



智能監控及工地智慧管理系統 應用於營建工程 施工架之監測

吳俊德／泛亞工程建設股份有限公司 董事長

黃德孝／泛亞工程建設股份有限公司 總經理

莊坤諺／泛亞工程建設股份有限公司 經理

曾惠斌／國立臺灣大學土木工程學系營建工程與管理組 教授

近年來，歐、美、亞洲等工業先進國家，廣泛使用營建施工架作為新建及拆除工程之臨時性設施物；相對地，造成的職業災害也層出不窮。對此，各國政府卻僅透過法令制度面進行策略管理，尚無專屬之施工架系統化監控系統。

臺灣地區位處亞洲，西太平洋之海島型國家，地處環太平洋地震帶及北太平洋西部颱風的路徑，因特殊地理位置及多元季風氣候，使臺灣常時受地震及颱風侵襲；爰此，政府機關針對臺灣氣候及地址條件，擬定施工架國家標準及法令規範。

本案針對臺灣法令規範，透過臺北市信義區某巨額營建工程作為案例，建立專屬「施工架智能監控系統」。透過2D施工架規劃配置圖說及材料試驗報告，建置BIM模型；運用ETABS結構分析，輸入工址參數及邊界條件，發現重要監測點位；透過感測器彙整監測數據，上傳雲端平台進行AI人工智慧數據分析，迴歸「施工架自然震動頻率」；透過ML深度學習法，區分日間「施工狀態」及夜間「非施工狀態」之頻率區間範圍，排除異常監測數值，提升整體監測系統穩定性。

本案成功運用施工架屬臨時性構造物特性，建置專屬監測機制，透過自動化數據監測，智能化結構辨識，有效控制以施工架為媒介物之危害因子，達到營建安全化的目標。

前言

臺灣等相關工業先進國家廣泛應用施工架作為新建及拆除工程之臨時性設施物，惟政府針對施工架工程管理策略，僅有產品製造國家標準、構件組搭法令規範，致相關職業災害頻傳，且一旦發生，常造成重大傷亡，致生命財產嚴重損失。

根據行政院勞動部的統計資料顯示：「營造業屬重大職災風險發生率較高之行業，每年發生重大職災案件約佔全產業之一半，統計103~107年營造業工作場所，以施工架為媒介物之重大職災比例約佔15.1%，災害類型以墜落及倒塌、崩塌災害為主」^[1]。

本案認為，僅透過國家政策宣導，無法有效達到

施工架職災預防目的；更應建制專屬的「施工架智能監控系統」，針對施工架臨時性設施物進行系統化分析研究，期能於施工架職災發生前，達到事先預警等成效，使施工架為媒介物之職災比例能降低並有效控制。

施工架構造物結構分析及監測技術發展

近年來，永久性結構物（如：建築物）安全分析及監測技術蓬勃發展，但針對臨時性結構物（如：施工架）的重視程度，卻遠少於永久性結構物。本案係針對作為外牆施工平台用途之施工架進行研究，後續將針對其結構分析及安全觀測發展程度，進行說明。

施工架結構分析

施工架構造物與建築物結構分析模式主要差異為：建物構造屬高度靜不定韌性結構體，其結構強度分析及安全觀測方式，已有多項研究成果及成熟的設計規範準則可供依循；另施工架構造物屬「離散化多自由度無阻尼結構系統」，其結構質量成連體分佈，其結構分析模式複雜，尚於實驗階段，爰研究人員僅能透過文獻回顧及設計經驗反饋，逐步建構解析施工架結構行為模式。

根據李瑋櫻（2018）研究^[2]，以 ETABS 結構分析軟體分析 1 排 4 跨 3 層等 7 種單排多跨多層整架施工架標準單元，模擬重要監測點位及監測管理數值；本案亦採用相同分析軟體，然更進一步，納入案例工址地質參數，輸入現場邊界條件（如：斜籬、帆布、不整架單元及遮斷層三角架等），建立符合營建現況之不整架施工架系統單元，進行後續結構辨識模擬及感測儀器點位規劃，並定義監測管理值、警戒值及行動值，提升智能監測效率及質量。

施工架安全觀測

施工架構造物多半搭設於興建中營建工地，其監測干擾因子眾多，儀器架設條件嚴峻，於現場應克服其「防水性」、「固定性」、「供電性」及「傳輸性」等四項施工障礙關鍵要點，始能穩定進行施工架結構資訊收測；另監測系統架構，需考量「即時性」、「穩定性」及「正確性」，以降低環境因素影響，並減少假警報發生機率。

根據吳倫旺（2021）研究^[3]，運用九軸感測器紀

錄施工架監測數據，透過 LoRa 無線通訊技術，建立長距離、低功耗及低成本的物聯網架構；本案採用有線傳輸（如：Cat 6）及無線傳輸（如：LoRa）等不同系統，將感測器監測數據，彙整於工業電腦及利用網關開道收測數據，上傳智能監控雲端平台，進行 AI 模擬分析及監測成果產出。

施工架智能監控系統

監控系統架構

為有效控制施工架結構物危害因子，本案「施工架智能監控系統」架構（圖 1 和圖 2）包含複數個感測器、一訊號傳輸裝置、一電腦伺服器、一雲端即時監測平台、一工地管理裝置及一通報系統。

複數個感測器，應按結構分析軟體結果，設置於臨時性設施物重要監測點位，用以量測結構位移、角度、加速度等監測數據。

訊號傳輸裝置，包含有線傳輸（如：Cat 6）及無線傳輸（如：LoRa、Wifi … 等），結合相關應用程式，建立多對一設備間的數據傳遞方式，其設備規格及系統環境（圖 3）。

