

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

August
2025



ISSN 0253-3804



Volume 52, No. 4

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

恆春斷層
AI 大哉問

災害面面觀

鹽下微言

政府採購
機關招、決標
沒有容錯空間

智慧工地之
現況及未來趨勢

專 輯

停車繳費單 正在消失中

臺中市智慧停車無紙化

我們，讓繳費單退休，讓綠意上班。

在臺中市停車，綁定行動支付代扣繳，可享停車費優惠。

「那張單子沒來，
是因為城市學會了呼吸。」

- 臺中市交通局

進一步了解
臺中市智慧停車計劃，請至

WWW.TRAFFIC.TAICHUNG.GOV.TW



土木水利



社團法人中國土木水利工程學會會刊



恭賀 水利署「石門水庫阿姆坪防淤隧道工程」
榮獲亞洲土木聯盟大會 CECAR10「優良工程獎」
將於 2025.10.23 在韓國釜山領獎

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分 會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

發行人：高宗正

出版人：社團法人中國土木水利工程學會

主任委員：周頌安（中興工程顧問股份有限公司總工程師、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定 價：每本新台幣 350 元、每年六期共新台幣 1,800 元（航郵另計）

繳 費：郵政劃撥 00030678 號 社團法人中國土木水利工程學會

會 址：10055 台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電 話：(02) 2392-6325 傳 真：(02) 2396-4260

網 址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地 址：22161 新北市汐止區中興路 98 號 4 樓之 1

電 話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木水利工程學會第二十六屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理 事 長：高宗正

常務理事：朱惕之 余信遠 廖學瑞 賴建信

理 事：王宇睿 王炤烈 林子剛 林祐正 林聰利 胡宣德 高銘堂
張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃一平 楊正君
楊偉甫 歐善憲 謝尚賢 謝震輝

常務監事：宋裕祺

監 事：王藝峰 吳文隆 呂良正 沈景鵬 邱琳濱 賴建宏

中國土木水利工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，
土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、
都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木水利工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

「智慧工地之現況及未來趨勢」專輯 (客座主編：林祐正教授兼系主任)

■ 專輯序言：智慧工地之現況及未來趨勢	林祐正	3
■ 智慧工地資訊技術的整合與挑戰 莊梅菱／王如觀／王蘇傑／柯榮云／簡奕帆／洪榕芊／許華容／周建成		4
■ 智慧工地的應用現況、未來發展與挑戰 王琨淇		17
■ 基於工程圖說之施工查驗表單自動化檢核 陳弘翊／陳翊翔／林之謙／陳俊杉		23
■ 資訊化智慧營造模擬與工程規劃在智慧工地之應用 李孟崇		31
■ 新北市智慧工地管理：浮洲橋耐震補強工程為例 馮兆麟／鄭立輝／黃柏升／陳亦揚		39
■ 整合 BIM 與 AI 技術應用於智慧工地安全管理系統之建構與研究 ——以某巨額採購統包工程為例 莊坤諺／曾惠斌		46
■ 從模型到現場：HDEC 工程管理的新日常 褚月桂		51
■ 智慧安全的落地實踐：科技驅動勞安管理革新 許勝凱		56
■ 智慧工地科技在社會住宅的應用——以前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程為例 曾國展／許義傑／吳匡倫／陳其豐		62

鹽下微言

■ 政府採購不限於工程，機關招、決標，沒有容錯空間 高銘堂		69
-------------------------------	--	----

工程技術及發展

■ 淡江大橋基樁工程排碳特性分析 蔡富仔／陳奕伸		73
--------------------------	--	----

災害面面觀

■ 恒春斷層AI大哉問—核三安全及與其他能源、與台北盆地的風險比較 周南山		81
---------------------------------------	--	----

廣告特搜

遠揚營造工程股份有限公司 — 工法創新	封底
臺中市政府交通局 — 停車繳費單正在消失中	封面裡
台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌	封底裡
交廣工程顧問有限公司 — 誠信 創新 品質 服務 永續發展	50
亞新工程顧問股份有限公司 — 服務品質 ASSET	68
山林水環境工程股份有限公司 — 品質、專業、使命必達	88
義力營造股份有限公司 — 義呈實諾 力呈卓越	88



智慧工地之現況 及未來趨勢

專輯序言

專輯客座主編 林祐正*／國立臺北科技大學土木工程系 教授兼系主任

在全球營建產業面臨勞動力短缺，以及施工效率與品質控管需求提升的趨勢，營建智慧工地（Smart Construction Site）已成為智慧轉型過程中極具潛力的發展方向。智慧工地之發展係透過導入並整合物聯網（Internet of Things, IoT）、人工智慧（Artificial Intelligence, AI）、大數據（Big Data）、雲端運算（Cloud Computing）、建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）、數位孿生（Digital Twin）與自動化系統開發（Automation Systems Development）等關鍵技術，期能建構高效率之智慧工地，智慧工地不僅能即時掌握現場資訊，更有助於提升工程安全、效率與永續指標的整體表現。

本專輯以「智慧工地」為核心主題，廣邀國內學者、專家及業界先驅，分享最新的研究成果、技術應用與實務經驗。這些研究不僅展現出跨領域融合的創新思維，也回應了智慧工地現場施工技術升級與智慧化發展的迫切需求。同時本專輯亦收錄國內智慧工地實務導入案例，藉此提供經驗交流與日後智慧工地推動之參考。

* 通訊作者，yclin@ntut.edu.tw

本專輯邀請國內學者、專家及業界先驅撰寫九篇文章，介紹智慧工地之現況與智慧工地最新研究發展及應用。第一篇文章介紹智慧工地之資訊技術整合與技術應用挑戰。第二篇探討智慧工地的現況、未來發展與挑戰。第三篇介紹開發施工查驗表單自動化檢核在智慧工地之應用。第四篇介紹資訊化智慧營造模擬與工程規劃在智慧工地之應用。第五篇介紹新北市政府在浮洲橋專案導入智慧工地之實務應用。第六篇探討桃園市統包工程透過模組化系統建置智慧工地安全管理系统。第七篇介紹結合擴增實境與BIM技術在再生水廠興建工程智慧工地之實務應用。第八篇介紹智慧工地導入數位科技及AI影像辨識技術以提升工地安全管理之實務應用。第九篇介紹智慧工地應用於社會住宅新建統包工程之經驗分享。

相信智慧工地的推動不只是科技應用的進展，更是營建產業未來競爭力之關鍵之一。本專輯期望能成為研究者與實務工作者之間的橋樑，激盪更多創新想法，進一步推動營建產業的智慧化與自動化的轉型。謹此感謝所有參與本期專輯的作者、審稿人及編輯團隊，因為您們的專業與投入，使本期專輯內容得以豐富而多元。期盼本專輯內容能夠提升讀者對於智慧工地技術之應用現況及未來趨勢有更多的認識。





智慧工地 資訊技術 的 整合與挑戰

莊梅菱／國立中央大學土木所IT組 博士候選人、桃園大眾捷運股份有限公司 專員

王如觀／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 博士後研究員

王蘇傑／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

柯棨云／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

簡奕帆／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

洪榕芊／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

許華容／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

周建成*／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 教授

在建築或營建產業邁向數位轉型過程中，智慧工地逐漸成為提升工程專案管理效率，與推動工安及品質的關鍵技術。不同於傳統工地管理仰賴人工作業與經驗判斷，智慧工地強調以資訊技術為支撐，促進資源整合與專案控制。本研究採取系統性文獻回顧方式，探討智慧工地相關研究發展脈絡，特別是資訊技術如何應用於營建管理不同層面，以達成工程專案如期如質與如價的管理目標。文章首先分析現有研究如何透過智慧工地進行資源管理與效率最佳化，相關技術如工人定位與出勤管理、機具使用率監測與排程最佳化、材料供應鏈追蹤與物料管理系統，皆直接影響工程專案進度控制、成本管理與品質保證。在資訊技術層面，本研究依應用層次與技術特性，進行分層探討。首先介紹通用型資訊技術，如雲端平台、大數據分析、人工智慧等，最後探討機器人與3D列印。綜上所述，智慧工地的資訊技術應用展現出從決策層到現場管理的多層次特性，為建築或營建產業數位轉型的關鍵利器，本研究透過文獻回顧，提出智慧工地資訊技術在營建管理領域中的整體位階與未來發展方向，期望為後續學術研究與實務應用提供有系統的參考架構。

導論

智慧工地運用物聯網（Internet of Things, IoTs）等新式資訊技術，來提升複雜建築或營建工程專案成效、工程品質和安全性。一般而言，智慧工地採用即時資料收集技術，監視或感測工地現場的工作人員、施工機具或設備，及施工材料或物料等的狀態，並將資料傳回中央伺服器，使得遠端監控和管理成為可能^[1,2]。智慧工

地的關鍵要素包括雲端平台及智慧化管理作法，透過物聯網的運用，能夠有效進行資料收集、分析和應用，支援各種管理服務需求^[3]。這種整合性的資訊技術不僅提升了工地營運效率，更為建築或營建產業帶來了前所未有的數位化管理體驗^[4,5]。

智慧工地的概念最早可追溯約莫二十年前，當時多以「IT-supported construction site management」或「Automated construction monitoring」為名出現於相關文獻中。初期研究重點多集中工地現場的物料監控、

* 通訊作者，ccchou@ncu.edu.tw

資訊流整合，以及施工資料的數位化^[5,6]，試圖解決傳統因資訊分散、資訊孤島（Information island）或資訊煙囪（Information silo）、資料格式不相容，缺乏即時反饋等因素，而導致工地現場管理效率低落與透明度不佳等問題。隨著感測科技與無線通訊技術的發展，智慧工地研究於近十年間快速升溫，技術焦點逐漸轉向物聯網、虛擬實境（Virtual Reality, VR）、建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM），與人工智慧（Artificial Intelligence, AI）及深度學習（Deep Learning, DL）等領域，研究範疇也從單一技術應用，擴展至多技術融合與管理的系統性探討。特別在營建資源管理、進度追蹤與工地現場數位化，及施工安全預警等面向，智慧工地已漸次形成標準技術架構與實務應用模式。

從文獻發表的地理分布看，美國、中國與英國學者於智慧工地研究具領先地位^[7,8]。其中，美國學者多著重於BIM與感測整合技術的創新，中國則在AI與物聯網技術的落地實踐方面快速推進，而英國則關注於智慧工地的政策框架與永續導向。這顯示智慧工地的發展已從技術實驗階段逐漸走向策略導入與產業應用，並呈現出跨國多元的發展路徑。整體而言，智慧工地的歷史發展可視為營建產業數位化與智慧化演進的縮影，從早期以工地大數據為核心的靜態管理，逐步邁向結合即時監控、預測分析與智慧決策的動態營運系統。本研究將在此歷史脈絡下，整理資訊技術於智慧工地中的發展脈絡與管理應用，特別聚焦於其如何強化工程如期如質與如價的專案目標達成。

以下首先說明智慧工地的背景概念，接著探討新式資訊技術如何協助管理工人、機具與物料等工地現場資源，以讓工程專案達到如期如質與如價目標。此外，也將依序介紹智慧工地所涵蓋的各式資訊技術，並闡述智慧工地在工地安全的應用。文章最後，則作一總結與展望。

背景概念：營建 4.0 與智慧營建物件

營建 4.0（Construction 4.0）是建築或營建產業的全面數位化革命，此概念是工業 4.0 在建築或營建領域的具體實踐與發展，旨在透過實體與數位技術的深度整合，為傳統作法帶來全面性與革命性的變革^[9]。營建 4.0 的核心在於建立網宇實體系統（Cyber-Physical

System, CPS）與數位生態系統，並由機器人、人工智慧、3D 列印等新興科技提供技術後援。建築資訊模型構成了實施營建 4.0 的基礎架構，為整個產業的數位轉型奠定了堅實的技術基礎，這種整合性的技術架構不僅改變了傳統的施工作業模式，更重新定義了建築或營建專案從規劃、設計、施工，到營運維護的完整生命週期管理流程^[9]。

當前研究趨勢顯示，營建 4.0 主要聚焦施工階段的最佳化、品質管控，和工安風險等的管理流程改善^[10]。3D 列印技術、大數據分析、虛擬實境和物聯網等關鍵技術成為推動營建 4.0 發展的主要驅動力，這些技術整合後，理論上能創造前所未有的施工效率和管理精確度。透過這些先進技術的整合運用，建築或營建產業預期將轉型為一個高效率、以品質為中心、安全性極佳的現代化產業，能夠充分滿足人類社會對於建築環境品質和永續發展的多元化需求^[11]。然而，營建 4.0 作為一個新興概念，其技術仍在持續演進中，相關研究領域正快速增長，有發展潛力和創新空間。隨著技術的不斷成熟和應用案例的累積，營建 4.0 將逐步實現從理論框架到實務應用的全面落地，為全球建築或營建產業開創嶄新的發展局面^[11]。

綜合來看，營建 4.0 概念可謂擴展智慧工地至工程全生命週期之願景，相關資訊技術除運用時間尺度或規模不同，其他並無重大相異處。

智慧營建物件（Smart Construction Objects, SCOs）被定義為建築或營建產業的基礎智慧單元，透過將某實體物件，例如工人的頭盔，與資訊技術做深度融合，創造出具備自主性、感知能力和互動特性的智慧化個體^[12]。事實上，智慧營建物件的概念，亦可用於智慧工地的場域。這些創新物件不僅具備傳統個體的基本功能，例如頭盔保護工人頭部，更整合了感測、運算和通訊能力，能夠主動感知環境變化、自主進行決策，並與其他物件或系統進行即時互動^[13]。智慧營建物件構成建築或營建業之物聯網核心基礎，為創新運算應用程式和增強型決策提供了系統整合技術平臺，改變了傳統工程專案資訊流和決策流程，不僅提升了施工過程的智慧化程度，更為建築或營建產業帶來了前所未有的自動化管理和精準控制能力^[13]。

由於智慧營建物件具備高度聯網特性，這些特徵使其與傳統物件產生根本性的差異，具有徹底改變施

工流程和改善資訊流的巨大潛力^[14]。在整合時，智慧營建物件能夠支援跨領域的協同作業，並封裝智慧化功能以促進不同專業領域之間的資訊交換與整合，這種跨領域的資訊整合能力，使得建築、結構、機電、消防等各次專業領域能夠在同一個智慧化平台上，進行協同設計和施工管理，大幅提升工程專案執行的效率和品質^[15]。隨著建築或營建產業對智慧營建物件概念理解的不斷深化，新一代資訊技術，諸如即時定位技術、嵌入式感測器和人工智慧等，可創造更高效率且反應更迅速的施工環境^[16]。未來智慧營建物件將能自主監控結構健康狀態、最佳化能源使用效率、預測維護需求，並與建築資訊模型等系統進行無縫整合，為建築或營建產業帶來全面數位轉型、智慧化升級與運用的理想世界^[17]。

與工程專案管理目標的關係

以下分別說明智慧工地對於工程專案如期如質與如價的目標實現程度，其在文獻上的研究進展。

在如期完工部分，智慧工地運用先進資訊技術可大幅縮短工程專案時程，並能顯著提升營建生產力（Construction productivity）^[18]。例如，基於電腦視覺的活動識別技術，透過 YOLOv3 深度學習模型，能自動化即時更新工程專案的進度，有效改善施工效率和專案管控精確度^[18]。這種創新的自動化監控系統不僅減少了人工排程更新的時間成本，更透過精準的影像辨識，即時掌握工地現況和施工進展，協助管理者全面掌控時程^[18]。此外，智慧工地常結合價值工程（Value engineering），應用精實管理（Lean management）策略，改善工地各式資源配置，以提升工程專案時程控制能力^[19]。當施工區域較大，或工地進出路線複雜，若運用多代理人系統（Multi-Agent System, MAS）與機器學習等技術，可協助施工機具進行最佳路徑規劃，或施工材料運送路線最佳化，以提升整體工程專案執行成效^[20]。研究顯示，智慧工地結合多代理人系統等技術，可節省 3.1% 工期^[21]；若智慧工地結合資源限制演算法等技術，可避免重工（Rework reduction）與達到排程效率最佳化，最多能節省 4.6% 工期^[22]。

在工程專案品質部分，智慧工地運用先進資訊技術來品質保證施工的過程與成果。影響智慧工地品質管理的關鍵因素，包括自動化技術、智慧化系統、法

規框架和全面性品質標準體系的建立與執行^[23]。這些要素的整合應用，不僅提升了施工品質的一致性和可靠性，更建立了系統化的品質保證機制，確保每個施工環節都能達到預期的品質標準。智慧工地透過建築資訊模型、物聯網、區塊鏈（Block chain）、人工智慧和即時模擬等技術的深度整合，實現了對工作人員、機具設備，和施工材料的持續性追蹤監控，例如區塊鏈技術可讓品質管理紀錄的儲存與管理更完備，即使無中央伺服器亦可追蹤，讓紀錄維持高可靠度，最終促使品質管理過程公開透明，避免工程專案有多參與者而衍生的資料不一致或爭議等問題^[24]。這種全方位的即時監控系統，不僅提供了完整的施工過程紀錄，更能夠即時識別潛在的品質問題，為工程專案管理者提供預警和決策支援，有效降低品質缺陷發生機率^[20]。

在工程專案成本部分，智慧工地在降低建築或營建專案成本和提升施工效率方面，展現出良好的發展潛力。從專案成本數據來看，日本小松製作所透過機器人、無人機系統和雲端平台的整合，成功將工程專案成本降低 20% ~ 30%^[25]。智慧工地所運用的創新技術，不僅改變了傳統的施工作業流程，更透過自動化設備和數據驅動的決策制定，大幅提升了施工精確度和資源使用效率。另一方面，文獻亦顯示運用智慧營建物件概念與技術，能夠將建築成本削減幅度高達 70% 以上^[17]。這些數據充分證明了妥善運用智慧工地技術，所增加的資訊技術相關成本不多，反而能減少整體工程專案成本，為建築或營建產業的數位轉型提供有力的實證支持。

通用型技術：數位雙生、雲端平台

簡言之，智慧工地場域為工地現場，需整合各新式資訊技術，方能應付施工過程碰到多樣化問題。在眾多資訊技術中，通用型數位雙生（Digital Twin, DT）與雲端平台，可謂扮演整體框架與整合者角色，制定各項特定需求所需資訊技術（後文稱具體技術），使得在智慧工地的大藍圖上，不同具體技術間介面整合或訊息互動得以完成。

首先說明數位雙生技術，事實上，數位雙生正成為智慧工地領域的必備軟體架構。如圖 1 所示，數位雙生技術包含實體世界（圖 1 左方）與虛擬世界（圖 1 右方），實體世界指定物件，例如準備搭計程車的

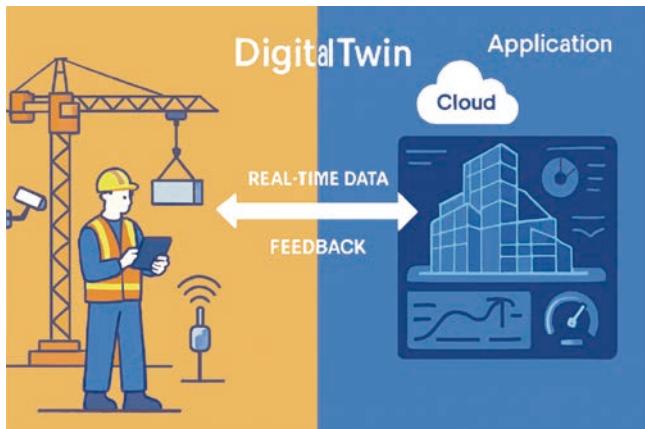


圖 1 數位雙生軟體架構圖

旅客與手機，具備感測器或物聯網裝置，以便收集物件即時資料或位置，並將資料送至實體世界的中央伺服器，或稱虛擬世界的雲端平台。以手機叫車程式如 Uber 為例，在雲端平台有許多應用程式，皆具有大數據分析、預測與決策能力，可針對使用者需求、分析收進來的資料，做出決斷，例如計算出最匹配的計程車司機。當應用程式將運算結果將送回實體世界，可能透過人類、動作器（Actuator），或可程式控制的實體世界裝置，來實現指定產出，例如旅客看到應用程式傳回來的計程車之車牌號碼，決定搭車前往。將 DT 應用在智慧工地上，能為即時監控和決策支援提供了前所未有的能力，這些虛擬世界應用程式透過整合來自多樣化來源的資料串流（Data stream），包括自主式機械設備、感測器網路和物聯網系統等，創建動態的工地地圖，並能顯著改善施工安全管控能力^[26,27]。

數位雙生技術的核心價值在於其能夠將實體工地的各種資訊即時同步至虛擬環境中，使管理者能夠透過數位化方式全面掌握工地現況，包括人員動態、設備狀態、材料分布和施工進度等關鍵資訊^[26]。這種即時的資訊整合和視覺化能力，不僅提升了工地管理的透明度和精確度，更為複雜的建築或營建專案提供了強有力的監控和分析工具^[27]。此外，透過採用標準化框架和系統架構，數位雙生技術能夠有效克服數位轉型的障礙，並自動化多項關鍵流程，包括進度監控、品質控制和設備管理等環節^[28]。網頁應用程式和儀表板系統的導入，使得 3D 模型和資料視覺化（Data visualization）成為可能，為決策制定者提供直覺且全面的資訊支援平台^[29]。這種整合性的資訊呈現方式，不僅簡化了複雜數據的理解和分析過程，更使得跨領

域團隊能夠在同一個平台上進行協同作業和決策討論。儘管數位雙生技術在提升建築環境的生產力、資源效率和安全性方面展現出巨大的發展潛力，但在實際導入過程中仍面臨諸多挑戰。為了實現數位雙生技術在既有建築工地的廣泛應用，仍需要進一步的研究來完善資料傳輸方法並解決現有的技術瓶頸，包括數據標準化、系統整合和成本效益等關鍵議題，以確保這項創新技術能夠順利轉化為實際的產業應用價值。

在雲端平台部分，雲端運算在提升智慧工地管理與促進永續發展方面展現出顯著潛力。此技術透過提供高效率且即時的資料收集、存取與分析能力，能有效支援工地的數位轉型，進而滿足各類行政管理及商業運營需求^[4]。在綠色施工管理的推動上，雲端運算可藉由降低能源消耗、減少二氧化碳排放量，同時提升協作效率與系統整合程度，促進建築或營建產業向低碳化與資源最佳化方向發展^[30]。此外，雲端運算亦扮演新興建築科技發展的創新驅動角色，為建築資訊模型、物聯網、虛擬實境等技術的應用提供基礎支援與運行環境^[31]。在實務層面，其應用涵蓋施工流程最佳化、跨部門與跨地點的即時溝通、資料共享以及生產力提升等多面向^[30]。然而，儘管雲端運算在建築或營建領域的應用已展現出多重優勢，其推廣與普及仍受到多項挑戰與限制的影響，包括資訊安全疑慮、技術基礎設施不足、組織採納意願與人力資源能力差異等問題。因而，必須制定有效的策略與管理模式，以克服這些阻礙並促進其廣泛應用^[31]。綜合而言，雲端運算不僅為建築或營建產業提供了一條邁向高效率、協作互動性與永續性皆高的技術路徑，更有助於推動整體產業結構轉型，促進智慧建築與綠色建築的長遠發展。

裝置端技術：物聯網與 RFID

在工地現場端，首先說明智慧工地應用上最為關鍵的物聯網技術。物聯網是一種透過感測器、無線通訊、網際網路協議及嵌入式系統，將各類實體物件連接至網路的技術與架構，使其能夠進行資料的自動感知、收集、傳輸、交換與處理，從而實現對實體世界的智慧化監測、控制與決策支援。在智慧工地上，物聯網透過分散式網路架構，實現多重建築或營建工地的遠端監控暨適應性管理機制，促使管理者得以基於感測器陣列與智慧裝置所提供之即時資料流，進行動

態決策制定與資源配置最佳化^[32]。此創新管理作法，根本性地重構了傳統建築或營建工程專案之監控模式，藉由異質性感測器網路的佈署，管理者得以同時掌握多重智慧工地之施工樣態，涵蓋人力資源動態、設備運行狀態、環境參數變化及施工進度指標等關鍵性資訊維度^[32]。

物聯網系統透過嵌入式感測器陣列自建築機械設備中進行資料收集，並運用雲端平台進行資料處理與使用者介面存取，此等先進技術實現設備狀況之即時監測與診斷，涵蓋振動頻譜分析及排放物質監控等關鍵性能指標，不僅提升設備預測性維護之精確性，更能預防潛在設備故障與安全風險事件之發生^[33]。物聯網解決方案同步促進自主化施工技術之發展，透過電腦視覺技術之整合應用，實現更高層次之施工自動化與智慧化^[33]。物聯網技術於施工材料管理領域之整合性應用，正獲得學術界與產業界之廣泛關注，透過系統性效率提升與營運成本最佳化策略，展現顯著之應用價值^[34]。

基於物聯網之創新性框架運用多元感測器網路進行施工材料之即時追蹤與狀態監控，有效解決材料錯置、庫存管理不當及偽造材料等關鍵性管理議題^[35]。長距離無線感測網路（Wireless Sensor Network, WSN）與平台之應用研究，展現其於追蹤靜態建築設備方面之技術可行性，能夠於廣域範圍內實現穩定之通訊連接與數據傳輸^[35]。物聯網技術於供應鏈管理最佳化發揮關鍵性作用，特別於即時資訊更新機制與施工材料處理流程自動化方面，展現卓越之應用效益^[36]。物聯網應用範疇更擴展至建築物全生命週期維護、施工管理體系及安全管理機制等多重領域，透過與 AI/DL 之深度整合，實現運輸板車之車隊互動式三維監控系統，顯著改善現場作業績效與操作人員行為模式^[37]。此等技術進展於減少作業無效率現象與提升生產力指標方面，展現顯著之發展潛力，同時於流程最佳化、廢料減量化及資源使用效率提升等面向，具備變革性影響力。然而，於系統可靠性、智慧感測器技術成熟度及巨量資料管理架構等技術領域仍存在進一步發展之空間，需透過持續性技術創新與系統最佳化研究，以實現物聯網技術於建築或營建產業之全面性應用價值與產業轉型效益。

物聯網技術近年來在建築或營建產業中應用日益廣

泛，並逐漸成為提升施工安全與作業效率的重要手段。基於物聯網的系統可實現對勞工健康與安全狀況的即時監測，從而降低事故與傷害的發生率^[38,39]。此類系統結合多元感測器、穿戴式裝置以及各類資料收集方法，以獲取有關作業人員及其作業環境的動態資訊^[40]。在建築或營建工程專案中引入物聯網技術，可有效提升安全性、隱私保護、作業生產力以及整體績效^[41]。然而，勞工對該技術的接受程度對成功落實應用至關重要，其中，隱私與資安議題是首要考量^[39]。為促進技術採用，建議在設計過程中納入勞工的參與，並開發能建立信任感的技術解決方案^[39]。此外，政府支持與專業技能培訓亦被認為是推動物聯網於建築或營建領域有效落實的關鍵措施^[41]。

物聯網正持續推動建築或營建產業的數位轉型，並透過提升工程專案管理、監測能力及作業效率，重塑產業運作模式^[42]。其核心在於，藉由佈署於實體物件上的感測器與軟體，實現資料的收集、儲存與交換^[43]。該技術不僅有助於提升施工安全、決策品質與生產力^[42]，亦可與建築資訊模型整合，提供即時的環境數據與定位資訊，從而服務於施工階段與後續的設施管理^[44]。在智慧建築領域中，基於物聯網的架構可結合雲端運算與基於位置的自動化控制，顯著提升能源效率^[45]。物聯網在智慧工地領域的落實應用，具備降低成本、減少浪費及最佳化資源配置等多重優勢^[43]。隨著建築或營建產業持續擁抱數位化浪潮，物聯網有望成為改善施工流程與最終成果的關鍵技術支柱。

值得一提的是，物聯網的前身為無線射頻識別（Radio Frequency Identification, RFID）技術，作為一種非接觸式自動識別與資料擷取方法，約莫二十年前，在工地管理領域早已展現出應用潛力。該技術透過射頻訊號實現標籤（Tag）與讀取器（Reader）之間的無線通訊，可對施工材料、施工設備以及現場人員進行即時追蹤與精確識別^[46]。RFID 標籤分主動式（需要電源供應），與被動式（不需要電源供應），現今台灣高速公路電子收費系統即使用被動式 RFID 標籤，稱作 eTag。應用在建築或營建產業，RFID 使得材料採購、物流配送以及工地資源定位等流程更為高效，有助於縮短供應鏈週期並減少因資源錯置或遺失所造成的延誤^[46]。RFID 技術的另一關鍵優勢在於其可實現施工資源的即時監控，減少人工資料輸入的需求，並有效避

免重複登錄或資料錯誤等問題^[47]。當RFID系統與手持裝置結合時，可即時顯示標籤標記物件之登錄或識別資訊，進一步提升工具、設備與高價值資源的管理便利性^[48]。此外，相較於傳統條碼系統，RFID具有更高的資料儲存容量、可在無視線環境下進行識別，以及能同時讀取多個標籤的特性，因而在複雜的建築工地環境中具備更強的適應性^[48]。

然而，RFID在建築或營建領域的推廣應用仍面臨多項挑戰，包括設備與安裝成本、訊號干擾問題、金屬與水對讀取效能的影響、以及與現有資訊管理系統的整合難度等。此外，資料安全與隱私保護亦是必須考量的議題，特別是在涉及人員行蹤監控的情境下。儘管如此，研究與實務案例顯示，RFID在大型建築或營建專案中能夠顯著提升資源調度效率與現場作業的透明度^[47]。總體而言，RFID技術透過精確且即時的資源追蹤與識別能力，不僅有助於優化工地現場管理流程，亦能為建築或營建工程專案的進度控制、成本管理及品質保證提供強有力的技術支援^[48]。隨著感測技術的進一步成熟及與其他數位化工具的整合，RFID有望在未來建築產業的智慧化與數位轉型中扮演更加關鍵的角色。

穿戴式與定位技術

在智慧工地的現場，除了上一節提到物件裝置端，在工人身上端也常見穿戴式裝置，用以收集資料、展示成果，甚至執行分析。在這技術脈絡下，計有：延展實境（Extended Reality, XR）技術，包括虛擬實境、擴增實境（Augmented Reality, AR）與混合實境（Mixed Reality, MR），日益廣泛應用於智慧工地領域，以提升工地現場的安全性、效率與訓練成效。透過將虛擬模型疊加於實體環境之中，XR技術能有效增進品質檢查的準確性，此外，其在降低工地事故發生率與強化職業安全衛生（Occupational Safety and Health, OSH）方面亦展現高度潛力^[49]。目前XR在工程專案管理上的應用範疇涵蓋進度控管、品質控管與安全管理，並促進工程專案參與者間即時資訊交換^[50]。在工程教育與訓練層面，XR亦被應用於安全管理、技能培訓、設備操作、人機協作及人體工學等訓練內容^[51]。然而，儘管XR技術具備顯著潛能，其在實際環境中之導入仍面臨技術瓶頸與使用者採納等挑戰^[50]。

近年來，關於穿戴式感測器於提升工地現場安全與監測工人健康之潛能的研究逐漸增多。手環式感測器可量測如皮膚電活動（Electrodermal activity）、皮膚溫度與心率變異性等生理訊號，進而評估工人的身心狀態^[52]。市售穿戴裝置亦展現出在連續監控體溫與偵測健康風險方面的可行性，相關研究已針對其準確度與配戴舒適性進行評估^[53]。進階穿戴科技如具備擴增實境功能的智慧安全帽、生理感測器與外骨骼裝置，透過即時數據傳輸、生命徵象監控與降低身體負荷等方式，提供更具個人化之安全防護方案^[54]。此外，創新系統如配備多重感測器之智慧手環與安全帽，能即時追蹤工人位置、生理參數，並偵測跌落事件，從而採取主動式工人健康管理策略。這些科技之應用，標誌著工地安全管理體系的重大進展。值得注意的是，新一代XR裝置通常具備良好的室內定位能力，搭配下一節提到的定位技術，在智慧工地現場，亦可混搭不同裝置來截長補短，以求現場所收集之資料串的正確性、完整性與即時性，方能真正輔助後續各式決策工作。

定位與資料收集傳送技術

首先介紹同步定位與地圖繪製技術（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）：近年研究SLAM於建築或營建產業的應用逐漸增加，SLAM可使自主機器人或車輛於複雜且持續變動之施工場域中，進行自主導航與地圖構建^[55]。透過SLAM，自主機器人或車輛能夠蒐集三維空間數據、辨識障礙物，並在未知環境中自主移動^[56]，此技術有效解決了傳統靜態雷射掃描方法所面臨之遮蔽問題，與需進行多點掃描的限制^[57]。基於SLAM的機器人或車輛可產出具備高解析度與RGB紋理資訊之點雲資料，廣泛應用於智慧工地領域，如進度監控與安全風險辨識等^[56,57]。近期更進一步拓展SLAM於大型室內場域中的應用潛能，透過融合多種感測器，例如立體攝影機與三維雷射掃描儀，以提升定位與建圖之精度與穩定性^[58]。上述發展有望顯著促進施工作業自動化、提升生產效率，並強化現場作業之安全管理。

進一步看其他空間或定位技術，光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）與三維雷射掃描（3D laser scanning）皆屬於以雷射為基礎之空間數據擷取方法，但兩者針對之應用需求與場域有所不同。三維雷射掃描以其高精度著稱，特別適用於需細部建模之專

案，例如歷史建築修復與精緻建築資訊模型建構。而 LiDAR 則強調其大範圍與高效率特性，更適用於動態與大尺度環境中，如都市規劃、自主駕駛與地形建模等場景。儘管兩者應用面向不同，皆對提升多元空間資料準確性與作業效率具有顯著貢獻。

首先說明雷射掃描技術，該技術發展甚早，近年來已成為工地現場管理與監測中極具價值的工具。該技術可快速且精確地取得三維空間數據，應用於施工進度控管、品質保證以及決策支援等多項工程管理任務^[59,60]。透過與四維模型整合，雷射掃描能實現施工進度之自動化追蹤與排程更新^[59]，此外，其亦可用於建立工地現場之視覺化表徵，以增進溝通效率與目標物追蹤^[61]。為提升資料蒐集效率並兼顧品質，已有研究提出快速掃描規劃法，以在滿足資料精度需求的同時，最小化掃描時間^[60]。實務應用顯示，雷射掃描技術可有效應用於土方量測、鋪面特性評估與考古遺址記錄等領域，當與傳統測量方法結合時，更能展現其經濟效益與高應用價值，顯示其於工程專案管理與施工控管層面具有高度潛能^[59,60]。

另一方面，LiDAR 技術迭代較快，目前常結合深度學習演算法，革新工地現場之監測與管理方式，進一步促進施工安全、生產效率與法規遵循。此一整合方案能實現工人、設備與環境狀況之即時監測，有助於風險辨識與工作流程最佳化。透過 LiDAR 數據可建立具語意資訊之工地地圖，支援物件分類與自動化路徑規劃^[62]，實證研究顯示，LiDAR 技術於工地現場具顯著應用潛力，可用於地面平整度分析、模板檢測等作業，進而提升營建生產力、品質紀錄完整性，與業主參與度^[62]。綜合而言，LiDAR 技術正展現出促進施工實務現代化與智慧化之發展潛能。

接著，探討一項新興資料收集裝置或技術：無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）。UAV 於建築或營建領域應用日益廣泛，涵蓋工地監測、安全評估與施工進度追蹤等多元面向^[63-65]，相較於傳統方法，UAV 具備更佳之空拍能力，特別是在高處或整體場域視角之影像擷取上，展現其資訊可視化與資料覆蓋範圍的優勢^[65]。此外，UAV 可結合擴增實境技術，進一步強化施工管理與問題偵測功能，提升決策效率與現場反應能力。在工地安全管理方面，UAV 亦扮演關鍵角色，透過機器學習演算法，UAV 可自動識別工人是否配戴

個人防護裝備（Personal Protective Equipment, PPE），從而促進安全規範之落實與風險控管^[64]。然而，UAV 技術之導入亦可能引入新的工安風險，如操作失誤、設備墜落或隱私疑慮等問題，亟需進行系統性之風險評估與管理^[63]。儘管存在挑戰，UAV 技術已實證其於施工現場監控、安全管理與整體專案執行效率提升等方面之應用潛力，對於推動工程管理數位化與智慧化具有積極意義^[63-65]。

當工地現場資料收集完畢，欲傳送到中央伺服器或雲端平台時，此時，傳輸方式的選擇，往往亦是智慧工地導入成功與否的指標。以下，從文獻上分別探討 5G、藍芽，與長距離低功耗通訊技術（Long Range Radio, LoRa）技術。5G 技術於智慧工地場域之整合應用展現出顯著潛力，特別是在提升工地安全、生產力與自動化層面，5G 可支援遠端操作與自主施工機械，其在低延遲（Low latency）與高可靠性通訊需求的應用場景中，優於先前之 4G 技術^[66]。低延遲性指的是資料在裝置與伺服器之間傳輸，一來一往的延遲時間，以 Wi-Fi 為例，Wi-Fi 5 (802.11ac)，約 10 至 30 毫秒；Wi-Fi 6 (802.11ax)，約 1 至 10 毫秒，為理想值，實際延遲受路由器品質、干擾與裝置數量等；4G 平均延遲，約 30 至 50 毫秒；而 5G 理論值低於 1 毫秒，實際約 1 至 10 毫秒。因此，這種即時性對於需要快速反應的應用非常關鍵，例如遠端控制機械、自動化設備操作或即時監控系統，是故，5G 可提供高速且穩定之無線數據傳輸，並可依據工地特性進行網路佈署之優化與調整^[67]。5G 於智慧工地現場之應用範疇涵蓋各式大型車輛管理、即時協調與資源追蹤等功能^[68]。然而，針對室內或局部定位需求，其他低功耗通訊技術如藍牙低功耗（Bluetooth Low Energy, BLE）亦具備成本效益高之優勢，適用於資源實時定位與人員移動軌跡監控^[69]。此類技術之導入可有效應對智慧工地場域動態性高、作業分散等挑戰，為建築或營建產業之數位轉型與自動化發展奠定基礎^[67,68]。

除了常見的 Wi-Fi、4G 或 5G，近期研究關注於長距離低功耗通訊技術的應用，探討其於施工現場即時監控與資訊傳輸之潛力。LoRa 具備遠距傳輸與低能耗特性，特別適用於工地等通訊條件受限之環境^[70]。相關研究已將 LoRa 應用於工人健康監控、設備辨識與定位等功能^[70,71]，進而提升工地之安全性、作業效率與流

程管理能力。部分研究更進一步將 LoRa 與其他通訊協定，如 ZigBee 與 Wi-Fi 整合，建構混合式通訊架構，以實現更全面之場域監控系統^[71]。此外，基於 LoRa 之網路協定 LoRaWAN 已被應用於施工現場之網路建置與物流自動化作業，顯示其於建築資訊整合、現場通訊與物聯網實作方面之廣泛應用潛力^[72]。整體而言，這些研究反映出 LoRa 技術於提升建築或營建產業資訊傳遞效率、安全管理與智慧化作業之高度發展潛能，然而，LoRa 的高延遲性、低資料傳輸速率（0.3 kbps 到 50 kbps），在應用仍需妥善考量。

最後，如同任何資訊系統，智慧工地於現場所收集的數據雖然眾多，但均為真實資料，非必要不應修改，更不能竄改，後續無論用在工程保險或工安稽核，這些現場數據必須妥善保存，方能取得資料上下游參與者的信任，與發揮最大功效。而區塊鏈技術便在建築或營建產業中，為此需求，展現出高度潛能，能有效回應當前業界所面臨之信任不足、資訊不透明與資料可追溯性薄弱等核心挑戰^[73]。在數位化工地與智慧建造日益普及的背景下，施工現場產生大量異質性資料，例如來自感測器、無人機、電腦視覺或穿戴裝置的資訊，這些資料需即時傳輸至雲端平台以供分析與決策。然而，在資料傳輸與儲存過程中，資訊有可能遭竄改、遺失或被未授權存取之風險，進而影響管理決策之正確性與系統整體信任度。區塊鏈技術透過其去中心化架構、加密演算法、時間戳記與共識機制，可有效確保資料在從現場端至雲端平台傳輸過程中之不可竄改性（Immutability）與完整性（Data integrity）。例如，可透過合約機制，建立資料上鏈，當感測器或影像擷取設備產生新資料時，自動驗證其真實性並上鏈儲存，確保任何資料變動皆可追溯其來源與修改紀錄^[74]。這一資料治理機制不僅提升資訊透明度，亦強化各參與方間之信任基礎，特別是在多方協作與外包頻繁的建築或營建專案中。

