	0.855
ETABS分析	0.9568	1.0065	0.733
2020/12/20 地震紀錄			
峰值法	0.3103	0.3531	
子空間法	0.3052	0.3465	

結構物勁度比預期高很多

台灣 建築物 運用大量 隔間牆 承重牆 · 識別結果 與規範公式落差很大

78 針對 振動頻率 建立履歷表

觀測 長期 頻率 變化 · 確認 結構 有無損傷

日期	x 向	y 向	最大地表加速度	放大倍數	層間變位
	Hz	Hz	gal		cm
2020/12/10	3.223	2.832	52.158	3.84	1
2021/1/9	3.318	2.884	5.204	3	0.09
...					

確認層間變位 是否 不合理

79

定期量測建築結構振動頻率目的

	目的	配套
跟自己比	自身建築結構的勁度是否： 1.隨時間 減損 2.在大地震後減損	最好能量測到大樓剛完成時的初始值
跟別人比	自身建築結構的勁度跟同等級、同類型的結構是否： 1.勁度 偏低	必須建立公眾資料庫

80

樹林藝文大樓振動頻率歷時紀錄識別結果

Date	fx	fy	Ug max
	Hz	Hz	gal
2021/03/28	3.418	2.9297	0.837
2021/04/18	3.418	2.832	2.45
2021/06/23	3.2471	2.9785	1.136
2021/07/08	3.3203	3.125	2.213
2021/08/05	3.4668	3.0273	11.604
2021/09/26	3.3203	2.9297	14.83
2021/10/23	3.418	2.9297	1.316
2021/11/17	3.2227	3.125	1.436

今年 到目前 11月 止 · 整體振動頻率值 仍處在穩定階段

建議未來執行機制

- 資訊蒐集
 - 利用科技工具、設備 蒐集建物地震反應數據
- 資訊分析
 - 由專家學者或業界協助定期分析建檔，或是標準化、簡化 分析流程，並提供房屋管理人參考
- 資訊公開
 - 公有建物資訊定期披露 或是 在地震後 於公開場合公告周知
- 資訊處理
 - 建立預警機制，如遇臨界值應立即處理

結語

- 地震儀預警系統可以協助 有效蒐集建築物 受震反應數據，以及**結構安全狀況**，若能建立定期健檢制度，對於建物使用者安全更有保障。
- 建議針對使用性強度高，或是重要性高的公有建築物優先裝設，並期未來技術成熟、成本下降後能逐漸推廣普及到一般私人住宅。
- 台灣建築結構並未標準化、模組化，每棟結構振動頻率均不相同，因此必須針對每棟建物**量測初始值**才能進行後續監測比對，大量本土資料庫建立後，有助於建立標準值與參考值



參考書目

1. AIoT 於產業價值鏈的災防創新應用與商機，民國 107 年，
<https://www.asmag.com.tw/showpost/11236.aspx>。
2. 2020 年全球重大天然災害回顧，傅鑣漩、施虹如、張志新，災
害防救電子報，國家災害防救科技中心，民國 110 年。
3. Hart, GC. and Yao, JTP., “System identification in structural
dynamics”, Journal of Engineering Mechanics Division,
ASCE; 103(EM6), pp.1089-1104., 1977.
4. Ljung, L. and Stoica, T., Theory and Practice of Recursive
Identification, Asco.Trade Typesetting Ltd., Hong Kong.,
1983.
5. Yun, C.B. and Shinozuka, M., “Program LINEARID for
identification of linear structural dynamic systems”,
technical report, NCEER-90-0011, National Center for
Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 1990.
6. Shinizuka, M. and Ghanem, R., “Structural system
identification II: experimental verification”, Journal of
Engineering Mechanics, ASCE, 121(2), pp.265-273, 1995.
7. Ghanem, R. and Shinozuka, M., “Structural-system

- identification I: theory”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 121(2), pp.255-264, 1995.
8. Saridis, G.N., “Comparison of six on-line identification algorithm”, *Automatica*, 10, pp.69-79, 1974.
 9. Farrar C.R., Worden K., “An introduction to structural health monitoring”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 373, pp.303-315, 2007.
 10. Sim S.H., Spencer B.F. Jr., “Decentralized strategies for monitoring structures using wireless smart sensor networks”, *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series*, No. 019, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
 11. Mottershead J.E., Friswell M.I., “Model updating in structural dynamics”, a survey, *Journal of sound and vibration*, 167(2), pp.347-375, 1993.
 12. Zhang Q.W., Chang C.C., Chang T.Y.P., “Finite element model updating for structures with parametric constraints”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(7), pp.927-944, 2000.
 13. Jaishi B., Ren W.X., “Structural finite element model