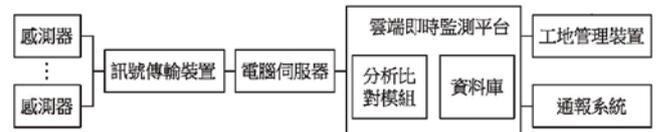


圖 1 施工架智能監控系統架構圖

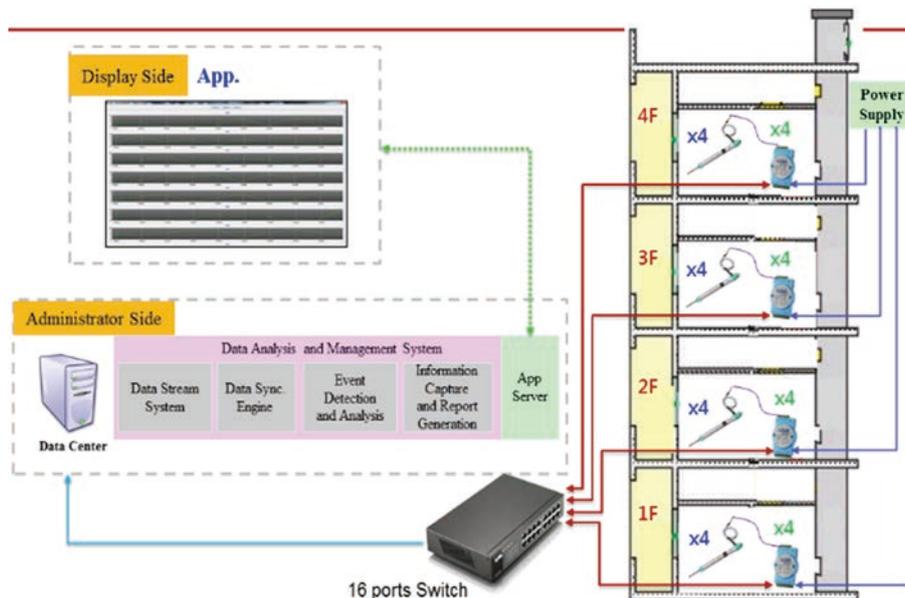


圖 2 智慧結構安全監測系統架構示意圖

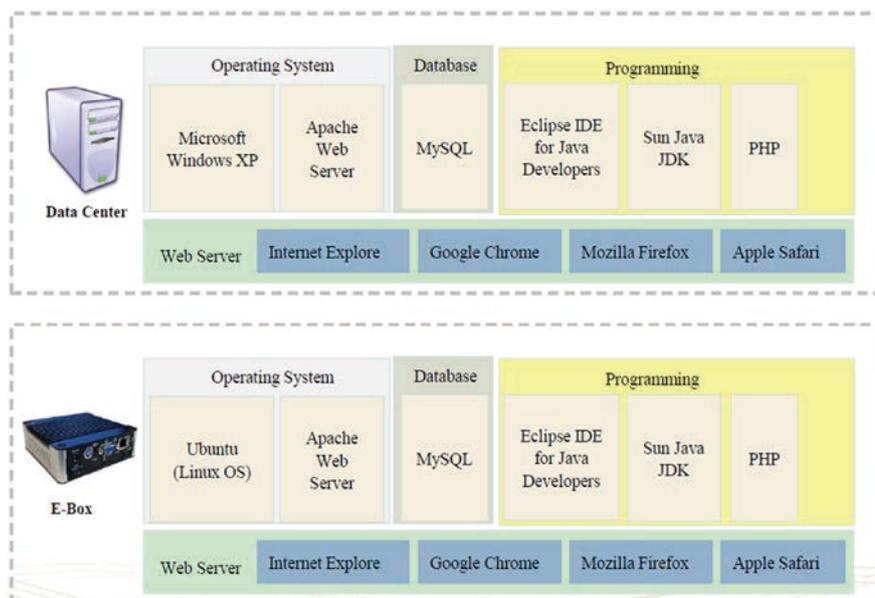


圖 3 監測設備規格及系統環境示意圖

電腦伺服器，接收感測器量測之監測數據，於彙整後上傳雲端伺服器，其設備規格及系統環境(圖 2)。

雲端即時監測平台，包含「比對模組」及「資料庫」，其中資料庫內應建置施工警戒數據，該警戒數據係透過「結構軟體分析」及「AI 數據迴歸」等成果，透過與感測器監測值進行分析比對，評估施工架結構安全狀態。

工地管理裝置，包含有燈號、語音、廣播等設備，可接收雲端即時監測平台之監測數據，即時顯示，以供現場施工人員快速閱讀，並於收到示警訊息時，運用上開設備，示警現場施工人員。

通報系統，包含 APP 行動推播系統或 PWS 標準化管理系統(災防告警細胞廣播訊息系統，Public Warning System)，可接收雲端即時監測平台之監測成

果，「即時化」及「自動化」顯示雲端數據迴歸分析結果，以利使用者快速於 BIM 模型查閱相關監測數值及接收警示訊息。

工地智慧管理實例及運用

本案成功將上開「施工架智能監控系統」架構，應於臺北市信義區巨額採購公共工程作為智慧工地管理案例(圖 4)，透過先期規劃檢討，運用無人機空拍技術(圖 5)、光學雷達掃描(圖 6)及建築物外牆配置圖說(圖 7)，模擬檢討建築物外觀幾何形狀、施工工序、工地動線配置及邊界條件限制，繪製施工架配置圖說(圖 8)；及建置 BIM 建築資訊模型(圖 9)，輸入施工架構件材料參數，以利後續參數導出，進行結構分析等第三方軟體應用。