進一步而言，區塊鏈亦可與電腦視覺技術整合，針對施工影像進行自動化資訊擷取與上鏈存證，例如辨識施工進度、作業安全或品質問題等，並確保所擷取之影像資料具備法律效力與資料真實性^[75]。此外，其應用潛力可涵蓋建築生命週期各階段，包括但不限於供應鏈管理（例如追蹤建材來源）、契約履約驗證、品質保證、檢驗流程記錄與支付機制自動化等^[76]。然

而，儘管區塊鏈技術於建築或營建產業具高度潛力，目前仍處於初步研究與實驗性階段，尚未全面落地於大規模工程實務中。其導入仍面臨多項挑戰，例如資料上鏈成本、交易延遲、區塊鏈與既有系統整合之困難度，以及法規與標準體系尚未完善等^[76]。因此，未來研究應持續探討區塊鏈技術於建築資訊模型等資料管理中之可行性、架構設計、與異質資料整合機制，以促進其在建築或營建產業中之實質應用與價值實現。

決策與行動：人工智慧與機器人

若將智慧工地比喻成數位雙生系統，則數位雙生在虛擬世界所做的決策，相當於智慧工地運用人工智慧的過程，包含資料前處理、數據分析，與資料後處理；而數位雙生從虛擬世界將決策傳回實體世界，則相當於智慧工地使用機器人或智慧裝置，執行人工智慧計算的結果。

事實上，人工智慧的深度學習技術於智慧工地應用，正深刻改變傳統的安全監控與生產效率管理模式。此類技術能夠實現即時辨識現場工人、機具或施工材料，及潛在危害因子，大幅提升施工安全與作業反應速度^[77,78]。透過電腦視覺演算法，系統可高精度地識別物件類型，並結合人臉辨識技術，進行工人身分識別，提升現場人員管理效率^[77]。針對職業安全管理，已訓練之深度學習模型可自動檢測個人防護裝備（如安全帽與反光背心）之配戴狀況，而應用 Kalman filter 等演算法則能進行工人動線與行為軌跡之追蹤^[78]，有助於即時預警與風險預測。進一步結合 LiDAR 技術與深度學習，可實現更高解析度之三維空間建模與環境監控能力，有效提升危害辨識與作業流程最佳化^[79]。與傳統監視系統相比，基於深度學習的監控系統具備更高的偵測準確率與更佳的環境適應性，特別是在多工種共作、環境複雜且動態變化快速的建築或營建場域中。然而，該技術仍面臨大量數據處理、模型訓練成本與邊緣運算需求等挑戰，亟需發展更具彈性與效率的資料管理架構^[79]。整體而言，深度學習於智慧工地的應用，對於提升施工安全、作業效率及法規遵循之能力，具有高度發展潛力與產業轉型意義^[80]。

電腦視覺技術於建築或營建產業中展現出顯著潛力，能有效促進施工安全管理、生產效率提升與進度監控自動化。此類技術可透過影像與影片資料，實現

施工現場中之自動化物件偵測、目標追蹤與行為辨識，大幅降低人力監控負擔並提升資訊即時性^[81]。其應用範疇廣泛，涵蓋施工進度評估、施工材料檢查，以及施工機具安全監控等。進階的深度學習模型能準確偵測與追蹤工人及施工設備，進一步分析其互動關係，並識別潛在危險區域，以實現主動式事故預防與風險控制^[82]。然而，儘管技術發展迅速，仍面臨若干挑戰，尤其是在實現全面性場景理解（Comprehensive scene understanding）、確保跨攝影機視角下的追蹤一致性，以及對多目標實體同時行為辨識等技術層面尚待突破^[81]。此外，實務應用中亦涉及多項限制因素，如施工現場環境高度動態化、工人隱私權保障問題，以及需依工作情境設計具針對性的安全評估指標等，皆為影響電腦視覺技術在建築或營建產業廣泛落地之關鍵議題^[81]。綜上所述，電腦視覺技術作為智慧建造核心支撐之一，具備促進工程數位化與自動化之潛能，惟需進一步解決技術與倫理層面的實務挑戰，方能實現其在建築或營建領域中的全面應用。

近年來，學術界日益強化智慧工地中之物件偵測與辨識能力。為提升深度學習模型於建築或營建場域之辨識準確性，研究者發展了如 Scalable Open Dataset for Architecture (SODA) 等大型標註資料集，專為訓練施工場域中專屬物件之偵測模型而設計^[83]。其中，基於 YOLOv5 的系統，在多尺度條件下對於小型物件之即時偵測表現出良好成效，顯著提升工地即時監控與安全管理之自動化程度^[84]。此外，YOLO 類神經網絡亦被成功應用於無人機影像與固定監視器畫面中，實現多類別物件，如工人、機具、材料等，之高準確度辨識，有助於擴展工地監測應用之範疇與深度。早期研究亦提出整合三維電腦輔助設計模型作為圖像過濾機制，以輔助進行物件辨識與施工進度監測，進一步提升資料解析與自動比對效率。該方法提供一種從靜態影像中識別施工階段變化的可行路徑。綜合而言，這些人工智慧與電腦視覺技術的進展，正逐步促進施工現場之智能化監測與資訊自動化處理，除可有效降低人力成本外，亦有助於提升施工安全性與決策效率，展現其於智慧建造領域中的關鍵支撐角色。

此外，GSO-YOLO 模型結合了全域優化與穩定擷取模組，強化了模型在複雜環境中對情境資訊的捕捉能力與目標偵測穩定性^[85]。CaSnLi-YOLO 為一種基

於 YOLOv5s 的輕量化架構模型，融合了座標注意力機制（Coordinate attention）與軟非極大值抑制（Soft-NMS）技術，在有效降低模型參數數量的同時，顯著提升了偵測準確率^[86]。另有研究針對個人防護裝備，進行 YOLOv5 各版本之性能比較，發現 YOLOv5s 在處理速度上最為高效，達每秒 110 幅影像的處理效能，具備良好的即時性與實用價值^[87]。另外，GeoIoU-SEA-YOLO 模型結合了幾何交併比損失函數（Geometric intersection over union loss）與結構增強注意力機制（Structural-Enhanced Attention, SEA），針對小型目標偵測與特徵優化方面表現優異，並在辨識不安全行為等應用上，超越既有 YOLO 模型的準確度與穩定性^[88]。整體而言，這些 YOLO 模型之創新發展大幅推進了施工場域中之自動化、即時化安全監控技術，有效回應了遮蔽（Occlusion）、小目標辨識與複雜環境下偵測精度不足等長期挑戰，為建築或營建產業邁向智慧安全管理奠定技術基礎。

至於探討機器人部分，施工機器人在建築或營建產業中正逐漸成為提升生產力、安全性與作業效率的重要工具。具備移動操作功能的機械手臂與全向移動平台（Holonomic platforms）等機器人系統已被開發，用於執行高空鑽孔等高風險與高精度作業，展現出其在施工現場中的實務應用潛力。此類建築機器人具備多項優勢，包括操作精度提升、與工程管理系統之整合性高，以及現場客製化構件之即時製造能力^[89]。實證研究顯示，施工機器人可減少 25% 至 90% 的重複性作業負擔，並可降低高危險作業時間約 72%；此外，其可提升施作精度約 55%，同時重工比例降低超過 50%^[90]，顯著優化建築品質與資源運用。儘管具備多重潛力，施工機器人的實際佈署仍面臨諸多挑戰，包括：需整合機械工程、建築學、電機與資訊工程等跨領域知識體系；施工場域之非結構化環境與高度動態性，也對感知、導航與作業規劃提出高度要求。此外，如何在機器人與人類工人共作情境下確保作業安全，亦為當前技術落地應用的重要瓶頸^[89]。儘管存在上述挑戰，半自主式移動機器人（Semi-autonomous mobile robots）於實際工地中的試驗性佈署已展現出廣泛的應用潛能，不僅為施工流程帶來高度自動化，亦預示未來建築產業邁向智慧建造與人機協作新典範的發展方向^[91]。

近期智慧工地相關研究，逐漸關注大型語言模型（Large Language Models, LLMs）於建築與機器人領域之應用潛力。LLMs 正在改變傳統建築實務，特別是在文件分析、自動化資料處理與內容管理方面，展現出顯著的資訊理解與處理能力^[92]。在多機器人任務規劃（Multi-robot task planning）領域中，SMART-LLM 展現了將高階語意指令轉換為具體任務規劃之能力，透過任務分解、合作編組與資源分配等步驟，實現複雜作業流程的語意驅動式規劃^[93]。針對工地現場中的機器人應用，LLMs 可用於提升任務指派效率，透過與人類操作者互動與調適現場環境變化，協助動態資源調度與行動決策。此外，AutoRepo 框架運用多模態大型語言模型（Multimodal LLMs）自動生成施工檢查報告，不僅可加速文件產製流程，亦有助於強化安全管理與紀錄的標準化^[94]。上述應用實例顯示，LLMs 在工程管理領域具有高度革新潛力，有助於提升作業效率、資料處理準確性與決策品質，並可望在施工自動化與智慧建造的實踐中發揮關鍵作用。

最後探討 3D 列印在智慧工地的應用：3D 列印（3D Printing）技術在建築或營建領域中日益受到關注，被視為促進施工自動化與減少材料浪費之具潛力創新技術。該技術已發展出多種應用形式，包括輪廓建造法（Contour crafting）、混凝土列印（Concrete printing）與 D-shape 列印技術等^[95]，旨在透過數位化施工實現更高效率與設計自由度。以 BatiPrint3D 技術為例，其運用發泡材料作為混凝土的臨時模板，不僅構築結構體，亦同時提供隔熱功能，展現功能一體化建構（Integrated function and structure）的潛力^[96]。此外，大尺度三維列印已成功應用於多項具複雜幾何形體之工程專案中，進一步回應傳統建造技術在可施工性（Constructability）與建築設計自由度方面之限制^[97]。現地混凝土列印（On-site 3D concrete printing）具備多項優勢，包括減少能源消耗、擴展設計表現形式，以及促進環保建材之使用^[98]。研究亦指出，三維列印之牆體結構在力學性能方面，表現優於傳統磚造結構，顯示其在建築結構應用上具備技術可行性與潛在優勢^[98]。儘管三維列印技術於建築領域展現高度潛能，然其全面落地仍面臨若干挑戰，如成本過高、材料選擇受限、施工標準尚未成熟，以及缺乏大規模實證研究以驗證其在真實工地環境中之應用成效與穩定性^[95,99]。因

此，未來仍需跨學科合作與實地試驗，推動該技術在建築工程實務中的深度應用與制度化發展。

結論與建議

本研究透過系統性文獻回顧，全面整理智慧工地在建築與營建產業中之資訊技術應用現況，並針對其整合特性與實施挑戰進行分析。隨著全球建築產業面臨數位轉型浪潮^[100]，智慧工地已逐漸從概念性架構走向實質應用，其核心價值在於透過資訊技術導入，實現工地作業流程的數據化、透明化與即時化管理。研究發現，智慧工地涵蓋之資訊技術從基礎的雲端運算與大數據平臺，到進階的人工智慧、機器人與 3D 列印等，構成一多層次且系統性的技術網絡，對工程專案的進度控制、成本管理、安全監測與品質保證皆產生深遠影響。

在資源管理與效率最佳化層面，智慧工地透過人員定位與出勤追蹤、機具使用率監控、施工材料供應鏈資訊化管理等，已展現出良好的管理成效。這些技術的落實不僅提升了施工現場作業透明度，更促使管理者能依據即時數據進行決策，有效降低工程延誤與成本超支風險。

然而，智慧工地資訊技術的導入亦面臨多重挑戰。首先，在技術整合層面，不同技術間缺乏標準化介面與資料互通性，導致系統間整合困難。再者，施工現場高度動態與不確定性的環境特性，使得設備感測與資料收集的穩定性與準確性仍有待強化。此外，人員的技術接受度與操作能力亦成為導入智慧工地的重要瓶頸，特別是傳統營建產業中仍存在對新科技的抗拒情緒與應用落差。

有鑑於此，本研究提出以下建議以促進智慧工地資訊技術於營建管理中的深化應用：

1. 推動資訊標準化與系統整合機制：應建立統一之資料交換格式與技術介面，促進異質資訊系統間的互操作性，以實現跨平台整合與全面性數據管理。
2. 加強人機協作機制與使用者訓練：為減少技術落差與使用阻力，建議從現場實務角度出發，設計友善介面與操作流程，同時強化工地人員對智慧技術之認知與操作能力。
3. 建構動態且可適應的智慧系統架構：因應施工現場高度變動的特性，資訊技術應具備彈性調整與模組化設計能力，以適應不同專案規模與工地情境。

4. 強化資料安全與隱私保護機制：在大量感測與即時監控情境下，需建立有效的資料加密與區塊鏈驗證機制，確保關鍵工地資料之完整性與不可竄改性。
5. 鼓勵跨領域合作與政策支持：智慧工地的發展需結合建築、資訊、管理與法規等多領域專業，建議政府單位提供政策誘因與示範計畫，加速技術落地與產業升級。

總結而言，智慧工地所代表的不僅是技術革新，更是營建管理思維與模式的根本轉變。未來研究可進一步從實證研究出發，針對特定技術應用成效與管理制度設計進行深入探討，進一步建構符合我國營建產業實情之智慧工地發展策略。

誌謝

本研究部分感謝國科會計畫編號 MOST 111-2221-E-008-024-MY3 與 NSTC 113-2221-E-008-028-MY3 的支持。

參考文獻

1. Hammad, A., Vahdatikhaki, F., Zhang, C., Mawlana, M., and Doriani, A. (2012). Towards the smart construction site: Improving productivity and safety of construction projects using multi-agent systems, real-time simulation and automated machine control. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC). <https://doi.org/10.1109/wsc.2012.6465160>
2. Bucciarone, A., De Sanctis, M., Hevesi, P., Hirsch, M., Abancens, F.J.R., Vivanco, P.F., Amiraslanov, O., and Lukowicz, P. (2019). Smart Construction: Remote and Adaptable Management of Construction Sites through IoT. IEEE Internet of Things Magazine, 2(3), 38-45. <https://doi.org/10.1109/iotm.0001.1900044>
3. Zhou, H., Wang, H., and Zeng, W. (2018). Smart construction site in mega construction projects: A case study on island tunneling project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. Frontiers of Engineering Management. <https://doi.org/10.15302/j-fem-2018075>
4. Liu, T., Hou, J., Xiong, G., Nyberg, T.R., and Li, X. (2016). Smart cloud-based platform for construction sites. 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Beijing, China, 2016, pp. 168-173, doi: 10.1109/SOLI.2016.7551681.
5. Liu, H., Song, J., and Wang, G. (2021). A Scientometric Review of smart Construction site in Construction Engineering and Management: Analysis and visualization. Sustainability, 13(16), 8860. <https://doi.org/10.3390/su13168860>
6. Song, J., Haas, C.T., Caldas, C., Ergen, E., and Akinci, B. (2005). Automating the task of tracking the delivery and receipt of fabricated pipe spools in industrial projects. Automation in Construction, 15(2), 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.03.001>
7. Zhu, H., Hwang, B., Ngo, J., and Tan, J. (2022). Applications of Smart Technologies in Construction Project Management. Journal of Construction Engineering and Management. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0002260](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002260)
8. Zheng, Z., Wang, F., Gong, G., Yang, H., and Han, D. (2022). Intelligent technologies for construction machinery using data-driven methods. Automation in Construction, 147, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104711>
9. Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J., and Pérez, C.T. (2020). A proposed framework for Construction 4.0 based on a review of literature. EPiC Series in Built Environment. <https://doi.org/10.29007/4nk3>
10. Perrier, N., Bled, A., Bourgault, M., Cousin, N., Danjou, C., Pellerin, R., and Roland, T. (2020). Construction 4.0: a survey of research trends. Journal of Information Technology in Construction, 25, 416-437. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.024>
11. Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., and Pulido-Arcas, J. A. (2020). Construction 4.0: A Literature Review. Sustainability, 12(22), 9755. <https://doi.org/10.3390/su12229755>
12. Niu, Y., Lu, W., Chen, K., Huang, G.G., and Anumba, C. (2015). Smart construction objects. Journal of Computing in Civil Engineering, 30(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000550](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000550)
13. Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., and Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of things. IEEE Internet Computing, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1109/mic.2009.143>
14. Štefanić, M. and Stankovski, V. (2018). A review of technologies and applications for smart construction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, 172(2), 83-87. <https://doi.org/10.1680/jcien.17.00050>
15. Halfawy, M. and Froese, T. (2005). Building Integrated Architecture/Engineering/Construction Systems Using Smart Objects: Methodology and Implementation. Journal of Computing in Civil Engineering, 19(2), 172-181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2005\)19:2\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2005)19:2(172))
16. Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., and Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of things. IEEE Internet Computing, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1109/mic.2009.143>
17. Lee, J., Shin, D.P., Park, S.H., and Byon, C. (2023). Development and application of Smart Construction Objects and Management System for an Efficient and Cost-Effective Safety Management. Buildings, 13(6), 1383. <https://doi.org/10.3390/buildings13061383>
18. Bhokare, S., Goyal, L., Ren, R., and Zhang, J. (2022). Smart construction scheduling monitoring using YOLOv3-based activity detection and classification. Journal of Information Technology in Construction, 27, 240-252. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.012>
19. Elizar, N., Suripin, N., and Wibowo, M.A. (2017). The concept of value stream mapping to reduce of work-time waste as applied the smart construction management. AIP Conference Proceedings, 1903, 070010. <https://doi.org/10.1063/1.5011579>
20. Kuenzel, R., Mueller, M., Teizer, J., and Blickle, A. (2015). SmartSITe: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. Proceedings of the 32nd ISARC, Oulu, Finland. <https://doi.org/10.22260/isarc2015/0068>
21. Jiang, S., Yang, B., and Liu, B. (2025). Precast Components On-site Construction Planning and Scheduling Method Based on a Novel Deep Learning Integrated Multi-agent System. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111907>.
22. Khaledi, H., Balali, A., Valipour, A., Antuchevičienė, J., Migilinskas, D., and Zigmund, V. (2020). Application of Hybrid SWARA-BIM in Reducing Reworks of Building Construction Projects from the Perspective of Time. Sustainability, 12, 8927. <https://doi.org/10.3390/su12218927>.
23. Zhang, S., Liu, J., Li, Z., Xiahou, X., and Li, Q. (2024). Analyzing critical factors influencing the quality management in smart Construction Site: a DEMATEL-ISM-MICMAC based approach. Buildings, 14(8), 2400. <https://doi.org/10.3390/buildings14082400>
24. Sheng, D., Ding, L., Zhong, B., Love, P., Luo, H., and Chen, J. (2020). Construction quality information management with blockchains. Automation in Construction, 120, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103373>.
25. DeWit, A. (2015). Komatsu, Smart Construction, Creative Destruction, and Japan's robot Revolution. Japan Focus, 13(50). <https://doi.org/10.1017/s1557466015017143>
26. Wickberg, P., Fattouh, A., Afshar, S., and Bohlin, M. (2023). Adopting a digital twin framework for autonomous machine operation at construction sites. 2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI), 1, 1-6. <https://doi.org/10.1109/cvci59596.2023.10397254>
27. De Andrade Marques Ferreira, E., De Jesus, B.S.V.B., Araújo, C.S., Rodrigues, Y.C.M., and Costa, D.B. (2021). Digital twins to monitor physical resources at construction sites with web application. AIP Conference Proceedings, 2429, 050006. <https://doi.org/10.1063/5.0070688>
28. Torres, J., San-Mateos, R., Lasarte, N., Mediavilla, A., Sagarna, M., and León, I. (2024). Building digital twins to overcome digitalization barriers for automating construction site management. Buildings, 14(7), 2238. <https://doi.org/10.3390/buildings14072238>
29. Chacón, R., Posada, H., Ramonell, C., Jungmann, M., Hartmann, T.,

- Khan, R., and Tomar, R. (2024). Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure. *Journal of Building Engineering*, 84, 108522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>
30. Rawai, N.M., Fathi, M.S., Abedi, M., and Rambat, S. (2013). Cloud Computing for Green Construction Management. 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, China, pp. 432-435, doi: 10.1109/ISDEA.2012.107.
31. Bello, S.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Bilal, M., Delgado, J.M.D., Akanbi, L.A., Ajayi, A.O., and Owolabi, H.A. (2020). Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, 122, 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
32. Jiang, Y. and He, X. (2020). Overview of applications of the sensor technologies for construction machinery. *IEEE Access*, 8, 110324-110335. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3001968>
33. Khoury, H., Salhab, D., and Antar, S. (2018). A review on internet of things solutions for enhancing construction equipment fleet productivity. *Creative Construction Conference 2018 - Proceedings*, 971-978. <https://doi.org/10.3311/ccc2018-126>
34. Jain, E.A.S. (2023). An IoT-Based framework for enhanced construction material management and tracking. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(9), 1579-1586. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i9.9143>
35. Brennan, T.M., Jesson, J.E., Deese, A.S., Rodriguez, E., and Bechtel, A.J. (2021). Internet of things application for smart construction assets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 174(3), 79-87. <https://doi.org/10.1680/jsmic.21.00022>
36. Kumar, A. and Shoghli, O. (2018). A review of IoT applications in supply chain Optimization of construction materials. 2018 Proceedings of the 35th ISARC, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0067>
37. Katiyar, A. and Kumar, P. (2021). A review of Internet of Things (IoT) in Construction industry: Building a Better Future. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 3(2), 65-72. <https://doi.org/10.30630/ijasce.3.2.53>
38. Prabha, D., B, D., A, D.M., and K, S. (2021). IoT application for Safety and Health Monitoring System for Construction Workers. 2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). <https://doi.org/10.1109/icoei51242.2021.9452911>
39. Häikiö, J., Kallio, J., Mäkelä, S., and Keränen, J. (2020). IoT-based safety monitoring from the perspective of construction site workers. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 4(1), 1-14. https://doi.org/10.24840/2184-0954_004.001_0001
40. Singh, R., Gehlot, A., Gupta, D., Rana, G., Sharma, R., and Agarwal, S. (2019). XBee and internet of robotic things based worker safety in construction sites. In CRC Press eBooks (pp. 81-107). <https://doi.org/10.1201/9780429053290-4>
41. Oke, A.E., Arowooya, V.A., and Akomolafe, O.T. (2020). Influence of the Internet of Things' application on construction project performance. *International Journal of Construction Management*, 22(13), 2517-2527. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1807731>
42. Alzubi, K.M., Alaloul, W.S., Salameen, M.A., Qureshi, A.H., Musarat, M.A., and Alawag, A.M. (2022). Reviewing the applications of internet of things in construction projects. 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA), 169-173. <https://doi.org/10.1109/dasa54658.2022.9765143>
43. Katiyar, A. and Kumar, P. (2021). A review of Internet of Things (IoT) in Construction industry: Building a Better Future. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 3(2), 65-72. <https://doi.org/10.30630/ijasce.3.2.53>
44. Teizer, J., Wolf, M., Golovina, O., Perschewski, M., Propach, M., Neges, M., and König, M. (2017). Internet of Things (IoT) for integrating environmental and localization data in building Information Modeling (BIM). 2017 Proceedings of the 34rd ISARC, Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.22260/isarc2017/0084>
45. Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A., and Sha, M. (2015). An Internet of Things framework for smart energy in buildings: designs, prototype, and experiments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 527-537. <https://doi.org/10.1109/jiot.2015.2413397>
46. Jaselskis, E.J. and El-Misalmi, T. (2003). Implementing Radio Frequency Identification in the Construction Process. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 129(6), 680-688. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:6\(680\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:6(680))
47. Soleimanifar, M., Beard, D., Sissons, P., Lu, M., and Carnduff, M. (2013). The autonomous Real-Time system for ubiquitous construction resource tracking. 2013 Proceedings of the 30th ISARC, Montréal, Canada. <https://doi.org/10.22260/isarc2013/0162>
48. Gaba, A., Panwar, A., Singh, R., Gehlot, A., and Garg, V. (2018). An approach to monitor construction site based on radio frequency identification and internet of things. In *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 1629-1639). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_169
49. Li, M., Ganesh, B., Bai, H.S., R, P., and S, U.M. (2023). Blend of IoT and Extended Reality for Safety in Construction Trend of Technology. *Proceedings of the International Conference Emerging Trends in Engineering (YUKTHI 2023)*, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4557020>
50. Zhao, X., Zhang, M., Fan, X., Sun, Z., Li, M., Li, W., and Huang, L. (2023). Extended Reality for Safe and Effective Construction Management: State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions. *Buildings*, 13(1), 155. <https://doi.org/10.3390/buildings13010155>
51. Li, S., Wang, Q., Wei, H., and Chen, J. (2024). Extended Reality (XR) training in the construction industry: A content review. *Buildings*, 14(2), 414. <https://doi.org/10.3390/buildings14020414>
52. Jebelli, H., Choi, B., Kim, H., and Lee, S. (2018). Feasibility study of a Wristband-Type wearable sensor to understand construction workers' physical and mental status. *Construction Research Congress 2022*, 367-377. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.036>
53. Nasirzadeh, F., Karmakar, C., Habib, A., Neelangal, K.B., Mir, M., Lee, S., and Arnel, T. (2024). Continuous monitoring of body temperature for objective detection of health and safety risks in construction sites: An analysis of the accuracy and comfort of off-the-shelf wearable sensors. *Heliyon*, 10(6), e26947. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26947>
54. Rane, N., Choudhary, S., and Rane, J. (2023). Leading-edge wearable technologies in enhancing personalized safety on construction sites: a review. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4641480>
55. Yarovoi, A. and Cho, Y.K. (2024). Review of simultaneous localization and mapping (SLAM) for construction robotics applications. *Automation in Construction*, 162, 105344. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105344>
56. Kim, P., Chen, J., and Cho, Y.K. (2018). Autonomous mobile robot localization and mapping for unknown construction environments. *Construction Research Congress 2022*, 147-156. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.015>
57. Kim, P., Chen, J., Kim, J., and Cho, Y.K. (2018). SLAM-Driven intelligent autonomous mobile robot navigation for construction applications. In *Lecture notes in computer science* (pp. 254-269). https://doi.org/10.1007/978-3-319-91635-4_14
58. Ress, V., Zhang, W., Skuddis, D., Haala, N., and Soergel, U. (2024). SLAM for indoor mapping of wide area construction environments. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2404.17215>
59. Bosché, F., Turkan, Y., Haas, C.T., and Haas, R. (2010). Fusing 4D modelling and laser scanning for construction schedule control. In *Procs 26th Annual ARCOM Conference* (pp. 1229-1238).
60. Zhang, C., Kalasapudi, V.S., and Tang, P. (2016). Rapid data quality oriented laser scan planning for dynamic construction environments. *Advanced Engineering Informatics*, 30(2), 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.004>
61. Shih, N. (2002). The application of 3-D scanner in the representation of building construction site. *Proceedings of the 19th ISARC*, Washington, USA. <https://doi.org/10.22260/isarc2002/0053>
62. Westfechtel, T., Ohno, K., Akegawa, T., Yamada, K., Neto, R.P.B., Kojima, S., Suzuki, T., Komatsu, T., Shibata, Y., Asano, K., Nagatani, K., Miyamoto, N., Suzuki, T., Harada, T., and Tadokoro, S. (2021). Semantic mapping of construction site from multiple daily airborne LiDAR data. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 3073-3080. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3062606>
63. Howard, J., Murashov, V., and Branche, C.M. (2017). Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety. *American Journal of Industrial Medicine*, 61(1), 3-10. <https://doi.org/10.1002/ajim.22782>
64. Gupta, S. and Nair, S. (2023). A review of the emerging role of UAVs in construction site safety monitoring. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.135>

65. Kaamin, M., Razali, S.N.M., Ahmad, N.F.A., Bukari, S.M., Ngadiman, N., Kadir, A.A., and Hamid, N.B. (2017). The application of micro UAV in construction project. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5005403>
66. Xiang, Y., Xu, B., Su, T., Brach, C., Mao, S.S., and Geimer, M. (2021). 5G Meets Construction Machines: Towards a Smart Working Site. *2021 International Conference on Computing and Communications Applications and Technologies (I3CAT)*, Ipswich, United Kingdom, 2021, pp. 28-35, doi: 10.1109/I3CAT53310.2021.9629426.
67. Jung, V. and Brell-Cokcan, S. (2024). Enabling construction automation: Implementing radio frequency communication infrastructure on construction sites. *2024 Proceedings of the 41st ISARC*, Lille, France. <https://doi.org/10.22260/isarc2024/0047>
68. Mendoza, J., De-La-Bandera, I., Álvarez-Merino, C.S., Khatib, E.J., Alonso, J., Casalderrey-Díaz, S., and Barco, R. (2021). 5G for Construction: Use Cases and Solutions. *Electronics*, 10(14), 1713. <https://doi.org/10.3390/electronics10141713>
69. Badishi, B., Zhao, J., Zhuang, S., Seppänen, O., Jäntti, R. (2019). Intelligent Construction Site: On Low Cost Automated Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons. *2019 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe)*, Pulau Pinang, Malaysia, 2019, pp. 29-35, doi: 10.1109/ICWISE47561.2019.8971829
70. Teizer, J., Weber, J., König, J., Ochner, B., and König, M. (2018). Real-time positioning via LORA for construction site logistics. *2018 Proceedings of the 35th ISARC*, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0001>
71. Kumar, G.S.A., Singh, R., Gehlot, A., and Akram, S.V. (2022). LoRa enabled Real-time Monitoring of Workers in Building Construction Site. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 10(1), 41-50. <https://doi.org/10.37391/ijeer.100106>
72. Dai, R., Diraneyya, O., and Brell-Cokcan, S. (2021). Improving data communication on construction sites via LoRaWAN. *Construction Robotics*, 5(2), 87-100. <https://doi.org/10.1007/s41693-021-00059-8>
73. Darabseh, M. and Martins, J.P. (2023). Blockchain orchestration and transformation for construction. *Smart Cities*, 6(1), 652-675. <https://doi.org/10.3390/smartcities6010031>
74. Zhang, Y., Wang, T., and Yuen, K. (2021). Construction site information decentralized management using blockchain and smart contracts. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(11), 1450-1467. <https://doi.org/10.1111/mice.12804>
75. Wu, H., Li, H., Luo, X., and Jiang, S. (2023). Blockchain-Based onsite activity management for smart construction process quality traceability. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(24), 21554-21565. <https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3300076>
76. San, K.M., Choy, C.F., and Fung, W.P. (2019). The Potentials and Impacts of Blockchain Technology in Construction Industry: A literature review. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 495, 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/495/1/012005>
77. Nain, M., Sharma, S., and Chaurasia, S. (2024). Deep learning oriented smart constructional material and face recognition system for the site safety. *2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/upcon62832.2024.10983026>
78. Zhao, Y., Chen, Q., Cao, W., Yang, J., Xiong, J., and Gui, G. (2019). Deep learning for risk detection and trajectory tracking at construction sites. *IEEE Access*, 7, 30905-30912. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902658>
79. Igboekulie, C.V. (2025). Integrating deep learning and LIDAR for autonomous construction site monitoring: enhancing safety, productivity, and regulatory compliance frameworks. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(4), 14835-14751. <https://doi.org/10.55248/gengpi.6.0425.1671>
80. Zhang, Y. and Yuen, K. (2021). Applications of deep learning in intelligent construction. In *Structural integrity* (pp. 227-245). https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9_11
81. Seo, J., Han, S., Lee, S., and Kim, H. (2015). Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.02.001>
82. Wang, M., Wong, P.K., Luo, H., Kumar, S., Delhi, V.K., and Cheng, J.C. (2019). Predicting safety hazards among construction workers and equipment using computer vision and deep learning techniques. *2019 Proceedings of the 36th ISARC*, Banff, Canada. <https://doi.org/10.22260/isarc2019/0054>
83. Duan, R., Deng, H., Tian, M., Deng, Y., and Lin, J. (2022). SODA: A large-scale open site object detection dataset for deep learning in construction. *Automation in Construction*, 142, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104499>
84. Kim, S., Hong, S.H., Kim, H., Lee, M., and Hwang, S. (2023). Small object detection (SOD) system for comprehensive construction site safety monitoring. *Automation in Construction*, 156, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105103>
85. Zhang, Y., Guan, D., Zhang, S., Su, J., Han, Y., and Liu, J. (2024). GSO-YOLO: Global Stability Optimization YOLO for Construction Site Detection. *arXiv* (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.00906>
86. Hao, F., Zhang, T., He, G., Dou, R., and Meng, C. (2024). CaSnLi-YOLO: construction site multi-target detection method based on improved YOLOv5s. *Measurement Science and Technology*, 35(8), 085202. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad42c5>
87. Ngoc-Thoan, N., Bui, D.T., Tran, C.N.N., and Tran, D. (2023). Improved detection network model based on YOLOv5 for warning safety in construction sites. *International Journal of Construction Management*, 24(9), 1007-1017. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2171836>
88. Jia, X., Zhou, X., Shi, Z., Xu, Q., and Zhang, G. (2025). GEOIOU-SEA-YOLO: An advanced model for detecting unsafe behaviors on construction sites. *Sensors*, 25(4), 1238. <https://doi.org/10.3390/s25041238>
89. Luo, D. and Yu, L. (2021). From Factory to Site—Designing for industrial robots used in On-Site construction. In *Advances in 21st century human settlements* (pp. 87-109). https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5_4
90. Brosque, C. and Fischer, M. (2022). Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten construction robots. *Construction Robotics*, 6(2), 163-186. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00072-5>
91. Braga, R.G., Tahir, M.O., Iordanova, I., and St-Onge, D. (2024). Robotic deployment on construction sites: considerations for safety and productivity impact. *arXiv* (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2404.13143>
92. Ahmadi, E. and Wang, C. (2024). Transforming Construction Practices with Large Language Models. *EPiC Series in Built Environment*, 5, 414-404. <https://doi.org/10.29007/hb2g>
93. Kannan, S.S., Venkatesh, V.L.N., and Min, B. (2024). SMART-LLM: Smart Multi-Agent Robot Task Planning using Large Language Models. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 12140-12147. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10802322>
94. Pu, H., Yang, X., Li, J., Guo, R., and Li, H. (2023). AutoRepo: A general framework for multi-modal LLM-based automated construction reporting. *arXiv* (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2310.07944>
95. Perkins, I. and Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1-9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>
96. Poullain, P., Paquet, E., Garnier, S., and Furet, B. (2018). On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of YnovaTM. *MATEC Web of Conferences*, 163, 01001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816301001>
97. Teizer, J., Bickle, A., King, T., Leitzbach, O., and Guenther, D. (2016). Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction. *2016 Proceedings of the 33rd ISARC*, Auburn, USA. <https://doi.org/10.22260/isarc2016/0114>
98. Van Der Putten, J., Van Olmen, A., Aerts, M., Ascione, E., Beneens, J., Blaakmeer, J., De Schutter, G. and Van Tittelboom, K. (2020). 3D concrete printing on site: a novel way of building houses? In *Rilem bookseries* (pp. 712-719). https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_71
99. Prasittisopin, L. (2024). How 3D printing Technology Makes Cities Smarter: A review, thematic analysis, and perspectives. *Smart Cities*, 7(6), 3458-3488. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060135>
100. Wang, R.G. (2023). Transformation of Building Information Models into Knowledge Graph-based Digital Twin Systems for Facility Management. Ph.D. Dissertation, National Central University, Jhongli, Taoyuan, Taiwan. <https://hdl.handle.net/11296/c7u83f>



智慧工地 的應用 現況、 未來 發展 與 挑戰

王琨淇*／國立台灣科技大學營建工程系 助理教授

隨著營造產業加速數位轉型，智慧工地的概念逐漸從研究討論走向實務應用，並成為提升施工效率、安全管理與品質控管的重要策略。現階段，許多工地已引入無人機巡檢、雲端協作平台與數位雙生技術，以加強現場資訊蒐集與決策支持，智慧工地已逐步在實務中展現價值。然而，智慧工地的推動仍面臨挑戰，例如跨系統與跨技術的整合度不足、高昂的初期投資與維運成本，對中小型營造公司而言是一大負擔。這些因素使智慧工具雖具應用潛力，但實際推廣於工地現場仍需更多的實務考量。本文透過對智慧工地現況、挑戰與可能發展的探討，期望為營造產業提供參考方向，並促進技術在工地管理中的有效落實與產業競爭力的持續提升。

前言

在數位轉型的浪潮下，營造產業迎來了亟需突破與調整的關鍵時期，亦從營建 4.0 邁向營建 5.0。長期以來，工地現場多仰賴人工作業與經驗傳承，然而，面對工期壓力加劇、專業人力短缺的現況，加上現代工程對施工效率、品質、職安及永續發展的高標準要求，傳統營建模式已難以完全因應。

為解決此問題，許多施工單位開始積極導入各項智慧化工具，期望透過數位技術輔助，強化現場管理能力並提升決策效率。常見的科技工具如物聯網（IoT）、人工智慧（AI）、虛擬實境（VR）、擴增實境（AR）、混合實境（MR）等，近年已逐步出現於營建專案中，透過各式數位工具的導入，現場資訊得以即時蒐集與回饋，施工規劃與調度更具彈性，安全與品質管控也能向前推進。

本文將針對智慧工地現階段的應用重點進行整理與說明，並進一步探討目前智慧工地推行時所遭遇的挑戰，以及未來在政策推動與實務執行面上可努力之方向，期盼作為我國營造產業邁向智慧化與永續發展的可行參考。

* 通訊作者，wkc@mail.ntust.edu.tw

智慧工地之應用現況

本文將智慧工地的應用分為營造安全、環境監測、工序協調到專案管理等四個主要面向，分別說明目前智慧工地的常見做法與實際應用。

以數位工具輔助營造安全

AI 影像辨識

工地內常透過 AI 影像辨識系統，在出入口、吊裝區或高風險區域自動偵測人員是否確實配戴安全帽、穿戴反光背心，或是否進入限制出入的危險區域^[1-4]。透過與 CCTV 整合，系統會持續比對影像，一旦發現異常就能立刻發送通知給職安管理人員，儘早排除違規情形，以降低意外發生之機率^[5]。舉例而言，AI 監視系統若捕捉工人進入工地沒有攜帶安全帽，則會即時在管理人員及工人手機發送警報，提醒其必須立即改善或處理。

穿戴式姿勢評估裝置

目前已有內含 GPS 與姿勢感測模組的安全帽或穿戴式智慧裝置^[6] 在工地現場投入使用，主要用於即時掌握作業人員的位置與活動狀態。這些裝置通常包含加速度計、陀螺儀與高度計等感測元件，可在不同工作環境下記錄人員的移動路徑、姿勢變化與作業時間

分布。一旦系統偵測到長時間靜止、急速跌落、突然俯仰或翻轉等異常狀況，便會自動觸發警報，將資訊同步傳送至工地監控中心及主管手機，以便第一時間派員前往確認與救援。

由於工地多為噪音大、視線受阻且作業區分散的開放空間，人工巡檢不僅耗時，還可能錯過關鍵時刻，因此這類穿戴式裝置能有效協助即時監控。此外，部分系統具備歷史數據回溯功能，可分析個別工人的日常活動型態，找出高頻率進行高風險動作的族群，例如反覆彎腰以不良姿勢進行搬運、長時間攀爬或在高處無支撐作業等。這些資料可作為職業傷害風險評估與教育訓練的依據，也能協助調整工作分配，降低因疲勞與姿勢不良導致的職安事件。