參考書目

- updating using ambient vibration test results”, *Journal of Structural Engineering*, 131(4), pp.617-628, 2005.
14. Carden E.P., Fanning P., “Vibration based condition monitoring”, a review, *Structural Health Monitoring*, 3(4), pp.355-377, 2004.
 15. Berman A., “Inherently incomplete finite element model and its effects on model updating”, *AIAA Journal*, 38(11), pp.2142–2146, 2000.
 16. Casas J.R., Aparicio A.C., “Structural damage identification from dynamic-test data”, *Journal of Structural Engineering*, 120(8), pp.2437–2450, 1994.
 17. Wahab M.M.A., De Roeck G., Peeters B., “Parameterization of damage in reinforced concrete structures using model updating”, *Journal of Sound and Vibration*, 228(4), pp.717–730, 1999.
 18. Chen J.D., Loh C.H., “Tracking modal parameters of building structures from experimental studies and earthquake response measurements”, *Structural Health Monitoring*, 16(5), pp.551-567, 2017.

19. Van Overschee P., De Moor B., “Subspace algorithms for the stochastic identification problem”, 30th IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, UK, pp.1321-1326, 1991.
20. Peeters B., De Roeck G., “Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis”, Mechanical Systems and Signal Processing, 13(6), pp.855-878, 1999.
21. Peeters B., De Roeck G., “Stochastic system identification for operational modal analysis”, a review, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 123(4), pp.659-667, 2001.
22. Brownjohn J.M.W., “Ambient vibration studies for system identification of tall buildings”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, pp.71-95, 2003.
23. Lynch J.P., Wang Y., Loh KJ, Yi J-H, Yun C-B, “Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors”, Smart Materials and Structures, 15, pp.1561-1575, 2006.
24. Siringoringo D.M., Fujino Y., “System identification of a

參考書目

- suspension bridge from ambient vibration response”,
Engineering Structures, 30, pp.462-477, 2008.
25. Weng J-H, Loh C-H, Lynch J.P., Lu K-C, Lin P-Y, Wang Y.,
“Output-only modal identification of a cable-stayed bridge
using wireless monitoring systems”, Engineering Structures,
30, pp.1820-1830, 2008.
26. Chang C.M., Loh C.H., “Improved stochastic subspace
system identification for structural health monitoring”,
Journal of Physics: Conference Series, 628, 012010,2015.
27. C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication,"
The Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379-
423, 1948.92
28. A. N. Kolmogorov, "New Metric Invariant of Transitive
Dynamical Systems and Endomorphisms of Lebesgue
Spaces," Doklady of Russian Academy of Sciences, Vols.
119, N5, pp. 861-864, 1958.
29. S. M. Pincus, I. M. Gladstone and R. A. Ehrenkranz, "A
regular statistic for medical data analysis," Journal of
Clinical Monitoring, vol. 7, no. 4, pp. 335-345, 1991.

30. J. S. Richman and J. R. Moorman, "Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy," *Am J Physiol Heart CircPhysiol*, vol. 278, pp. H2039-H2049, 2000.
31. M. Costa, A. L. Goldberger and C. K. Peng, "Multi-scale entropy analysis of complex physiologic time series," *Physical Review Letters*, vol. 89, no. 6, pp. 068102-1-068102-4, 2002.
32. S. M. Pincus and B. H. Singer, "Randomness and degrees of irregularity," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 93, no. 5, pp. 2083-2088, 1996.
33. J. S. Richman and J. R. Moorman, "Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy," *Am J Physiol Heart CircPhysiol*, vol. 278, pp. H2039-H2049, 2000.
34. S. D. Wu, C. W. Wu, S. G. Lin, C. C. Wang and K. Y. Lee, "Time series analysis using composite multiscale entropy," *Entropy*, vol. 15, no. 3, pp. 1069-1084, 2013.
35. Yin, Y.; Shang, P.G.; Feng, G.C. "Modified multiscale