圖 4 案例工地工址空拍照圖資



圖 5 施工架無人機空拍照圖資

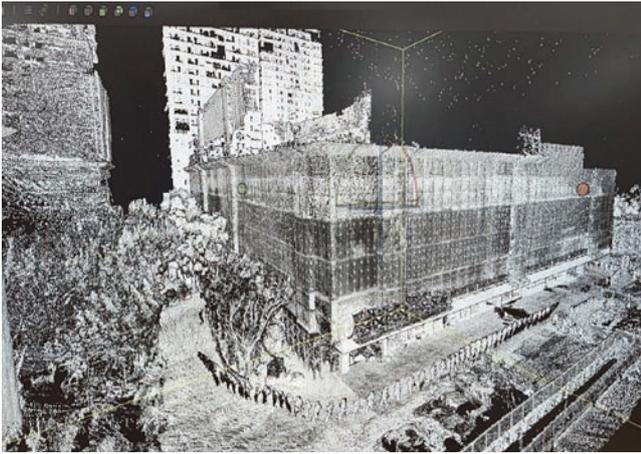


圖 6 施工架「光學雷達」掃描圖資



圖 9 施工架 BIM 模型建置圖

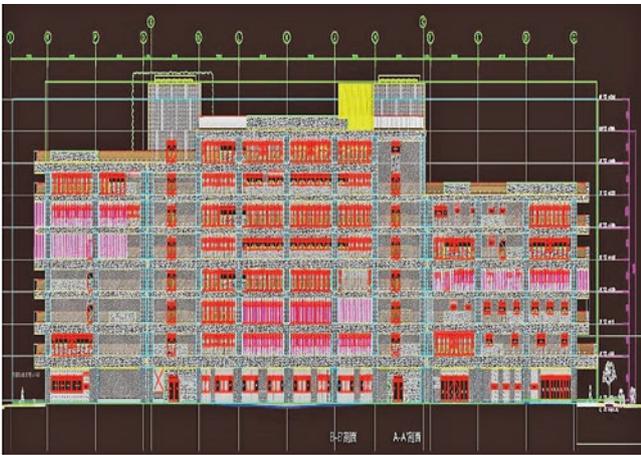


圖 7 建築物外牆配置圖

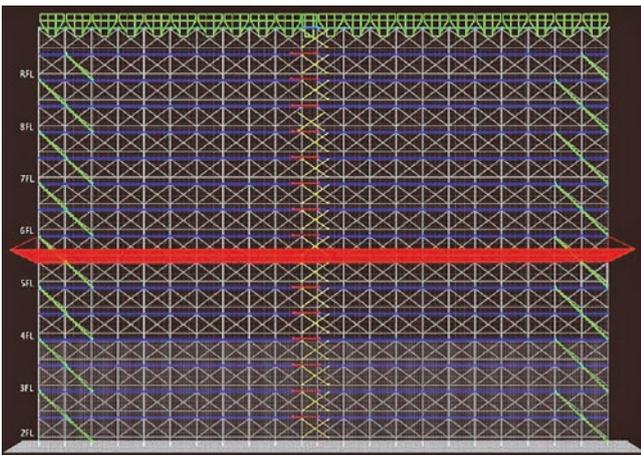


圖 8 施工架配置圖

本案考量「外牆施工平台架」為臨時性構造物，於建築物施工期間使用年限約 6 個月至 18 個月，針對地震力參數設定部分（圖 10），根據臺北市地震危害度分析及年超越機率公式檢討，設定 30 年回歸期之「中小度地震」進行地震力模擬檢討，最大地動加速度（PGA）相當於 127 Gal (cm/s^2)，屬 5 弱震度階級

地震（強震）進行分析，即可反映現場條件，產生墜落、倒塌、崩塌等災害危害因子狀態條件。

另針對風力載重參數設定部分（圖 11），根據「建築物耐風設計規範及解說」第六章，6.2 節規定，設定 10 年回歸期之設計風速，納入工地現場配置之施工斜籬、防塵帆布等附屬設施物，進行施工架系統單元應力分析。

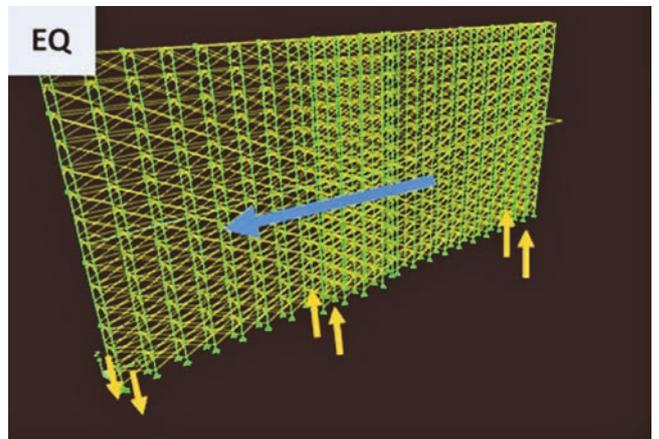


圖 10 結構分析模組受地震力示意圖

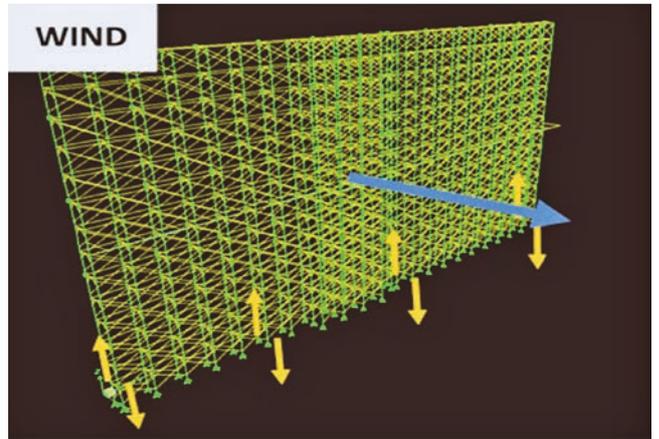


圖 11 結構分析模組受風力示意圖

本案針對案例工地施工架結構系統單元，輸入案例工址參數，納入現場邊界條件限制，模擬施工架結構物所受的外力載重，如：靜載重、活載重、地震力及風力等，基於可靠度概念，納入載重放大係數和強度折減係數，以補足無法預見的標準值偏差，得到施工架構件應力集中位置（圖 12）及變形模擬成果（圖 13）。