VR 職安教育訓練

相較於傳統以講義、簡報為主的安全教育，VR 職安訓練（如圖 1）可讓受訓人員以沉浸式之方式，身歷其境體驗高處墜落或物體飛落等職災危險情境，加深對危害的感受與記憶，提升作業人員的安全意識與臨場應變能力^[7,8]。此方式讓工程人員可以用第一人稱視角提前模擬高風險作業，並事先演練作業檢查與緊急應變流程。在實務上，一些國際大型建商已將 VR 安全培訓納入公司內部的強制性開工前程序，部分公共工程的標案中，也開始嘗試將 VR 職安教育訓練列為合約要求。

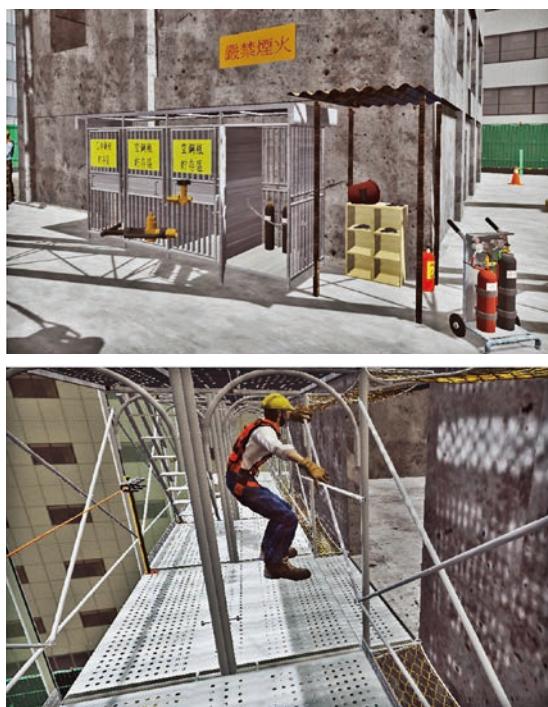


圖 1 以 VR 輔助工程人員進行職安教育訓練
(圖片來源：余文德等人^[9])

以數位工具輔助施工監測與環境管理

IoT 感測器

在施工現場各處裝設 IoT 感測器，可長時間自動蒐集溫度、濕度、二氧化碳濃度、噪音及振動等數據，形成一個即時環境監控網絡（如圖 2）^[10-12]。這些感測器通常具有低功耗、無線傳輸與多點分佈的特性，可即時將數據彙整後進行分析。當系統偵測到異常值超標，例如噪音分貝超過法規限制或結構振動異常，便能自動發送預警至工地主任、職安管理員或專案經理的行動裝置。

實務上，IoT 感測器也常與自動化控制系統結合，例如當粉塵感測器偵測濃度達警戒值時，可自動啟動灑水系統或排風設備，降低污染源；或在檢測到過高的結構振動時，立即暫停大型機具運作，減少對周邊建築的影響。此外，透過長期累積的感測數據，管理團隊可進行趨勢分析與預測，提早發現潛在問題，例如判斷某工序是否在特定氣候條件下更容易產生安全風險，進而調整施工計畫。

無人機巡檢與影像紀錄

無人機（UAV）搭載高解析度鏡頭，可依照預先設定的定點飛行路線，定期拍攝施工進度、材料堆放狀況、工地出入口人員流量，以及檢查高處構件的安裝品質^[13,14]。此技術能取代部分傳統人工巡檢，減少人員攀爬鷹架或吊籠進行高空檢查的風險，亦能在惡劣氣候條件或危險區域進行遠距檢測，提升安全性與效率。

在進階應用上，無人機可結合影像辨識與 AI 分析，進行自動化施工檢測。例如，透過影像比對 BIM 模型與現況照片，可自動判斷構件安裝位置是否正確，甚至辨識鋼筋外露、模板變形等缺陷。部分系統更能利用熱成像鏡頭進行紅外線檢測，快速發現隔熱層缺失、漏水或能源流失等問題。此外，定期拍攝的影像也可用於建立三維點雲模型，協助管理團隊進行施工量測與進度驗證，減少人工丈量誤差。

以數位工具輔助施工規劃與工序協調

MR 輔助大型機具進場路徑與空間模擬

對於需要大型機具進場作業的工地，MR 技術可先在現場將虛擬機具疊加到真實環境中（如圖 3），協

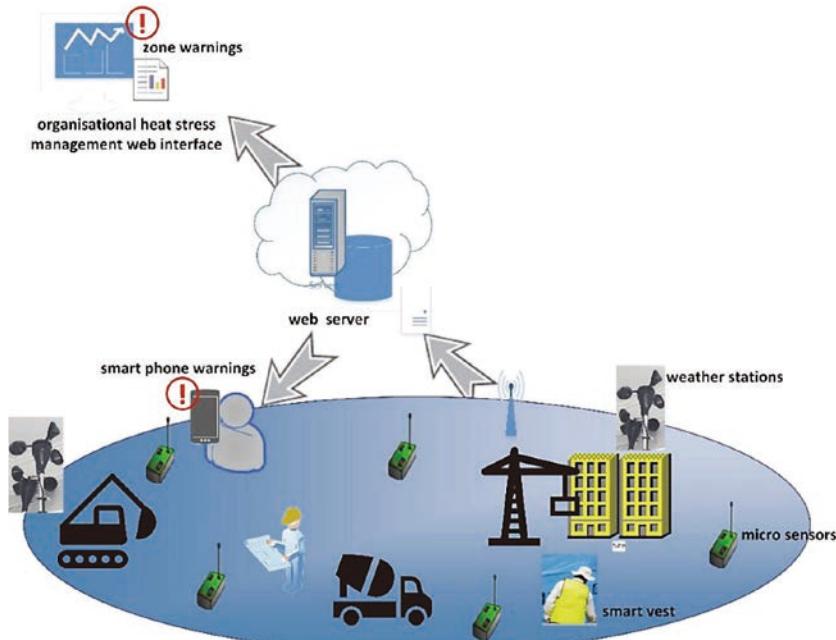


圖 2 IoT-based 智慧工地傳輸
(圖片來源：Edirisinghe, et al. [10])



圖 3 以 MR 技術評估機具動線
(圖片來源：洪偉翔 [15])

助施工團隊檢視動線、吊裝半徑與障礙物位置，預防空間不足或路徑干擾問題，提升規劃準確度^[15]。在規劃內容方面，除路徑與轉彎半徑外，會同步檢核臨時動線、臨時設施位置、回轉掃掠區、吊裝盲區與人員隔離線。若基地周邊有路權限制或既有建物淨空間不足，可先以 MR 模擬不同入場時間與分段進場策略，評估對交通維持與鄰里影響。完成審查後，系統可輸出進場路線配置圖、關鍵區域之模擬樣式截圖，提供現場監造會勘使用。然而，此一應用常見限制包含定位不準確、戶外強光造成設備之可讀性下降、網路穩定性差時導致多人操作之同步時間差。

AR/MR 工序說明與現場輔助

在複雜的施工作業中，紙本圖說往往無法即時反映現場情況，導致施作位置偏差或後續衝突。在現場實作階段，AR 或 MR 技術可直接把下一步施作的結構或管線位置，以虛擬影像顯示在實際場域，讓現場人員比對參考，避免埋設或安裝錯位，同時減少依賴紙本圖說的困擾，有助於複雜工項的協調與解釋。以多工種協作的廠房工程為例，空調風管、消防管與電纜橋架之間需保持嚴格間距，透過 AR 顯示的即時位置資訊，安裝團隊能在施工前確認所有系統的預定位置，並在現場及時調整安裝策略。

以數位工具輔助專案管理與決策支援

雲端協作平台

部分工地會使用雲端平台將最新的設計變更、現場回報與檢核紀錄集中管理，讓設計單位、監造與施工團隊能即時在線上共同檢視與討論，縮短訊息傳遞時間並降低錯誤。以 bimU 平台（如圖 4）為例，其平台可整合圖資、模型、施工紀錄與施工議題等，亦可即時瀏覽與標註 3D 模型，讓不同利害關係人於同一平台上討論問題點，並提出修改建議。此外，亦可於雲端平台上統計過去所發生之議題類型、追蹤人員處理情形等，提供工地管理之效率。

進度自動比對與預測分析

透過無人機影像或感測器回傳的現場數據，系統能自動比對實際進度與原定工期是否一致，若有延誤或異常，則提供預測結果與可行調整建議，讓現場人員或管理階層可即時因應^[16]。

雖然目前工地上已經可以看到各式各樣的智慧化應用，但就整體執行情況而言，許多技術仍處在逐步成熟與驗證的階段。像是 AI 的辨識準確度、感測器的穩定性、無人機與機器人自動化巡檢的可用性，以及 VR、AR、MR 的現場操作便利性，都還有許多細節需要持續優化與調整。

對多數施工單位來說，如何讓這些智慧化工具真正符合現場需求、整合成穩定可用的系統，仍有相當

大的努力空間。因此，在推動智慧工地的同時，也需要更多實際案例的累積與跨領域技術的協作，才能讓各項應用真正發揮效益。

智慧工地之未來發展趨勢

隨著人工智慧、感測技術、實境科技與自動化設備持續進步，未來的工地不再只是導入單一之數位工具，更會強調多技術整合。其應用層面亦隨之拓展，不再侷限於目前已經普遍嘗試的安全監控、進度管理與環境監測。以下為可能的發展方向：

實境科技與人工智慧的整合

AR、VR、MR 等實境科技已能在工地提供視覺化輔助，但未來若與人工智慧結合，將可形成即時分析與視覺提示的現場輔助模式。系統可透過攝影機或智慧眼鏡即時擷取現場影像，AI 模型自動辨識構件安裝錯誤、施工順序偏差或安全防護不足，再於使用者設備上直接以圖示或文字標註問題位置與修正方法。例如，在安裝鋼構時，AI 系統可即時比對現場構件的整體位置、垂直度與連接狀況，若發現與設計模型有超過允許範圍的差異，便會在使用者視野中直接標記問題區域，並提示可能的修正方式；在進行鋼筋綁紮時，亦可掃描檢核實際綁紮之數量是否與設計圖有差異，並即時指出錯誤。

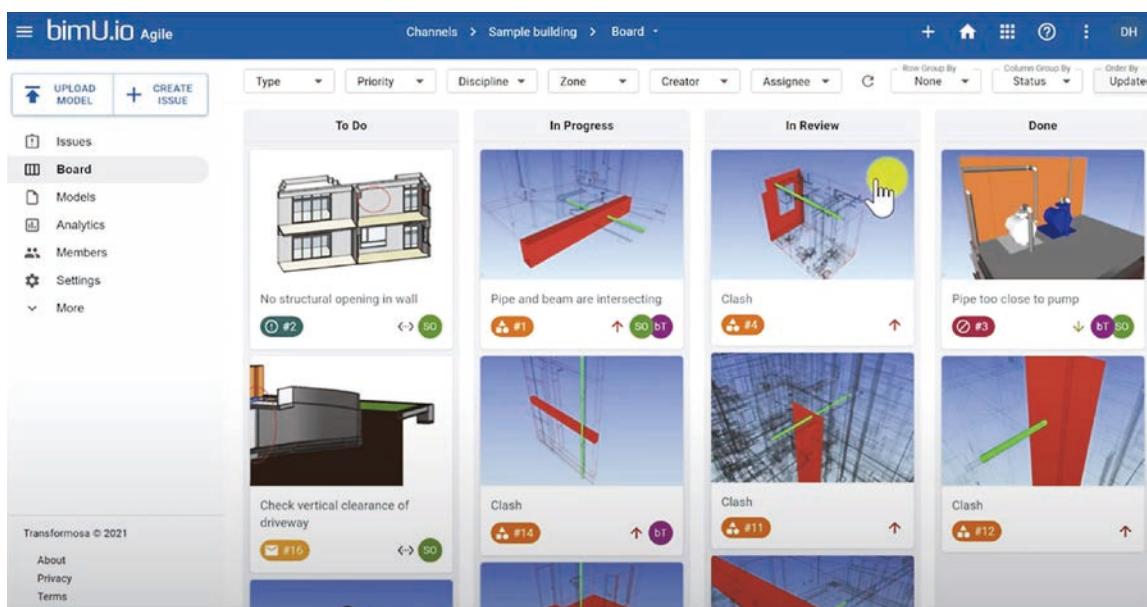


圖 4 bimU 雲端管理平台
(圖片來源：鈞逸科技有限公司^[17])

機械手臂於現場施工之協助

機械手臂的應用未來將從工廠製造延伸至現場施工。未來的工地可部署具備移動能力與視覺感測的機械手臂，協助完成重複性高或高風險的作業，例如鋼筋綁紮、模板組裝、構件搬運與固定等。機械手臂可透過雷射掃描或攝影機即時感知施工區域，並依據BIM或數位雙生模型自動調整作業路徑，確保施工位置與排程一致。在高處或狹窄空間作業時，機械手臂還能減少人員暴露於高風險環境的時間，降低職安事件發生的風險。

數位雙生於施工流程檢核之應用

數位雙生技術將從進度模擬工具，發展為施工現場的即時檢核平台。透過感測器與影像辨識系統，現場狀況可即時映射到數位雙生模型中。監造人員使用各式智慧裝置檢視時，能將設計模型與現場實景精準對位，比對構件的安裝位置、尺寸與方向。例如，在機電管線安裝階段，系統可即時判斷管線是否與模型位置一致，並標記可能與其他系統干擾的部分；又或是比對機具之站位、材料之堆置情形，是否符合施工初期之規劃。

智慧化施工品質即時監測

除人工檢測外，未來可在澆置混凝土、焊接或塗裝等工序中安裝即時監測模組。例如混凝土澆置時，可透過內嵌式感測器持續監測溫度與濕度，並即時分析是否有早期離析或未密實的風險；焊接作業則可透過影像與熱感應數據分析焊縫均勻度與溫度分布，判斷是否需要立即補強。系統一旦偵測異常，可立刻提醒施工人員修正。

個人化安全防護系統

未來的工地安全管理可依照每位工人的健康狀態與作業風險等級，提供個人化的安全防護策略。穿戴式裝置可持續監測心率、體溫與姿勢變化，例如在高溫作業環境下，若偵測到工人體溫異常上升或心率過高，系統會立即透過智慧手環或耳機發出提醒，並同步通知主管安排替換或休息。同時，系統還可整合作業紀錄與風險評估，針對長時間從事高負荷工作的員工，提前安排輪休或調整工作內容，以預防疲勞累積造成事故。

智慧工地之挑戰

雖然近年來各類智慧化工具在工地現場的導入已逐步增加，許多技術也開始進入實際應用階段，但在推動智慧工地的過程中，仍存在一些無法忽視的挑戰與限制，需要各方持續投入資源與心力共同克服。

目前缺乏統一之系統整合標準

目前工地上所使用之智慧工具，如感測器、AI影像辨識系統、無人機及各式雲端管理平台，大多來自不同廠商或由不同團隊開發，軟體與硬體之間的資料格式、串接介面皆不一致。如此導致各系統之間難以直接互通，常出現資料重複輸入、資訊不相容以致無法銜接或需要額外轉換格式的情況。如何有效整合各種分散的數位工具，仍是推動智慧工地時必須面對的挑戰之一。

環境與現場條件限制

智慧工地的重點在於即時掌握現場各項施工或管理所需之資訊，提高施工效率或降低施工錯誤。然而，實際施工現場之環境複雜，且現場變動快速，各項感測器或預先製作之智慧模組等都可能無法與現場完全吻合。此外，由於現場條件不同，可能導致場地障礙或訊號不佳，以致無法發揮智慧工具之最大效益。

加強人才培育

智慧工地涉及感測器配置、數據分析判讀、AI監控管理與實境技術操作，對現場管理與施工人員的數位素養要求相對較高。然而目前許多工地主任與工程人員雖具備豐富的施工經驗，但對新興數位工具仍不熟悉，缺乏操作與維護經驗。近年來，許多學校已陸續開設智慧工具之相關課程，培育新一代工程師對智慧工具之熟悉能力，但由於課堂時間有限以及傳統教學方式的約束，課程內容往往難以深入涵蓋所有智慧工地之實際應用。

經費投入與業主支持

目前智慧工地已廣為熱議，但由於科技設備仍未真正普及，目前智慧工地所導入之硬體（如感測設備、穿戴裝置等）與軟體（如雲端平台或自行開發串接之軟體）所需之經費不低。對部分中小型營造廠而言，若缺乏業主在經費或制度上的支持，很難獨自承

擔這些長期投入。換言之，雖智慧化應用已被認定為具潛力與效益，但仍受限於初期投入成本與回收期的不確定性，導致推動速度較為緩慢。

結語

智慧工地是營造業面對數位轉型的重要實踐方向之一。近年來，AI 影像辨識、穿戴式裝置、IoT 感測器、無人機、AR/VR 教育訓練等工具已逐步導入工程現場；但實務上，這些技術大多仍處於試行階段，能長期穩定運作的案例並不多。其原因並非技術本身不可行，而是整體導入的環境尚未成熟，包含管理機制、配套措施與人才支援等面向都尚有落差。

從目前台灣營建業實務現場觀察可發現，智慧化推動最常遇到的問題不在於沒有工具可用，而在於不知道要從哪裡開始用。許多業者在導入智慧工地時，抱持著「要全面升級」的觀念，反而忽略了不同工地之規模、工種與階段需求並不相同。當智慧技術無法對應實際問題，或是投入成本無法轉換為顯著成效時，就容易在一兩次試行後選擇放棄。這也反映出，智慧工地的推動應該回到工地之基本需求，而非盲目追求完整性或全面性。

另一個不容忽視的挑戰是人力與組織的調適速度落後於技術變化。即使部分學校與培訓單位已經開始提供數位營建課程，但許多施工現場的管理幹部與基層工程人員，仍習慣於傳統的溝通與作業流程，對於新系統的接受度偏低。當系統導入後缺乏足夠的支持與使用動機，就容易淪為形式，無法實現技術原本預期可帶來之管理價值。

因此，未來在推動智慧工地時，建議應從幾個方向著手。第一，從技術成熟之重點需求開始導入，聚焦在那些已被實證可行、成本可控且回饋機制明確的技術，如 AI 安全帽辨識、無人機巡檢、環境感測與簡易 AR 導引，逐步累積智慧工地之管理經驗。第二，推動輕量化導入之觀念，讓中小型營造廠也能在有限預算下參與智慧化轉型，避免將智慧工地視為大型工地之專利。最後，制度與政策層面應給予更多鼓勵與支持，包含示範案例之推行、補助機制與導入指引等，讓實務現場人員願意嘗試，也能逐漸建立屬於公司本身的智慧管理能力。

參考文獻

- 林楨中、余文德、廖璇洲、蕭文達、張憲寬（2021），人工智慧視覺化技術於工地危害辨識之應用，勞動及職業安全衛生研究季刊，第 29 卷第 1 期，第 67-80 頁。
- 余文德、張憲寬、蔡宛穎（2022），基於電腦視覺技術之防墜落設施安全狀態辨識研究，中國土木水利學刊，第 34 卷第 2 期，第 109-120 頁。
- 蕭文達、余文德、張憲寬（2023），利用大數據建立營建人員安全管理的風險分類模型，勞動及職業安全衛生研究季刊，第 31 卷第 4 期，第 22-33 頁。
- Wang, R.J., Yu, W.D., Liao, H.C., Chang, H.K., and Lim, Z.Y. (2024). Cost/Benefit Analysis of AIoT Image Sensing for Construction Safety Monitoring. *Journal of Engineering, Project & Production Management*, 14(3).
- 余文德、蕭文達、張憲寬、謝堉程（2023），基於影像辨識距離計算之工地即時人員定位方法研究，中國土木水利工程學刊，第 35 卷第 7 期，第 705-719 頁。
- 詹斯晴（2022），穿戴式偵測墜落及跌倒裝備於本國建築工地之研發測試，國立中央大學土木工程學系在職專班，碩士論文。
- Yu, W.D., Wang, K.C., and Wu, H.T. (2022). Empirical comparison of learning effectiveness of immersive virtual reality-based safety training for novice and experienced construction workers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(9), 04022078.
- Man, S.S., Wen, H., and So, B.C.L. (2024). Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis. *Journal of safety research*, 88, 230-243.
- 余文德、王琨淇、吳獻堂、劉國青（2022），以互動式 VR 體驗學習系統輔助工地高危害職安教育之效益評估，技術學刊，第 37 卷第 3 期，第 149-164 頁。
- Edirisunge, R., Andaman, M.M., and Ghanem, A. (2022, November). Exploring the thermal conditions in construction sites through IoT based methodologies. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1101, No. 8, p. 082031). IOP Publishing.
- Jeoung, J., Jung, S., Hong, T., and Choi, J.K. (2022). Blockchain-based IoT system for personalized indoor temperature control. *Automation in construction*, 140, 104339.
- Ismail, Z.A.B. (2022). Thermal comfort practices for precast concrete building construction projects: towards BIM and IOT integration. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1504-1521.
- Tan, Y., Li, S., Liu, H., Chen, P., and Zhou, Z. (2021). Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV. *Automation in Construction*, 131, 103881.
- Aela, P., Chi, H.L., Fares, A., Zayed, T., and Kim, M. (2024). UAV-based studies in railway infrastructure monitoring. *Automation in Construction*, 167, 105714.
- 洪偉翔（2024），以 MR 為基礎之施工機具作業空間檢討，朝陽科技大學營建工程系，碩士論文。
- Zhen, L., Yang, Z., Laporte, G., Yi, W., and Fan, T. (2024). Unmanned aerial vehicle inspection routing and scheduling for engineering management. *Engineering*, 36, 223-239.
- 鉤逸科技有限公司（2025），bimU.io, <https://bimu.io/>





基於工程圖說之 施工查驗表單自動化檢核

陳弘翊／國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 碩士班研究生

陳翊翔／國震中心與臺大土木合設 AI 中心 專案經理

林之謙／國立臺灣大學土木工程系 副教授

陳俊杉*／國立臺灣大學土木工程系 特聘教授

以查驗表單進行現場查驗是營建工程中確保結構品質的關鍵步驟，然而表單內標準的檢核需人工對照繁複且篇幅龐大的施工圖說，不僅耗時費力且易出錯。本研究提出一結合多模態檢索增強生成（Retrieval-Augmented Generation, RAG）與代理式工作流程之規範自動化檢核（Automated Compliance Checking, ACC）系統。該系統導入為工程圖說特別設計之層級式詳圖檢索流程，針對表單內容檢索相關圖說與詳圖。以實際橋梁工程圖說與查驗表單進行實驗之結果顯示本系統於圖說頁面檢索、詳圖檢索與符合性檢核三項指標中分別達成 93.3%、92.4% 與 83.3% 的準確率，驗證其於工程圖說 ACC 應用之實用性，為工程領域實務導入基於圖說之 ACC 系統發展提供具體解決方案。

簡介

現場工程查驗是現代營建工程中確保結構品質的關鍵步驟。在施工過程中，每一步驟皆須依據相應的施工規範或工程圖說嚴格執行以確保工程品質^[1]。為利現場查驗之執行，傳統上工程師會於查驗前預先準備包含各項查驗項目與查驗標準之查驗表單，而於現場查驗時，即可依據表單所列之查驗標準逐項進行檢核。然而查驗表單中所列之查驗標準是否正確與精準，攸關查驗作業的有效性。若表單內容出現錯誤或與實際規範不符，將導致現場查驗未能確實落實。一項在臺灣進行之研究指出，在公共工程施工查核品質管理制度常見缺失中，缺失排行第一名即為「品管自主檢查標準未訂量化標準及落實執行」，缺失比率高達 84.1%^[2]。此類問題包括品管自主檢查表未落實執行，或檢查標準未訂量化、容許

誤差值，或未確實記載檢查值等。其根本原因在於查驗表單的製作過程需人工對照複雜且篇幅龐大的施工規範及圖說，以淡江大橋工程專案為例，該專案之施工圖說總計高達 1650 頁。此一流程不僅耗時費力，亦極易產生錯誤^[3]。此情境突顯了針對工程查驗表單進行規範自動化檢核（Automated Compliance Checking, ACC），並結合文字規範與施工圖說進行檢核之必要性。

針對文字法規之 ACC，傳統方法多仰賴自然語言處理技術^[3]與建築資訊模型^[4]。而近期隨著大型語言模型（Large Language Models, LLMs）及其相關技術，如檢索增強生成（Retrieval-Augmented Generation, RAG）^[5]、多模態 RAG^[6]與代理型工作流程（Agentic Workflow）^[7]之發展，進一步拓展了對營建法規語意理解的可能性。已有多項研究證實，結合生成式預訓練 Transformer 模型、提示工程與 RAG 技術之架構，可實現基於文字層面的工程規範 ACC^[8-10]。除了文字規範

* 通訊作者，dchen@ntu.edu.tw

外，圖說在多數應用領域中亦扮演關鍵角色，對於準確傳達設計意圖與技術要求具有不可或缺的重要性。在工程領域中，諸如鋼筋配筋規格、施工高程、鋼筋搭接長度等查驗項目，這類查驗項目不僅數量眾多且在一工程內各處標準不盡然相同，無法依靠純文字規範闡明所有細節，因此必須倚賴大量設計圖或施工圖等文件內之圖說或表格進行檢核。為解讀工程圖說資訊，傳統之電腦視覺技術包括可擷取圖面文字資訊之光學字元辨識^[11]；可辨識圖形元素之卷積神經網路^[12]；而注意力機制模型則可捕捉文字與圖像間之上下文關係^[13]。近期研究亦開始探索運用多模態 LLMs 於工程文件理解上之潛力^[14]。儘管已有相關技術進展，然而目前尚未有效連結至針對查驗表單進行施工圖說 ACC 之流程中。其主要挑戰包括：現有語言模型之上下文視窗（Context Window）限制，導致難以處理大型且複雜之施工圖；以及施工圖說間高度視覺相似性，致使檢索困難。故目前多模態 RAG 架構尚不足以支援針對查驗表單之 ACC。此現況凸顯出需開發具工程領域特化之檢索機制，方能實現基於工程圖說之施工查驗表單 ACC 系統。

為克服上述限制，本研究提出一套創新架構如圖 1 所示，整合層級式詳圖檢索與代理式反思流程，以實現基於工程圖說之施工查驗表單 ACC。層級式詳圖檢索嵌入工程圖說之領域特有結構規則，並由多個模組組成，能針對查驗表單內容，自設計圖說中層級式溯源並檢索相關詳圖。實驗驗證結果顯示，在使用真實施工圖說與查驗表單進行測試時，所提之架構於低難度之 RC 檔土牆工程分項工程資料集之圖說頁面檢索、詳圖檢索及整

體符合性檢核準確率均達 100.0%，更於高難度之全套管基樁分項工程資料集上分別達 93.3%、92.4% 與 83.3%，證實其有效性及可擴展性。本研究之主要貢獻於發展出一套具工程領域特化檢索能力之架構，可克服現有多模態 RAG 方法之限制，具體貢獻如下：

- 導入一物件偵測模型以分割複雜施工圖面為具結構性的詳圖，使模型可於語言模型上下文視窗限制內，保留必要視覺與語意資訊進行處理。
 - 設計一與施工圖說結構對應之層級式檢索流程，即便面對圖說頁面與詳圖間高度視覺相似性，仍能精確檢索相關圖說頁面及詳圖，確保檢核品質。
- 本文其餘章節安排如下：第貳節說明本研究架構之方法與實驗配置；第參節討論消融實驗結果與檢核錯誤分佈及變化^[15]；第肆節為結論與未來研究方向。

研究方法

系統運作流程

本基於工程圖說之查驗表單 ACC 系統旨在自施工圖檔中檢索正確圖說頁面及詳圖，並對查驗表單進行檢核，其整體系統運作流程如圖 2 所示。

輸入及資料預處理

施工查驗表單

圖 3(a) 所示為一施工查驗表單範例，其內容包含表單名稱、工程名稱、檢查位置、管理項目以及抽查標準等資訊。為利自動化處理，查驗表單內容經人工轉換為 JSON 格式，作為系統輸入資料。

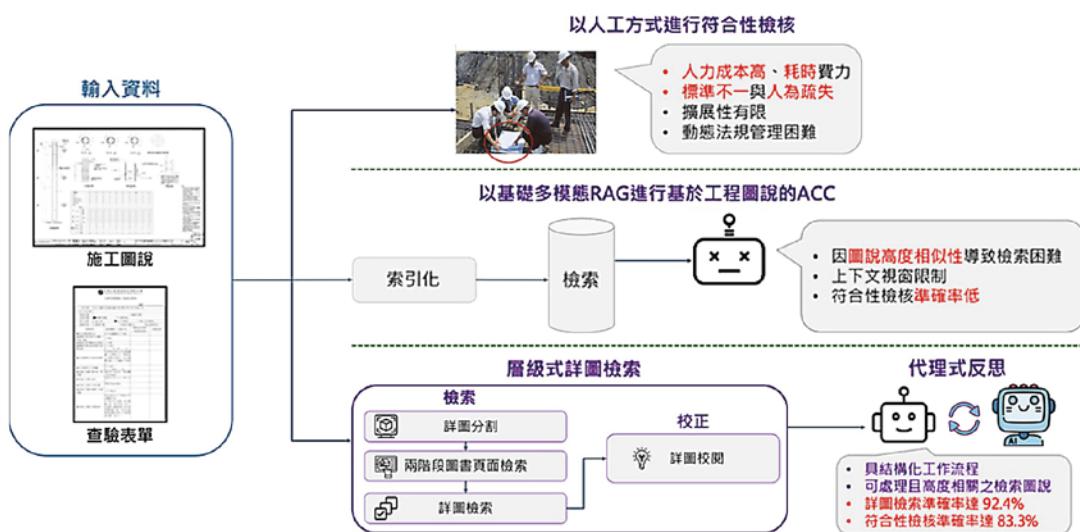


圖 1 本研究背景與所提架構概覽

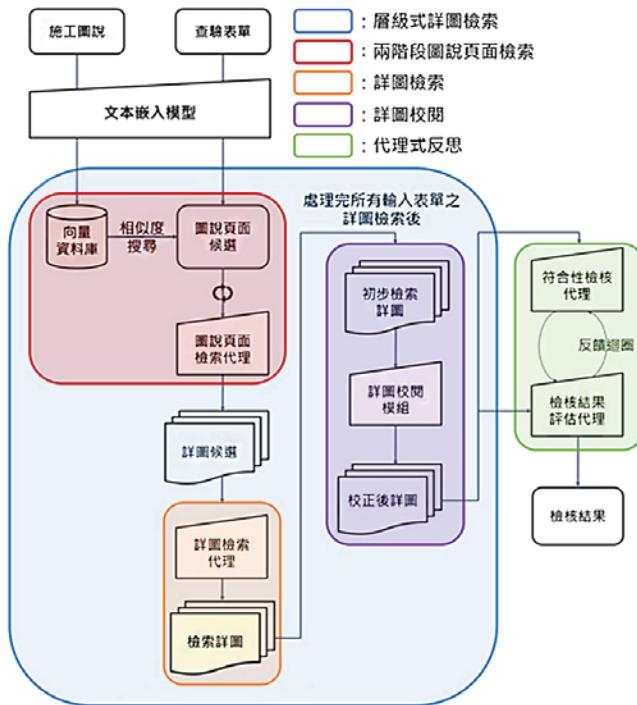


圖 2 系統運作流程概覽

施工圖說檔案

圖 3(b) 為一施工圖說頁面之範例，展示圖說頁面結構與詳圖配置。施工圖說檔案通常為 PDF 格式，作為本系統進行檢核的主要參考依據。其內部具備有助於系統進行有組織檢索之層級式結構，可分為三個層級：(1) 頂層：整份施工圖說檔案，作為整體設計資訊之載體；(2) 中層：單一圖說頁面，每頁具備唯一之圖

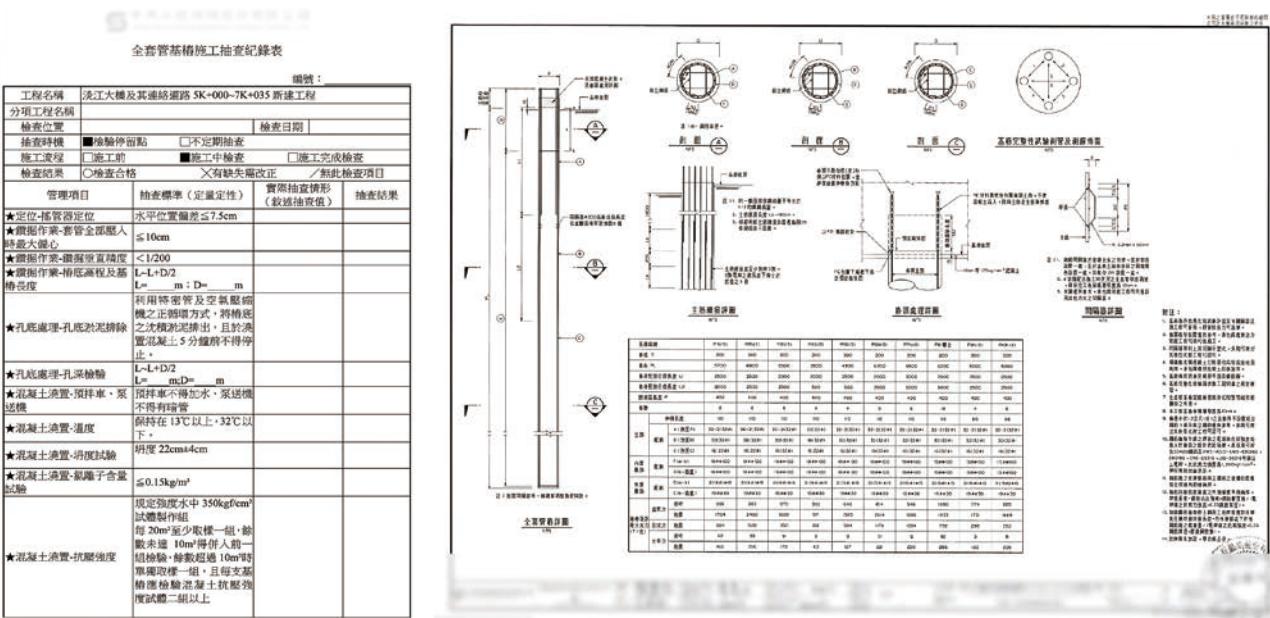
號與圖名；(3) 底層：頁面中內嵌之詳圖或表格，呈現施作細節與規格資訊。為支援系統流程之順利運作，需對輸入之施工圖說檔案進行預處理。具體步驟如下：首先將 PDF 文件中每一頁擷取並轉換為圖像檔案。隨後從各頁圖像中提取圖名與圖號，並使用 OpenAI 提供之「text-embedding-3-small」^[16] 模型產生圖名的文字向量。最後將上述圖名、圖號與文字向量存入向量資料庫中（本研究採用 Neo4j 圖型資料庫進行實作）^[17]。透過此前處理流程，系統可執行基於輸入查驗表單內容對於工程圖說頁面之相似度搜尋，並建立施工圖說檔案內各頁面與其詳圖間之關係，進而支援後續之層級式詳圖檢索與 ACC 作業。

層級式詳圖檢索

層級式詳圖檢索採用由上而下之層級式檢索策略以逐步縮小檢索範圍，檢索最符合查驗表單內容之圖說內容。該機制整合多個模組，包括相似度搜尋、詳圖分割、兩階段圖說頁面檢索、詳圖檢索以及詳圖校閱。以下各小節將分別介紹層級式詳圖檢索各組成模組之設計與運作細節。

相似度搜尋

系統將查驗表單資訊轉換為文字向量表示，並與在預處理階段儲存於向量資料庫中之圖名向量進行相似度比較，取得圖說頁面候選。



(a) 施工查驗表單範例

圖 3 施工查驗表單及施工圖說頁面範例

詳圖分割

本研究將引入 LLMs 分析圖說頁面內容以進行精確檢索，然而將整頁施工圖說直接輸入至 LLMs 可能出現以下問題：圖說頁面所包含資訊量龐大，若完整輸入將導致總 token 過大，超過 LLMs 之上下文視窗上限。即便技術上能處理整頁圖說頁面內容，工程圖說的複雜性仍將造成極高的計算成本。由於 LLMs 仰賴自注意力機制進行語意理解，當輸入過長或結構過於複雜時，將導致模型效能下降，產出結果亦可能不具備足夠準確性與參考價值。為解決上述問題，本研究訓練並應用「Roboflow 3.0 Object Detection (Fast)」^[18] 物件偵測模型，以自動化方式將整頁圖說頁面分割為獨立的詳圖與表格，如圖 4 所示。候選施工圖說在輸入至 LLMs 前將先行處理，透過物件偵測模型將其切割為可供後續檢索與分析之小區塊。這些被分割的詳圖與表格將被儲存並作為後續 LLM 處理的單位，藉此實現更高效率的圖說頁面語意分析與檢索。

兩階段圖說頁面檢索

兩階段圖說頁面檢索的處理流程設計為由兩個語言模型代理協同合作，以完成圖說頁面的檢索。第一個語言模型代理的任務是判斷給定圖說頁面之圖名或其各詳圖內容是否涵蓋了查驗表單中指定的檢查位置資訊。在這一階段，系統會將該頁圖說的圖名以及所有經物件偵測模型分割出的詳圖內容，連同查驗表單中標註的檢查位置資訊一起輸入至語言模型代理。語言模型代理根據這些資訊進行語意理解與比對，評估該圖說頁面與檢查位置的相關性，並判斷該頁是否包含所需資訊。若檢查位置驗證通過，第二個語言模型代理將進一步驗證這些詳圖是否包含足以驗證查驗表單中所列各查驗項目的必要元素。在此階段，系統將切割後的詳圖與各查驗項目一併輸入至語言模型代理中，語言模型代理根據這些資訊評估圖說頁面內容的相關性，確認是否可作為檢核的參考依據。透過此設計，即便初步相似度搜尋之結果無法完全判斷圖說內

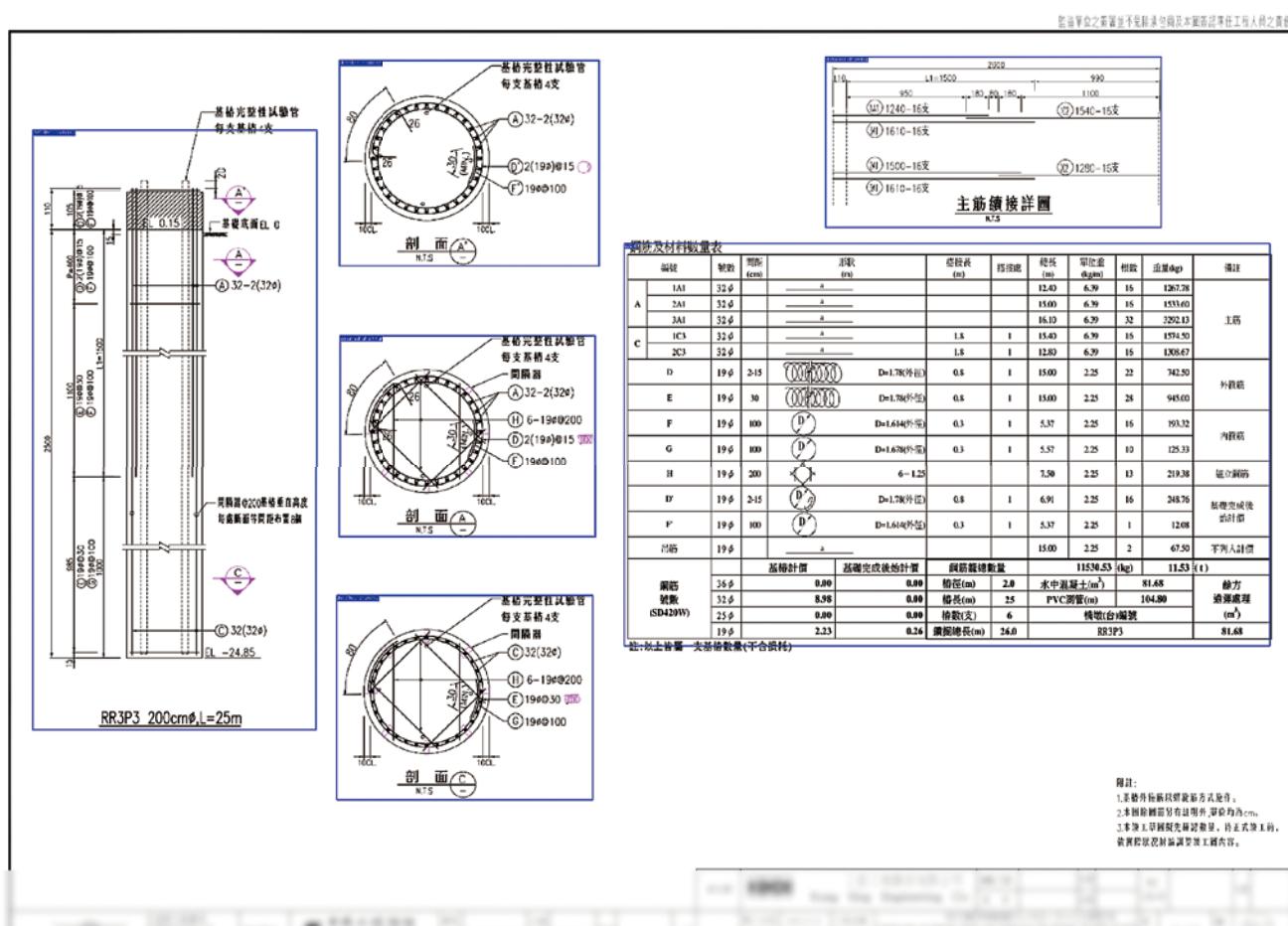


圖 4 透過一物件偵測模型實現之工程圖說詳圖分割範例

容細節，也能藉由語言模型代理的語意推理能力進一步篩選出更相關的圖面。

詳圖檢索

為了進一步檢索與輸入之查驗表單中指定的查驗項目最相關的詳圖或表格，本研究發展一詳圖檢索流程。在此流程中，自上一步驟檢索得之圖說頁面內每張詳圖將由一語言模型代理進行評估，判斷其和指定查驗項目間的相關性。語言模型代理會為每張詳圖提供一個介於 0 到 10 之間的相關性分數，用以表示該詳圖與指定查驗項目的契合程度，隨後選取分數最高的詳圖作為檢索結果。