參考書目

- cross-entropy for complex time series. *Appl. Math. Comput.*
" 2016, 289,98-110.
36. X. F. Guan, Y. X. Wang and J. J. He, "A Probabilistic
Damage Identification Method for Shear Structure
Components Based on Cross--Entropy Optimizations,"
Entropy, vol. 19, no. 1, p. 27, 2017.
37. B. Wimarshana, N. Wu and C. Wu, "Crack identification
with parametric optimization of entropy & wavelet
transformation," *Structural Monitoring and Maintenance*,
vol. 4, no. 1, pp. 33--52, 2017.
38. Baogen Li and Guosheng Han, " Composite Multiscale
Partial Cross-Sample Entropy Analysis for Quantifying
Intrinsic Similarity of Two Time Series Affected by Common
External Factors," *Entropy* 2020, 22(9), 1003
39. Ma, Jianpeng; Han, Song; Li, Chengwei; Zhan, Liwei;
Zhang, Guang-zhu. 2021. "A New Method Based on Time-
Varying Filtering Intrinsic Time-Scale Decomposition and
General Refined Composite Multiscale Sample Entropy for
Rolling-Bearing Feature Extraction" *Entropy* 23, no. 4: 451.

40. Belleri, A., Moaveni, B., & Restrepo, J. I. (2014). Damage assessment through structural identification of a three-story large-scale precast concrete structure. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(1), 61-76.
41. Yousefianmoghadam, S., Behmanesh, I., Stavridis, A., Moaveni, B., Nozari, A., & Sacco, A. (2018). System identification and modeling of a dynamically tested and gradually damaged 10-story reinforced concrete building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(1), 25-47.
42. Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A. F., & Golinval, J. C. (2006). Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mechanical systems and signal processing*, 20(3), 505-592.
43. Yuen, K. V., & Katafygiotis, L. S. (2005). Model updating using noisy response measurements without knowledge of the input spectrum. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(2), 167-187.
44. Skolnik, D., Lei, Y., Yu, E., & Wallace, J. W. (2006).

參考書目

- Identification, model updating, and response prediction of an instrumented 15-story steel-frame building. *Earthquake Spectra*, 22(3), 781-802
45. Park, J.W., Sim, S.H. and Jung, H.J. (2013), “Displacement estimation using multimetric data fusion”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18, 1675-1682.
46. Trapani, D., Maroni, A., Debiasi, E. and Zonta, D. (2015), “Uncertainty evaluation of after-earthquake damage detection strategy”, in 2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, *EESMS 2015 - Proceedings*, ed, 125-130.
47. Ting Y. Hsu*, Quang V. Pham, Wei C. Chao, and Yuan S. Yang, “Post-earthquake Building Safety Evaluation Using Consumer-grade Surveillance Cameras,” *Smart Structures and Systems*. 2020, 25(5): 531-541, DOI: <https://doi.org/10.12989/sss.2020.25.5.531> (IF=3.622)
48. Ting-Yu Hsu*, Xiang-Ju Kuo, “PDP method to compensate for rotational effect when using a single surveillance camera for interstory drift measurement,” *Measurement Science and*

- Technology. 2020, 31(9), 095902.
<https://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/ab833d>
49. Ting-Yu Hsu*, Xiang-Ju Kuo, “A stand-alone smart camera system for on-line post-earthquake building safety assessment,” *Sensors*. 2020, 20(12), 3374;
doi:10.3390/s20123374
50. Chen, P. Y. (2021). *A Data-Driven Framework for Regional Assessment of Seismically Vulnerable Buildings* (Doctoral dissertation, UCLA).
51. Yu, Q., Wang, C., McKenna, F., Stella, X. Y., Taciroglu, E., Cetiner, B., & Law, K. H. (2020). Rapid visual screening of soft-story buildings from street view images using deep learning classification. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(4), 827-838.
52. Yeum, C. M., Dyke, S. J., & Ramirez, J. (2018). Visual data classification in post-event building reconnaissance. *Engineering Structures*, 155, 16-24.
53. Lu, X., Xu, Y., Tian, Y., Cetiner, B., & Taciroglu, E. A deep learning approach to rapid regional post-event seismic

參考書目

- damage assessment using time-frequency distributions of ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
54. Wu, R. T., & Jahanshahi, M. R. (2019). Deep convolutional neural network for structural dynamic response estimation and system identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(1), 04018125.
55. Zhang, R., Liu, Y., & Sun, H. (2020). Physics-guided convolutional neural network (PhyCNN) for data-driven seismic response modeling. *Engineering Structures*, 215, 110704.

應用 AIoT 技術進行建築物安全耐震能力評估檢查

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：王榮進、李明濤、李台光、黃國倫、周楷峻、林沛
暘、陳鵬宇、陳克宜

出版年月：110 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-5456-56-6 (平裝)