透過 ETABS 結構分析結果，經與案例工地專家學者討論後（圖 14），確認以案例工地（1 幢 4 棟）中的最高樓層建築，並在該樓層的西面項施工架作為監測標的物，並進行感測器佈設圖說配置（圖 15）。

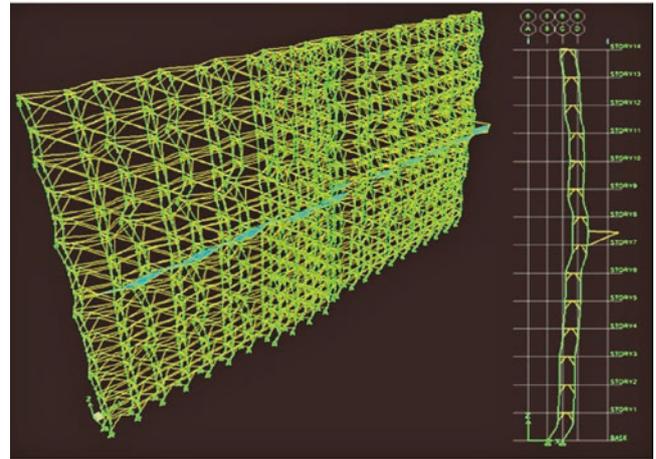


圖 13 施工架變形模擬成果圖

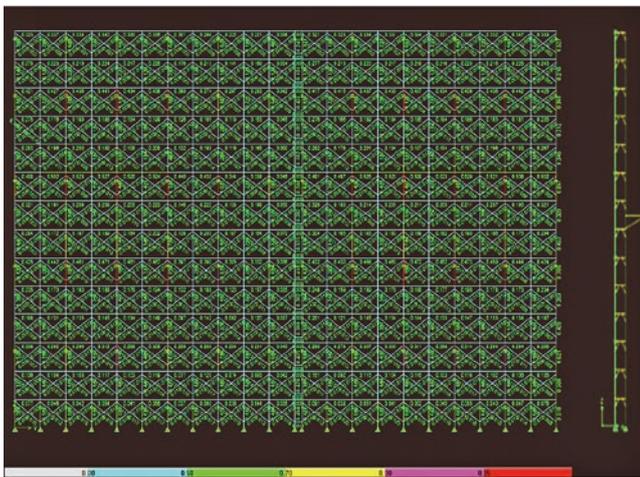


圖 12 施工架構件應力集中位置圖



圖 14 案例工地專家學者訪談圖資

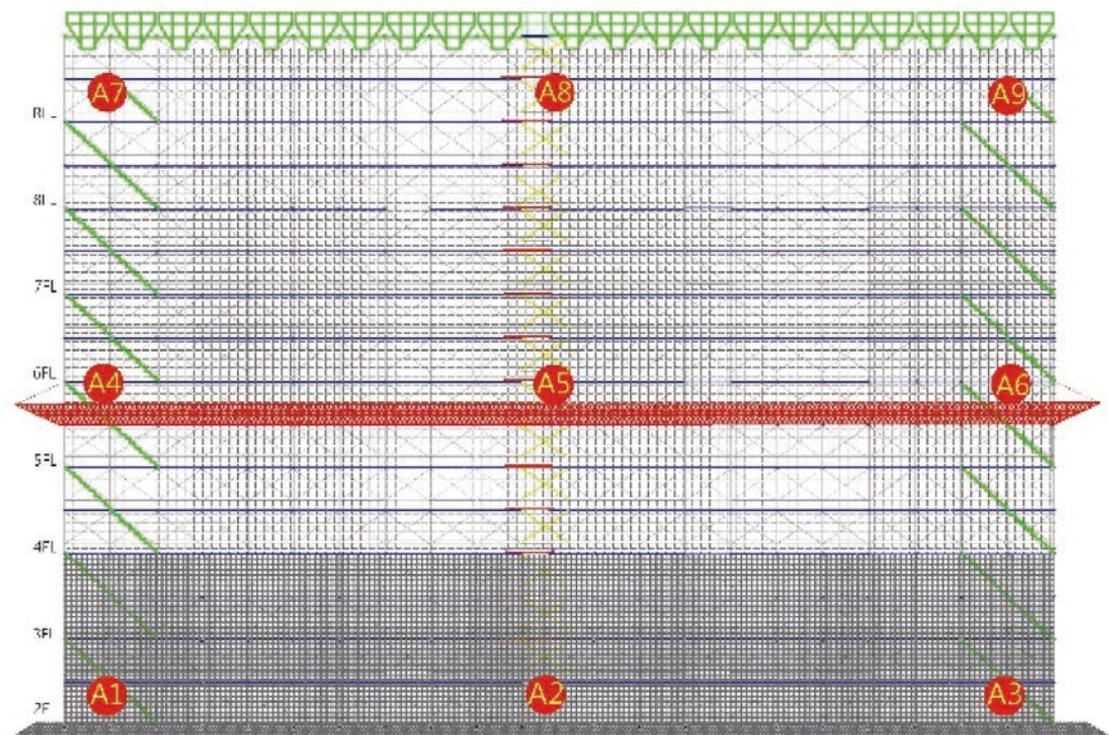


圖 15 監測標的物實際儀器佈設點位圖資

針對監測儀器佈設之「防水性」、「固定性」、「供電性」及「傳輸性」等四項施工障礙關鍵要點；本案透過具 IP65 防水等級認證的保護盒，裝載監測儀器，以克服現場「防水性」障礙。另透過特製鋼束環於防水盒上，克服現場監測位置「固定性」障礙（圖 16）。有關「供電性」及「傳輸性」部分，有線感測設備部分，係透過感測儀器之網路接口，利用 Cat6 網路線，透過乙太網路（Ethernet）區域網路技術，連接 POE（供電網路交換器），提供感測器運作所需工地臨時電力系統；另無線感測設備部分，係透過天線及網關設備，運用 Lora 定義通訊協定及網路系統架構，進而克服現場「供電性」及「傳輸性」等關鍵障礙因素（圖 17）。使感測器得以穩定接收結構資訊（圖 18 至圖 20）。