詳圖校閱

詳圖檢索流程在多數情況下皆表現良好，但偶爾會出現評分不合導致檢索錯誤發生。這些錯誤源於 LLMs 固有的隨機性及不確定性。為了解決此問題，本研究提出了一詳圖校閱流程，用以校正錯誤檢索的詳圖。此方法不依賴額外的外部知識，而是利用預訓練模型提取的各詳圖內多數群體之平均影像特徵作為參考依據。圖 5 說明了本研究所提出的詳圖校閱流程，針對不同查驗表單的同一查驗項目，每張被檢索的詳圖會先透過預訓練的「ResNet-50」模型^[19] 提取影像特徵，並使用 K-means 分群為兩類。多數群體被視為正確檢索的詳圖，並將作為後續校正的參考依據。屬於少數群體的詳圖，將重新回到詳圖檢索流程。所有詳圖候選將再次進行特徵提取處理，並將其特徵與多數群特徵進行比較，計算平均歐式距離 (Euclidean Distance)。最後根據這些平均距離對詳圖候選進行重新排序，優先選擇與多數

群距離較近者做為校正後之檢索詳圖。此校閱流程能有效減少因 LLMs 的不確定性與隨機性所導致詳圖錯誤檢索錯誤，進而提升整體詳圖檢索結果的可靠性。

代理式反思

代理式反思的運作流程涉及兩個語言模型代理：符合性檢核代理與檢核結果評估代理。符合性檢核代理負責根據輸入查驗表單中指定的查驗項目與抽查標準，以透過層級式詳圖檢索得到的詳圖進行檢核。相對於符合性檢核代理，檢核結果評估代理負責評估符合性檢核代理所產出的檢核結果，以確保檢核過程的準確性與完整性。若檢核結果評估代理從結果中發現任何錯誤或說明不足之處，其將提供改善建議並傳回給符合性檢核代理，促使其進行修正後的檢核。

實驗驗證

為驗證所提出系統的可行性，本研究進行一系列消融實驗並驗證不同類型工程圖說，測試層級式詳圖檢索流程內各模組的可行性與可擴展性。以下各小節分別說明資料集、消融實驗配置及評估指標之細節。

資料集

本研究之實驗將透過來自一真實橋梁工程專案之資料集進行驗證，該橋梁工程專案的施工圖說共計 1650 頁，涵蓋多種分項工程。本研究選取其中兩項分項工程的現場查驗表單作為實驗對象進行消融實驗，測試層級式詳圖檢索流程中各模組對於檢核任務之可行性及可擴展性，其細節如下：

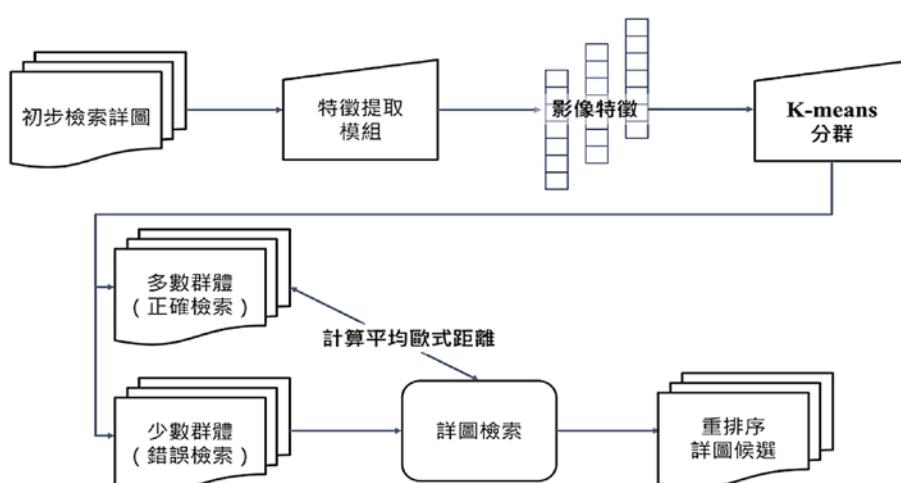


圖 5 詳圖校閱運作流程圖示意

1. RC 擋土牆工程分項工程資料集

此資料集包含 9 份針對不同配置之 RC 擋土牆工程施工的現場查驗表單，對應一頁工程圖說頁面，屬於難度較低之資料集。每份表單均包含表單名稱、工程名稱、檢查位置與五組需透過圖說進行檢核的查驗項目及對應抽查標準（共計 45 組）。

2. 全套管基樁分項工程資料集

此資料集包含 90 份針對不同全套管基樁施工位置的現場查驗表單，分佈於六個橋段，對應七頁工程圖說頁面，屬於難度較高之資料集。每份表單同樣包含表單名稱、工程名稱、檢查位置，以及五組需透過圖說進行檢核的查驗項目及對應抽查標準（共計 450 組）。

消融實驗配置

為驗證層級式詳圖檢索流程中各模組在圖說檢索與檢核任務中的貢獻，本研究設計五種不同的圖說檢索組合方式進行消融試驗並透過 OpenAI 的「o4-mini」^[20] 進行實驗。所涉及的模組包括詳圖分割、兩階段圖說頁面檢索、詳圖檢索以及詳圖校閱，五種圖說檢索流程細節說明如下：

1. 基礎

透過一語言模型自相似度搜尋結果得之候選圖說中篩選出一圖說頁面作為檢索結果。

2. 詳圖分割

首先將候選圖說頁面進行詳圖分割，隨後透過一語言模型自候選圖說中篩選出一圖說頁面作為檢索結果。

3. 兩階段圖說頁面檢索

將圖說頁面檢索流程拆分為兩階段的驗證流程，先驗證指定檢查位置後再驗證圖說頁面內容。

4. 詳圖檢索

改為使用 LLMs 檢索最為相關的單一詳圖作為檢索結果。

5. 詳圖校閱

加入額外的校閱步驟以減少因 LLMs 在檢索正確詳圖時的不確定性所導致的錯誤。

評估指標

為評估所提出方法的整體效能與可行性，本研究採用三項指標作為評估依據，此三項指標說明如下：

1. 圖說頁面檢索準確率

本研究假設每份查驗表單在提供之施工圖說檔案中皆存在一最具關聯性的圖說頁面，可作為檢核之依據。圖說頁面檢索準確率即根據層級式詳圖檢索流程是否正確檢索出該正確圖說頁面進行計算。

2. 詳圖檢索準確率

針對每一查驗項目，本研究假設在提供之施工圖說檔案之最具關聯性的圖說頁面中存在一張最具關聯性的詳圖，可作為檢核之依據。詳圖檢索準確率即根據層級式詳圖檢索流程是否正確檢索出該正確詳圖進行計算。

3. 符合性檢核準確率

針對每一查驗項目，本研究假設在提供之施工圖說檔案皆定義有一正確的抽查標準。符合性檢核準確率即根據系統是否能正確判斷該查驗項目是否符合圖說要求並能否在發現抽查標準有誤時能正確修正該標準進行計算，亦為本研究所提出架構之整體指標。

實驗結果與討論

消融實驗結果

表 1 彙整了以 RC 擋土牆資料集與全套管基樁資料集進行之消融實驗的準確率結果。綜合所有消融實驗結果，最佳的結果來自於整合所有四個模組的配置。此配置於難度較低之 RC 擋土牆分項工程資料集上達到 100.0% 的圖說頁面檢索準確率、100.0% 的詳圖檢索準確率以及 100.0% 的符合性檢核準確率，並於難度較高

表 1 消融實驗結果比較

實驗配置		RC 擋土牆			全套管基樁		
LLM	檢索方式	圖說頁面檢索	詳圖檢索	符合性檢核	圖說頁面檢索	詳圖檢索	符合性檢核
o4-mini	基礎	100.0	-	24.4	66.7	-	20.0
	+ 詳圖分割	100.0	-	100.0	74.4	-	62.9
	+ 兩階段圖說頁面檢索	100.0	-	100.0	93.3	-	80.4
	+ 詳圖檢索	100.0	100.0	100.0	93.3	80.2	74.2
	+ 詳圖校閱	100.0	100.0	100.0	93.3	92.4	83.3

之全套管基樁分項工程資料集達成了 93.3% 的圖說頁面檢索準確率、92.4% 的詳圖檢索準確率以及 83.3% 的符合性檢核準確率。

消融實驗結果分析

基礎

此檢索方式由相似度搜尋結果以大型語言模型重新篩選出一圖說頁面作為檢索結果，雖然在難度較低的 RC 檔土牆資料集中，此方法可達到 100.0% 的圖說頁面檢索準確率（由於最佳相似度結果即為正解），但在高難度的全套管基樁資料集中表現顯著不佳，圖說頁面檢索準確率僅為 66.7%，兩資料集之符合性檢核準確率更降至僅 24.4% 及 20.0%，為所有檢索策略中最低。此結果顯示單純且未經調整的檢索方式並不適用於圖說溯源檢核任務，需引入更進階之技術方能有效提升整體效能。

詳圖分割

當加入詳圖分割模組後，兩資料集之符合性檢核準確率有顯著提升。在 RC 檔土牆資料集中，由 24.4% 大幅提升至 100.0%。而在全套管基樁資料集中，亦由 20.0% 提升至 62.9%。此結果凸顯將施工圖說頁面切分為較小且可處理的小區塊對於模型推理能力的幫助，能有效降低處理圖說資訊的複雜度，使 LLMs 更能聚焦於與查驗項目及抽查標準高度相關的內容，提升整體檢核的準確率。

兩階段圖說頁面檢索

加入兩階段圖說頁面檢索機制後，全套管基樁資料集之圖說頁面檢索與符合性檢核準確率皆顯著提升。由於較簡易的 RC 檔土牆資料集在前述檢索策略下即已達成 100.0% 的圖說頁面檢索準確率，故此模組對該資料集無進一步改善空間。而在全套管基樁資料集中，圖說頁面檢索準確率由 74.4% 提升至 93.3%，符合性檢核準確率同步提升至 80.4%。此結果顯示將圖說頁面檢索任務拆解為兩個連續且相對簡化的步驟，能有效模擬實務中工程師尋找正確圖說頁面的推理流程，顯著提升語言模型在辨識正確施工圖說頁面時的準確率。

詳圖檢索

引入詳圖檢索模組後，在全套管基樁資料集中之符合性檢核準確率下降，由 80.4% 降至 74.2%。此結果顯示，雖然詳圖檢索旨在提供更聚焦的輸入內容，該步驟仍存在檢索錯誤詳圖的風險。若檢索錯誤詳圖，

反而可能導致缺乏關鍵資訊，進而影響檢核準確性。然而若進一步分析全套管基樁資料集中，在「成功檢索到正確圖說」的前提下，符合性檢核準確率由原先的 86.2%（即 93.3% 圖說頁面檢索準確率內達成 80.4% 符合性檢核準確率）提升至 92.5%（即 80.2% 詳圖檢索準確率內達成 74.2% 符合性檢核準確率），展現出提升趨勢。此一現象指出，儘管詳圖檢索步驟可能因錯誤檢索而拉低整體檢核準確率，其對於成功檢索到正確圖說的樣本而言，卻能顯著提升檢核表現。這是因為相較於提供整頁圖說資訊，將單一、聚焦的詳圖提供予語言模型代理，不僅可有效縮小分析範圍、降低自注意力機制的運算負擔，更有助於模型聚焦於與查驗項目及抽查標準直接相關的內容，從而減少推理錯誤，提升檢核判斷的精確性。

詳圖校閱

最終加入之詳圖校閱模組進一步提升了詳圖檢索準確率與整體符合性檢核準確率兩項關鍵指標的表現。在全套管基樁資料集中，詳圖檢索準確率提升至 92.4%，符合性檢核準確率則提升達 83.3%，皆為整體最佳表現。詳圖校閱步驟能有效降低單獨僅有詳圖檢索步驟所帶來的檢索錯誤，在減少檢索錯誤的同時，又保有將單一且最聚焦的詳圖提供予語言模型代理處理的優勢。此最後一步驟不僅強化了整體符合性檢核流程的穩健性與可靠性，也使本研究所提出之架構在所有測試的檢索方式中達成最佳的整體檢核效果。

結論

以施工查驗表單進行現場工程查驗是現代營建工程中確保結構品質的關鍵步驟。傳統上此流程仰賴工程師人工對照篇幅龐大且結構複雜之施工規範與圖說對查驗項目及標準逐條檢核，不僅耗時費力亦易出錯。儘管現有 LLMs 已具備初步理解施工規範與圖說之能力，然其尚未被有效導入至基於工程圖說之施工查驗表單 ACC 應用中。主要挑戰包括 LLMs 的上下文視窗限制，以及施工圖說間高度視覺相似性所造成之檢索困難。為解決上述問題，本研究提出一融合多模態 RAG 技術與代理型工作流程之創新架構，以層級式詳圖檢索逐層篩選出與查驗項目相關之圖說頁面與對應詳圖。系統以一物件偵測模型進行詳圖分割，以降

低視覺輸入的處理負擔，並於檢索流程之最終步驟導入詳圖校閱機制進一步確認詳圖內容之正確性。最終於符合性檢核階段透過代理式反思，結合兩語言模型代理之迭代驗證，提升檢核準確率。本研究以一實際橋梁工程案之施工圖說與查驗表單作為測試資料集進行驗證，結果顯示所提出系統於圖說頁面檢索、詳圖檢索與符合性檢核三項指標上，於較簡易之 RC 檔土牆資料集上全部達成 100.0% 的準確率，並於較高難度之全套管基樁資料集分別達成 93.3%、92.4% 與 83.3% 的準確率，展現了整體系統的可擴展性。消融實驗分析進一步驗證各模組對整體效能之貢獻：詳圖分割能有效降低語言模型之輸入複雜度；兩階段圖說頁面檢索提升圖說頁面辨識準確性；詳圖檢索有助於聚焦模型處理範圍，降低模型處理負擔；詳圖校閱則能顯著降低錯誤檢索導致之後續檢核失敗，提升整體系統穩健性與可靠性。本研究針對工程領域圖說在資訊結構與視覺呈現上之特殊性，設計出一具擴展性、穩健性與高準確性的層級式詳圖檢索流程，整合於基於工程圖說之施工查驗表單 ACC 架構中。此架構於處理圖說量龐大且內容複雜之大型建設專案時，展現出高度實用潛力。透過補足現有多模態 RAG 框架於工程圖說檢索應用上的缺口，為工程領域實務導入可行的 ACC 系統提供一項具體且具應用價值的技術基礎。

誌謝

本研究由國家科學及技術委員會與中興工程顧問股份有限公司透過「以自然語言處理擷取施工規範查驗項目並輔助查驗表單的設計與檢核」計畫 NSTC 112-2622-E-002-018 與 NSTC 113-2622-E-002-027 補助支持。作者亦感謝國震中心與臺大土木合設 AI 研究中心以及國家高速網路與計算中心提供運算與儲存資源。

參考文獻

1. Bureau of Land Management, MS 9103: Facility Construction, Manual section Rel. 9-402 MS 9103, U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, Washington, D.C., Apr. 2014. Supersedes Rel. 9-325.
2. 張建信 (2021),「以工程實務面探討公共工程施工三級品質管理制度之執行成效」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，臺北。
3. Xu, X., Jeon, J., Zhang, Y., Yang, L., and Cai, H. (2021). "Automatic Generation of Customized Checklists for Digital Construction Inspection," Transportation Research Record, Vol. 2675, No. 5, pp. 418-435.
4. Goh, W., Jang, J., Park, S. I., Choi, B.-H., Lim, H., and Zi, G. (2024). "Automated Compliance Checking System for Structural Design Codes in a BIM Environment," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 28, No. 10, pp. 4175-4189.
5. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-t., Rocktaschel, T., Riedel, S., and Kiela, D. (2020). "Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks," Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 33, pp. 9459-9474.
6. Langchain AI, Multi-Modal RAG, (2024). Available: https://github.com/langchain-ai/langchain/blob/master/cookbook/Multi_modal_RAG.ipynb (accessed: 2025-02-11)
7. Weng, L., LLM-Powered Autonomous Agents, (2023). Available: <https://lilianweng.github.io>
8. Liu, X., Li, H., and Zhu, X. (2023). "A GPT-based Method of Automated Compliance Checking through Prompt Engineering".
9. Yang, F. and Zhang, J. (2024). "Prompt-based Automation of Building Code Information Transformation for Compliance Checking," Automation in Construction, Vol. 168, 105817.
10. Uhm, M., Kim, J., Ahn, S., Jeong, H., and Kim, H. (2025). "Effectiveness of Retrieval Augmented Generation-based Large Language Models for Generating Construction Safety Information," Automation in Construction, Vol. 170, 105926.
11. Villena Toro, J., Wiberg, A., and Tarkian, M. (2023). "Optical Character Recognition on Engineering Drawings to Achieve Automation in Production Quality Control," Frontiers in Manufacturing Technology, Vol. 3.
12. Jamieson, L., Moreno-García, C., and Elyan, E. (2024). "Towards Fully Automated Processing and Analysis of Construction Diagrams: AI-Powered Symbol Detection," International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR), Vol. 28, pp. 71-84.
13. Xuesong, X., Gang, X., Li, S., Xia, Z., Peixi, W., Yuanming, Z., and Zhenbo, C. (2025). "Associative Reasoning for Engineering Drawings using an Interactive Attention Mechanism," Automation in Construction, Vol. 170, 105942.
14. Doris, A.C., Grandi, D., Tomich, R., Alam, M.F., Ataei, M., Cheong, H., and Ahmed, F. (2024). "DesignQA: A Multimodal Benchmark for Evaluating Large Language Models' Understanding of Engineering Documentation".
15. Yue, X., Ni, Y., Zhang, K., Zheng, T., Liu, R., Zhang, G., Stevens, S., Jiang, D., Ren, W., Sun, Y., et al. (2024). "MMMU: A Massive Multi-Discipline Multimodal Understanding and Reasoning Benchmark for Expert AGI," Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 9556-9567.
16. OpenAI, text-embedding-3-small, (2025). Available: <https://platform.openai.com/docs/models/text-embedding-3-small>
17. Neo4j, Inc., Neo4j Graph Database, Version 2025.04 (2025).
18. Dwyer, B., Nelson, J., Hansen, T., et al. (2024). Roboflow (version 1.0) [software], Computer Vision.
19. He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2016). "Deep Residual Learning for Image Recognition," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 770-778.
20. OpenAI, o4-mini (2025-04-16 version), (2025). Available: <https://platform.openai.com/docs/models/o4-mini>



資訊化 智慧營造 模擬與工程規劃 在 智慧工地 之應用

李孟崇*／衛武資訊股份有限公司 總經理

本文探討了智慧工地在智慧營造中的重要性、現況、應用重點及關鍵技術。智慧工地透過物聯網、大數據、人工智慧及 BIM 等技術，提升施工效率、安全管理、成本控制與永續發展。

目前台灣智慧工地的應用現況，主要集中在工地安全、環境、人員管理與監控，BIM 的應用，以及專案資料雲端化管理；智慧工地的應用正在從單點試驗逐步邁向更廣泛的導入與實踐，然而，相較於其他先進國家，台灣的智慧工地應用仍處於發展初期，許多核心要素（例如智慧營造模擬與工程規劃的各種工程資訊整合、自動化等）尚未達到全面性整合。

智慧工地由被動管理轉向主動模擬與優化，核心在於資訊化智慧營造模擬與工程規劃應用，利用 BIM 與數位孿生進行施工前模擬與動態優化。衝突檢測可提前發現設計問題，動態模擬優化吊掛路徑、複雜工序與安全設施規劃。4D 施工模擬整合時間維度，提升時程管理的空間感與溝通效率；5D 成本管理則將成本動態連結至模型，實現即時成本追蹤與變動分析。數位化供應鏈與物料管理則透過 RFID 與 AI 自動化提升物流與倉儲效率。所有應用皆依賴強大的共同資料環境（CDE）實現跨專業協同。此外，智慧工地的推動也面臨許多的挑戰，如產業分工與制度問題、成本與效益評估、技術整合不足及人才培育與觀念轉變。

未來智慧工地將轉變為具自主學習與決策能力的生態系統，AI 將從輔助工具轉為協作者，實現自動化排程、預防性維護與品質管理自動化。資訊系統將深度整合於工地現場，透過 AR/VR 提升施工精度與安全訓練，即時數據可視化提高應變能力，機器人與自動化設備將與資訊系統協同作業。此外，跨領域整合將打破產業壁壘，實現設計與施工無縫接軌，營建與製造業融合，以及低碳永續管理納入智慧系統。整體而言，智慧工地將成為安全、高效、永續的智慧生態系統，推動營建業數位轉型與產業升級。

前言

全球營建產業正迎來一場深刻的智慧營造浪潮，其中工地現場扮演著核心主場域的角色，智慧工地，作為推動智慧營造轉型的關鍵驅動力，是一個極具潛力且快速發展的領域。智慧工地的概念在當前建築行業中逐漸受到重視，尤其是在大型建設項目中。隨著 ICT 技術的迅速發展，建築工地的管理模式也在不斷演變。本文將深入探討智慧工地的現況挑戰、關鍵技術應用、未來發展趨勢，並著重闡述資訊化的智慧營造模擬與工程規劃如何應用於此。

* 通訊作者，marklee@webim.com.tw

這是一個智慧工地的模板工項工程師的日常情境：

邁克是超快鋁模公司的施工部經理，昨天傍晚收工會議，營造廠工務所的王大副所長交辦：丹娜絲颱風下周將襲台，需要調整變更工進，提前完成 12 樓鋁模組裝。邁克昨晚已在公司的智能鋁模管理系統「速配」上，由系統在 BIM 模型配模模組上，依提前 2 天的工進自動化劃分區塊，「速配系統」也已在鋁模配模模型上自動化建立區塊視圖，並上傳到進度管理系統。

今天一大早，邁克先到堆貨區用手機掃 RFID，確認昨晚新變更的模板工作範圍的物料是否都有進場，因為之前有批較舊的 RFID 在鋁模上有些遮蔽問題，幸好跟物料管理部及現場再核對沒有問題，都到現場了（圖 1）。

工程師小丁在平板上下載了施工分區的模型資訊，帶工班施作趕工中，鋁模師傅雖然一天可以組裝 30M²，但是要達到工進，還是得分 2 個工班，從相鄰的 2 個分區平行作業（圖 2）。下班前邁克拿著 Ipad mini 在 3D 模型上掃描標示安裝進度，並完成品質檢查表。邁克把「速配系統」的進度資訊、自主檢查表回報到工地的專案資訊平台，這樣王副所也可以視覺化的看到完成進度的模型狀態顯示，順便通知王副所模型中 A7 區的預組機電管線尚未看到平行廠商來裝配（圖 3）。

很無奈的，公司採購的客制化組裝機器還沒到，這個協同式的組裝機器，是公司請自動化公司規劃客製的機器人，含有輕型搬運車及一個協作機器手臂，可以協同搬運、抬高及固定，每個人每日可以增加組裝面積到 90M²，這次只得加工班及加班來完成任務了。



圖 1 RFID 物料管理



圖 2 視覺化分派工作

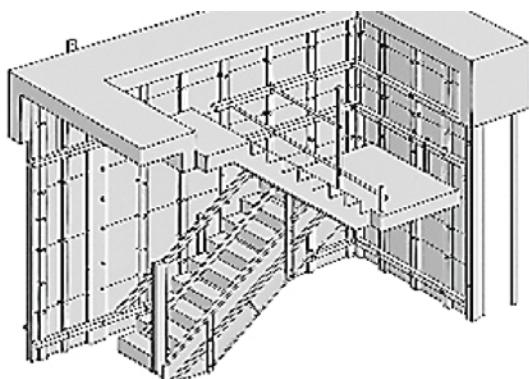


圖 3 視覺化的工進狀態

智慧工地之於智慧營造的重要性

全球營建業正處於從根本上改變傳統運作模式的智慧營造浪潮中。過往的營建專案高度依賴人工經驗、紙本文件與勞力作業，導致效率低下、安全風險高且成本難以控制。隨著科技進步，營建業正加速擁抱數位化，而智慧工地正是這場轉型的核心驅動力量。它不僅是單純的技術應用，更是一種整合性解決方案。透過將物聯網、大數據、人工智慧、機器人與建築資訊模型（BIM）等技術導入工地現場，智慧工地實現了以下關鍵變革：

- 提升效率與精準度：透過數位化的規劃與模擬（如 3D/4D/5D 模擬），能在施工前預見並解決潛在問題，減少現場返工與延誤。
- 強化安全管理：智慧穿戴設備與 AI 監控系統能即時偵測危險狀況，大幅降低工安意外發生的機率。
- 優化成本與資源：數位化管理能精確追蹤物料、設備與人力，有效控制預算，減少資源浪費。
- 實現永續發展：智慧系統有助於監控能源使用與廢棄物產生，推動綠色營建與低碳建築的目標。

智慧工地是實現智慧營造願景的具體實踐場域，亦是將智慧營造宏觀概念轉化為具體行動的「前線戰場」。圖 4 說明智慧工地整合各種解決方案，其重要性體現在：

- 數據收集與分析的基石：智慧工地透過物聯網裝置、感測器、無人機等，即時且全面地收集施工進度、人員位置、設備狀態、環境參數等現場數據。這些數據是智慧營造進行大數據分析和決策優化的基礎。
- 實現即時監控與決策管理：智慧工地系統能將現場數據視覺化，管理人員可透過儀表板即時監控工地情況，並基於即時客觀數據做出決策，提升管理效率與問題解決速度。
- 優化施工流程與效率：透過與 BIM 整合，智慧工地能模擬施工流程，提前發現設計衝突並優化排程。機器人與自動化設備的應用則能取代高風險或重複性工作，提升施工精度和效率，縮短工期。
- 提升工地安全與環保：利用 AI 影像辨識、穿戴式裝置等技術，能即時偵測工地風險（如未戴安全帽、進入危險區域）並自動發出警報，大幅降低工安事故。同時透過監測空氣品質、噪音、廢棄



圖 4 智慧工地整合各種解決方案

物等數據，協助營造更環保的施工環境，符合永續發展目標^[1,2]。

5. 培育未來營建人才的訓練場：智慧工地的發展促使傳統營建人才學習新的數位工具與技術，如BIM軟體操作、數據分析、無人機應用等，為智慧營造的長期發展奠定人才基礎。

智慧工地之現況、應用重點及關鍵技術

綜觀台灣營建產業，智慧工地的應用正在從單點試驗逐步邁向更廣泛的導入與實踐，特別是在大型公共工程和社會住宅建案中，智慧安全工地規劃實施已富有成效。然而，相較於其他先進國家，台灣的智慧工地應用仍處於發展初期。目前主要以部分技術導入為主，許多核心要素（例如智慧營造模擬與工程規劃的各種工程資訊整合、自動化等）尚未達到全面性整合。

台灣現階段的應用重點^[1-4]

1. 工地安全、環境、人員管理與監控：這是台灣智慧工地目前最主要的應用領域。許多工地運用物聯網（IoT）感測器進行環境監測（如空氣品質、噪音），並搭配AI影像辨識系統，除了透過臉部辨識系統進行人員進出及勞安受訓資格管理外，也能即時監控工人的安全帽佩戴、區域闖入、車輛與物料防竊等違規行為，有效降低工安意外風險。例如，台北市的社會住宅智慧工地計畫便是透過物聯網技術來進行安全即時監控。

2. BIM（建築資訊模型）的應用：BIM已逐漸成為公共工程及大型建案的標準作業流程。其主要應用於工程的初期規劃與設計階段，進行3D模型協作、衝突檢測與施工模擬，以優化設計並減少現場變更。
3. 專案資料雲端化管理：為應對傳統紙本作業的痛點，越來越多營建公司導入專案資料雲端管理系統與協作平台。依照ISO 19650建置CDE（共同資料環境），使專案相關人員、工地與辦公室之間的資料能夠即時同步，提升溝通效率，並實現更便捷的門禁管理與資料數位化。

其他關鍵技術現況^[3]

1. BIM（建築資訊模型）與數位孿生（Digital Twin）：這兩項技術是智慧工地最基礎的數位骨幹。BIM不僅是傳統的3D模型，它更是一個包含建築所有資訊的數位資料庫，涵蓋從設計、施工到營運維護的全生命週期所有環節。在智慧工地的應用上，BIM的深化運用在初期規劃與模擬階段扮演了關鍵角色。
 - 虛擬建造（Virtual Construction）：在實際動工前，可透過BIM模型進行精密的施工模擬，預先發現結構衝突、管線碰撞等問題，有效避免現場返工，節省大量時間與成本。
 - 數位孿生（Digital Twin）：可視為BIM的進化版。它在BIM模型基礎上，加入感測器數據的即時更新，形成一個與實體工地完全同步的虛

擬模型。這個數位孿生能即時反映工地的真實狀況，如設備運作狀態、人員位置、環境參數等，使管理者能遠端監控並做出即時決策。

2. 物聯網（IoT）與感測技術^[4]：

物聯網與感測技術是將實體工地與數位世界連結的橋樑。這些技術透過在工地現場部署各種感測器，實現了數據的即時採集。

- 環境監測：工地感測器可即時監測空氣品質（PM2.5、CO₂）、噪音、溫度和濕度，確保施工環境符合法規並保障工人健康。
- 設備追蹤與管理：感測器安裝於大型設備上，可追蹤其位置、使用時間與維護狀況，有助於優化設備調度，並實施預防性維護，避免設備故障導致工程延宕。
- 人員定位與安全管理：透過在安全帽或背心嵌入 RFID 或 GPS 感測器，可即時追蹤工人位置，有助於緊急情況下快速定位人員，並監測工人是否進入危險區域，自動發出警告^[2]。

3. AI（人工智慧）與機器學習^[2]：

AI 是智慧工地的大腦，能分析 IoT 感測器收集的海量數據，並將其轉化為有價值的洞見與自動化決策。

- 影像辨識：利用 AI 影像辨識技術，可透過工地攝影機自動偵測工安違規行為（如工人未戴安全帽、未穿反光背心等）。此外，AI 也能辨識工程進度，例如判斷模板是否已安裝完成。
- 風險預測：機器學習模型可分析過往工安事故數據、天氣預報、人員疲勞狀況等，預測潛在危險時刻，使管理者能提前採取預防措施，從被動應對轉為主動預防。
- 進度優化：AI 演算法可分析施工進度、資源使用與天氣變化等數據，自動優化施工排程，確保工程以最有效率的方式進行。

4. 自動化設備與機器人：

這類技術旨在取代部分人力，提升施工精度與效率，並降低人員在高風險環境中的暴露。

- 無人機：搭載高解析度攝影機或 LiDAR 感測器，可進行空拍測量與地形繪製。它也能執行定時巡檢，監控工程進度，並提供即時影像給遠端管理人員。

- 施工機器人：雖仍處於發展階段，但部分機器人已應用於重複性高的工作，例如自動砌磚、焊接、噴漆等。這不僅大幅提升施工精度，也使工人能從繁重與危險的工作中解放出來。
- 自動駕駛工程車輛：在大型工地，自動駕駛的運輸車輛或推土機可按照預設路徑自主作業，優化物料運輸效率並減少人為操作失誤。

資訊化的智慧營造模擬與工程規劃

資訊化的智慧營造模擬與工程規劃是智慧工地從「被動管理」走向「主動預防與優化」的關鍵核心，也是數位轉型最能展現價值之處。

1. 施工模擬（Virtual Pre-construction）與動態優化：將衝突化解於無形其核心價值在於運用 BIM 與數位孿生技術，在施工前進行虛擬模擬，發現潛在問題並優化施工流程，實現「先在虛擬世界中發現錯誤，避免在真實工地中犯錯」。

- (1) 衝突檢測（Clash Detection）：傳統上，管線與結構的衝突常在施工現場才被發現，導致停工、修改，耗費大量時間與成本。透過 BIM 模型，可在施工前精確檢測出所有碰撞點，並在設計階段進行優化，避免現場管線衝突、停工、延誤、返工與成本超支。

- 自動化檢測：軟體會自動掃描模型中所有構件的幾何關係，精確標示出所有碰撞點，並產生詳細的衝突報告。
- 協同解決：專案團隊可共同檢視衝突報告，並在虛擬模型上直接討論解決方案，例如調整管線路徑、修改構件尺寸等，所有變更都會在模型中即時更新。

- (2) 工法優化：提升效率與安全的最佳化路徑：除了靜態的衝突檢測，動態的施工模擬則能幫助優化施工流程與工法，確保效率與安全。

- 吊掛路徑模擬：針對大型設備或預鑄構件的吊掛作業，可利用 BIM 模型與動態模擬軟體，預先規劃吊車的設置位置、臂長、以及構件的吊掛路徑。這能確保吊掛過程中不會碰撞到建築物或其他障礙物，並驗證作業的可行性與安全性。
- 複雜工序預演：對於高難度的施工工序，例如模板系統架設、鋼筋綁紮順序、臨時支撐

移除，皆可透過動態模擬進行預演。這不僅幫助施工人員直觀理解作業步驟，也能讓專案經理提早發現潛在的時程瓶頸，進行更合理的資源調配。

- 安全設施規劃：透過模擬，可將高空作業平台、安全護欄、臨時通道等安全設施整合到模型中，確認其佈設是否合理、是否能有效保護施工人員。這將安全管理從被動的事後檢查，提升為主動的事前規劃。

(3) 動態的數位孿生（Digital Twin）：透過 BIM 模型與工地的即時數據（例如天氣、人員位置、施工進度狀態、機具狀態、物料供應等）結合，形成一個動態的數位孿生。這使得我們不僅能看到「規劃中的工地」，更能即時掌握「真實的工地狀況」，為後續決策提供依據（圖 5）。

2. 4D/5D 施工模擬：考慮時間變化與成本的精實管理
將時間（4D）與成本（5D）的維度加入 BIM 模型，是未來實現精實管理的重要手段。

(1) 4D 施工時程模擬：傳統施工時程管理通常依賴於甘特圖或網狀圖，這些 2D 圖表雖能呈現任務順序與時程，但缺乏空間感，使專案團隊難以直觀理解施工實體進程。例如，很難從甘特圖判斷同一工項兩個不同工班在同一時間是否會在同一空間範圍內進行作業，產生潛在衝突。4D 施工模擬正是為了解決此問題而生，其核心

是將「時間」這個第四個維度整合到「3D 建築資訊模型」中。

- 整合時程資料：將專案的施工時程表（通常為 Microsoft Project 或 Primavera P6 等排程軟體的數據）與 BIM 模型中的每個構件進行連結。
- 視覺化時程衝突：透過模擬影片，專案團隊能直觀地看到施工實體進程。例如，當吊車吊掛作業與模板拆除作業在同一區域、同一時間點發生時，影片會清楚呈現出空間與時間上的衝突，使專案經理能在施工前發現並調整時程，避免現場混亂與延誤。
- 溝通與協作：4D 模擬影片亦是極佳的溝通工具，能讓不懂工程圖的非專業人士（如業主或投資方）清晰理解整個專案的施工計畫與進度，提升專案溝通效率與透明度。簡而言之，4D 施工模擬將施工計畫從抽象的數字與文字，轉化為具體的視覺呈現，將「計畫」與「現實」進行橋接。儘管目前因動態進度規劃變動頻繁，維護 4D 資料成本較高，但隨著 AI 技術發展，預計此問題將很快解決。

(2) 5D 成本管理系統：在營建專案中，成本管理一直是最具挑戰性的環節。傳統模式下，成本估算與追蹤通常基於 2D 圖紙，依賴人工計算工程數量，不僅耗時費力，且易因設計變更而

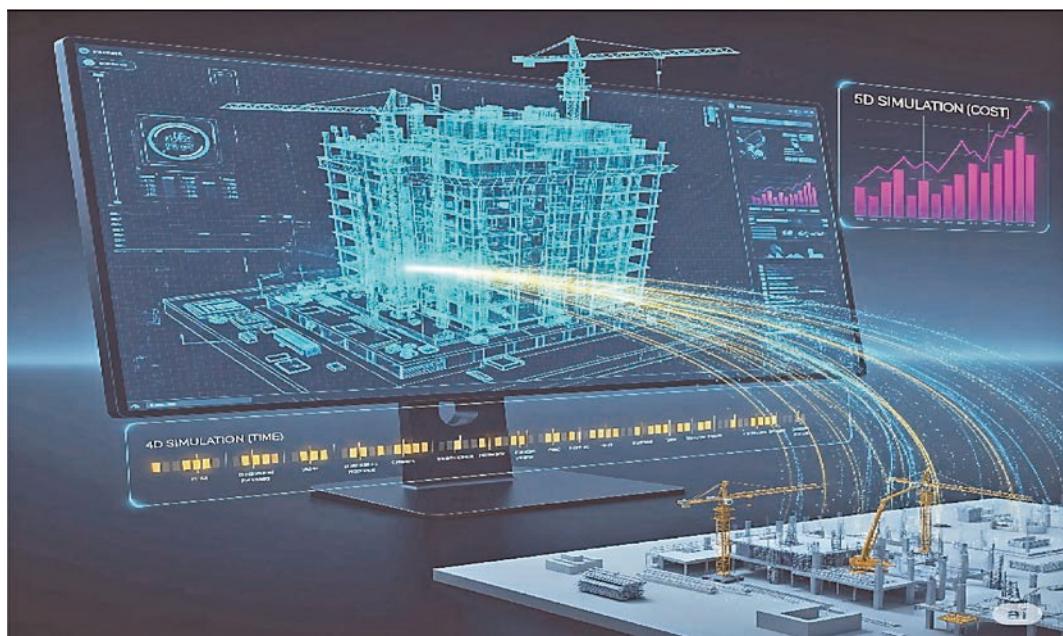


圖 5 資訊化的智慧營造模擬應用

產生錯誤。將「成本」這個第五個維度整合到BIM模型中，徹底顛覆了傳統成本管理方式。

- 自動化工程數量清單（Quantity Take-off）：BIM模型中的每個構件都包含詳細的參數資訊（如尺寸、材質、數量等）。5D系統能直接從模型中提取這些資訊，自動產生精確的工程數量清單。這大大減少了人工計算錯誤，並大幅提升估算效率。
- 即時成本追蹤與更新：5D系統會將工程數量與預設的單位成本進行連結。當設計師在模型中進行任何變更時（例如調整牆體厚度或增加窗戶數量），系統會自動更新工程數量與成本估算，使專案團隊能隨時掌握最新成本狀況。
- 成本變動分析：5D系統不僅提供成本總額，還能針對不同專業（如結構、機電）或不同工種（如混凝土、鋼筋）進行詳細的成本分析。當成本發生變動時，專案經理可精確追溯是哪個構件或哪個環節產生變化，從而做出更精準的決策。透過5D模擬，成本管理從被動的事後審核，轉變為主動的事中監控與預測。這使得專案的財務狀況變得更加透明與可控，也為專案的利潤管理提供了強大的數據支持。