儀器設備安裝定位後，經供電電源測試（圖 21）、軟體設備校正設定（圖 22）後，成功將即時數據上傳「施工架智能監控系統」雲端平台。（圖 22 和圖 23）

本案智能監控雲端平台係與國家高速網路與計算中心（NCHC）合作開發，透過 AIOT 智能監控雲端平台可以即時化顯示現場感測器（編號 A1 ~ A9）監測數據，如：角度、加速度等，及 AI 人工智慧識別診斷結果，其分析診斷原理係先透過類神經網路學習紀錄（LSTM）迴歸出施工架結構自然震動頻率；另於監測過程，以頻率回歸均方差（RMSE）比對即時監測數據，模擬施工架系統效能組態，並將結果轉換為顯而易懂的「百分比」數值呈現，以利快速辨識施工架結構安全狀態（圖 24 和圖 30）。



圖 16 感測器 IP65 防水盒及鋼束環配置照圖資



圖 17 感測器訊號電源供應線路佈設照圖資



圖 18 有線及無線感測儀器進場照圖資



圖 19 感測器安裝過程照圖資



圖 20 有線及無線感測儀器安裝完成照圖資



圖 21 供電電源測試照圖資



圖 22 軟體設備校正設定照圖資



圖 23 「施工架智能監控系統」校正設定照圖資

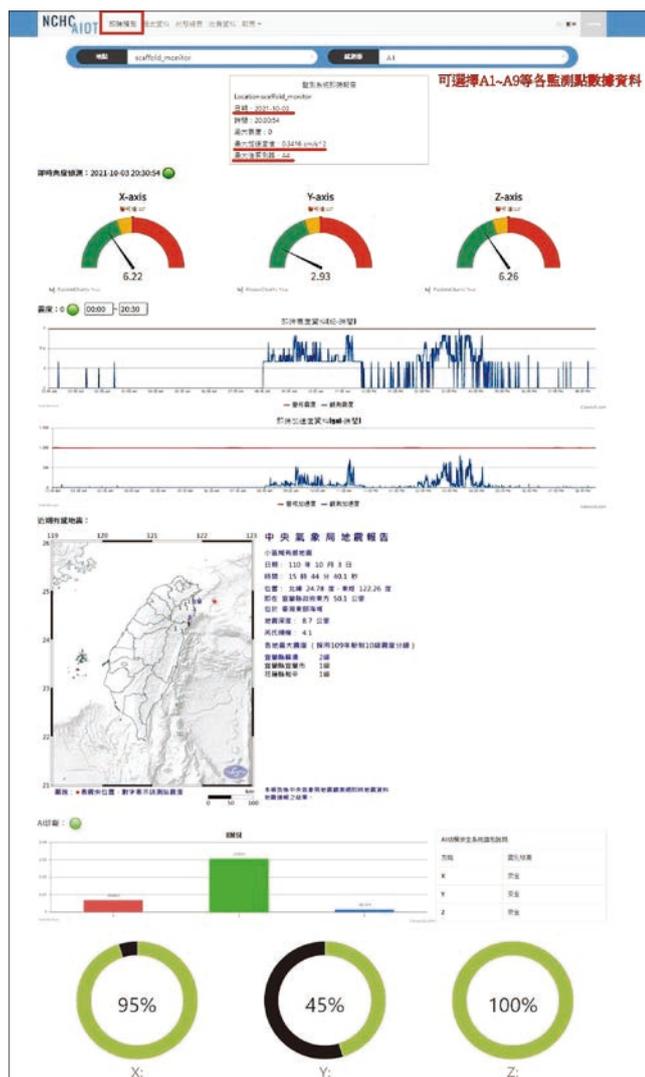


圖 24 「施工架智能監控系統」即時預測功能

「施工架智能監控系統」雲端平台(圖 24)具「即時預測」、「歷史資料」、「狀態總表」、「地震資料」及「數據報表」等 5 大功能，網頁畫面呈現如下所示。

即時預測 — 監控系統即時報告

監控系統即時報告(圖 25)，系統自動釘選最大監測數據之點位資訊於頁首頂端，以利使用者快速瞭解系統主控點位資訊，即時報告會顯示日期、時間、最大震度、最大加速度值、最大值感應器。

即時預測 — 即時監測數據呈現

即時監測數據呈現(圖 26)，更新頻率為 20 秒 / 次，監測資訊為「角度」與「加速度」，針對角度測值，係以儀表圖示方式，方便查閱者檢視即時數據與警戒範圍；另針對加速度測值，則以歷時曲線方式呈現，水平軸為時間，垂直軸分別為震度(級)與加速度(gal)。

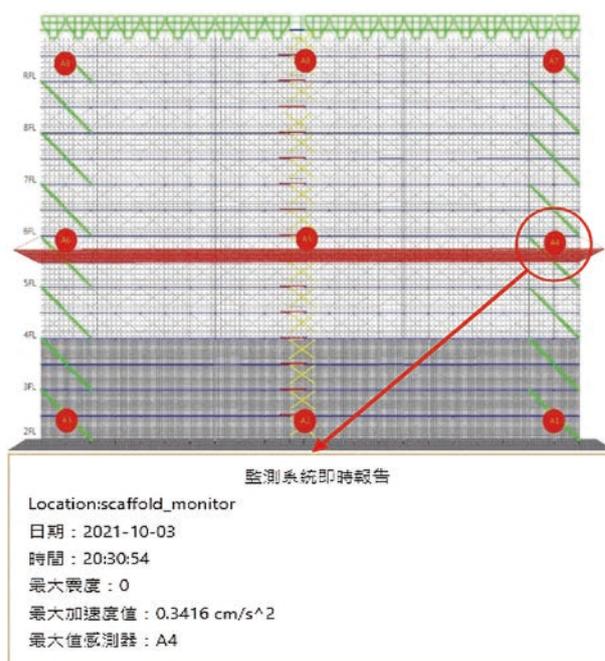


圖 25 監控系統即時報告



圖 26 即時監測數據

即時地震資訊及地震資料功能

即時地震資訊(圖 27)，系統與中央氣象局連結，可於首頁顯示最近一筆有感地震資料，另於「地震資料」功能(圖 28)自動紀錄及產出施工架震後分析報告(圖 29)。

即時預測 — AI 人工智慧識別診斷

感測器接收到的資料會即時進行人工智慧系統進行識別診斷，並以類神經網路學習紀錄(Long Short-Term Memory, LSTM)診斷三軸(X、Y、Z)健康狀態，其

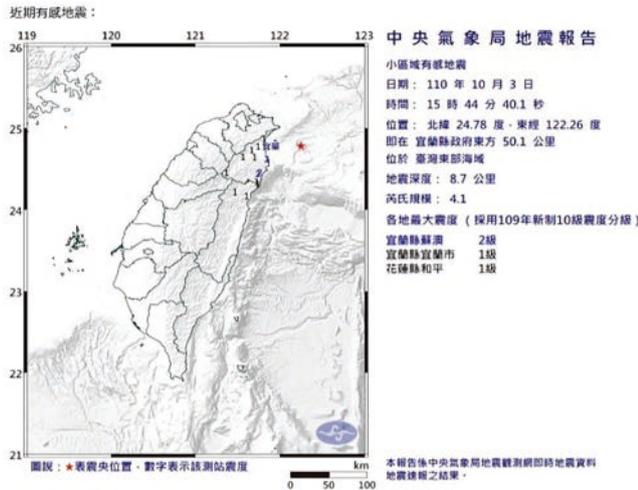


圖 27 中央氣象局即時地震資訊圖資

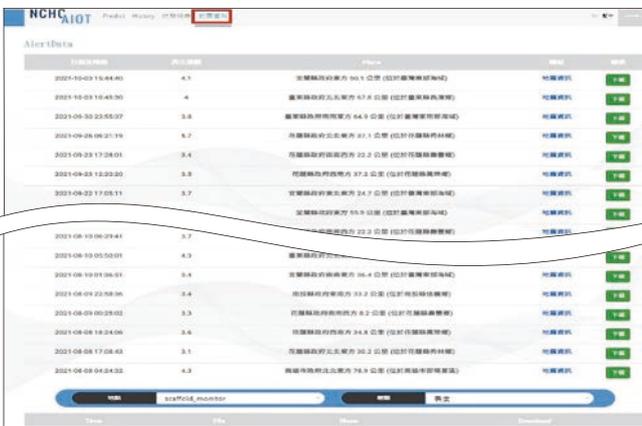


圖 28 「施工架智能監控系統」地震資料功能

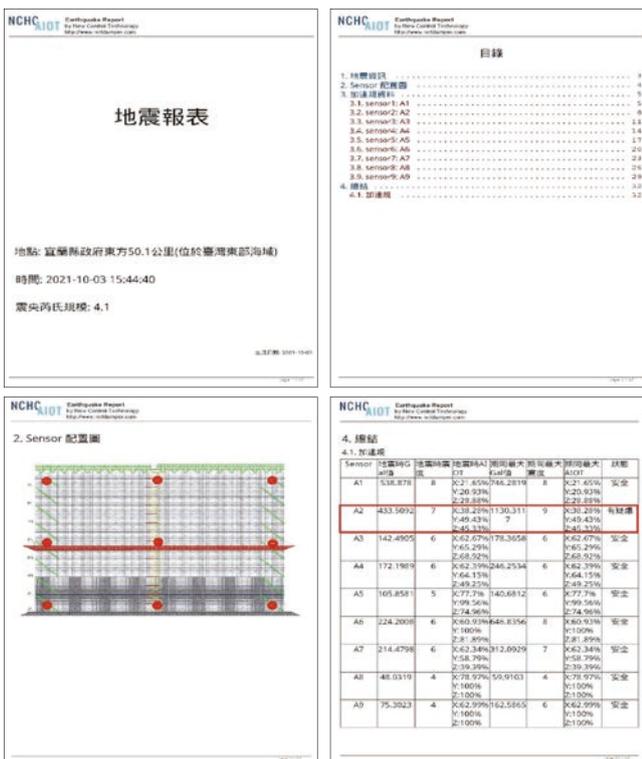


圖 29 震後分析報告

識別結果在右方以表格方式陳列，以達掌握施工架結構狀態，預判可能性損壞部位構件，避免相關職災發生。

除上述的 LSTM 診斷，系統另以 RMSE (Regression Mean Square Error, 頻率回歸均方差) 系統來判斷三軸數據的準確性，其顯示的數字表示，「監測數據」與「自然振動頻率」效能組態模擬程度 (圖 30)。

「施工架智能監控系統」歷史資料功能

歷史資料功能 (圖 31)，可提供瀏覽近三天內即時預測資訊，上方欄位可選擇日期、地點及感測器，可顯示區段時間內各時點震度、加速度、旋轉角 (角度) 及 LSTM 歷史資料。

「施工架智能監控系統」狀態總表功能

狀態總表功能 (圖 32)，即時化概覽施工架上所有感測器之震度、加速度、AI 模擬值及識別診斷結果資訊。

「施工架智能監控系統」報表功能

報表功能 (圖 33)，可提供輸出「前 3 日」、「前 1 週」及「上個月」等不同時間區段的 Excel 報表文資，除紀錄各時點數值外，更疊加所有感測器之三軸 AIOT 模擬值歷時曲線 (圖 34)。

透過行動裝置連結「施工架智能監控系統」，可接收雲端平台之監測數據，運用 API 應用程式，「即時化」及「自動化」顯示監測數據 AI 診斷識別結果，俾利施工人員快速於 BIM 模型或智慧工地管理平台 (圖 35) 查閱相關監測數值，及接收警示訊息 (圖 36)。