4D/5D施工模擬的核心價值在於，將傳統上相互獨立的設計、時程與成本三者緊密整合在一個動態的BIM模型及資訊系統中。這使得營建專案的規劃不再是單純的紙上談兵，而是一個可以被模擬、預測、分析與優化的智慧資產，為整個專案的順利執行提供了強大的技術基石。

3. 數位化供應鏈與物料管理

智慧營造的規劃與模擬，未來也將延伸到智慧工地人、機、料供應鏈的數位化。

- (1) 人、機、料追蹤與可視化：利用RFID或QR Code技術，可從物料出廠便開始追蹤其位置與狀態，並將這些資訊同步到BIM模型中。例如，追蹤混凝土車何時抵達工地，預鑄板目前在哪個倉庫等。這不僅優化了物流，也減少了因物料延遲導致的工期延誤。
- (2) 自動化進場與倉儲管理：結合AI影像辨識與自動化設備，可實現物料自動點收與智慧倉儲

管理，解決傳統工地物料堆放混亂、盤點困難的問題。

4. 數據整合與協同作業平台為進行智慧營造，智慧工地的所有應用都離不開一個強大的數據整合平台^[5]。
 - (1) 共同資料環境（CDE, Common Data Environment）：這是所有專案成員共享資訊的中心。BIM模型、施工圖、進度表、合約文件等所有資訊都儲存在此平台上，確保每個人都使用最新、最準確的資料。
 - (2) 跨專業協同：CDE打破了傳統各專業獨立作業的壁壘，智慧工地的各方專案關係人等都能在CDE環境的資訊系統上協同工作，減少溝通上的誤解與資訊落差。

簡而言之，資訊化的智慧營造模擬與工程規劃在智慧工地中的核心價值，在於將營建專案從不確定性高的「經驗導向」轉變為可精準預測與優化的「數據導向」。它將傳統營建智慧從紙本與人腦中釋放出來，儲存為可數位化、可重複利用的資產，為營建產業的永續發展奠定基石。

從「經驗」到「數據」：營建思維的根本轉變傳統營建專案管理高度依賴資深工頭、專案經理的個人經驗。他們憑藉過往工地經歷判斷工期、成本與風險。這種模式在簡單專案或許可行，但面對複雜、大型或創新設計的專案時，其局限性顯而易見：

1. 人為錯誤風險高：人的記憶與判斷力有限，尤其是在資訊量龐大時，難免產生疏漏。
2. 決策缺乏依據：決策往往基於「經驗與感覺」而非具體數據，難以被量化與驗證。
3. 知識無法傳承：資深專家的經驗難以系統化地儲存與傳承，一旦人員異動，知識資產便隨之流失。

運作模式改變：資訊化的智慧營造則徹底改變了這一局面。它將整個專案生命週期中的所有資訊，從設計圖、材料規格、施工時程、成本預算，到現場的即時數據，全部數位化並整合在一個CDE環境中。這使得營建專案的運作模式從「經驗導向」轉變為：

1. 數據驅動的決策：透過BIM模型與各種感測器收集的數據，專案經理可獲得具體、可量化的資訊來做出決策。例如，透過4D模擬，可精準預測不同施工方案對工期的影響，而非憑感覺判斷。
2. 知識資產化：過去存在於人腦中的經驗，現在被

轉化為 BIM 模型、施工模擬影片、歷史數據等數位資產。這些資產可被儲存、檢索、分析，並應用於未來專案，實現知識的永續傳承。

3. 可預測與可優化：藉由數據分析與模擬，專案的未來發展不再是未知。可預測潛在衝突、成本超支風險以及工期延誤可能性，並在問題發生前進行優化與調整。

具體應用：工程管理中的變動管理，從不確定性走向可控性這種思維轉變在實際應用中體現在以下關鍵環節：

1. 設計階段的優化：傳統模式下，設計錯誤常在現場施工時才被發現。透過 BIM 衝突檢測，可在虛擬世界中精準預測並解決這些問題，將錯誤從「現場問題」提前轉化為「設計階段的數據問題」。
2. 施工階段的風險預測：過去，專案工期延誤原因往往複雜且難以追溯。但透過資訊化的智慧營造模擬和 BIM 模型，可將實際進度與計畫進度進行即時數據對比。當發現某環節進度落後時，系統能立即發出警報，並分析其對後續工序的影響，幫助專案經理提早介入，而非等到專案失控才亡羊補牢。
3. 成本管理的精準化：傳統成本估算與控制常依賴人工計算與 Excel 表格，效率低且易出錯。未來施工模擬則將成本數據與模型中的構件數量動態連結。當設計變更時，系統會自動更新物料清單與成本預算，使成本管理從被動的事後審核，變為主動的事中監控。

智慧工地所面臨的挑戰

總體而言，台灣的智慧工地正處於從工地安全單點應用，邁向工程規劃、施工效能管理系統性整合的過渡期。未來，隨著技術成熟與政府政策推動，可預期將有更多企業積極投入，將智慧工地應用範圍擴展到更全面的工程管理、品質檢測與永續營建，最終實現產業生產力的整體升級。

儘管已有許多智慧工地安全運用的成功案例，但台灣營建業在智慧工地的推廣上仍面臨諸多挑戰：

1. 產業分工與制度問題：智慧工地的主要執行方為營建業者。目前台灣的產業分工與制度，除了少部分包含開發、營造的集團企業外，大部分營建業採投標承攬工程，依公共、私人業主需求接單

建造。然而，目前智慧工地的各種運用皆不在付費的工程項目中，對營造業者缺乏積極正向的推動助力。

2. 成本與效益評估：導入智慧工地的各種應用與工程規劃及施工管理息息相關，需要長期導入及深化運用。加上初期投資成本高，如何明確評估長期效益與投資回報，是企業決策者主要顧慮。
3. 技術整合不足：智慧工地的各類應用常因不同資訊系統與設備間缺乏統一標準，導致數據孤島，難以實現全面的資訊整合。
4. 人才培育與觀念轉變：產業鏈普遍缺乏具備產業專業及數位技能的複合型人才，且傳統營建思維的轉變仍需時間。

展望未來：智慧工地的新篇章

從當前的技術發展軌跡來看，未來的智慧工地將不再只是被動的工具，而是具備自主學習與決策能力的生態系統。這也是為什麼說，資訊化的智慧營造規劃與模擬是實現智慧工地的第一步，也是關鍵的第一步。它為整個專案的工程規劃、施工管理，從進度、品質、勞安到永續發展，都提供了堅實的數據基礎。未來智慧工地可能呈現以下圖景：

1. AI 協助及自主決策能力：從輔助者到協作者

目前，AI 在工地上的應用多半是輔助性的，例如影像辨識用於安全監控、數據分析用於進度預測。然而，未來的趨勢是讓 AI 具備更強大的自主決策能力，使其能從單純的「工具」轉變為與人類「協作」的夥伴。

- **自動化排程與資源調度：**AI 系統能即時監控工地的天氣、材料到貨狀況、人員出勤等數據。當它預測到某環節可能延誤時，不再只是發出警報，而是能主動提出最佳解決方案，例如自動調整後續工序的排程，依調整建議最佳物料採購時間與數量，並生成相關作業工作分派，發送提醒通知及 email。
- **預防性維護與故障排除：**透過對機具感測數據的深度學習，AI 能精準預測設備何時可能發生故障，並在故障發生前通知維修人員進行保養。這將維修從事後補救轉為事前預防，大幅提升工地的運作效率。

- 品質管理的自動化：未來，AI 影像辨識系統將不僅限於監控，更能自主進行品質檢測。例如，透過無人機拍攝影像，AI 能自動比對 BIM 模型，檢查施工是否符合設計規範，並生成詳細的品質報告，減少人工檢查的誤差與時間。

2. 資訊系統在現場的深度應用：虛擬與現實的無縫整合

目前許多資訊系統仍侷限在辦公室電腦上。未來的趨勢是將資訊系統直接深度整合到工地現場各類行動裝置上或新世代裝置（例如 AI 眼鏡）運用，模糊虛擬與現實的界線^[6]。

- AR（擴增實境）與 VR（虛擬實境）應用：施工人員透過 AR 頭盔，可直接在現實場景中看到 BIM 模型的虛擬投影。例如，機電人員安裝管線時，可戴上 AR 頭盔看到管線在牆體內的精確位置與走向，避免錯誤安裝。VR 則可應用於高風險工序的虛擬訓練，讓新進人員在安全環境下熟悉作業流程^[7]。
- 即時數據可視化：透過智慧穿戴裝置與大型數位螢幕，工地現場的即時數據（如環境溫度、空氣品質、人員位置、機具狀態）將被可視化，使所有人員一目了然地掌握工地狀況，提升應變能力。
- 機器人與自動化設備的協作：資訊系統將作為機器人的「大腦」，指揮無人機進行巡檢、自動化設備進行重複性作業，並將其產生的數據回傳到系統中，實現人機協同的高效作業模式。

3. 跨領域的緊密整合：打破產業壁壘

智慧工地的未來，不僅是單一技術的進步，更是不同領域之間的緊密整合。

- 設計與施工的無縫接軌：未來，BIM 模型將不再只是設計階段的工具，而是貫穿專案全生命週期的數位資產。設計師在模型中的任何變更，都將即時同步到施工現場，實現設計與施工的零時差協同。
- 營建與製造業的融合：隨著預鑄工法（Prefabrication）的普及，營建業將與製造業更加融合。智慧工廠會根據 BIM 模型自動生產建築、機電、裝修構件，並透過數位化供應鏈系統，精

準地將構件運送到工地，實現「像造車一樣蓋房子」的願景。

- 低碳與永續的整合：未來的智慧工地將把能源管理、廢棄物監控等綠色指標直接納入資訊系統中。系統會自動監測碳排放、分析能源使用效率，並提供優化建議，使綠色建築從設計概念走向實際的數據化管理。

從「經驗導向」轉變為「數據導向」，不僅僅是工具上的升級，更是營建產業思維與工作流程的根本性變革。這使得營建專案不再是充滿不確定性和風險的場域，而是一個可以被精準預測、即時監控、持續優化的透明系統。

總結來說，未來的智慧工地將是一個由 AI 駕動、資訊深度整合、跨領域協作的智慧生態系統。它將從根本上改變營建產業的運作模式，使其變得更安全、更高效、更具永續性；承載並推動智能和裝配式作業，堅持標準化設計、工廠化生產、裝配化施工、一體化裝修、資訊化管理、智慧化應用，營建產業應積極擁抱數位轉型，以智慧工地為核心，共同擘劃營建業的數位新篇章。

參考文獻

1. 臺灣 BIM 聯盟，民國 114 年 2 月 11 日，SMART CONSTRUCTION SAFETY MANAGEMENT IMPLEMENTATION WHITE PAPER 智慧工地安全管理白皮書，出版品。
2. 蔡明修、張傳育、許輝煌、盧祥偉、陳炳宏（2025），「營建工地影像生成文字摘要系統之開發與應用：以工地安全缺失摘要生成為例」，土木水利，第五十二卷第一期，第 41-47 頁，台灣，中國土木水利工程學會。
3. 郭武勳（2022），「前瞻技術應用於智慧工地之研究」，碩士論文，國立陽明交通大學。
4. 簡奉順、姜振中、黃德孝、陳哲仲（2024），「IoT 物聯網結合 BIM 元件模組化在勞安科技應用－興達電廠燃氣機組更新改建計畫 345/161 kV 開關場區土建及附屬機電工程」，土木水利，第五十一卷第三期，第 22-27 頁，台灣，中國土木水利工程學會。
5. 林芳輝、呂斌豪、林之謙（2025），「以 PMIS 為核心的工程資訊管理新典範：從資訊爆量到智慧工地整合」，土木水利，第五十二卷第一期，第 5-12 頁，台灣，中國土木水利工程學會。
6. 邱上峻（2012），智慧型手持裝置於施工管理應用之研究，碩士論文，臺北科技大學。
7. 李秉展、程金龍、羅紫萍、張玉萍（2025），「利用環景 VR 提高工作者的危害辨識能力與安全意識」，技師期刊，108 期，第 69-73 頁，臺北市土木技師公會。





新北市 智慧工地管理： 浮洲橋 耐震補強工程 為例

馮兆麟／新北市政府工務局 局長

鄭立輝／新北市政府養護工程 處長

黃柏升／新北市政府養護工程處橋隧維護 科長

陳亦揚*／新北市政府工務局工程 科長

為確保浮洲橋符合最新耐震規範，新北市政府工務局自籌新臺幣 6,925 萬元推動耐震補強工程，並導入智慧工地管理策略以強化施工效率與職業安全。工程跨越市區、高灘地與河道水域，施工風險高、管理挑戰多，透過建築資訊模型（BIM）、物聯網感測（IoT）、AI 影像辨識與 UAV 巡檢等技術，提升品質管理與工地韌性。設計階段納入低碳工法評估，實踐淨零排放目標。成果顯示智慧工地技術可有效協助公共工程克服地形限制、減少災害風險，提升工安與環境永續性。

前言

浮洲橋位於新北市板橋區，跨越大漢溪連接樹林區，是當地重要交通要道，橋上並附掛自來水管、電力及天然氣等維生管線。該橋由交通部公路總局興建，於民國 90 年（2001 年）完工通車，迄今已超過 20 年橋齡。為確保浮洲橋結構安全能符合最新橋梁耐震規範，市府委託專業顧問公司進行耐震評估後，確認有補強必要，因此自籌預算新臺幣 6,925 萬元辦理橋梁耐震補強工程，以提升耐震性能、延長使用年限，並提供市民更舒適安全的通行環境。本次耐震補強工程於 113 年 4 月開工，施工內容涵蓋橋墩混凝土包覆、鋼板包覆、碳纖維纏繞，以及增設鋼製阻尼器、防落橋裝置、帽梁補強、剪力鋼棒等措施，全面提升橋梁耐震能力（如圖 1）。其中共 16 座橋墩新設鋼構阻尼消能裝置，並對部分橋墩施作 FRP（碳纖維聚合物）包覆或外包鋼板，加強結構韌性；同時在橋梁伸縮縫與

支承處加裝防落橋托架，強化抗震時的構件穩定。另針對橋梁上跨大漢溪的鋼箱樑結構，亦實施內部鏽蝕螺栓更換與防鏽塗裝維護，確保整體結構耐久。經各項補強施工後，橋梁耐震能力由原設計規範的「中震區」（設計基底加速度 PGA 0.12g）提升至現行規範要求的 0.24g 水準，有效增強橋梁在強震下的結構表現，保障用路人安全。

然而，本工程在執行過程中也面臨諸多挑戰。浮洲橋全長約 1 公里，施工區域狹長且橫跨市區、高灘地及河道水域三大區域，施工環境複雜、調度困難。在防汛期間施工尤具風險：每逢颱風豪雨來襲，需在極短時間內撤離高灘地及水中作業機具，確保工地安全無虞。例如，113 年颱風凱米侵臺發佈警報後，施工團隊立即將位於高灘地的挖掘機、施工圍籬等設備全面撤離至安全處所，並將臨時土方平整排水，同時備妥抽水機、橡皮艇等防汛設備。如此大範圍、多區段且需隨時應對天候的工區管理，對傳統工地管理模式形成巨大考驗。為克服這些困難，新北市政府工務

* 通訊作者，ag6171@ntpc.gov.tw



圖 1 浮洲橋耐震補強工程施工內容

局與施工團隊宸茂營造攜手導入「智慧工地」(Smart Construction Site)管理理念，利用數位科技與創新措施提升狹長型工地的管理效能與安全性。以下將從提升施工效率、強化品質管理、確保勞工安全防護及實現永續發展等幾大主軸，闡述本工程應用智慧工地策略的核心作法與成效。

提升施工效率的智慧管理

浮洲橋耐震補強工程涉及多工區同步施工與跨領域協調，為提高施工效率，本局導入了施工資訊整合與智慧調度系統。透過建置「智慧工地」資訊平台，即時掌握各施工區域的人員機具分布、工程進度與環境狀況，讓管理團隊能及時調度資源並優化工序。在施工前期即運用建築資訊模型（BIM）進行詳細的施

工模擬與排程規劃。利用 BIM 的 3D 模型協助檢視橋墩補強構件安裝順序、大型機具進出動線及鷹架架設空間（如圖 2），預先發現潛在衝突並優化工序安排，提高整體施工效率與精確度（如圖 3）。例如，團隊以 BIM 進行鋼箱梁內部施工平台的佈局模擬，確保在有限空間內順利完成螺栓更換和塗裝作業，同時避免與既有管線衝突（如圖 4）。經由數位工具的輔助，工程在進度管控上表現亮眼：截至 114 年 7 月中，實際進度達 93.3%，超前原訂進度 4.3%，有效縮短工期。

此外，本工程引入即時監測與預警技術，加強進度與風險掌控。工地安裝了物聯網（IoT）感測裝置與遠端監視系統（如圖 4），可 24 小時監控大漢溪水位、工區雨量、風速等環境參數，一旦天候或水位異常即自動警示管理人員預作因應。此舉大大縮短了對突發狀況的

►採用建築資訊模型(BIM)實施施工安全應用

議題 懸吊架

鋼構油漆作業高度不一，懸吊架無法採用同一高層搭設

對策

將箱梁中間懸吊架抬升，符合人員施工安全高度

效益(以P17-18為例)

- (1) 減少搭設施工架重量： $1.7*60*10=1020\text{m}^2$ 約40噸)
- (2) 減少每平方荷重： $40\text{T}/1250\text{m}^2=32\text{kg}/\text{m}^2$)
- (3) 縮短作業時間： $(1020\text{m}^2*150/3000=51\text{工})$
以5人一組工班，節省約10工作天



圖 2 運用 BIM 數位模型進行設計協調與衝突檢討，降低施工風險

► 採用建築資訊模型(BIM)實施施工安全應用



圖 3 運用 BIM 數位模型預先排出施工障礙，施工衝突檢核

- ✓ 設置CCTV，即時監控，並自動上傳水利署後台
- ✓ 加強夜間警示，增設水管燈，黃色漸變至紅色，警示分級
- ✓ 設置保全人車管制，異常情形處置及通報



圖 4 物聯網(IoT)感測裝置與遠端監視系統

反應時間。例如在汛期，系統偵測到大漢溪水位上升接近警戒時，立即通知現場停止河道內施工並撤離人員機具。此外，透過工地即時影像監看，管理者即使不在現場也能掌握施工情形並遠端指揮調度，提升決策效率。當颱風來襲時，工務局與施工團隊運用這套智慧監控系統，在最短時間內完成高灘地機具撤離及防汛布設，成功避免災害損失。同時，為加速施工流程，本工程採用了電子化文件與雲端協作機制來簡化行政程序。例如，所有施工紀錄、會議紀要等均上傳共享平台，各單位即時查閱回報，省卻傳統紙本往返耗費的時間。在智慧管理措施加持下，浮洲橋補強工程雖施工環境艱鉅，仍能如期甚至提前達成階段目標，充分展現智慧工地在提升施工效率方面的價值。

強化品質管理與數位協同

本案從設計階段即採取數位協同作業，確保補強工程品質達到最佳，充分運用 BIM 數位模型進行設計協調與衝突檢討。在細部設計時，將橋梁原結構與新增補強構件建立整合模型，模擬碳纖維布包覆、鋼板圍束以及阻尼器安裝的位置關係。透過 BIM 的碰撞檢查功能，及早發現補強構件與原橋梁或管線的干涉問題，並由設計、監造與施工團隊共同討論最佳解決方案（如圖 5）。例如，經由 BIM 衝突檢核，發現原設計中部分鋼板包覆可能干擾橋下管線支架，隨即優化了構件尺寸與施工順序，避免日後施工返工，確保品質與效率。

➤採用建築資訊模型(BIM)實施施工安全應用



圖 5 運用 BIM 數位模型碰撞檢查功能，及早發現補強構件與原橋梁或管線的干涉問題

在施工階段導入數位工具進行品質監測與紀錄，現場施工時採用平板電腦及手機 APP 記錄每日施工日誌、材料檢驗結果及品質稽核清單，所有數據自動彙整至雲端資料庫。監造單位可即時查核關鍵工序（如鋼筋綁紮、混凝土澆置、碳纖維包覆）的施工照片與檢驗報告，發現不符合項目立即線上開立缺失單要求改善。這種數位化的品質管理系統確保了施工偏差能隨時被監控和修正，減少品質問題累積。

引進無人機與三維實景技術輔助品質查驗，在高灘地橋墩補強完成後，利用無人機搭載高解析攝影機巡檢難以接近的構件表面，建立工程實景模型比對設計圖，確認補強構件位置、尺寸與品質皆符合設計要求。尤其對大跨徑橋梁下部構造的檢查，無人機影像提供了傳統人工作業難以取得的視角，有效提升查驗效率與精度。同時，本案創新應用懸吊式施工架進行鋼箱梁內部塗裝作業，此施工法不但提升作業安全，也確保了塗裝品質均勻完整。過去若採傳統支架，可能因空間狹窄導致塗裝死角或品質不穩；改用懸吊架後，工人可貼近鋼梁各處進行除鏽塗裝，使防蝕處理品質大為提高。綜合以上措施，智慧工地的數位協同與技術創新手段，讓本工程從設計到施工皆維持高品質水準，順利通過各項品質檢測。

確保勞安防護

安全圍籬與智慧警示，工地周邊的安全隔離與現場警示是勞工安全的第一道防線。浮洲橋工地臨近既

有車道與大漢溪水域，施工團隊依規設置了堅固的安全圍籬及防墜設施，同時導入智慧警示裝置提高防護效能（如圖 6）。圍籬配備了感應式警示燈與智慧監測節點，能在夜間自動發光提醒過往車輛並透過物聯網即時回傳圍籬受撞擊或移位的訊號。一旦有車輛不慎碰撞圍籬或圍籬移動異常，系統將立即通知現場安全人員檢查，防止防護區域出現缺口。高空作業區則採用邊緣防墜網與感應繩索，繩索一旦被觸動或承受重量，連接的警報器隨即鳴響提示。此外，在橋梁下方水域作業時，圍籬結合了智能救生圈裝置，一旦有墜落水域情況發生，感測器會在第一時間將救生圈拋出並發出求救定位訊號。透過這些升級的安全圍籬與警示系統，浮洲橋工地將傳統被動防護轉變為主動感知防護，顯著提高了勞工安全水平。

確保勞工安全與健康

勞動安全衛生是工地管理的核心，藉由智慧工地系統大幅強化了安全防護措施，有效實現零事故的目標，設置一套綜合工地安全管理平台，工地出入口處安裝的門禁設備（如圖 5）整合了人臉辨識與 RFID 感應功能，並將電子安全圍籬感測、UAV 巡檢（如圖 7）、人臉門禁、影像監控、以及人員定位等系統全部接入統一的監控介面（如圖 8）。在工地安全控制室內，大型顯示屏同步實時呈現工地各區的影像畫面、感測警報狀態和人員分布熱點圖。一旦任何子系統發出警報（如圍籬受撞、無人機偵測異常、人員跌倒或



圖 6 紅外線電子圍籬



圖 7 利用 UAV 巡檢與 CCTV 監控巡查

► 結合AI人臉辨識實施門禁管制



圖 8 工地出入管制統一的監控介面

未經授權闖入），平台會立即彈出警示窗口並聲光提醒值班人員關注。安全管理人員可透過平台一鍵調取事發區域的多角度視頻影像，結合門禁數據確認現場人員身份，同時通知就附近的工地主任或安全員前往處置。該平台亦會自動生成每日安全報表，統計各類異常事件次數及處理情形，供管理團隊檢討改進。透過這種「數據整合、一體管理」的模式，工地安全由原先各自獨立的管理項目變成互相聯動的整體。例如，當門禁顯示當天特殊作業人員（如電焊工）在場時，平台會提醒安全員加強相應區域巡視，又如高溫夏季平台根據人員佩戴的穿戴式裝置回傳心率體溫數據，提示現場適時休息補水。入口處採用 AI 人臉辨識門禁系統，電子圍籬杜絕未經許可人員進入，並可自動檢查進場人員是否配戴安全帽等個人防護具。AI 影像辨識技術也運用在施工現場的即時監控上，能自動偵測高處作業人員是否繫安全帶、危險區域是否有未穿反光背心者等情況。當系統偵測到違規行為或潛在危害（例如人員進入起重機旋轉半徑），立即發出警報通知現場管理人員介入處置，將事故苗頭扼殺在萌芽。同時，施工團隊導入 IoT 感測設備監控環境及設備安全狀態，例如於橋墩作業平台安裝傾斜感測器，隨時監測鷹架穩定性；在地下開挖處部署有一氧化碳和或沼氣氣體偵測器，一旦濃度超標即刻警示並啟動通風（如圖 9）。透過物聯網技術的應用，現場可能危害因子受到嚴密監控，有效防止職災發生。

推行安全文化與智能培訓，本工程施工單位宸茂營造秉持「安全至上、生命無價」的政策，將職業安全衛生納入企業經營理念並投入充足資源。在智慧工地的框架下，所有工人進場前必須透過線上安全教育系統完成培訓課程（如圖 7），包括 VR 模擬體驗常見工地危害情境，以提升風險意識。現場每日晨會則結合電子看板公布當日施工風險提示和安全提醒，使安全訊息「看得見」並深植人心（如圖 10）。建立完善的安全稽核與激勵機制。工務局與監造單位運用數位稽查系統，每週對工地進行安全巡檢，透過平板即時記錄檢查結果並拍照存證，不符合項目自動生成整改通知單並限期追蹤。最高管理階層定期查看系統稽核報告，強調「職安衛重要決策直達最高管理層」。在激勵方面，建立「安全績效獎勵制度」，對於零事故工班及積極改善安全隱患者給予獎勵，營造互相比拼安全的良性競爭氛圍。施工過程中也落實了多項創新安全工法，例如採用新型模組化鷹架與安全扣件，提升架設穩定性並以顏色區分承重構件，方便快速辨識危險等級；利用特製立柱連結器及桁架替代傳統鋼管，強化支撐結構且減少高空組裝作業，大幅降低高處墜落風險。在所有這些智慧安全舉措的加持下，本工程自開工以來保持零災害、零事故的紀錄，再次印證智慧工地管理對於勞工安全的助益。



圖 9 導入 IoT 感測設備監控環境及設備安全狀態

►採用AI人工智能進行危害自動辨識，強化工安管理



圖 10 工地出入管制統一的監控介面

實踐永續發展目標

推進低碳工地與綠色建築整合，新北市政府因應全球淨零碳排目標，率先將碳減量概念引入工程管理。在本工程規劃階段，即考量施工對碳排放的影響並採取降碳對策，例如優化施工機具調度以減少不必要的怠工耗，採購低揮發性有機物（VOC）含量的塗料以降低空汙排放，以及鼓勵使用在地材料以縮短運輸距離等，透過這些創新舉措，新北市的工地管理正逐步融合智慧工地與永續理念：一方面利用數位技術提高效率和安全，另一方面將環保減碳要求納入日常管理，使每一項公共建設都朝向綠色永續的方向邁進。

結語

浮洲橋耐震補強工程的順利推動，生動詮釋了「智慧工地」在公共工程管理中的關鍵價值與系統性影響。面對複雜艱鉅的施工環境，本案透過智慧工地的應用，在施工效率、品質管理、勞工安全與永續發展等方面均取得顯著成效，運用智慧安全系統（感測圍籬、無人機巡查、人臉門禁等）將工安防護由被動轉為主動，大幅降低工地事故率。同時，這也象徵新北市工務局近五年來在工程管理模式上的加速轉型—由傳統經驗導向，走向結合自動化與數位科技的智慧管理體系。展望未來，新北市將持續聚焦智慧工地的最新發展成果，同時正視推行過程中可能面臨的挑戰。

在施工資訊整合、進度與風險監控技術、安全管理數位系統等方面，後續將深化應用；在機器人與感測設備的實務應用上，探索更多可行性，例如引入自動化工地巡檢機器人、無人載具運輸等，以進一步提升施工現場的生產力與安全性；並在低碳工地與綠色建築的整合實踐上持續領先，建立完善的減碳評估與管理機制。智慧工地的理念將全面融入工程的規劃、設計、施工與營運維護各階段，改變傳統產業生態並創造附加價值。新北市工務局將秉持專業與創新精神，帶領施工團隊不斷精進，共同朝向工程品質更卓越、工地安全更可靠、城市發展更永續的目標邁進，為公共工程領域樹立嶄新的標竿，朝「科技引領、智慧建造、永續城市」的願景邁進。

參考文獻

- 馮兆麟、鄺豪中、譚羽文、林育群（2024），「新北市永續數位轉型」，土木水利，第 51 卷第 6 期，第 20-27 頁。
- 新北市政府工務局（2025），「低碳建築（BIM 模型）評估系統」，2025 智慧城市展創新應用獎—智慧節能類，應用案例說明。
- 銘祥科技（2024），〈榮獲 113 年金安獎公共工程類優等〉，列舉智慧工地導入技術。
- 新北市政府工務局，新北市市政新聞稿，「建築減碳淨零 新北 BIM 最行」，2024 年 7 月 8 日。
- 新北市政府工務局，「新北市營建剩餘土石方管理資訊系統計畫」（內部文件，2023 年）。



整合 BIM 與 AI 技術 應用於 智慧工地 安全管理系統 之建構與研究 — 以某巨額採購統包工程為例

莊坤諺^{*}／國立臺灣大學土木工程學系 博士
曾惠斌／國立臺灣大學土木工程學系 教授

近年來隨著營建產業邁向數位轉型，智慧安全工地成為結合物聯網（IoT）、建築資訊模型（BIM）、人工智慧（AI）、地理資訊系統（GIS）等技術的核心應用場域。本研究以桃園市某巨額採購統包工程為例，探討如何建構一套模組化、具延展性的智慧工地安全管理系统，以提升工程之安全性、效率與資訊整合程度。系統涵蓋人員與車輛進出管制、工地環境與結構監測、AI 視覺辨識安全管理、雲端協作與文件控管等四大技術及八大功能子系統，透過資料整合平台與即時決策輔助機制，有效提升施工場域的管理反應力與風險預警能力。本文除分析系統實施效益外，並參考國際智慧營建文獻與理論模型，探討精實營建資訊管理在臺灣營建環境中的在地化發展潛力與挑戰。

關鍵詞：物聯網、BIM、智慧工地安全管理系统、AI 視覺辨識、精實營建資訊管理

研究背景與動機

根據世界經濟論壇（World Economic Forum）報告，營建業的生產力在過去二十年增幅有限，主要受限於資訊不透明、工地管理碎片化與人力依賴性高^[1]。為因應第四次工業革命趨勢，全球各國相繼提出智慧營建（Smart Construction）架構，強調 ICT（Information and Communication Technologies）與 BIM、IoT、AI 等技術整合，建構自動化、數位化與智慧化的營建生產模式，詳圖 1 所示。本研究以桃園市某巨額採購統包工程為平台，規劃一套具體的智慧工地管理架構，

透過功能模組分層設計與跨系統數據整合，驗證其在實務中的可行性與效益值^[2,3]。

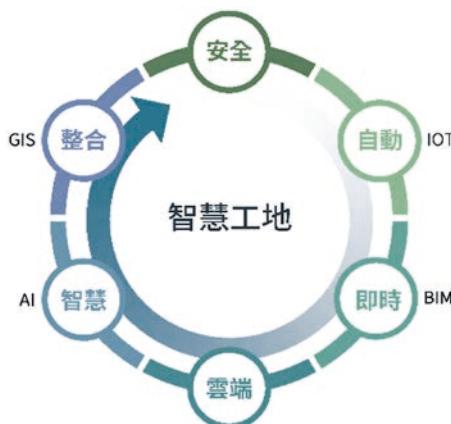


圖 1 智慧工地架構圖

* 通訊作者，d09521015@ntu.edu.tw

智慧工地相關研究

智慧工地的核心架構

智慧工地係指將感測、運算、通訊與數據平台整合應用於工地場域，涵蓋人、機、料、法、環之監測與管理，並具備即時預警與數據驅動決策能力。其核心包含三個層級：感知層（Perception Layer）、網路傳輸層（Network Layer）、應用層（Application Layer），分別對應感測器部署、無線通訊技術，以及後端 AI 與 BIM 平台之整合應用^[4]。

BIM 與 AI 於施工安全管理應用

BIM 提供三維構件關聯性資訊，有助於施工排程與空間衝突分析^[5]，結合 AI 後更可進行行為辨識、自動檢核與風險預警，成為近年智慧工地安全應用的主要研究方向。AI 演算法如：You Only Look Once (YOLO)、Fast Region-based Convolutional Network method (Fast R-CNN) 等，已廣泛應用於施工現場之個體偵測與行為判讀，形成人機協作安全治理架構^[4]。

系統設計與功能模組

系統整體架構

本系統採模組化設計架構，具備高度擴充性與互通性，各子系統可依照工地場域條件獨立部署，亦可透過雲端平台進行整合^[4]。系統設計以三大原則為核心：即時性、可擴展性與使用者導向。其中，即時性確保所有感測與影像資料於 5 秒內完成雲端回傳；可擴展性則來自模組化子系統架構，可因應不同專案需求調整感測密度與設備組合；使用者導向則強調平台介面簡潔、行動化與多端支援，便於現場使用者快速操作與掌握資訊。

各子系統功能與技術原理

智慧人車管制子系統

結合 AI 人臉辨識、車牌辨識與 RFID 無線射頻識別技術，提供工地人員與車輛進出之自動化身分驗證與紀錄。AI 影像辨識部分多採用卷積神經網路（convolutional neural network, CNN），透過深層特徵提取與比對進行高準確率的臉部與車牌辨識，詳圖 2 所示；而 RFID（Radio-frequency identification）則利用無線電波與標籤裝置間的非接觸式通訊，快速完成個體辨識與進出紀錄整合，詳圖 3 所示。



圖 2 AI 影像辨識子系統示意圖



圖 3 RFID 無線射頻識別技術子系統示意圖

人員定位與健康監測子系統

透過 UWB (Ultra-wideband)、GPS (Global Positioning System) 與藍芽等混合定位技術，即時掌握工地人員動態位置，詳圖 4 所示；輔以智慧手環，持續監控心率、體溫等生理參數，詳圖 5 所示。UWB 為高頻低功耗的無線傳輸技術，具備十公分等級的定位精度；智慧手環搭載光體積變化描記法（Photoplethysmography, PPG）感測器，偵測血流變化以估算心率，並結合體溫感測模組即時傳回健康狀態資訊。

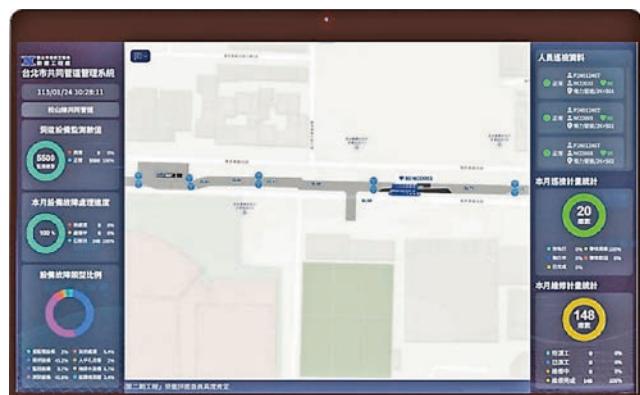


圖 4 人員定位子系統示意圖



圖 5 人員健康監測子系統

自動化環境監測子系統

部署多項感測元件，針對 PM2.5、溫溼度、CO、O₂、H₂S 等有害氣體與熱危害指標進行即時監測與預警。氣體濃度監測多採用電化學感測器或金屬氧化物半導體（MOS）感測元件，詳圖 6 所示，其電壓變化對應氣體濃度；PM2.5 感測多採雷射光散射法，量測空氣中微粒之光學密度；所得數據輸入環境危害評估模型，推估相關風險，提供作業指引，並上傳智慧化工地管理平台，詳圖 7 所示。



圖 6 環境監測子系統元件示意圖



圖 7 智慧化工地管理平台示意圖

AI 施工安全監控子系統

透過 CCTV 影像整合 AI 辨識模型，如 YOLO v5，辨識人員是否配戴安全帽、穿著反光背心等工安裝備，詳圖 8 所示。系統並設置虛擬電子圍籬，偵測人員是否進入危險作業區域，當接近重機具作業邊界時即自動觸發聲光警示，有效防止重大事故發生，詳圖 9 所示。



圖 8 AI 視覺辨識監控子系統示意圖



圖 9 電子圍籬偵測子系統示意圖

智慧巡檢子系統

提供行動裝置操作介面，工地人員可利用手機或平板即時填報環安衛與品質稽核表單。系統採用 HTML5 與 JavaScript 為核心之 Web App，支援 RWD (Responsive Web Design) 設計，並透過 HTTPS 協定將數據傳輸至雲端資料庫，實現資訊即時更新與管理同步，如圖 10 所示。

開挖支撐自動化監測子系統

整合傾斜計、應變計、水壓計等儀器，即時監測支撐構件與土壤穩定性。傾斜計採 MEMS 微機電加速度感測元件偵測微小角度變化；應變計以應變電阻原理測得構件變形，推算型鋼支撐應力數據；水壓計以壓力感測膜片監測孔隙水壓力，透過上開儀器數據監控，以確保開挖安全，如圖 11 所示^[6]。



圖 10 智慧巡檢子系統示意圖

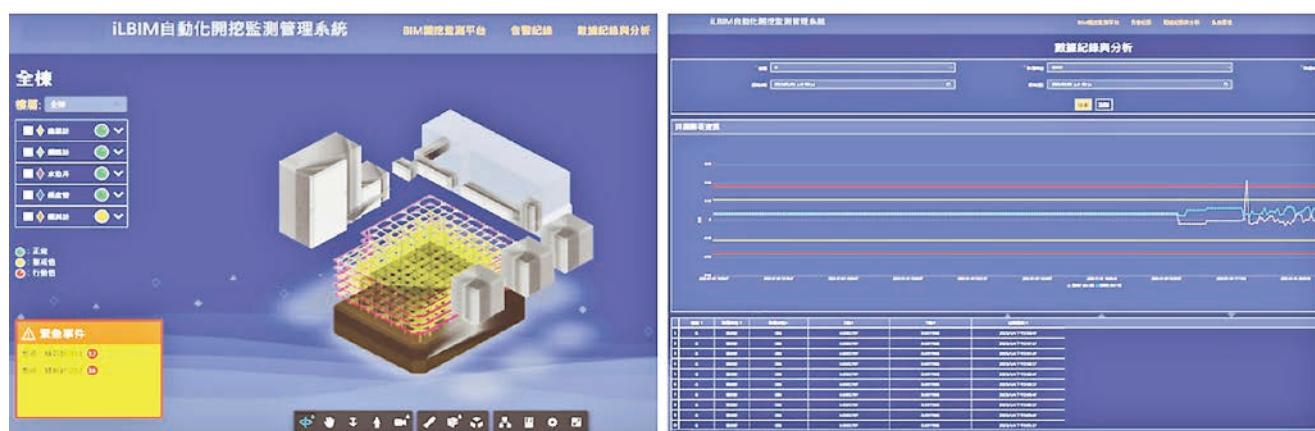


圖 11 iLBIM 自動化開挖監測管理系統示意圖

雲端戰情整合子系統

將 BIM 三維模型與 GIS 地理空間資料進行資料疊合，整合人員定位、環境數據與警示事件等資訊於視覺化平台中。系統採用 WebGL 視覺化框架，進行三維場景渲染，協助決策者進行即時派工與應變調度，如圖 12 所示。