本案例工地將此系統作為各大獎項參選亮點，目前業已獲得臺北市勞動安全獎、臺北市公共工程卓越獎 (圖 37、圖 38)，及職安署第 15 屆職業安全衛生優良營繕工程金安獎等肯定。

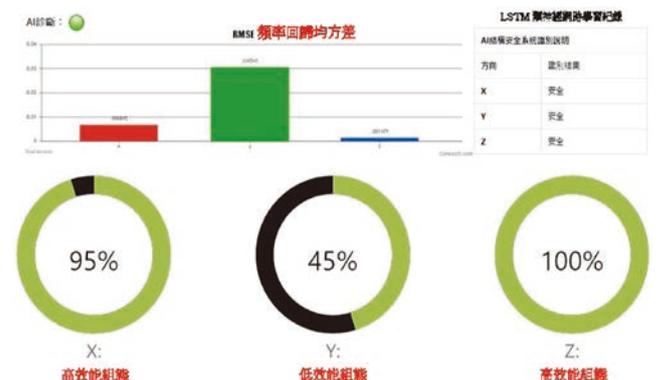


圖 30 AI 人工智慧識別診斷圖

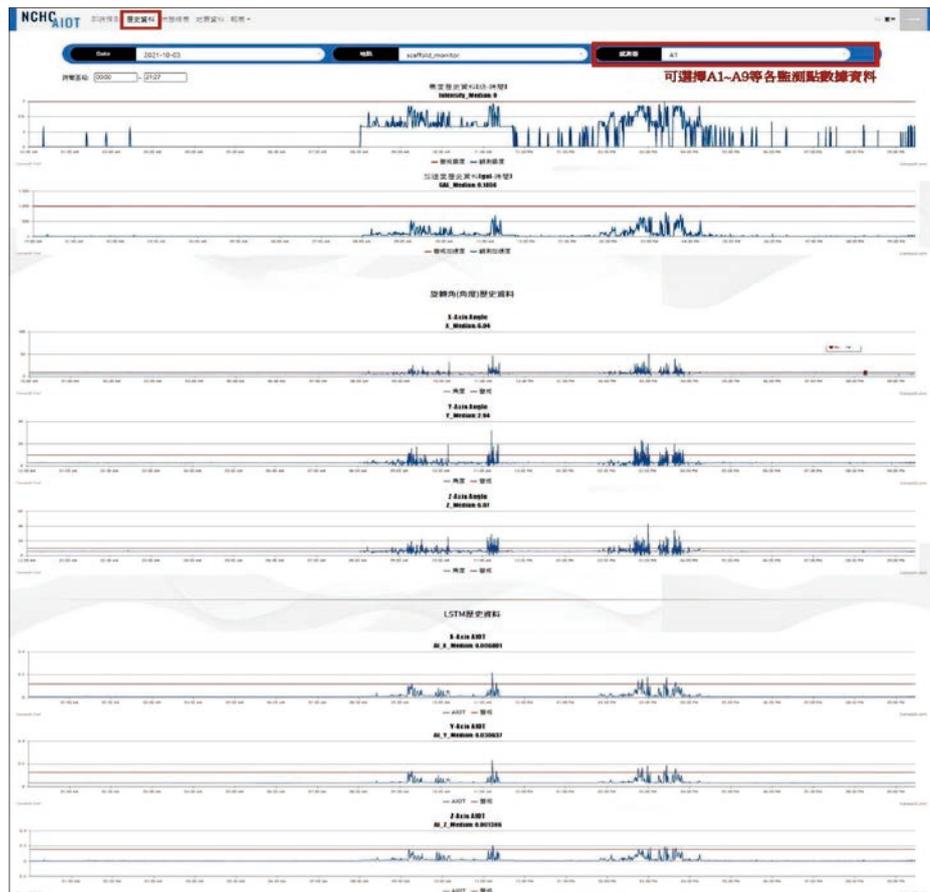


圖 31 「施工架智能監控系統」歷史資料功能

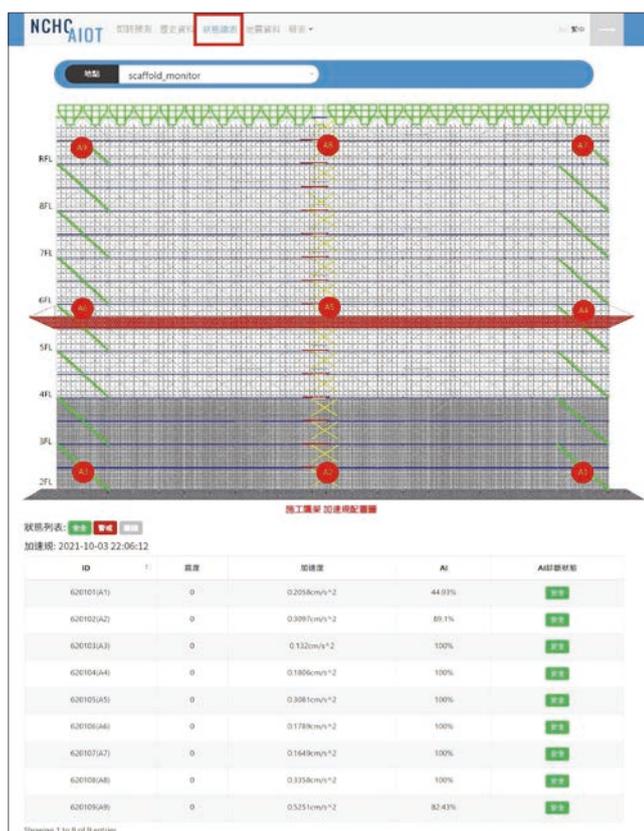


圖 32 「施工架智能監控系統」狀態總表功能



圖 33 「施工架智能監控系統」數據報表功能

結語

本案成功運用系統化建置流程，導入科學化結構軟體進行施工架定性分析，以及智慧化 AI 智能回歸學習進行施工架定量分析，成功建置「施工架智能監控系統」，研擬出經濟且可信「營建智能施工架」監測方法。對此，本案研究團隊業已於 110 年 7 月 5 日正式向臺灣 - 經濟部智慧財產局提出專利申請（案件編號：110207818），案經審查後，於 110 年 9 月 28 日取得中