施工文件雲端管理子系統

建立集中式版本控制與跨設備文件協作平台，支援如 Google Workspace 或 SharePoint 之 API 介接，施工圖說與說明文件可於現場及辦公端即時查閱與同步更新，提升團隊溝通效率與資訊一致性，如圖 13 所示。



圖 12 雲端戰情整合子系統示意圖



圖 13 施工文件雲端管理子系統示意圖

結論與建議

本研究以桃園市某巨額採購統包工程為實證場域，系統性建構並實施一套整合 BIM、AI 與 IoT 智慧工地安全管理系统。透過八大模組化功能子系統之協同運作，實現人員安全監控、施工環境管理、巡檢智慧化與文件雲端協作，展現智慧營建於實務應用的可行性與高效益。系統部署後於現場實測中展現出優異

的即時性與擴充性，並有效提升管理透明度、危險預警反應速度與跨部門協作效率。

綜合研究成果與現場實施經驗，提出以下建議作為後續系統優化與研究方向：

1. 建議擴充與施工進度控制系統（4D BIM）之整合，使工地智慧管理可納入時間維度分析，進一步掌握施工節奏與人力配置效率。
2. 應導入 AI 行為預測與風險模型，結合歷史巡檢紀錄與監控影像資料，建立作業異常預測與事故趨勢評估機制。
3. 強化資料隱私與資安防護機制，針對影像監控、健康數據與文件平台進行分權管理與加密傳輸，因應大規模感測與資訊共享可能帶來的風險。
4. 可進一步評估區塊鏈技術於施工文件與履歷資料之應用潛力，提升數據不可竄改性與驗證性，強化工程紀錄可信度。

參考文獻

1. World Economic Forum. (2016.) The Global Risks Report 2016. Geneva: World Economic Forum.
2. 國家住宅及都市更新中心 (2023)，桃園市八德區白鶯安居社會住宅新建統包工程，統包需求書。
3. 泛亞工程建設股份有限公司 (2024)，桃園市八德區白鶯安居社會住宅新建統包工程服務建議書。
4. 莊坤諺 (2025)，施工架智能監控及工地安全管理系統，博士論文，國立臺灣大學。Doi: 10.6342/NTU202501316。
5. Azhar, S., Khalfan, M., and Maqsood, T. (2012). Building Information Modeling (BIM): Now and beyond. The Australasian Journal of Construction Economics and Building, 12(4), [15]-28. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.013120167780649>
6. 林高禾 (2024)，建築結構健康監控系統配置之研究—以鋼構廠房為例，碩士論文，國立臺灣大學。Doi: 10.6342/NTU202402304。



從模型到現場： HDEC 工程管理的新日常

褚月桂*／欣達環工股份有限公司 高級工程師

當 BIM/AR 的檢核成為工地的日常，是否意謂著營建產業虛擬設計與施工（Virtual Design and Construction, VDC）^[1] 技術發展已進入至精實營建（Lean Construction）^[2] 的管理模式？亦或是營建產業在邁入 AI 自動化的起手式？

營建產業隨著科技創新，帶動了許多施工方面的數位轉型，結合資通訊技術及各式感測設備，大幅提高了施工期間的安全管理的效能，也在即時性、數據化與自動化等各種優勢條件下，智慧工地就應運而生了。然而要建立真正的智慧工地，得先具備數位孿生（Digital Twin）的數位基礎環境，因此可能運用 BIM 模型來與實際的營造過程相結合^[3]。建築資訊模型（Building Information Modelling, BIM）與擴增實境（Augmented Reality, AR）兩項技術的融合即是一例，運用 AR 技術將 BIM 的 3D 模型以真實尺度套疊於施工現場，讓現場有擴增實境虛實的疊合效果，施工人員便可以更直觀地來進行施工查驗以及品質檢核等相關作業，這項技術改變了許多現場施工人員查閱圖紙的習慣，由原本採用傳統 2D 工程圖說查找，轉而以 BIM 的 3D 模型來進行更直觀的比對，而在運用這項創新技術的前題，BIM 模型的準確度要求以及前置作業，對於 BIM 團隊人員都是不容小覷的考驗，然而也唯有逐步的深入現場，才能讓 BIM 更接地氣的在施工端發揮其真實的應用價值和目的。

這是以執行再生水廠興建工程 BIM 專業人員的角度，對於工程專案設計階段即導入 BIM 技術，並且在工地端應用 AR 技術執行模型檢核的經驗分享。

前言

近年來由於全球面臨氣候變遷的挑戰，各地區降雨型態驟變，地方政府為力拼產業轉型，皆以爭取高科技產業進駐為首要目標，而在不影響民生用水的前提下，又必須滿足產業的高度用水需求，即藉由再生水產製技術讓水資源循環再利用，故政府單位積極展開公共污水處理廠再生水推動計畫^[4]。在兼具「提供產業穩定用水」與「水資源循環再利用」的兩項重要議題下，再生水廠的興建工程肩負起這項重責大任，然

而近幾年營建產業面臨嚴峻的缺工缺料問題，不僅影響工程進度，同時也墊高許多營建成本，在時間和成本雙重考驗下，即以避免施工錯誤或降低施工風險為首要目標，最終將智慧安全工地奉為圭臬。

建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）之應用已列為大型公共工程專案必備技術^[5]，設計階段即以 BIM 模型進行各類工程設計，也針對各類工程衝突或是具有職安高風險設計加以檢討，確保施工期間之安全與順利，甚至在施工階段運用擴增實境（Augmented Reality, AR）技術，讓 BIM 模型套疊至現場，融合虛擬模型與真實施工現場，視覺化地進行現場的查核比對工作。

* 通訊作者，archu@hdec-corp.com

BIM / AR 技術與應用介紹

BIM 它是結合營建與科技產業的技術，以物件為導向的參數式建模工具，同時也是工程各階段的一種流程，BIM 資訊為標準化且機器可讀取^[6]，BIM 構件包含參數化及屬性資訊，而這類資訊都可被自動化管理，且其物件導向資料結構具有與實體物件對應一致的特性，故 BIM 資訊管理層面靈活度高^[7]。現今許多指標性工程在設計階段即先行於電腦平台上完成 3D 虛擬建造，以便模擬分析施工過程及竣工後營運階段可能產生的問題及早規劃解決。

AR 它是透過裝置可以將虛擬的資訊、圖像、物件或影音疊加至真實環境中的一種技術，讓使用者能在真實環境中體驗到附加的數位資訊，它同時也能提供互動式情境的體驗，因此自從 2016 年《Pokémon GO》遊戲風潮以後，AR 技術已成為家喻戶曉一項平民化的實用科技了。

然而營建業施工階段要採用 AR 技術，其前題為必須具備完整的 BIM 3D 模型，其它工具尚包含：

1. 硬體（平板裝置、智慧型手機或頭戴式裝置）
2. 軟體（AR 應用程式、雲端平台）

執行 AR 技術的工作程序^[8] 可概分為：

1. 環境捕捉：AR 裝置使用其攝影機和感測器來捕捉真實世界的環境。
2. 資料處理：捕獲的資料由裝置的處理器進行處理。
3. 數位內容產生：依據處理後的數據，AR 系統產生適當的數位內容以涵蓋真實世界。
4. 追蹤和對齊：當使用者移動時，AR 系統會持續追蹤他們的位置並調整數位內容，以確保其與真實世界環境保持一致。
5. 顯示：增強內容顯示於裝置螢幕上或透過 AR 眼鏡顯示，與使用者對真實世界的看法無縫結合。

AR 技術的應用重點包括：虛實整合、觸發啟動及呈現方式，其中在觸發啟動部分，亦即是定位的精確度，對於營建施工未來應用這項技術影響甚大^[9]，目前仍以

圖像辨識為主，AR 圖像辨識方法區分為以下三種^[10]：

標記的辨識

採用標記的辨識方法是最常見的 AR 圖像辨識方法之一。它透過在真實場域中放置特定的標記（如：二維碼、QR code 等），利用攝影鏡頭掃瞄標記圖像，透過圖像識別技術確認標記的位置和方向。

視覺 SLAM 的辨識

視覺 SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）是一種利用視覺即時定位技術。它透過分析攝影鏡頭採集的圖像序列，對於動態環境進行定位。

深度學習的辨識

深度學習技術在 AR 圖像辨識領域也有廣泛的應用，透過訓練神經網路模型，也可針對圖像進行識別、分類和辨識。

依據上述三種方法又可將其區分為「標記式 AR」與「無標記式 AR」二類^[11]，其綜合比較（表 1）。

綜整上述各式 AR 圖像辨識方法，視覺 SLAM 的辨識與深度學習的辨識方法皆屬「無標記式 AR」，由於深度學習的辨識方法技術門檻較高，以現階段營建產業自動化尚未成熟故難以施行，而視覺 SLAM 的辨識方法於施工期間也可能因複雜環境而難以運作，故「無標記式 AR」的辨識方法較適用於工程竣工後或營運階段較完整的場域，「標記式 AR」的辨識方法應可適用於施工階段尚未完備之現場環境。

AR 檢核的需求探討

以往傳統施工查核比對多半借助於 2D 圖說以獲取相關資訊，然而零散的圖說版次經常造成控管疑慮，再者施工現場環境危機四伏，工程人員攜帶大量圖紙與相關資料往返於施工現場，於現場費時翻找之際也徒增曝露於危險場域的風險。由於專案在執行現況查核時需要依據不同專案需求以及不同的情境，所採取的查核比

表 1 AR 圖像辨識方法的比較表

分類	AR 圖像辨識方法	優點	缺點
標記式 AR	標記的辨識	不需要進行物件辨識和追蹤，簡單快速，穩定性高	需要預先放置標記，適用場景有限
無標記式 AR	視覺 SLAM 的辨識	無需預先放置標記，適用場景廣泛	在複雜環境中，定位精度和即時性將受影響
	深度學習的辨識	能夠自動學習圖像特徵，適應性強	訓練資料需求量大，計算複雜度高

參考來源：^[10,11]

對方式也略有不同。一般大型的公共工程專案，業主契約可能會要求施工期間或竣工後查驗要採行影像模型的比對，而採行 BIM 模型查驗通常是與工程實體來做比較，以確認模型的擬真程度符合正確與完整性，因此需要應用 3D 雷射掃描儀器將實體設施轉換成點雲模型，再與 BIM 模型來進行套疊比對，以檢核影像模型與 BIM 模型的幾何位置與形狀大小是否正確^[12]。

運用 BIM/AR 查核針對現場錯誤問題可即時顯示，且透過 AR 技術可將 BIM 模型與 2D 圖紙做疊合可更精準的確認現場設備基座或預留開孔是否正確，進而確認現場防護措施是否到位，即可讓現場同仁理解問題並及早修正改善。

案例導入說明

本案例是一座位於高雄市橋頭區，為擴建中的再生水廠（預計 2025 年底完工），全廠包括一期及二期污水處理單元，佔地面積約 6.64 公頃，專案類型為污水廠 BTO 興建移轉營運案，處理容量為污水處理量約 6 萬 CMD、再生水的產水量約 3.5 萬 CMD。

本案例在設計階段即導入 BIM 的設計應用，主要係為本案屬二期工程與既有一期污水廠之間，預期將有許

多界面協調的需求，如：廠區地下連絡管新舊系統需要銜接。再者，再生水廠屬科技產水，設備空間需求也需要更精確地規劃，並整合各專業模型，藉由 BIM 視覺化優勢以進行工序的優化。施工階段則定期將全廠區整合模型上傳至 BIM 雲端平台，以提供相關單位進行界面整合、工程釋疑或變更設計等溝通之用，運用 AR 技術係由於此為 BTO 案，對於特許公司而言，未來也將面臨營運維護階段冗長的建築物生命週期，施作的正確與否對將來的影響重大，因此在施工品質檢核管理，需要採取更具成效、務實的管理方法，故以試辦的方式於施工期間導入 AR 技術，將 BIM 的 3D 模型疊合至實體場域，以供施工團隊進行施工查驗比對作業，藉由專案施工 BIM 模型的滾動式修正，再搭配專業廠商所開發的 AR 應用程式（圖 1），即可將 BIM 模型定期更新儲存於雲端，可更快速且便捷地檢核現場實體是否正確（圖 2）。

再生水廠的管線有別於以往的傳統污水處理廠，廠內各類系統管線的複雜度並不亞於高科技業廠房，其涵蓋各類大型機組設備以及密集的各類管群，只要一小處稍有錯誤終將影響後續的整體配置，正所謂的牽一髮而動全身，因此施工期間的查核比對需要更頻繁，才能及早協調整合現場的各項失誤，以降低現場施作錯誤的成本損失。

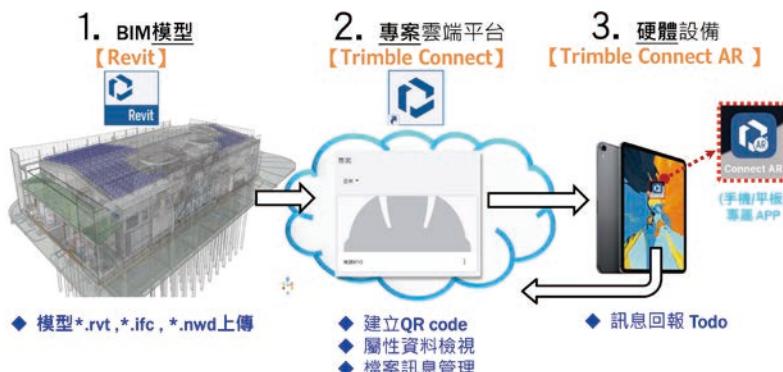


圖 1 專案 AR 工具說明（資料來源：欣達環工公司）



圖 2 BIM/AR 在工地操作程序（資料來源：欣達環工公司）

施工階段檢核程序與管理方式

施工期間的時程管控為每一工地的核心要務，然而在執行 BIM/AR 的檢核比對過程往往又會發現一些相互抵觸問題，而這些問題究竟是圖說的問題？還是模型沒建好？亦或者是現場施作的錯誤呢？因此經常要掌握時效並且追根究柢的釐清問題癥結原因，與土建及機電人員進行協調討論，快速解決或尋求變通之道。

因此，也針對施工查核擬定 BIM/AR 現場標準作業程序，以供施工端駐點 BIM 工程師執行時瞭解相關的作業內容，掌握作業時效及作業要點（圖 3），並且將現場查核記錄進行系統化的管控（圖 4 和圖 5）。

BIM / AR 檢核的問題探討

執行施工階段的 BIM/AR 檢核過程中，及早解決了許多現場問題，同時也累積不少的檢核經驗（例如：過牆管預留開孔、設備基座位置等），獲得不少實質的效益，然而運用這項技術也仍存在著部分的問題，綜整如下：

- 為符合現場套疊模型的需求，設備系統及基座甚至是管線支撐吊架等，必須依實際採購的設備規格尺寸，建置相同比例且精度較高的實體元件。
- 現場已施作完成，若在不影響功能情況下，通常專案會選擇以 BIM 模型來配合進行修正，無形中增加建模人員的修模次數。
- AR 查核前置作業較繁瑣，包括：模型轉檔為 IFC （或 NWD）、QR code 位置選擇、QR code 印製以及現場位置的測量張貼 需要有駐點 BIM 工程師配合。
- BIM 模型轉檔為 NWD 於 AR 應用程式內顯示可能產生部分缺件模型元件不完整的現象。
- AR 工具若採用頭戴式裝置可能將有無法察覺週遭環境的問題，而使用平板裝置又可能因戶外光線而導致影像不清楚比對困難現象。
- 施工現場受限的環境，例如：地下室的空間容易產生訊號延遲問題，影響比對的即時及準確性。
- 施工現場安全問題，為提早瞭解是否有預留開孔是否正確，通常會在假設工程未拆的情況下進入案場，檢核人員自身安全防護也是一項重要課題。

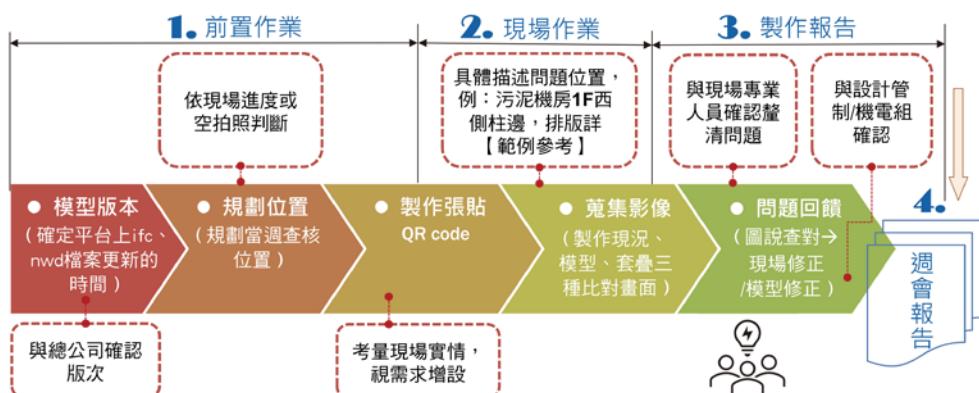


圖 3 BIM/AR 現場標準作業程序（資料來源：欣達環工公司）

查核編號：20240605-01
 查核位置：前處理及初沉池
 查核內容：屋頂層百葉預留開孔位置確認，確認無誤。
 問題釐清：N/A

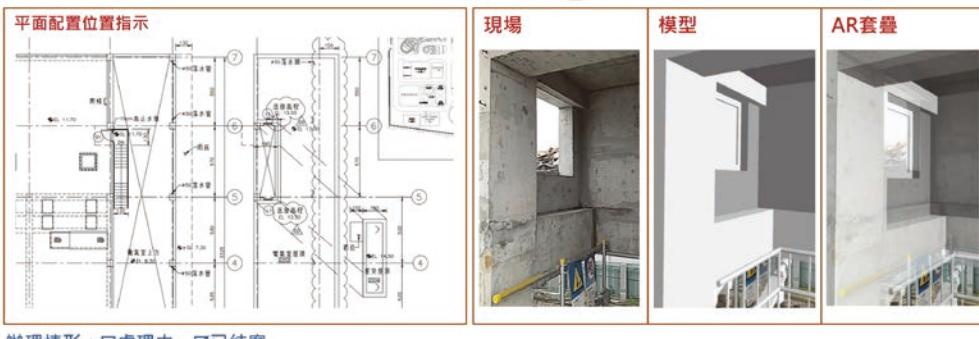


圖 4 BIM/AR 施工查核記錄（資料來源：欣達環工公司）

月管控表 (總公司記錄)											2024/11/15
月份位置	類型	抽樣內容	問題描述	追蹤辦理	爭取日期	執辦日期	結果日期	備註	備註	備註	備註
週管控表 (工務所記錄)											
2024/10/01 - 01	2024/10/01	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/02 - 02	2024/10/02	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/03 - 03	2024/10/03	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/04 - 04	2024/10/04	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/05 - 05	2024/10/05	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/06 - 06	2024/10/06	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/07 - 07	2024/10/07	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/08 - 08	2024/10/08	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/09 - 09	2024/10/09	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/10 - 10	2024/10/10	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/11 - 11	2024/10/11	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/12 - 12	2024/10/12	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/13 - 13	2024/10/13	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/14 - 14	2024/10/14	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/15 - 15	2024/10/15	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/16 - 16	2024/10/16	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/17 - 17	2024/10/17	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/18 - 18	2024/10/18	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/19 - 19	2024/10/19	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/20 - 20	2024/10/20	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/21 - 21	2024/10/21	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/22 - 22	2024/10/22	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/23 - 23	2024/10/23	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/24 - 24	2024/10/24	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/25 - 25	2024/10/25	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/26 - 26	2024/10/26	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/27 - 27	2024/10/27	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/28 - 28	2024/10/28	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/29 - 29	2024/10/29	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/30 - 30	2024/10/30	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	
2024/10/31 - 31	2024/10/31	09-再生水廠	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	高鐵橋再生水廠與接觸管路需 BIM量相容與操作制表	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	11/15	

圖 5 BIM/AR 施工檢核管控表（資料來源：欣達環工公司）

結論與建議

專案要在施工端推行這項技術，首先得先評估專案的預算條件、想要達成的應用目的與效益在哪裡？執行 BIM/AR 過程中，工具的導入基本上都不致於產生問題，而最具挑戰的部分應該是如何貫徹施行，需要搭配 BIM 人員的積極投入、擬定標準作業程序、整備人力與控管議題等，這些才是影響專案執行 BIM/AR 成果的關鍵要素，而這也是當前許多工程專案在施工端應用這項技術時，面臨窒礙難行的首要因素。

以橋頭案再生水廠為例，在設計階段採行 BIM 檢核工程中的各類衝突，以及具有職安疑慮的高風險設計，並且在施工階段採行 AR 技術，使現場錯誤問題得以早確知並立即改善，降低失誤的成本損失。再者，由於本案例污水處理廠單元，施工期間預留開孔或開放式池槽，皆具有潛在的墜落高風險，也藉由 AR 檢核確認現場相關安全防護措施是否符合要求。

BIM/AR 的巧妙融合使得先進科技趨於實用化，而要在施工階段執行這項技術，則需要 BIM 團隊更積極投入，與時俱進地更修模型才能提高 BIM 模型的完整性、正確性與一致性，亦才能獲得施工人員對於模型資訊的信賴感，也期望未來 AR 應用能和 AI、5G 等技術更深度的融合，使 AR 技術在環境的可變性及定位技術方面能更加地精進，為營建產業帶來更多創新應用。

參考文獻

- John Kunz and Martin Fischer (2012), “Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions”, CIFE

Working Paper, #97, Stanford University, America.

- Lean Construction Institute The Best Way to Build. Lean Construction Institute. <https://leanconstruction.org/>
- 高宇、周子祥、呂斌豪（2024），以推動智慧工地反思人本初衷—專訪臺大土木系謝尚賢教授，現代營建雜誌社。<http://www.arch.net.tw/modern/month/537/537-1.htm>
- 林于衡（2024, July 10），高科技產業用水渴 國土署拚 2026 年再生水日供 28.5 萬噸，工商時報。<https://www.ctee.com.tw/news/20240710701276-430104>
- 審計部 _ 第五廳（2018, April 30），工程會為提升我國公共工程技術、效率及品質，成立公共工程運用建築資訊建模（BIM）推動平台，該推動策略應如何運作以提升公共工程執行效能，審計部歡迎各界提供建言！公共政策網路參與平臺。<https://cy.join.gov.tw/policies/detail/8e95c8d6-ce87-4e05-afce-c46a33eb6f89>
- National BIM Standard (NBIMS), “Frequently Asked Questions About the National BIM Standard-United States™”, 2024/02, <https://www.nationalbimstandard.org/faqs>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K. (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors (2nd Edition) John Wiley and Sons, Inc.
- Trevor jackins. (2024, August 28) , 什麼是擴增實境 (AR) ? Splashtop Inc. <https://www.splashtop.com/tw/blog/what-is-augmented-reality>
- 王榮進、馮重偉（2020），擴增實境（AR）結合虛擬施工及設計（VDC）於營建施工應用研究。內政部建研所。
- 揭露 AR 圖像跟蹤技術：如何讓虛擬與現實無縫對接？(2025, April 11), 2025 雲原生實踐。<https://www.oryoy.com/news/jie-mi-ar-tu-xiang-gen-zong-ji-shu-ru-he-rang-xu-ni-yu-xian-shi-wu-feng-dui-jie.html>
- 什麼是擴增實境（AR）？ANSYS, Inc. <https://www.ansys.com/zh-tw/simulation-topics/what-is-augmented-reality>
- 謝尚賢（2013），淺談 BIM 應用工具（五）：模型檢核與管理，營建知訊，第 363 期，第 63-65 頁。



智慧安全 的落地實踐： 科技驅動 勞安管理 革新

許勝凱*／將捷集團 科技長

隨著勞工安全要求持續提升及勞動力供給日益緊縮，營建產業正面臨管理模式轉型的挑戰。為因應此趨勢，將捷集團近年積極導入數位科技，採用全生命週期之BIM技術以提升工程資訊整合效率，並結合智慧設備強化施工現場之安全衛生管理。同時本文亦探討AI影像辨識技術於地熱電廠營運管理之應用，以驗證其在能源設施管理中降低人力依賴之可行性，藉由本集團之實務分享與案例分析，期能為營建數位轉型與能源產業永續發展提供經驗參考。

前言

將捷集團（Fabulous Group）創立於1992年，為台灣以地產開發為本的企業，致力於垂直整合設計、建築、建築資訊模型（BIM）、室內裝修、營造工程及資產管理等業務。近年更積極拓展文創休閒與地熱能源產業，持續推動永續綠建築與綠色能源開發，展現多元化經營視野，並秉持以人為本、建構幸福人居的核心理念，將企業價值延伸至整體社會。

然而，面對少子化與人口老化的雙重挑戰，年輕勞動力對營建產業的投入意願日益降低，導致工地現場出現嚴重人力斷層。根據勞動部統計，2024年第一季全台營建工程業人力需求達4,276人創下歷年新高。此外，內政部國土管理署報告指出，全台營建產業勞工短缺人數已超過5.3萬人，其中基層勞工缺口占比高達75.3%，顯示台灣營建業正面臨前所未有的嚴峻缺工危機。

隨著消費者意識抬頭，民眾對建築安全與品質的要求日益提高，加上少子化導致整體勞動力供給趨緊，工地主任、現場管理及施工人員等人力資源日漸

不足。於此情況下，現場管理人員常因趕工壓力或人力短缺，被迫減少安全教育之頻次、時長或課程內容深度，進而引發施工品質瑕疵與職業安全風險。

除此之外，受限於監工人力不足，許多關鍵施工工項（如鋼筋綁紮、模板支撐、水電管線預埋等）常無法即時查核與稽核，導致潛在施工缺失未能及早發現與改善，增加了工地安全與品質管理的挑戰。上述問題已成為當前營建現場管理面臨的重大痛點與迫切課題。

智慧工地係指導入物聯網（IoT）、BIM/CIM、人工智慧（AI）及數據分析等先進技術於工地現場，透過感測器、自動化系統與影像分析工具，即時蒐集人力配置、安全狀況、環境條件、材料使用與施工進度等資訊，並整合至中央管理系統進行分析與決策，以提升施工效率、風險預警能力及整體品質管理效能^[1]。

面對少子化所帶來的人力短缺挑戰，亟需透過智慧化技術補足勞動力缺口。將捷集團自2020年起，已陸續於各施工現場導入智慧工地解決方案，並於2024年進一步擴大應用範疇，將智慧化管理技術導入地熱發電廠營運管理，積極推動集團轉型為以自動化與智

* 通訊作者，sky@fabulousgroup.com.tw

慧管理為核心的營運體系，期能有效降低少子化對產業之衝擊，並大幅提升整體管理效率。

將捷集團自 2014 年導入建築資訊模型（BIM）技術，多年來累積包含集合住宅、休閒運動中心、飯店、商辦等各類型 BIM 專案執行經驗，運用 BIM 技術於建築、結構與機電之設計整合、環境模擬分析、工程數量計算、施工前期規劃、施工中檢核、竣工資料庫等全生命週期應用，並將 BIM 技術結合智慧設備於施工現場管理，包含 BIM 於職業安全運用、臉部辨識出入管制系統、危險區域預警以及 AI 辨識等應用，本文分別說明如下：

BIM 於職業安全運用

BIM 使實體建物在施作前，得以先在電腦平臺上虛擬分析建造過程，將不同時間點在工區各處出現的各種安全危害風險，以 3D 可視化方式呈現，使職安衛管理人員更能預先發現施工過程之介面衝突及可能危

害，據以提出防災策略，同時更容易評估安衛防護規劃方案之有效性^[2]。

以集團某集合住宅案為例，營造廠於施工規劃時延接續設計 BIM 模型，於假設工程階段下載勞動部建置之「營造業安全衛生 BIM 資訊平台」內的安衛 BIM 元件（圖 1），運用於電梯井防護措施（圖 2）、現場施工架配置檢討（圖 3）、開口部防護措施（圖 4）等檢討，以下為導入效益說明：

1. BIM 於現場開口防護上的運用，可即早確定開口尺寸訂置相關安全防護措施。
2. 各項安衛措施套用在 BIM 模型，藉由 3D 視覺化呈現，可避免 2D 圖面的盲點，讓安全減災看的見。
3. 透過 BIM 可預先規劃施工架搭設方式，可避免因施工因素造成衝突。
4. 可即早決定安衛設施作方式，並透過協議組織會議等會議向工程師及廠商宣導。



圖 1 营造業安全衛生 BIM 元件庫

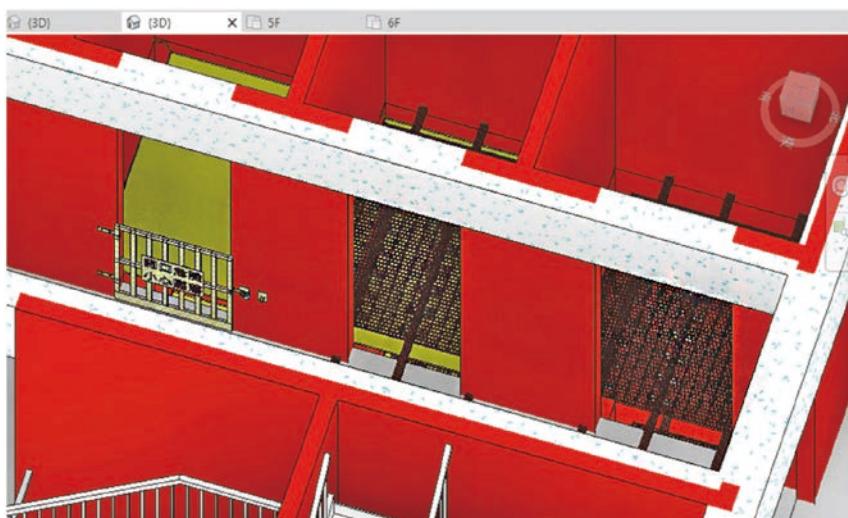


圖 2 電梯井防護措施模型

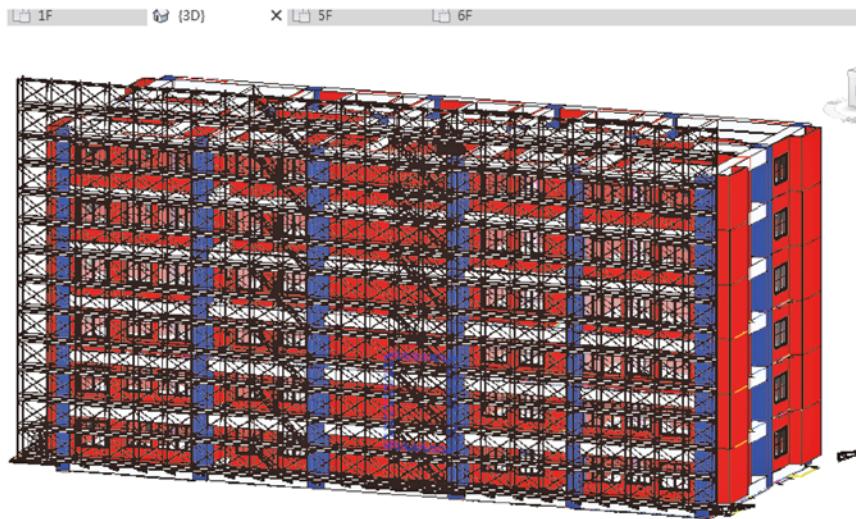


圖 3 BIM 施工架配置檢討



圖 4 BIM 開口部防護措施模型

臉部辨識出入管制系統

集團建案於工地現場導入人臉辨識系統，在出入口設置供工業級平板電腦，搭配雲端 AI 人臉辨識系統，未來可進一步結合三叉機或門口螢幕等進階管制，工班於正式進場前提交人員清冊，並於現場完成危害告知訓練後，完備人臉辨識資料，後續人員於進出工區皆需採用人臉辨識進出，其資料保存於雲端，後臺系統並可提供出工人數統計及進出紀錄等分析報表功能，整體架構如下圖 5 及應用示範如圖 6 說明。

實務上需注意平板於戶外使用易因戶外光線過量造成辨識不易以及工地粉塵及環境因素造成損壞，惟人臉辨識技術成熟，硬體使用門檻低，建置成本尚屬合理，仍不失為良好的解決方案，以下為其效益說明：

提升出入控管效率

傳統人工作業如打卡、簽到耗時且易出錯，人臉辨識可即時驗證，減少排隊與人為疏失。

強化工地安全管理

僅限授權人員進入工地，控管當日出工種類及人數，有效杜絕外來人員闖入與工地竊盜風險，並可利於事故追蹤與回溯管理。

即時出勤紀錄整合

系統可自動記錄工人每日出勤時數，與勞安、勞保申報系統連動，提升行政效率。

防疫與健康監測應用

可搭配測溫功能進行異常通報，於疫情或特殊衛生管控期間特別有效。

➤ 軟體面：人員臉部辨識出入管制系統

圖 5 臉部辨識出入管制系統架構圖^[3]

圖 6 出入管制系統應用示範

危險區域預警

工地導入閉路電視監控系統（以下簡稱 CCTV 系統），可即時掌握施工現場動態，有效監控人員安全行為、機具運作狀況及出入口管制，達到預防職業災害與非法入侵之目的，提升工地管理之透明度與效率，現已逐漸成為工地標準化管理設備之一。

隨著監控技術的進步，CCTV 系統已整合電子圍籬偵測及 APP 通知功能，可透過設定虛擬界線進行人員入侵或異常行為之辨識，並串接相關警報設備（例如警示燈、蜂鳴器或語音喇叭）或 APP。當人員誤入特定警戒區域時，系統將即時發出警報通知或 APP 通知，降低人員誤入高風險區域的可能性，有效預防工安事故發生。

例如，在電梯井施工區域設置 CCTV 系統及警示燈，當吊料作業進行時，現場警示燈將自動亮起以提醒施工人員注意安全，管理人員亦可透過辦公室螢幕監控吊料作業位置；若偵測到人員進入預設之電子圍籬範圍內，系統將即時跳出視覺警示畫面（圖 7），進一步強化作業安全管理。

AI 影像辨識於地熱發電廠之安防應用

將捷集團子公司結元能源為台灣地熱發電產業的領導者，專注於地熱發電相關產業之研究開發、整合創新及應用。現已建置宜蘭清水地熱電廠、新北市四礦子坪地熱發電廠並商轉中。



圖 7 CCTV 結合警示燈應用於電梯吊料警示

因電廠位處偏山且人力有限，結元公司於 2024 年導入發電廠智慧安防系統，提供 24 小時不間斷營運管理需求，實現在少人的條件下安全穩定的發電運作，具體應用包含全區影像監控、安全帽偵測系統，陌生人軌跡追蹤、門禁卡機 / 車道紅外線以及第三方系統整合^[4]，分別說明如下：

全區影像監控

全場外圍建置日夜型高解析度 CCTV 監控系統，並搭配語音警示喇叭與電子圍籬設置，採用高精度人形偵測技術及彈性化警戒規則，有效提升辨識準確度，大幅降低傳統電子圍籬因光影或非人形目標造成誤報之情形，以強化場域周界安全防護。

未戴安全帽偵測

因應進入廠區發電區域須配戴安全帽之安全規定，並考量現場人力無法全天候即時監控，故建置「安全帽偵測系統」。本系統採用人工智慧影像辨識技術，能即時辨識未配戴安全帽之人員，並透過現場廣播喇叭進行語音警示，同時擷取影像紀錄留存，以強化現場安全管理（圖 8）。

陌生人軌跡追蹤

利用 AI 辨識人臉及追蹤功能掌握特定人員在場區移動軌跡，有助於監控行為軌跡及應對突發事件，於發生事故或爭議時，可快速以人臉回查及調閱行蹤影像，提高事後追責與調查效率（圖 9）。

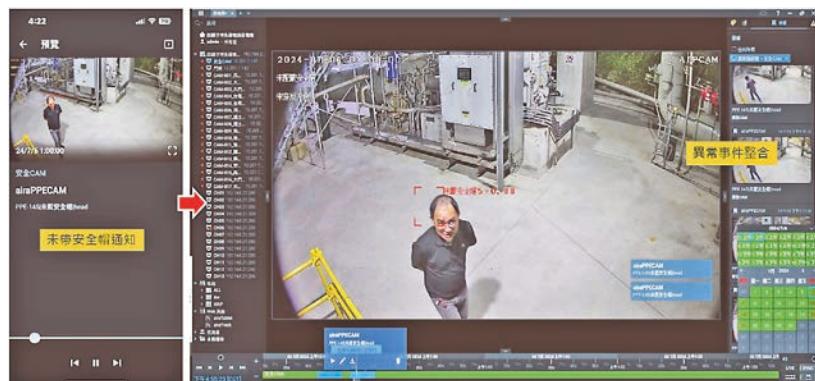


圖 8 未戴安全帽偵測

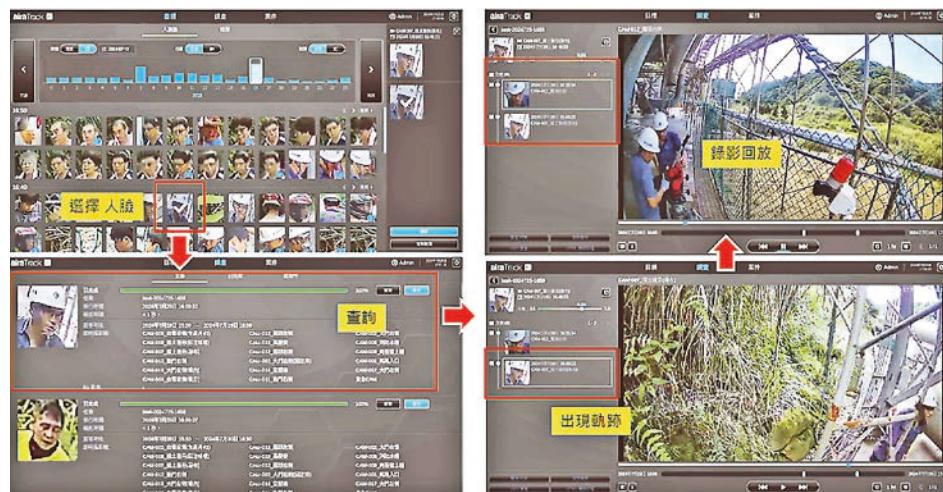


圖 9 陌生人軌跡追蹤

門禁卡機 / 車道紅外線整合

導入戶外型人臉辨識一體機，支援雙向語音對講功能，並整合車道紅外線（主要出入口）以及電子圍籬系統，當車輛靠近出入口自動發出聲響並截錄影像，相關事件統一收存至後端影像管理系統（圖 10）。

第三方系統整合

整合保全、有毒氣體以及消防系統（圖 11），當有設備端有異常狀況發生時，透過物聯網技術可即時發送警報至管理人員 LINE 群組（圖 12），現場維運人員可透過現場螢幕或手機 APP 遠端監看並即時做出合宜處置。



圖 10 門禁卡機 / 車道紅外線整合

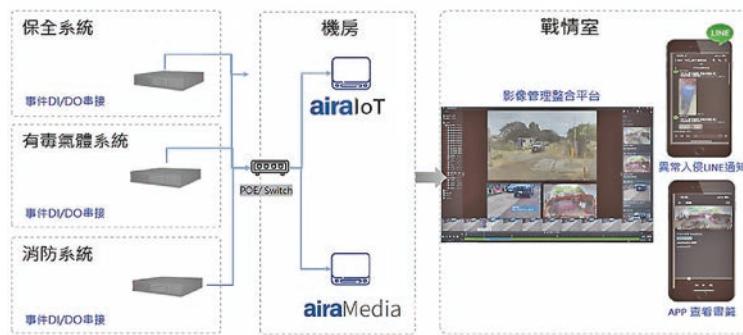


圖 11 第三方系統整合架構圖



圖 12 火警 / 氣體 / 保全警示通知 (LINE)

結論—善用科技 投資未來

鑑於營造業普遍面臨人力短缺及技術斷層日益嚴重之挑戰，將捷集團積極推動數位化轉型，強化營運效能與提升施工品質。具體作法包括導入工程管理系統（MBO）、自主檢查應用程式（APP）、建築資訊模型（BIM）應用於施工規劃，並建置人臉辨識出入管制系統及危險區域預警機制，以強化現場安全管理效能。

集團亦持續擴大人工智慧（AI）影像辨識技術之應用範疇，延伸至地熱電廠之營運管理，藉由科技導入提升能源設施之營運效率。

展望未來，隨著 AI 及物理型機器人技術日趨成

熟，將進一步研議導入於工地作業環節例如搬運、油漆及泥作等工項以及支援電廠的日常安防巡檢作業，期以有效降低人力依賴，促進施工端乃至營運端之自動化與智慧化發展^[5]。

參考文獻

1. 聯順聯網股份有限公司 (2025), <https://www.uoi.com.tw/>。
2. 营造業職業安全衛生管理系統資訊應用平台 (2025), <https://coshms.osha.gov.tw/>。
3. 帕卡資訊股份有限公司 (2025), <https://pro.pakka.ai/>。
4. 城智科技股份有限公司 (2025), <https://www.aira.com.tw/>。
5. 王維玲、張雅琳 (2025)，人居幸福學 將捷集團的多角化思維，天下文化 / 遠見，臺北。



智慧工地科技 在社會住宅的應用 — 以 前鎮亞灣 智慧公宅 第一期新建統包工程為例

曾國展／皆豪集團 總裁

許義傑／永青營造工程股份有限公司 總經理

吳匡倫／永青營造工程股份有限公司資訊中心 經理

陳其豐*／永青營造工程股份有限公司營建部南一處 處長

本文介紹「前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」導入多項智慧工地科技，涵蓋 AIoT 智慧工地系統、AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台、AIoT 雲端管理系統－自動化安全監測、智慧周界安全圍籬、AI 人員臉部辨識系統、智慧洗車台－車輛管制系統、AIoT－智慧環境監控系統、施工架監測預警系統－無線壁連桿等多元科技應用，說明智慧工地科技管理在社會住宅施工之應用成效。結果顯示，本工程智慧工地科技導入已展現初步成效，相關標準配備設施已推廣至本公司其他工地使用，未來隨著相關法規與標準之逐步建置，智慧工地科技可望普及至更多公共與民間工程場域，成為推動營造產業數位化、自動化及永續發展的重要動能。

前言

隨著臺灣營建產業面臨人力短缺問題日益嚴重，如何有效提升工地管理效能，並兼顧施工品質與進度控管，已成為當前營造業亟需解決之核心課題。為落實智慧工地科技應用，本公司於「前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」初期規劃階段，即預先導入多項智慧工地科技，涵蓋 AIoT 智慧工地系統、AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台、AIoT 雲端管理系統－自動化安全監測、智慧周界安全圍籬、AI 人員臉部辨識系統、智慧洗車台－車輛管制系統、AIoT－智慧環境監控系統、施工架監測預警系統－無線壁連桿等多元科

技應用。透過本實務案例，驗證智慧工地科技於降低人力依賴、強化施工管理效能與提升作業安全方面之可行性與實質成效，並已作為本公司所屬工地場域推動智慧工地科技之標準化設施基礎。

工程概述

「前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」係由高雄市政府都市發展局主辦，基地位於高雄市前鎮區亞洲新灣區核心地帶，如圖 1 所示，為市府推動都市更新與社會住宅政策之重要指標性建案。基地面積約 8,960 平方公尺，建築總樓地板面積約 58,657.08 平方公尺（含陽台），規模為地上 14 層、地下 2 層，乙幢 4 棟，規劃住宅 634 戶與商業空間 9 戶，共計 643 戶，

* 通訊作者，chifeng.n0625@msa.hinet.net



圖 1 基地位置



圖 2 建築 3D 模擬圖

如圖 2 所示。建築設計兼具綠建築、智慧建築、耐震構造及通用設計等多元性能，致力於滿足產業發展與都市居住雙重需求，並提供周邊產業從業人員及有租屋需求民眾之住宅使用。

本案亦納入多項社福設施，包含店鋪、托嬰中心、幼兒園、日間照顧中心與社區照顧關懷據點等公益空間，展現社會住宅公益性、多元性與社區共融之目標，為高雄智慧社宅發展建立新典範。

本工程採統包方式辦理，於 111 年 10 月 12 日完成決標，112 年 2 月 10 日進行假設工程施工，並於同年 8 月 3 日取得雜項執照正式動工，履約期限共計 1,569 日曆天。設計與施工階段即同步導入智慧工地科技系統，實現施工資訊即時化、風險預警自動化與管理流程數位化。透過本案之實務導入，驗證智慧工地科技

於本公司其他工程之可行性與實用價值，對後續同類型建案具有高度參考性與推廣潛力。

智慧工地科技導入項目

本工程為落實智慧工地理念，針對施工管理中安全、品質、人力、溝通等關鍵面向，導入多項 AIoT 與數位化技術，實際應用如下：

AIoT 智慧工地系統

本公司與中興保全科技股份有限公司和銘祥科技實業股份有限公司分別合作開發 AIoT 科技智慧化營建工地管理平台，如圖 3 及圖 4 所示，整合各項 AI 系統於「智慧工地管理平台」中，平台具備儀表板功能，可即時呈現潮汐資訊、所有文件送審狀態、現場總人



圖 3 AIoT 智慧工地系統（一）



圖 4 AIoT 智慧工地系統（二）

數、現場車輛總數、人員異常總數、環境監控警示超標次數、工地安全告警等功能，使工地管理實現全方位資訊可視化與數據化。

AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台

透過此平台，工地管理者可一覽所有 AI 系統監控結果，並自動產出每日巡檢報告與工作者出勤紀錄，如圖 5 所示。相較過往由紙本手寫紀錄、Excel 彙整，資訊整合時間從每日約 2 小時降至 30 分鐘以內，亦有助於後續監造單位、專案管理單位或業主查核透明度。

AIoT 雲端管理系統 – 自動化安全監測

本工程為確保工區與施工影響範圍內之建築物於施工期間之安全，於工區與施工影響範圍內規劃佈設適當之監測儀器，確實掌控施工期間安全，並降低工作者

在危險場所收測數值，現場自動化監測站設備有水位觀測井、電子水壓計（ELP）及支撐應變計等三項，連接 4G 自動化集錄器，經由網際網路傳送到手機 APP 監看、工務所顯示平台或專屬網頁，現場自動化安全監測與雲端系統架構如圖 6 所示，有助於後續監造單位、專案管理單位或業主查核透明度，如圖 7 所示。

智慧周界安全圍籬

本工程採用中興保全科技股份有限公司所建置之智慧型周界安全圍籬系統，進行工地周界防護與監控管理。系統具備全天候影像監控與入侵偵測功能，能即時辨識可疑入侵行為，並透過警報系統即時通知現場管理人員。整合視訊監控與智慧判斷技術，提供施工區域全面性之安全防護，有效降低非授權人員進入風險，強化工區安全防線，如圖 8 所示。



圖 5 AIoT 職業安全衛生告示牌雲端平台

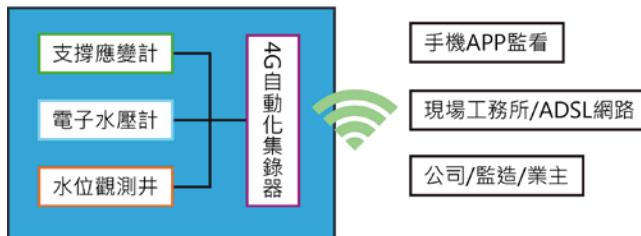


圖 6 現場自動化安全監測與雲端系統架構圖

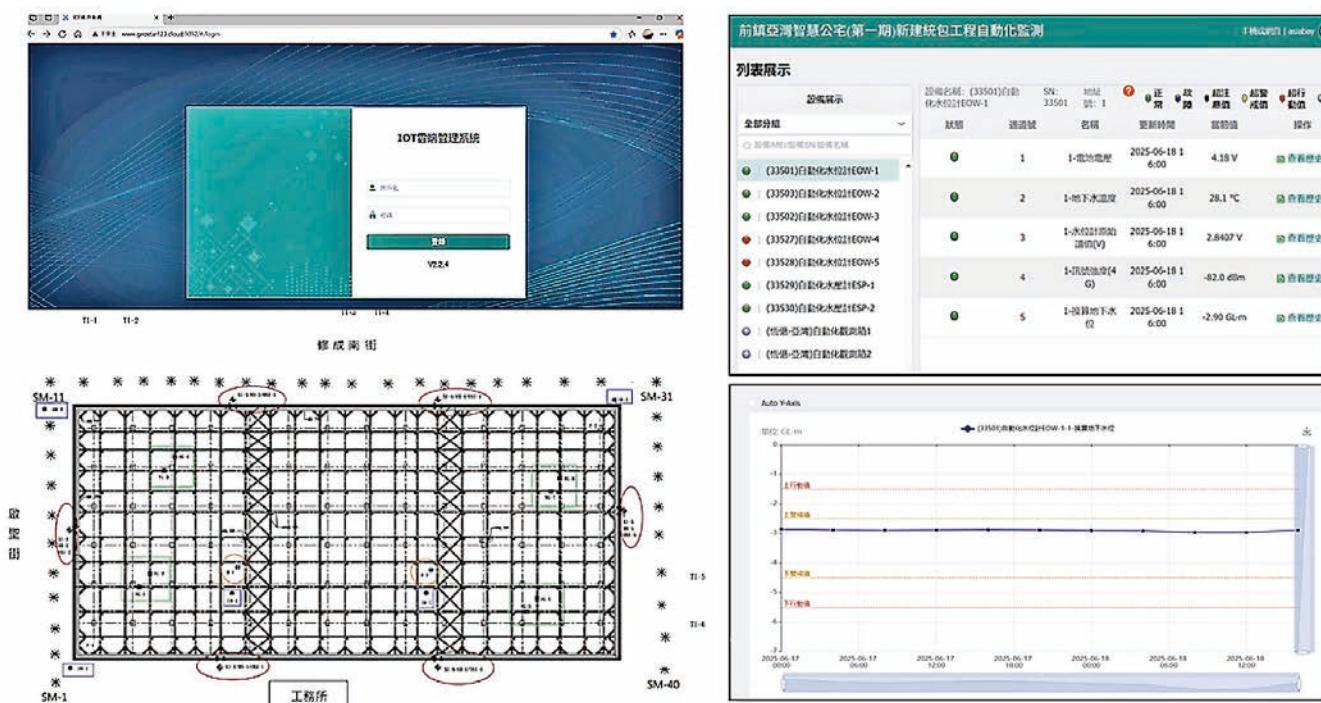


圖 7 AIoT 雲端管理系統 – 自動化安全監測



圖 8 智慧周界安全圍籬

AI 人員臉部辨識系統

為強化工地出入管理與提升安全管控效能，本工程由職安組建置完整之作業人員人臉資料庫，並導入 AI 人臉辨識技術執行出入口身分驗證作業。系統能針對所有進出工區人員即時辨識與紀錄，取代傳統人工現場查看作業與感應裝置，大幅提升進出控管之精確性與效率，並有效防堵非授權人員進入施工區域，每天收工後再次檢查 AI 人員臉部辨識系統是否遺留人員未出工地，達成預防性風險管理目標，如圖 9 所示。



圖 9 AI 人員臉部辨識系統

智慧洗車台 – 車輛管制系統

鑑於營建工程常見施工車輛駛出工區後造成週邊道路污染之情形，易引發環保單位開罰及民眾陳情爭議，本工地特於大門內側設置智慧洗車台，結合車輛識別與時間管控機制，以加強污染預防管理。系統設定車輛須於洗車平台停留 30 秒以上始得離場，大門上設置號誌燈供司機辨識，若於規定時間內提前駛離，設置於大門上方之 CCTV 將即時拍攝車牌影像，並透過 LINE 推播功能通知工地管理者。管理者將依系統紀錄立即開立警告單予該承攬廠商，並持續追蹤其後續是否涉及污染道路情形，以落實車輛出入管理與環境保護目標，如圖 10 所示。

AIoT – 智慧環境監控系統

本公司與銘祥科技實業股份有限公司合作建置 AIoT 智慧環境監控系統，於工地 AI 貨櫃外側設置溫度、濕度與空氣品質等多項感測模組，進行施工環境即時監測。該系統透過雲端整合平台連結周界安全圍籬與 AIoT 物聯網架構，可自動驅動相應之環境防護設施（如抑塵、降



圖 10 智慧洗車台 – 車輛管制系統

溫或警示裝置），依即時監測數值進行調節控制。此智慧化監控機制有助於降低施工對鄰近環境之衝擊，並強化工區綜合環境品質管理效能，相關監測統計數據及分析可作為後續施工期間的環境防護作為，如圖 11 所示。

施工架監測預警系統－無線壁連桿

墜落、倒崩塌、物體飛落是施工架最常見的幾種災害類型。根據勞動部 10 年間職業災害統計資料顯示，營造業職災占全產業十年平均比率在 50% 以上，其中，以施工架為媒介物的災害比率最高，約為營造業之 15%。本工地為強化高架作業之結構穩定與風險預防，於施工架關鍵連接處設置「無線壁連桿感知器」，透過無線通訊方式連接至雲端安全監控平台，即時監測壁連桿之連接狀態與結構穩定性。系統具備異常預警功能，當數值異常時可立即推播至管理人員手機 APP，進行即時通報與處置，有效達成預警管理與倒塌事故之預防，如圖 12 所示。

導入成效分析

本工地導入多項 AIoT 與智慧工地科技，針對施工安全、人員管理、施工品質、環境維護與資料整合等面向，皆展現出明顯成效，具體分析如下：

安全監控效率提升

透過 AI 人臉辨識系統及電子圍籬等措施，工地出

入控管與周界安全防護顯著強化。每日出入人員皆須經過 AI 驗證與即時紀錄，有效杜絕未授權人員進入，並透過 LINE 推播機制即時預警異常事件，提升現場反應速度。施工架感知系統亦成功辨識結構異常狀況，達成預防性警報目的。

勞動管理精準化

導入 AI 系統後，工作者進出資料皆由系統自動判讀與紀錄，出勤資訊每日自動彙整，減少人工紀錄與比對時間約 75% 以上。人員異常（如遲到、未刷退）皆即時告警並回報，增進人員管理準確性。

施工品質與風險預防同步提升

自動化安全監測系統（含水位、支撐應變、水壓力等感測）可即時監控結構周邊變化，透過 APP 與監控平台同步更新資料，提升風險反應即時性。由原本每週監測改為全天候即時掌握，有助減少潛在危害發生率。

環境污染事件有效抑制

智慧洗車台與空氣品質監控聯動塔吊或施工圍籬噴霧系統，降低道路污染與揚塵風險。針對車輛提前離場之違規情形，即時拍攝並回報，開立警告單件數明顯減少，周邊居民陳情案件亦大幅下降，顯示環境友善度提升。

資訊整合與管理透明化



圖 11 AIoT－智慧環境監控系統



圖 12 施工架監測預警系統－無線壁連桿

透過智慧工地管理平台，各類監測資料（人員、車輛、環境、告警）皆可即時匯總於儀表板，並自動產出巡檢日報。過去每日需 2 小時人工彙整資料，現今僅需 30 分鐘內即可完成，亦有助於監造單位或業主即時查核與決策支援。

本工地於 114 年 4 月 28 日向全國營造業職業安全衛生促進聯合總會申請認證「安全看得見，營造業減災運動實施工程標籤（南促 -114-0020）」，並於 114 年 5 月 29 日協助高雄市政府勞工局勞動檢查處、高雄市政府都市發展局、內政部國土管理署南區都市基礎工程分署及國家住宅及都市更新中心共同舉辦「114 年度營造業科技防災工地觀摩」，當日觀摩會充分展示各項智慧工地科技，且現場工程師在各示範站分享執行成果，共同協助政府機關推動智慧工地科技應用，加強高雄市營造工地作業安全。

結論

本公司近五年所承攬工程總金額近壹仟億元，現今員工人數達 1,200 餘人，「前鎮亞灣智慧公宅第一期新建統包工程」是第一件成功導入多項智慧工地科技，實證智慧管理系統於實際施工現場具備高度可行性與實質成

效。本工地透過 AI 臉部辨識進出管理、環境監控、施工架預警裝置、洗車台聯動系統、電子圍籬等多元數位化應用，有效強化工地在安全、品質、人力控管與資訊溝通等各層面之整體效能。各項系統經由本公司與協力廠商共同研發平台整合，實現資訊視覺化、警示自動化與管理透明化，顯著減輕現場人員負擔，提升工作效率與風險預防能力，並已推廣應用於本公司其他工程專案。

本工地亦與國立中山大學環境工程研究所合作，提供場域進行「營建工程排放係數估算及減量效益評估」研究，藉由科技化設施收取工地環境監測數據與實際施工活動，建構營建作業與環境負荷之對應關係，探索智慧工地在環境友善施工上的應用潛力，研究計畫成果提供行政院環境部後續政策推動之參考。

綜合評估，本工程智慧工地科技導入已展現初步成效，相關標準配備設施已推廣至本公司其他工地使用，不僅讓其他工地同步提升施工管理效率與安全水準，亦符合產業淨零轉型之長期目標。未來隨著相關法規與標準之逐步建置，智慧工地科技可望普及至更多公共與民間工程場域，成為推動營造產業數位化、自動化及永續發展的重要動能。



亞新工程顧問股份有限公司
MOH AND ASSOCIATES, INC.
台北 | 台中 | 高雄 | 仰光 | 曼谷 | 新加坡 | 香港 | 北京

運輸工程 | 大地工程 | 數位工程 | 結構工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程

Tel: (886-2) 2696-1555 Fax: (886-2) 2696-1166 Website: www.maaconsultants.com E-mail: maagroup@maaconsultants.com



政府採購 不限於工程， 機關招、決標，沒有容錯空間

高銘堂／前泛亞工程公司總經理、前中興工程顧問社執行長、前兼任工程會申訴審議委員

金額龐大的工程合約，常是政客的最愛

工程合約因為金額龐大，項目繁多，下包具多樣性，金流不易詳查，操弄工程發包，藉以取得權力和金錢，變成政客的最愛。在很多國家，營建工程廠商與執政者的關係相當曖昧，選舉時提供經費讓政客贏得政權，平時則奉獻執政者開銷，方便他們確保權力，回報就是高額的工程合約，與可以亂搞、不受追究的絕對安全感（impunity）。

舉例來說，像巴西的營建財團「Odebrecht」行賄拉丁美洲各國，甚至非洲的莫三比克與安哥拉政府，取得百億美金金額工程合約。到最後各國高層都要看他們臉色，依他們的推薦，任命建設、司法、情治等相關官員。錢、權勾結，反過頭來再撐起對財團與政客的保護傘。

但百密一疏，2014 年以小小的加油站的洗錢失誤，竟讓弊案暴光，扯出南美許多總統、總理、部長、議員、市長、銀行家涉及賄賂、包庇或圖利，結果是這些「上流人物」被求刑總共超過兩千年。也發生了許多命案，包括哥倫比亞該集團合作夥伴高管的氰酸鉀命案、秘魯前總統賈西亞的自殺，以及幾個南美國家前總統、總理的被關。到三年前，這個世紀弊案，才以曾被判 12 年，並入獄服刑的巴西總統魯拉，藉民粹獲釋，重返政壇，暫告一段落。

有利標、BOT 或 PFI， 在台灣開始發展不久

台灣政商勾結的程度，應該還沒那麼嚴重，因為：(1) 政黨對抗，媒體獵巫，民意代表與社會大眾會特別去注意各級政府工程發包是否有問題。(2) 長久以來，實行最低標決標制度，不論因果、對錯，競爭激烈，政客、官僚與商人，較難有操弄的空間。(3) 在儒家文化裡，商人是士農工商，四民之末，營造廠或許會因有利標、BOT（興建、營運、轉移）或 PFI（私人財務倡議）而壯大，但還不敢做出頭鳥，話語政府。

但現階段有利標決標案件以金額計，在中央機關與國營事業方面，已接近案件總金額的 90%，六都及各縣市也因財政收支劃分法修改，主辦工程的級數、金額，越來越高，有利標實施比例也會攀升，再加上「山也 BOT，海也 BOT」，社會大眾對政府、營建產業的信任應該到達臨界點了。

「最低標」與「有利標」的反覆循環

在公共工程以最低標決標的情況下，廠商為取得標案，會拼命去壓制工料價格，刻意忽視施工條件，為利潤與生存會放棄專業，導致更多對專業無知的投機者加入這個行業，破壞力更大，造成惡性循環。

在預算、底價都是根據前次招標結果編列的情況下，業主、審計、主計乃至社會大眾常說，砍頭的生意有人做，賠錢的生意無人做，標價就是市場行情，廠商自己填的標價，怎麼可以抱怨工程價格太低？

很多老闆從投標開始就行險圖倖，有了蹊蹺，面對罰款、虧損，或公司倒閉等災厄，固是咎由自取，不值同情；但社會大眾，沒作錯事，卻要忍受工程延滯，品質低劣，與安全堪慮等的痛苦，實在是不公平。

台灣公共工程曾試行「最有利標決標」方式，但執行結果讓政府與社會大眾有疑慮，試行幾年到了2006年3月，行政院鑒於「採最有利標也已面臨不小的問題，且著有案例」，希望以後公共工程「最低標為原則、最有利標為例外」。

持續採行最低標決標制度的結果，根據國際知名顧問公司的調查，針對營建工程造價水平，台北市與胡志明、雅加達或印度的班加羅爾等差不多，遠落後於香港、首爾，上海等東亞城市，遑論西方先進國家。在6、7年前還是這樣。

「有利標」現在台灣盛行， 會是「造王」的利器？

看到這個窘境，2009年5月工程會又發函，同意「機關辦理採購之決標原則」，回到「政府採購法第52條及第6條規定為適當之採購決定」，即不反對最有利標決標模式。自2017到2021年，以最有利標決標的案件數不超過30%，金額比例也大致在這個範圍。

這幾年勞力短缺、物料上漲，許多工程流標，於是政府把預算調高、放寬外籍勞工進口，將許多標案決標方式從最低標改為有利標，讓投標者不再在標價上做競爭，以良善的執行計畫、承諾、和工程實績，作為得標根據。

雖然法規給了工程機關及為其服務的PCM，很多招、決標方式的選擇，但當順利招標成為施政目標時，根據統計，2021至2023這三年，中央政府與國營事業的工程招標，以最有利標決標的案件已到達45%以上，到2024年，決標比例已經到了70%，以金額計算，就幾乎90%了。

前面所說台灣政商勾結的嚴重程度，應該還不到

廠商可以喊水成凍的地步，但有利標在短期間內的推行，風行草偃，營建產業的大翻身，會不會讓社會大眾以為有利標是「造王」的利器？

預算編列與營造工程物價的差異

比較2025年與2020年營建業排名前30名的公司報告，許多公共工程承包商的營收、利潤、員工人數，在這段時間有耀眼的成長，而且這還沒反映出因預算提高，新承攬的高價金工程，尚未消化的事實。為什麼承包商在短短的幾年可以擺脫虧損，歡慶榮景？關鍵或在以有利標決標，預算幾乎就是決標價。那麼值得思考的是，這幾年預算調整，相對於物價上漲的幅度，這差異有多大，該不該存在？

以主計處每年頒布的「各機關一般房屋建築費編列標準表」，6~12層的住宅宿舍每平方公尺的預算標準為例，110年為26,474元，114年則為51,900元，增加幅度將近兩倍。而這段時間的營造工程物價指數，則由100上升到111.81。如果用「最低標決標」的思維來看，好像有漲五毛，給一塊的味道，很不好解釋。

工程預算等於是對招標時標價上限的預測，必須反映出營建廠商承攬工程的意願與市場供需狀況。如果流標，編列預算的邏輯再怎麼正確，也沒有意義。廠商現已不再為取得標案，壓制工料價金，且把從前為搶標，不敢列入或儘量壓低的管理費、風險準備金，還有合理利潤等加了進來。從專業角度來看，這是對的。並沒有證據顯示金錢在不該碰它的人轉來轉去，也就是說預算標準與物價成本的差異不算是荒謬的。

政府標案的開放本質與有利標的原罪

政府標案，不管是工程、產品或服務採購，應給所有的人平等機會；所以資訊必須開放，程序必須明示且恪遵、競爭力包括「資格」、「技術」、「價格」，必須符合政府的最大利益。最低標的招、決標辦法可以很清楚，大家都看得懂；而有利標卻可能包括很多複雜的步驟與主觀的判斷，實質內容與表象可能不同，又不能直率的解釋，預算、成本與標價，有其刻板的一面，也有無法定型的部分，這是有利標的原罪。

有利標會不會遭大眾指指點點，在於業主能不能客觀、公平的去評斷每一個案廠商在投標時提出的資料？這很不容易，而且業主在不同的時機，對類似的工程，就會有不一樣的需求或偏好。備標者出大錢，花長時間，揣摩業主與競爭者想法，準備服務建議書，結果出乎意料，失望與憤怒之餘，一定認為有些機關首長或評審委員們，不會很客觀。

有利標的實施也有些時間了，自工程規劃開始，設計、估價、成立預算、招標資格、審標等，有些投機分子或掮客或可找出竅門，他們如在少數案子僥倖得逞，就會渲染，拉攏更多的廠商與他們合作，繼續橫行，於是三人成虎。工程單位常以「清者自清」，「謠言止於智者」被動防衛，這是不夠的。倒不如針對各項工程的特性，採用適當的招、決標方式來保護政府的財政利益，與公部門的名譽。

面對公共工程可能的財務緊縮， 招、決標方式必定要修正

當前局勢是政府要面對國內外許多挑戰，經濟繁榮與成長有變數，財政收入很難持續成長，各項開支又要增加，投入公共工程的經費，一定會減少。所以工程主管機關與營建業必須合作，撙節開支，確保國家建設能夠持續進行。雖然有利標的實行不代表承攬者可以獲得暴利，但依此方式決標的案件數、工程金額比例似已過高，值得關注。這兩年地位與業務狀況，已較前改進許多的工程公司大概不會反對吧？

所以我們建議

- 提高最低標決標的比例：特別是比較傳統、規格明白，方法或程序不會造成品質差異的工程，如辦公廳舍興建或整修、道路、軍警制服、管線等，可以採最低標決標，壓低工程造價，節省政府支出。招標機關也不必參與裁量，對維護政府的形象有很大的幫助。
- 工程機關最怕的是廠商標價過低，執行時品質、進度脫離掌控。如果機關在招、投標時能夠了解廠商提出的計畫，再決標，情況會好一些。有利標的決標價，會比最低標的價錢高。但從最低標到有利

標，其間還是有其他的招、決標方式，讓機關有機會可以不必負擔這個差價。比如說機關可以設定評分最低標準，淘汰不合格的廠商，或者決標給「標價除以評分」商數最高的廠商。如此，可以兼顧廠商的服務品質，也能維持投標者的競爭態勢。

當然，有些機關曾經試行這類辦法，但遭到要被淘汰，或低分者的抗議，所以認為一樣要面對壓力，乾脆就採用有利標，但這樣競爭差價就不見了。

- 對工程的需求，不能長考不決，或首長官大學問大，動輒變更，編預算時留下模糊空間，讓得標廠商有隙可乘。估價要確實掌握。常看到有些機關，怕工程標不出去，或因別的原因，無論是工或料，都是用過去幾年最高的價格來做預算。在最有利標的狀況下，有意或無意地用固定價格，或把價金評比的權重拉得很低，讓廠商利益最大化。他們的邏輯，認為評比主要是在價格以外的項目，如承諾到這個工程的施工資源：團隊、機具、工種及人數，或如廠商的組織、財務能力、安衛、完工紀錄、工程經驗等，幾乎是免除了投標廠商的競爭。

香港的評比，價格要佔到 50%，這一點可以供作我們的工程機關參考。

- 近年台灣的投標，常有獨家，或只有一、兩家投標，明顯有競爭不足的情形。原因之一，就是想投標的公司或團隊者不符積極或消極資格。有利標方式決標時，廠商的服務建議書要寫出業主想知道的消息，所以積極資格，不必訂得太刻板、嚴格。消極資格的限制，有些和營造法規有關，或許應該修法。

如果招標機關，允許共同投標，以廠商的條件加總，如資本額和實績，納入資格。增加選擇，對業主有利。

- 業主要特別注意，有利標場上許多常勝軍，得了標後就是轉包，服務建議書承諾的許多施工資源，其實還是要甩給真正做工的下包，而只有他們一直有資格。這樣的有利標，不會讓輸掉的對手，或是社會大眾服氣。



6. 依「最有利標評選辦法」，機關首長要決定「評選委員會」委員名單，無論是「總評分法」、「評分單價」、「序位法」，優勝廠商就由委員決定，所以機關首長在決定委員名單時，若有私心，就可能操縱分數、決定廠商優先序位，就產生了弊案。在十餘年前，檢調有所謂「蠹蟲專案」，著名學者教授，亦難保證完全公正，何況是指定的內部委員？
7. 實務上來說，社會大眾會認為政黨公職、民意代表，或民選官吏，對有利標優勝廠商有決定權。台灣的政黨並不只是柔性的選舉組織，只要執政，無論是在中央，六都、縣市或鄉鎮市，都應約束黨員，不得逾越分寸，影響各機關採購與發包！

政府採購不限於工程， 機關招、決標，沒有容錯空間

其次，有利標評選，雖然有詳細的法條規定，但「評選委員會」與「工作小組」（機關、PCM、顧問公司）的定位、分工與權責，實務上不是很清楚。評選委員會在評選項目、子項，及其配分、權重，如何訂定，當然有決定權，但當其載明於招標文件，投標者填具資料，經工作小組評分後，除非發現錯誤，評選委員會不能變更。但目前有些有利標，評分權責完全掌控在「評選委員會」各委員身上，尤其是依序位法評定優勝廠商者，工作小組樂得無事。也因此，「已有內定」之傳聞，甚囂塵上。此對「評選委員會」與「工作小組」成員都不好，應各有權能，共同負擔責任。

鹽下：

歐洲中古時鹽巴很貴。貴族晚餐，鹽罐通常放置於餐桌的中央，比較有身份地位的，坐在鹽罐正前方（above the salt），拿得到鹽巴；而坐在鹽罐下方（below the salt）的，則是地位比較低的侍從、小地主或農民等。



淡江大橋 基樁工程排碳 特性分析

蔡富仔／中興工程顧問股份有限公司環境工程部 組長

陳奕伸*／中興工程顧問股份有限公司環境工程部 工程師

近年來節能減碳、氣候變遷及淨零碳排議題已成為國際共識，我國自 2012 年起推動公共工程碳管理工作，而其中「淡江大橋及其連絡道路新建工程（第 3 標）」之施工階段工程碳足跡盤查作業亦刻正執行中。淡江大橋工程係首屈一指之國際性指標工程，施作內容複雜且具高度之獨特性，有鑑於淡江大橋工程基樁已全數施作完成，且碳足跡盤查工作執行迄今，已完成階段性資料蒐集作業，故本文以淡江大橋基樁工程為例，針對橋梁樁式基礎之全套管基樁工程項目進行排碳量、排碳特性分析及減碳效益評估，進而產出基樁工程排碳參數。依據階段性分析成果，樁徑 1.5 m 基樁單位體積排碳量約為 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，直徑 2.0 m 及直徑 2.5 m 之基樁平均單位體積排碳量則同樣皆為 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。

基樁工程排碳占比以材料為主要來源，其中又以水中混凝土約 56% 為最高，竹節鋼筋約 30% 次之，機具排碳占比約 9%；基樁施作之機具能耗會受工程地質條件差異之影響，並以岩體地質之機具能耗明顯高於粉砂土地質，淡江大橋工程基樁施作單位體積能耗率平均約 11.46 L/m^3 ；另外，承載力需求亦影響結構與量體之設計，針對基樁單位容許承載力與排碳量進行皮爾森積差相關性分析，相關係數（R 值）結果為 0.84，顯示呈現高度正相關。

淡江大橋工程基樁以水中混凝土使用之 IP 水泥具最高之減碳效益，其採用飛灰與爐石粉取代部份 I 型水泥之減碳量約 $34,260.37 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 65.28%；基樁圍束區採螺旋箍筋工法相較於閉合彎鈎工法之整體減碳效益約 $485.10 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約 20.45%；另外評估以工區場電替代燃油發電機，作為基樁鋼筋加工之電力來源，其減碳潛勢約 $12,206.31 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 31.78%。

關鍵詞：淡江大橋、碳足跡盤查、基樁工程、全套管基樁、節能減碳

前言

因應氣候變遷及淨零排放趨勢，全球皆面對迫切之減碳需求及淨零目標，各國無不積極投入碳管理及減碳領域，截至 2025 年 6 月 30 日已有約 139 個國家、285 個城市及 1,199 家企業宣示 2050 年前達「淨零碳排」目標^[1]。國際上針對工程碳管理面向之實務，包含如挪威奧斯陸推動之「零排放工地」案例，以及英國公路公司（National Highways）「淨零公路計畫」，除了規劃階段性目標以持續追蹤執行進度與成果，英

國公路公司亦針對高碳排之預拌混凝土、鋼材及瀝青混凝土提出淨零路徑圖。

我國《氣候變遷因應法》（以下簡稱氣候法）於 112 年 2 月正式公布施行，而行政院公共工程委員會（以下簡稱工程會）為落實公共工程節能減碳，除了自民國 102 年起推動公共工程碳排放量估算試辦案例，亦持續規劃公共工程整體性減碳策略，要求各主管部會訂定不同類型公共工程減碳作業指引，並辦理碳管理相關工作；為此，工程會碳排資料庫已於 113 年 5 月公告上線試行，提供各部會進行碳揭露之參考。此外，工程會於 113 年 7 月公告修正後之公共工程金質獎頒發作業要點，評審標準增列具體減碳成效與具體綠化成效等項目。

* 通訊作者，yishen@mail.sinotech-eng.com

因應國家減碳政策推動及公路局工程碳管理之發展，北區公路新建工程分局於「淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）」辦理工程碳管理與碳足跡盤查工作，希冀藉由工程盤查作業之執行蒐集及累積本土化工程碳排放資訊，以瞭解我國西部北區公路工程生命週期碳排放情形與工程排碳特性，進而有效落實減碳策略、達成減碳目標。

工程簡介及盤查範疇

淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）（以下簡稱淡江大橋工程），總長度2.035公里，跨越淡水河出海口，主要串聯台61線（西濱快速道路）及台64線（八里新店線快速道路），自108年2月23日開工，截至114年6月之工程進度約84%；主要工程內容、規模、型式及工法如表1所示，其中與本文分析標的相關之工項為橋梁工程下部結構樁式基礎，而工程之基樁型式則皆為場鑄混凝土全套管基樁^[2]。

表1 淡江大橋（第3標）工程內容簡介

位置	主要工程內容	工程型式	長度(m)	工法
八里端 引橋段	高架橋梁 匝道路堤	上構：PC箱型梁 下構：樁式基礎	910.0	場鑄逐跨 工法
主橋段	斜張橋	上構：鋼箱型梁 下構：樁式基礎	920.5	吊裝工法 / 場撐工法
淡水端 引橋及匝道	高架橋梁 匝道路堤	上構：PC箱型梁 下構：樁式基礎	335.0	場鑄逐跨 / 場鑄工法

註：基樁型式皆為全套管基樁。

淡江大橋工程施工期間碳足跡盤查範疇如圖1所示，涵蓋工區及非工區，工區包含工程材料使用、運輸、能資源使用、碳匯變化及廢棄物處理，非工區則為施工管理單位之辦公室。

基樁工程排碳量計算方法

系統邊界

淡江大橋工程基樁設計規格彙整資訊如表2所示，依工區可分為八里端、河中段及淡水端，八里端及淡水端工區依位置可進一步分為引橋段、公車道、匝道、自行車道及擋土牆（機車道僅淡水端）。基樁規格包含直徑1.5 m、2.0 m及2.5 m，並依各位置地理條件（如岩盤深度）設計不同長度之基樁；而河中段因包含主橋塔施作，其所需之承載力較高，故基樁設計長度及體積亦較大。

表2 各工區基樁設計規格彙整表

工區	位置	基樁規格			總體積(m ³)
		直徑(m)	樁長(m)	支數	
八里端	引橋段	1.5、2.0	25~69	257	46,409.77
	公車道	1.5、2.0	23~72	20	3297.89
	匝道	1.5、2.0	16~54	34	3503.66
	自行車	1.5	12~53	72	4325.97
	擋土牆	1.5	20~30	8	311.02
河中段	主橋段	2.0、2.5	46~71	188	42,884.70
	引橋段	1.5、2.0	20~40	56	5,549.62
	公車道	1.5、2.0	15~60	32	3,951.34
	匝道	1.5、2.0	16~35	52	4,255.29
	自行車	1.5、2.0	12~19	10	444.14
淡水端	機車道	1.5、2.0	10~55	35	2,824.88
	擋土牆	1.5	10	32	565.49

註：基樁型式皆為全套管基樁。

參考歐盟營建產品之產品類別規則（Product Category Rules, PCR）EN15804工程生命週期階段，主要包含產品階段（A1-A3）、建造階段（A4-A5）、使用階段（B1-B5與結構物相關及B6-B7與操作相關）、壽命終了（C1-C4）及系統邊界外利益與負荷（D）等階段。本文依此設定基樁工程系統邊界如圖2所示，包含產品及建造兩階段，即工程材料（A1-A3）、運輸（A4）及施工能耗（A5）^[3-6]。



圖1 工程施工期間碳足跡盤查範疇

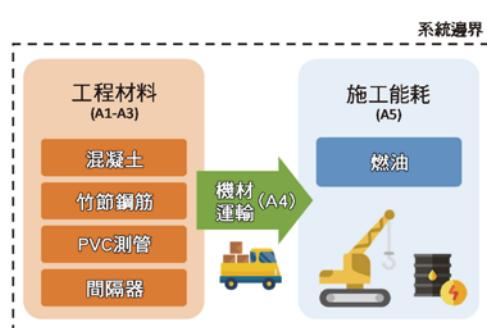


圖2 基樁工程系統邊界

彙整實際盤查內容，工程材料主要使用項目包含混凝土、竹節鋼筋、PVC 測管、間隔器等，另基樁施工過程使用之鋼套管及特密管由於可重複利用，屬於資本財故不納入系統邊界；運輸包含混凝土與竹節鋼筋等大宗材料之運輸以及施工機具之運輸；施工能耗則為施作過程機具使用之燃油。

活動數據及排放係數

排碳量計算方法為排放係數法，即「排碳量 = 活動數據 × 排放係數」，活數數據蒐集項目包含各類工程材料數量、運輸活動量及施工機具能資源使用量等，基樁排碳量計算使用之排放係數如表 3。

混凝土係數來源為淡江大橋工程混凝土供應商之盤查結果，竹節鋼筋係數則參考鋼筋供應商之產品碳足跡證聲明書；PVC 測管及間隔器則是參考商用軟體 Gabi 之 Gabi-PE 係數資料庫選用適當的係數。運輸之排放係數部分，竹節鋼筋與施工機具運輸係採用國內其他工程全拖車調查結果，預拌混凝土車運輸係數則為淡江大橋工程供應商盤查結果。施工機具、運具與設備所使用之燃油採用環境部產品碳足跡資訊網^[7]所公佈之最新係數。

功能單位

淡江大橋工程基樁依工區位置可分為八里端、河中段及淡水端，基樁直徑包含 1.5 m、2.0 m 及 2.5 m 等 3 種尺寸，為進行不同直徑尺寸基樁的排碳量分析及建立統一的比較基礎，故以 1 m³ 作為基樁單位體積排碳量的功能單位。