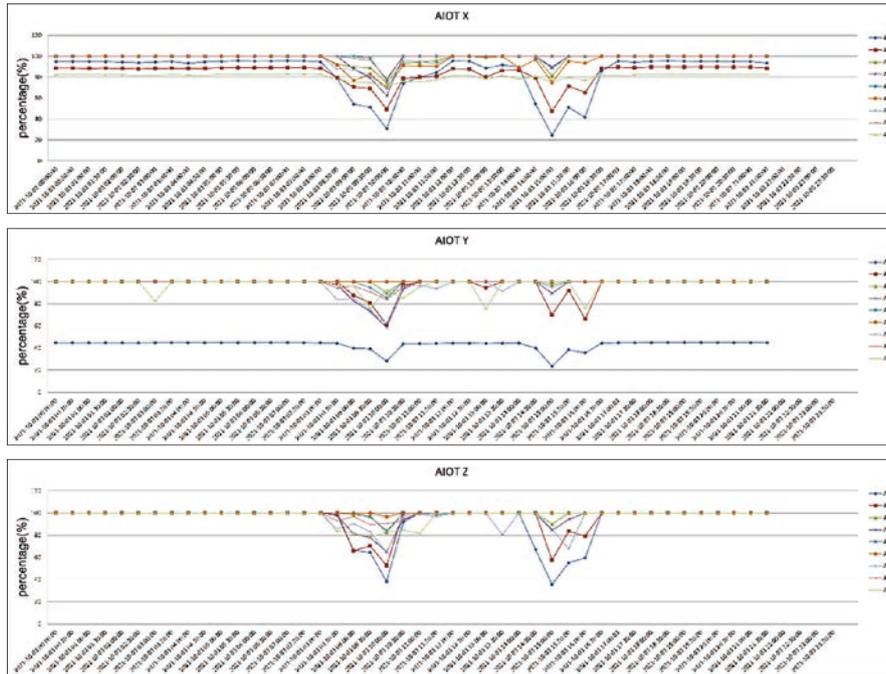


圖 34 X、Y、Z 三軸 AIOT 模擬歷時圖



圖 35 「泛亞智慧工地管理平台」網頁圖資



圖 36 行動裝置即時顯示監測成果圖資

華民國專利核准通知；另同步向中國 — 國家知識產權局及美國 — 專利商標局 (USPTO) 提出相關專利申請程序，目前仍於審查階段，敬請期待。

本案「施工架結構系統單元分析」相較於李瑋櫻 (2018) 研究，優化精進之處：先前研究係於實驗室，模擬施工架標準單元模組進行研討，相關條件過於理想化；本案採用實際工程案例，建立施工架結構系統單元 (包含地質條件、斜籬、帆布及施工遮斷層等設施物)，透過 ETABS 數據分析及案例工地專家學者訪談，發現重要監測點位，並實際安裝感測儀器進行監測，以達有效監控施工架結構安全等成效。

有別於先前研究案例，侷限於實驗室測試部分，本案係全臺首創唯一成功將「施工架智能監控系統」運用於營建工地之案例代表，本施工架監測系統開發成果及科技新知技術摘要彙整，臚列如下：

1. 監測數據定義：透過位移、角度、加速度等數據，詮釋施工架姿態。
2. BIM 模型建置：透過 BIM 模型參數，進行結構辨識、AI 回歸分析、ML 深度學習法，並即時呈現施工架監測數據及成果。
3. 監測儀器安裝：透過防水盒、鋼束環，克服「防水性」及「固定性」等施工障礙點。
4. 監測數據傳遞：透過有線傳輸 (如：Cat 6) 及無線傳輸 (如：LoRa)，將感測器監測數據，上傳智能監控雲端平台進行 AI 模擬分析，克服「供電性」及「傳輸性」等施工障礙點。
5. 警戒數值設定：定義 AI 模擬程度及結構變位之管理值、警戒值及行動值。



圖 37 臺北市勞動安全獎頒獎典禮圖資



圖 38 臺北市公共工程卓越獎頒獎典禮圖資

6. 警示訊息推播：當達警戒標準時，推播訊息予施工人員，進行緊急防災動線疏散。
7. 虛實整合系統：利用 BIM、VR、AR 及 QR Code 等科技新知技術，於虛實整合系統進行施工架智能監測。

本案成功運用營建科技新知技術輔助，克服營建工地監測障礙點，自動化偵測紀錄施工架結構資訊，並建立智慧化雲端平台，「即時化」及「自動化」顯示 AI 人工智慧數據迴歸分析結果，以利使用者快速於 BIM 模型查閱相關監測數值及接收警示訊息；並於施工架系統局部構件有安全疑慮時，緊急疏散該區作業人員，將其引導至安全通道動線，返回主體建物內，有效控制及避免施工架倒塌、崩塌等重大職災發生。

「不能避免的，要盡量去調適；不能調適的，要盡量去避免」，本案係以「外牆平台施工架」進行探討，期望未來能納入更多營建工程不同類型臨時監測設施，建構出完整「工地智慧管理系統」，將營造產業推向「自動化」、「智能化」及「安全化」領域。

參考文獻

1. 行政院勞動部職業安全衛生署. 施工架作業安全. 擷取自職安署網頁，網址：<https://www.osha.gov.tw/1106/29646/1150/1155/26617/> (2020)。
2. 李瑋櫻，「營建假設工程安全監控系統布設點位之研究—以施工架承受風力及地震力為例」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學系，臺北 (2018)。
3. 吳倫旺，「LoRa 無線監測系統應用於施工架之研究」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學系，臺北 (2021)。



S 工安
Safety