基樁工程排碳特性分析

主要排碳源（項目）鑑別

淡江大橋工程基樁之主要排碳源鑑別與各排碳源活動數據蒐集內容，說明如下：

1. 混凝土：淡江大橋工程使用 350 kgf/cm² 水中混凝土，並以混凝土實際投入量作為活動量計算之依據。
2. 竹節鋼筋：淡江大橋工程使用 SD420W 竹節鋼筋，並以施工圖數量作為活動量計算之依據。
3. PVC 測管：淡江大橋工程使用 PVC 膠管（管徑 2 英吋）作為基樁測管，並以施工圖數量作為活動量計算之依據。
4. 間隔器：淡江大橋工程鋼筋間隔器為鋼材質，以基樁設計長度作為活動量計算之依據。
5. 運輸：包含混凝土與鋼筋等主要大宗材料以及施工機具之運輸，運輸距離採 Google Map 預估值，運輸量則採材料與機具能耗實際投入數量作為活動量計算之依據。
6. 施工能耗：淡江大橋工程基樁主要使用之機具種類包含起重機、搖管機、挖土機、空壓機、發電機及拖板車；統計基樁施作期間之燃油使用總數量，再以基樁混凝土澆置數量 (m³) 作為基樁單位體積施工能耗之分配依據。

另考量氧氣、乙炔、二氧化碳及焊材等其他工程材料，對於整體基樁工程而言，其投入量及排碳量皆影響甚小，故於整體基樁工程排碳量占比結果中合併以「其他材料」呈現。

排碳量分析與排碳參數

本文依據基樁工程各項排碳源計算排碳量，施作總排碳量約 52,915.91 tCO₂e，各項排碳源占比如圖 3，最主要排碳來源為水中混凝土，占比達 56.28%，其次為竹節鋼筋約 30.35%，機具則約 9.26%，而機材運輸、PVC 測管、間隔器及其他材料占比分別約為 2.82%、0.85%、0.28% 及 0.16%。

各工區與位置之基樁數量、總排碳量及單位體積排碳量資訊如表 4 及圖 4，各工區之單位體積排碳量分

表 3 基樁工程排碳量計算使用之排放係數

項目	單位 (unit)	排放係數 (kgCO ₂ e/unit)	係數來源
350 kgf/cm ² 水中混凝土 (A 廠)	m ³	238.6954	供應商盤查結果
350 kgf/cm ² 水中混凝土 (B 廠)	m ³	222.0500	供應商盤查結果
竹節鋼筋	kg	0.8900	供應商產品碳足跡查證聲明書
PVC 測管	m	2.8213	Gabi 6-PE
間隔器	個	0.9730	Gabi 6-PE
全拖車	tkm	0.0996	國內其他工程盤查結果
預拌混凝土車 (A 廠)	m ³ km	0.4885	供應商盤查結果
預拌混凝土車 (B 廠)	m ³ km	0.4825	供應商盤查結果
柴油 (鐵路運輸與非道路運輸移動源)	L	3.5600	環境部產品碳足跡資訊網
柴油 (公路運輸移動源)	L	3.3200	環境部產品碳足跡資訊網
柴油 (固定源)	L	3.2900	環境部產品碳足跡資訊網

註：1. 因表格欄位寬度限制，僅列出 4 位小數。2. 淡江大橋工程基樁之水中混凝土使用 IP 水泥。

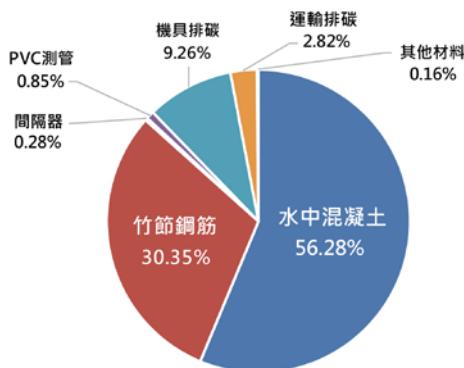


圖 3 基樁工程排碳量占比

別為八里端 $0.39 \sim 0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、河中段 $0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 及淡水端 $0.37 \sim 0.48 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，結果顯示淡水端擋土牆之單位體積排碳量為最高；整體排碳量以八里端引橋段為最高，河中段次之，主要係因河中段及八里端基樁受地理條件影響，所需長度較長且混凝土量體較大，導致整體排碳量亦隨之上升。

表 4 各工區基樁排碳量及單位排碳

工區	位置	施作數量 (支)	總排碳量 (tCO_2e)	單位體積 排碳量 * ($\text{tCO}_2\text{e/m}^3$)
八里端	引橋段	257	20,739.86	0.41
	公車道	20	1,339.34	0.40
	匝道	34	1,766.73	0.42
	自行車	72	1,875.63	0.39
	擋土牆	8	145.64	0.42
河中段	主橋段	188	19,000.01	0.42
	引橋段	56	2,473.92	0.40
淡水端	公車道	32	1,782.91	0.41
	匝道	52	1,944.40	0.41
	自行車	10	199.19	0.37
	機車道	35	1,328.13	0.42
	擋土牆	32	320.14	0.48

註：體積為實際混凝土澆置量。

本文另彙整各規格基樁直徑之施作數量、總排碳量及單位體積排碳量如表 5，平均之單位體積排碳量分別為直徑 1.5 m 約 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、直徑 2.0 m 及直徑 2.5 m 皆約 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，整體而言三種基樁直徑間之單位體積排碳量差距不明顯。

淡江大橋工程涵蓋八里端陸域側、河中段深槽區以及淡水端陸域側，其中淡水側之岩盤起始位置約介於河床下 $16 \text{ m} \sim 40 \text{ m}$ ，深度較淺；而八里側則相對岩盤深度較深，約於河床下 65 m 處，最深處約 74.5 m 始達岩盤。考量地質條件之差異可能影響基樁施作之機具能耗，故本文以淡江大橋工程基樁施作機具總柴油用量及量體進行換算，彙整單位體積之施工能耗率及單位施工能耗排碳量如表 6，單位體積能耗率平均約 11.46 L/m^3 ，若依據不同工區分別計算，以河中段 14.68 L/m^3 為最高，八里端次之為 9.90 L/m^3 ，淡水端則約為 8.92 L/m^3 。

表 5 各規格基樁排碳量

基樁規格 (直徑)	施作數量 (支)	總排碳量 (tCO_2e)	單位體積排碳量 ($\text{tCO}_2\text{e/m}^3$)
1.5 m	172	3,741.39	0.40
2.0 m	566	41,164.34	0.41
2.5 m	58	8,010.18	0.41

表 6 基樁工程單位體積之施工能耗排碳量

工區	燃油用量 (L)	基樁體積 (m^3)	單位體積能耗 (L/m^3)	單位體積之施工能耗排碳量 ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$)
八里端	627,936	63,436	9.90	32.57
河中段	671,590	45,744	14.68	48.30
淡水端	171,969	19,271	8.92	29.36
全工區	1,471,495	128,450	11.46	37.69

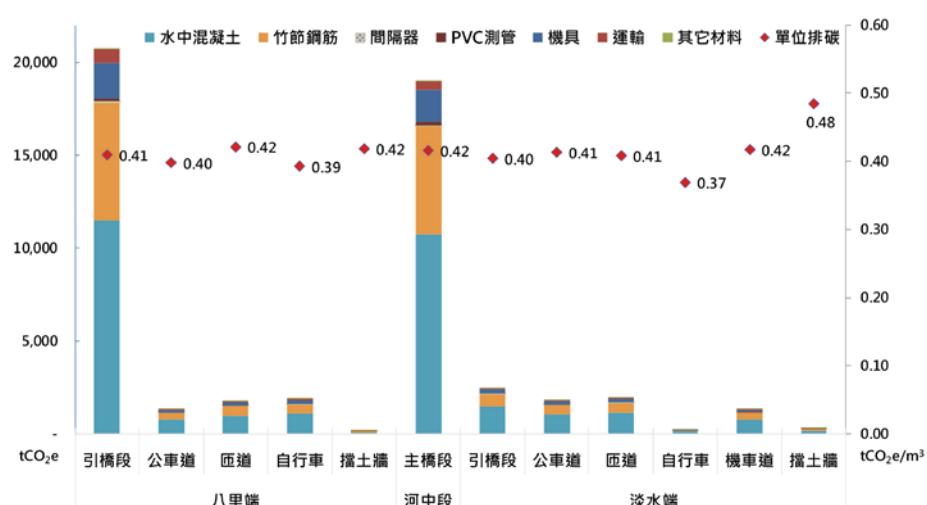


圖 4 基樁工程於各工區位置之排碳占比及單位體積排碳量

淡江大橋工程地質組成大致可為粉砂質細砂層及粉砂質黏土層、礫石層、砂岩及泥岩，惟淡水端及八里端兩側之地層分佈深度具明顯之差異。

本文彙整淡江大橋工程及國內各地區工程之地質組成資訊與基樁施作單位體積能耗如表 7，其中以地質條件包含岩體之工程案例（蘇花改^[8]、國 4^[9] 與淡江工程^[2]）基樁單位能耗較高，約介於 9.0 ~ 17.2 L/m³；主要地質組成為粉土、細砂與黏土之工程（國 5^[10] 與西濱南工程^[11]），單位體積能耗則相對較低，約介於 4.9 ~ 6.0 L/m³。

基樁工程設計考量因子包含橋梁與基礎型式、地質條件、載重條件及樁徑尺寸等影響，且因各基樁規格皆不相同，無法直接進行比較，故本文以淡江大橋工程基樁之單位承載力進行排碳量分析，如圖 5 所示，以河中段主橋塔基樁之單位容許承載力排碳量最高。針對基樁工程容許承載力與排碳量進行相關性分

析（Correlation Analysis），其皮爾森積差相關係數（R 值）為 0.84，顯示基樁工程容許承載力與排碳量呈高度正相關，另決定係數 (r^2 值) 為 0.70，表示容許承載力可解釋約 70% 之排碳量變異。

國內工程案例基樁排碳量分析

本文另彙整國內其他道路工程案例之基樁排碳量分析結果以供參照，案例包含台 9 線蘇花公路改善工程（以下簡稱蘇花改）^[8]、西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程（以下簡稱西濱南）^[11]、國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程（以下簡稱國 4）^[9] 及國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（以下簡稱國 5）^[10]。前述工程案例之盤查標別、基樁規模與排碳量資訊如表 8，基樁直徑尺寸大多為 1.5 m 及 2.0 m，基樁長度介於 7 m ~ 55 m。

表 7 基樁施作單位能耗與地質條件

工程	標別	區域位置	地質條件	單位體積能耗 (L/m ³)
淡江大橋	第 3 標	西部北區	<u>淡水側</u> +0 ~ -35 m：粉砂質細砂層及粉砂質黏土層 -5 m ~ -35 m：礫石層 -16 m ~ -40 m 及 >-40 m：砂岩、泥岩 <u>八里側</u> +0 ~ -60 m：粉砂質細砂層及粉砂質黏土層 -50 m ~ -65 m：礫石層 -65 m ~ -74 m 及 >-74 m：砂岩、泥岩	11.5
蘇花改	A1	東部	板岩、粉砂質板岩與硬頁岩	17.2
	A3		礫石、砂、泥、板岩與硬頁岩	13.2
	C1A		崩積塊石與片麻岩	9.8
國 5	E14	東北部	細砂、沉泥質細砂與黏土	5.9
西濱南	A	西部南區	粉土、細砂與粘土	4.9
	B			6.0
	C			5.2
國 4	C713	西部中區	砂岩、泥岩與砂頁岩互層	14.2
	C714		礫石、砂岩、泥岩與頁岩	9.0

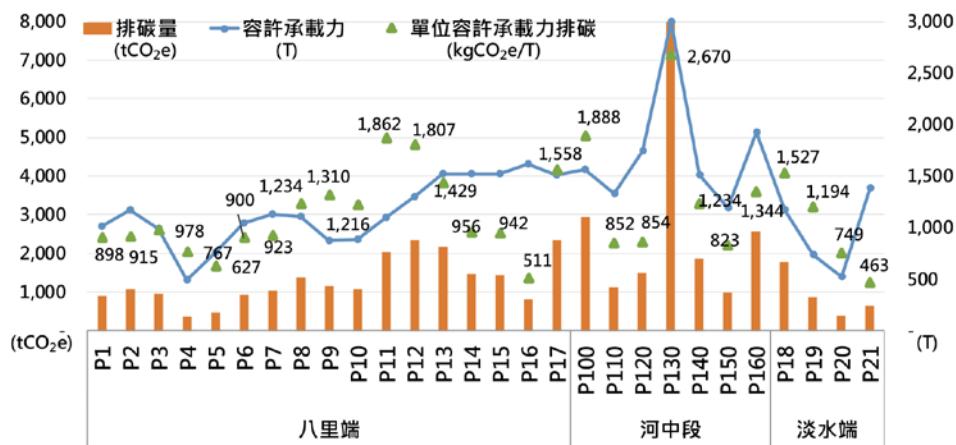


圖 5 基樁工程單位容許承載力排碳分析

表 8 各工程案例之基樁工程規模與單位排碳量

工程 簡稱	標別	基樁規格			總排碳量 (tCO ₂ e)	單位體積排碳量 (tCO ₂ e/m ³)
		直徑 (m)	樁長 (m)	支數		
蘇花改	A1	2.0	20、25、30	379	13,296.00	0.47
	A3			179	6,534.00	0.44
西濱南	C1A	1.5	22~35	54	1,409.30	0.53
	A	1.0	20~27	30	422.00	0.70
西濱南	A	1.5	41~53	468	20,076.00	0.54
	B	1.5	24~55	915	39,221.00	0.53
國 4	C		21~47	706	28,412.00	0.53
	C713	2.0	7~12	85	1,511.05	0.53
國 4	C714		20~36	336	13,402.96	0.48
國 5	E14	1.5	45	24	1,079.00	0.56
淡江大橋	第 3 標	1.5	10~55	172	3,741.39	0.40
		2.0	12~72	566	41,164.34	0.41
		2.5	65	58	8,010.18	0.41

註：1. 基樁型式皆為全套管基樁；不包含排樁；國 5 工程不含擋土牆基樁。2. 表列基樁長度規格不包含樁頭長度。

各工程案例之基樁工程單位排碳量及排碳源分析結果，說明如後：

單位排碳量

各工程案例之基樁單位體積排碳量分別為蘇花改工程 0.44 ~ 0.53 tCO₂e/m³，西濱南工程 0.53 ~ 0.70 tCO₂e/m³，國 4 工程 0.48 ~ 0.53 tCO₂e/m³，國 5 工程 0.56 tCO₂e/m³，整體如圖 6 所示，大致呈現單位體積排碳量隨基樁直徑尺寸增加而下降之趨勢。

排碳源分析

各工程案例之基樁排碳源占比分析結果如表 9，以混凝土排碳量占比最高約 58% ~ 69%，其次為鋼筋 22% ~ 36% 及機具 3% ~ 10%，間隔器、PVC 測管、其他材料及運輸占比則皆不及 5%。其中，混凝土及鋼筋

為最主要排碳來源（占比合計約 85% ~ 94%），機具之排碳占比僅次於前兩者，並以蘇花改工程直徑 2.0 m 基樁之機具排碳占比為最高（均超過 10%）。

基樁工程減碳措施與效益

依據淡江大橋工程基樁排碳特性分析結果，混凝土及竹節鋼筋為最主要排碳來源，故針對大宗材料的減碳措施一般亦被認為較具效益。以下分別計算水泥替代材料及基樁箍筋綁紮工法之減碳效益，另亦評估以工區場電替代燃油發電機之潛在減碳效益。

IP 水泥（含替代材料之水泥）

淡江大橋工程基樁之水中混凝土，其使用之 IP 水泥配比包含 I 型水泥及飛灰與爐石粉等替代材料。因

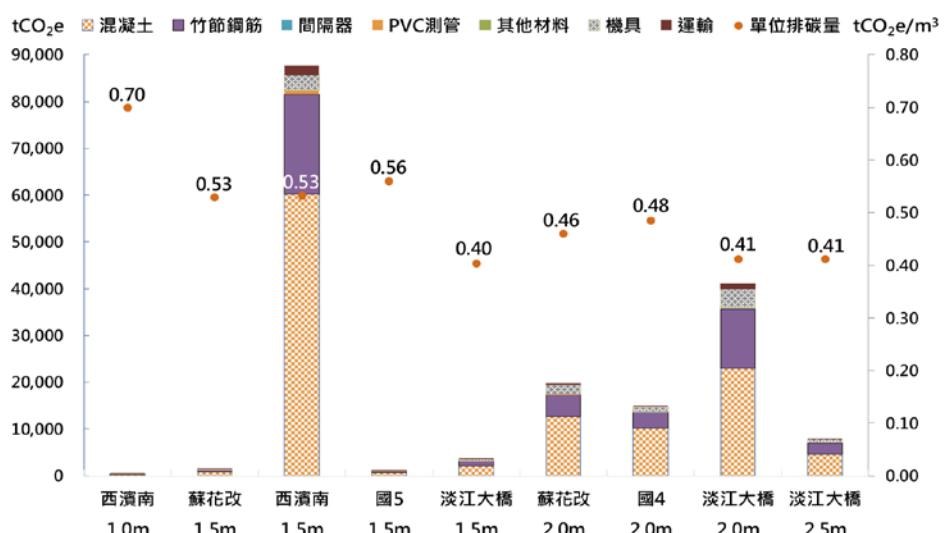


圖 6 各工程案例之基樁直徑尺寸與排碳量分析

表 9 各工程案例之基樁直徑尺寸與排碳占比

基樁直徑 (m)	工程 簡稱	排碳占比 (%)							單位體積排碳量 (tCO ₂ e/m ³)
		混凝土	竹節鋼筋	間隔器	PVC 測管	其他材料	施工能耗	運輸	
1.0	西濱南	57.82%	36.02%	—	1.66%	—	2.84%	1.66%	0.70
1.5	蘇花改	63.79%	27.74%	0.02%	1.63%	—	6.39%	0.43%	0.53
	西濱南	68.55%	24.40%	—	1.09%	—	3.63%	2.32%	0.53
	國 5	68.12%	22.43%	—	1.48%	—	3.99%	3.99%	0.56
	淡江大橋	56.64%	28.64%	0.48%	1.37%	0.16%	9.44%	3.27%	0.40
2.0	蘇花改	64.27%	23.17%	—	0.80%	—	10.30%	1.46%	0.46
	國 4	68.12%	23.34%	0.01%	0.50%	—	6.99%	1.05%	0.48
	淡江大橋	55.92%	30.65%	0.28%	0.76%	0.16%	9.25%	2.98%	0.41
2.5	淡江大橋	57.93%	29.61%	0.19%	1.06%	0.16%	9.25%	1.81%	0.41

飛灰及爐石粉之碳足跡較一般水泥低（飛灰為 0.004 kgCO₂e/kg，爐石粉為 0.104 kgCO₂e/kg，水泥為 0.906 kgCO₂e/kg），故由其取代 IP 水泥中部份 I 型水泥可具備減碳效益。淡江大橋基樁 IP 水泥之飛灰與爐石粉替代率、減碳效益及減碳率如表 10，總減碳效益約 34,260.37 tCO₂e，減碳率約為 65.28%。

表 10 IP 水泥之減碳效益

工區	飛灰及爐石粉 替代率 (%)	減碳效益 (tCO ₂ e)	減碳率 (%)
八里端	70.00%	16,919.61	65.28%
河中段		12,200.77	
淡水端		5,139.99	

註：1. 飛灰及爐石粉替代率 = (飛灰 + 爐石粉) 重量 / (I 型水泥 + 飛灰 + 爐石粉) 重量。

2. 減碳率 = 1 - 有替代材料之排碳量 / 無替代材料之排碳量。

基樁圍束區箍筋綁紮工法

淡江大橋工程 796 支基樁之圍束區箍筋係採用螺旋箍筋工法進行綁紮，相較一般的閉合彎鈎工法可減少鋼筋使用量，惟螺旋箍筋每 15 m 仍需進行 80 cm 之搭接焊接作業，故計算減碳效益時需將焊接材料排碳量扣除。

本文將兩工法之材料設計量，配合其相應之材料碳足跡係數進行排碳量計算，結果如表 11。整體而言基樁工程圍束區採螺旋箍筋工法相較於閉合彎鈎工法具有減碳效益，於淡江大橋工程之整體減碳效益約 485.10 tCO₂e，減碳率約為 20.45%。

工區場電替代柴油發電機減碳潛勢

淡江大橋工程基樁之鋼筋加工係以柴油發電機作為電力來源，若電力使用工區場電將可產生減碳效益；本文假設淡江大橋工程基樁皆以工區場電力作

表 11 基樁圍束區箍筋綁紮工法之減碳效益

項目	螺旋箍筋工法		閉合彎鈎工法
	鋼筋	焊材	
基樁施作數量 (支)	796		
材料使用重量 (kg)	223,732.11	406.82	286,928.54
排碳量 (tCO ₂ e)	1,856.85	29.66	2,371.62
減碳效益 (tCO ₂ e)	485.11		
減碳率 (%)	20.45%		

註：減碳率計算之分母為閉合彎鈎工法之排碳量。

為鋼筋加工之電力來源，並評估其潛在減碳效益。

工區使用發電機之活動量計量方式為燃油用量，本文以發電機規格之單位功率作為計算依據，配合柴油碳足跡係數計算發電機之單位排碳量。參考東元柴油引擎發電機之單位油耗 0.27 L/kWh (30 ~ 250 kW) 及環境部公告 2021 年之柴油 (於固定源使用) 碳足跡係數 3.29 kgCO₂e/L，得出發電機單位排碳量為 0.8883 kgCO₂e/kWh；另工區場電係數則採用環境部公告 2021 年之電力碳足跡 0.606 kgCO₂e/kWh。以工區場電替代柴油發電機於淡江大橋工程基樁施作之潛在減碳效益總計約 12,206.31 tCO₂e，減碳率約為 31.78%，評估結果如表 12。

表 12 工區場電替代柴油發電機之潛在減碳效益

項目	工區場電	柴油發電機 (30 ~ 250kW)
發電機理論發電量 (kWh)	43,238.79	
單位排碳量 (tCO ₂ e/kWh)	0.6060	0.8883
排碳量 (tCO ₂ e)	26,202.71	38,409.02
潛在減碳效益 (tCO ₂ e)	12,206.31	
減碳率 (%)	31.78%	

註：減碳率計算之分母為柴油發電機之排碳量。

結論

本文彙整淡江大橋（第3標）之基樁工程碳足跡盤查資料，並進行排碳特性與減碳效益分析，相關結論條列式說明如後：

1. 淡江大橋工程之基樁型式皆為場鑄混凝土全套管基樁工程，數量共計 796 支，以位置分為八里端、河中段及淡水端工區，基樁直徑包含 1.5 m、2.0 m、2.5 m 三種不同規格。
2. 樁工程以材料為最主要排碳來源，排碳占比以水中混凝土 56.28% 為最高，其次為竹節鋼筋約 30.35%，機具則約 9.26%，而運輸、PVC 測管、間隔器及其他材料占比分別約為 2.82%、0.85%、0.28% 及 0.16%。
3. 基樁排碳量及排碳參數
 - (1) 整體排碳量以八里端引橋段及河中段工區為最高及次高。各工區之平均單位體積排碳量分別為八里端 $0.39 \sim 0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、河中段 $0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 及淡水端 $0.37 \sim 0.48 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。
 - (2) 三種樁徑規格之單位體積排碳量以直徑 2.0 m 及 2.5 m 基樁最高，約為 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，直徑 1.5 m 基樁為 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。
 - (3) 基樁施作單位體積能耗率以河中段 14.68 L/m^3 為最高，八里端次之約為 9.90 L/m^3 ，淡水端則約為 8.92 L/m^3 ，全工區整體平均約 11.46 L/m^3 。
4. 河中段主橋塔基樁具最高的單位容許承載力排碳量，基樁工程容許承載力與排碳量呈高度正相關（皮爾森積差相關係數 R 值為 0.84），容許承載力可以解釋約 70% 排碳量（決定係數 r^2 值為 0.70）之變異。
5. 基樁工程減碳措施與效益
 - (1) 基樁之水中混凝土，其使用之 IP 水泥配比包含飛灰與爐石粉等水泥替代材料；材料替代之整體減碳效益約 $34,260.37 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 65.28%。
 - (2) 基樁圍束區箍筋係採用螺旋箍筋工法進行綁紮，雖需進行搭接焊接作業，但相較一般的閉

合鈎工法可減少鋼筋使用量。整體減碳效益約 $485.11 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 20.45%。

- (3) 基樁之鋼筋加工係以柴油發電機作為電力來源，假設以工區場電替代柴油發電機，潛在減碳效益約 $12,206.31 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 31.78%。
6. 淡江大橋工程施工內容複雜且具高度之獨特性，冀由碳足跡盤查作業之落實，累積寶貴之排碳成果，以供未來減碳目標規劃及減碳策略研訂之參考。

參考文獻

1. Net Zero Tracker，取自：<https://zerotracker.net/>
2. 交通部公路局北區公路新建工程分局（2024），淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）監造（含碳足跡盤查輔導及查證）委託服務工作 – 113 年度年末進度報告書。
3. 環境部（2019），基礎建設 – 橋梁（Infrastructure-Bridge）碳足跡產品類別規則，取自：<https://cfp-calculate.tw/cfpc/Carbon/WebPage/FLPCRDoneList.aspx>
4. BRE Global Ltd (2018) Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804. Available: https://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN514-BRE-EN-15804-PCR.pdf
5. European Commission (2016). Commission Staff Working Document, EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance. Available: https://ec.europa.eu/environment/gpp/eu_gpp_criteria_en.htm
6. Peab Grundläggning AB (2019). Environmental Product Declaration – EPD PRECAST CONCRETE FOUNDATION PILES Available: https://www.environdec.com/library/_?Epd=16880
7. 環境部產品碳足跡資訊網，取自：<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/WebSites/CoefficientDB.aspx>
8. 交通部公路局蘇花公路改善工程處（2021），台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫施工期間工程碳管理委託服務工作 – 成果報告書。
9. 交通部高速公路局第二新建工程處（2021），國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程委託監造及專業技術顧問服務 – 工程碳盤查 109 年度進度報告。
10. 交通部高速公路局第一新建工程處（2019），國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（第 E14 標）碳足跡盤查輔導與查證服務 – 服務成果報告。
11. 交通部公路局西部濱海公路南區臨時工程處（2018），西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程委託工程碳管理暨碳足跡盤查輔導及查證服務工作 – 正式成果報告書。



恆春斷層AI大哉問

核三安全及與其他能源、 與台北盆地的風險比較

周南山／臺灣大學土木系兼任教授、中國土木水利工程學會 工程永續與環境美學委員會主任委員

核能是公認最減碳、最可靠、最便宜的能源，應該已無疑義。比較有爭議的可能是核能電廠的安全，尤其是耐震性。核三公投剛過，本文就來探討下面幾個大家都關切的風險議題：

1. 核三廠廠址下方是否有斷層？長度多長？規模多大？多久會發生一次大地震？
2. 核三廠曾經遭受過多大的地震，是否有受損呢？
3. 若恆春斷層真發生大地震，核三廠能撐得住嗎？輻射外洩的機率如何？萬一外洩，死傷嚴重嗎？
4. 核能與天然氣、煤氣、風能、太陽能等風險的比較。何者較低？
5. 萬一發生相同規模／震度的地震，核三廠和臺北市大樓何者風險更大？死亡人數何者更多？

以上幾個大哉問，在這次核三大辯論及各項討論中，似乎很少看到具體的答案。而且核三資料年代久遠，又較為敏感，埋藏在各種已發表或未發表的文獻中，不易取得，因此必需藉助 AI 工具。經查遍 ChatGPT、ChatGPT 5、DeepSeek、DeepSeek R1、Google Gemini、Superbot、Claude，逐一探討，發現關於核三這個議題，只有 ChatGPT 5 最為詳盡，而且資料與時俱進。

以下盡可能依據最新版的 ChatGPT 5，逐層一步步地烤問它。這些問題其實不好回答，但聰明又客觀的 ChatGPT 5 每個題目都花了好幾分鐘，收集了無數的資訊（從電腦中可以看出它參考了哪些資訊），筆者並輔以多位地震、核能與風險專家的意見，儘量用淺白的科普方式提供大家參考。

大哉問一 核三廠廠址下方是否有斷層？ 長度多長？規模多大？平均多久會發生一次大地震？

地震規模與斷層長度的關聯

在地震學上，斷層破裂長度、破裂面積與位移量

共同決定地震釋放的能量（也就是規模）。

- 一般而言，斷層長度愈長，可能發生的地震規模愈大。
- 規模與斷層長度大致呈「對數關係」，而非單純的線性正比，還要考慮斷層寬度、破裂深度與位移量。Wells and Coppersmith^[1] 將地震規模與斷層長度之對數關係整理如圖 1。斷層長度大約增加 3 倍左右，規模會增加 1（如圖 1 和表 1）。

核三廠廠址下方是否有斷層？

官方調查並未劃出活動斷層直接穿過核三廠。就近的主要構造是恆春斷層，距離核三廠約 1.1 ~ 1.2 公里^[2,3]。部分學者主張廠區存在剪裂帶或斷層帶，甚至認為恆春斷層跨入廠區，惟此屬專家爭議，非主管機關正式定論。

斷層長度多少？是否為活動斷層？

恆春斷層陸域約 16 km；加上海域延伸，近年調查估總長約 41 km。中央地調機關把恆春斷層列為第二類活動斷層，最近一萬年無明確活動證據^[2,3]。

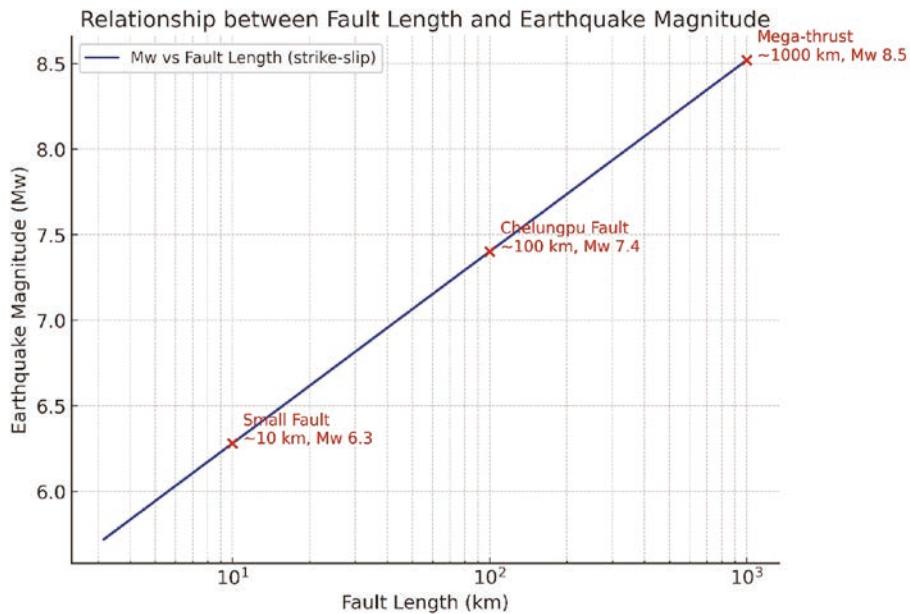
圖 1 地震規模與斷層長度之對數關係^[1]

表 1 地震規模、斷層長度與破壞程度關聯表

地震規模	典型斷層破裂長度	破壞程度說明
Mw 5.5	約 2~5 km	中小型斷層破裂，通常屬於淺層地震
Mw 6.0	約 5~10 km	造成區域性破壞，城市可能受災
Mw 6.5	約 15~20 km	已屬大地震，會造成結構破壞
Mw 7.0	約 30~50 km	可跨越城市與鄉鎮，多地區受影響，例如 0403 花蓮大地震
Mw 7.5	約 70~100 km	巨大地震，破裂可延伸至數縣市，例如 921 集集大地震
Mw 8.0	約 200~300 km	超巨大地震，通常發生在板塊邊界
Mw 9.0	約 500~1,000 km	超級大地震，如 2011 日本東北地震 (Mw 9.0)

註：Mw 為美式（USGS）的規模，數字會比台灣常用的芮氏規模略大。例如 0403 花蓮大地震芮氏規模為 7.1，Mw 規模為 7.4。

可能引起多大的地震？

以經驗關係（逆衝型斷層、長度 ~ 40 km）估計，約 Mw 6.8~7.1 層級。核安機關的機率式危害分析亦把「恆春斷層系統」視為控制震源之一，對核三廠的控制規模約 Mw 7.2、控制距離約 1.20 km（在年超越頻率 1E-4 的危害水準下）。《地震危害與篩選報告—核三廠》^[4]。

所謂年超越頻率 (Annual Exceedance Frequency, AEF) = 1E-4 = 0.0001／年，表示：在任意一年中，有萬分之一的機率會發生超過該「危害水準（如地震動強度、加速度 PGA）」的地震事件。

另外，區域模型也納入馬尼拉隱沒帶等更大的震源（可到 Mw 8.5+），雖然較遠，仍會對場址產生強震動。

可以達到 0.72g 的震度嗎？

官方公開報告寫明：核三廠在完成補強後，於地表峰值加速度 (PGA) = 0.72g（評估基準地震，RLE）等級的地震下，仍可確保安全停機^[3]。也就是說，0.72g 的地動是「被納入設計／評估基準」的情境。

早期設計的 SSE（安全停機地震）PGA = 0.4g；福島後依規範提升評估基準到 RLE = 0.72g。

進一步的地震危害再評估顯示，場址可能遭遇的地動加速度上看 1.384g。（屬低年超越機率事件）^[4]。

需注意 1.384g 為模型推算的低年超越機率上限值，不等於設計基準。

另外，核三位於逆衝斷層西側，東側為山麓，西側為沖積平原，逆衝斷層東側為上盤，而西側為下

盤。即使發生地震，核電廠應屬斷層的下盤，不致於發生隆起。

此外，美國 Sandia National Laboratory 曾實測 1/4 圍阻體模型，其耐震能力可達地表 2g。

依據資料

- 核安機關《地震危害與篩選報告－馬鞍山核能發電廠（公開版）》：控制震源表列出恆春斷層系統對核三的控制距離約 1.20 km、控制規模 ~ Mw 7.2。
- 經濟部地調單位彙編：恆春斷層最近一萬年無明確活動證據、列第二類活動斷層；距核三約 1.1 km。
- 屏東縣核安監督資料：陸 16 km + 海 25 km ≈ 41 km；距廠約 1.1 km。
- 原能會／核安會公開資料：核三補強後可承受 RLE = 0.72g 的地震並安全停機；早期設計 SSE = 0.4g。

說明

1. SSE (Safe Shutdown Earthquake)

- 原始設計基準地震，表示廠區在此地動下仍可安全停機。
- 台灣核電廠在 1970 ~ 1980 年設計時，常用 0.3 ~ 0.4g。

2. RLE (Re-evaluated Level Earthquake)

- 福島事故後，主管機關要求進行「地震危害再評估」。
- 依據最新地震危害分析，核一、核二、核三分別提升到 0.56g、0.52g、0.72g。

核三廠與石門水庫耐震設計的比較（如下）

設施名稱	考慮地震回歸期	設計 PGA (水平震度)	設計標準或參考依據
核三廠 (Maanshan NPP)	10,000 年 (1E-4)	≈0.72g (最大水平地震動)	依 IAEA 指引與美國 NRC 標準
石門水庫 (Shimen Dam)	約 475 ~ 2,475 年 (依設計等級)	約 0.3g 左右 (視位置與用途)	CNS 標準、交通部水利署規定

- 核三廠設計考慮更嚴苛地震標準，確保圍阻體、冷卻系統在最大設計基準地震 (Design Basis Earthquake, DBE) 與超設計基準地震 (SSE) 下仍不失效。
- 石門水庫為壩體安全等級 I 級設施，依 CNS 震度分級設計（含設計地震與最大考慮地震 MCE）。
- 由以上數據可以看出，核三廠的設計遠比石門水庫要保守的許多。

以上是 ChatGPT 5 關於核三廠下面是否有斷層，及可能引起的規模與震度做了客觀的介紹。由以上各項資訊顯示；核三廠即使萬年一遇的地震真的發生，也不至於造成重大災變。

大哉問二 核三廠曾經遭受過多大的地震，是否有受損呢？

2006 年恆春地震（規模 Mw 7.0），為核三廠建廠以來影響最大的一次。該地震並非由恆春斷層本體引起，而是來自南部外海隱沒帶。根據原子能委員會與台電過去的公開資料，以下是 2006 年恆春地震對核三廠的實際影響、地震加速度 (PGA) 數據與是否自動停機的綜合整理：

1. 2006 年恆春地震簡介

- 發生時間：2006 年 12 月 26 日
- 規模：Mw 7.0
- 震央位置：台灣南方海域（非恆春斷層）
- 震源深度：約 44 公里（屬於板塊隱沒帶）

2. 核三廠接收到的最大地震加速度 (PGA)

根據中央氣象局與原能會地震後報告：

- 核三廠地表測得最大水平加速度 (PGA) 為：根據台電與原能會 (AEC) 對 2006 地震的正式說明，核三廠的地表最大水平加速度約為 0.16g 左右。
- 垂直方向加速度約為 0.15g
- 為台灣核電廠歷史上最高紀錄之一

核三廠設計的安全停機地震 (SSE) 標準為 0.4g，因此當時的地震仍未超過安全設計值。

3. 核三廠是否有自動停機？

是的，核三廠兩部機組皆自動安全停機。具體情況如下：

- 核三廠一號、二號機組於地震發生後自動跳機（Scram）
- 所有反應爐保護系統、冷卻系統、緊急柴油發電機均運作正常
- 事件發生後由原能會派員進駐，核三廠於後續完成安全檢查才重新啟動

4. 地震對核三廠造成的實際影響？

- 廠區部分非安全系統（如氣管、水管）有輕微損壞
- 部分設備有非結構性裂痕與洩漏
- 反應爐本體與結構系統未受損
- 無輻射外洩或安全事件發生

以上是 ChatGPT 5 關於核三廠之前遭遇過的最大地震的描述。

大哉問三 大地震真的發生，核三廠會發生輻射外洩的風險嗎？

就實際操作之安全性言，核一、核二、核三在 2013 年 3 月被經濟合作暨發展組織核能署（OECD/NEA）專家評定為 Good Practice，由此證明此三座電廠營運經驗受國際肯定。

據參與核二核三的泰興工程顧問公司（美國貝泰與中興顧問合組，惟目前中興已無股份）的退休總工程師黃南鴻告訴筆者，核能電廠在設計時曾多方考慮各種受力狀況，耐震組合不下百種之多。對世界各地曾發生的大地震反應譜都拿到基地來進行動力分析，必需要應付各種地震角度及狀況做包絡式（Envelope）的設計（即考慮所有組合最壞的情況），而不只是簡單假設 0.4g 或 0.72g 的擬靜態分析（Pseudo Static Analyses）而已。因此安全係數遠大於擬靜態分析的計算成果。

另據台電退休主管告知，早年台電曾委託美國 Sandia National Laboratory 在花蓮做一個 1/4 比例實體圍阻體模型，實地測試圍阻體耐震能力，可以承受地表 2g 以上的地震^[6]。

據臺電前核安處副處長陳傳宗忠博士告知筆者：核三廠 PWR 圍阻體（containment）的設計與核一二廠

BWR 不同，更能抗高溫高壓，為一個具有 1/4 英吋碳鋼內襯（liner）、使用預力鋼腱的圍阻體。此圍阻體是以預力（Prestressed）鋼筋混凝土建造，並在圓筒體與圓頂部分以後張法預力鋼索（Post-tensioned tendons）進行預應力加強。中央設有一個空腔與儀器隧道，用以安置反應器壓力槽（reactor vessel）。在傳統鋼筋混凝土基礎板下方，設有一個環狀的張拉鋼索通道（tendon access gallery），以便安裝與檢查垂直方向的後張預力系統。因此，圍阻體和地表下的岩盤其實完全緊密結合成一體，不可能分離。也因為預力系統，結構體不易發生任何張力裂縫。

另曾參與核三廠規劃審核的前中興大學副校長林其璋教授告知：這預力圍阻體也考慮了飛機撞擊設計，萬一有飛機直接撞擊也不至於發生危險。

萬一有核能事故時，能確保高溫和高輻射物體侷限在圍阻體內，確實是核能電廠的安全屏障。而且因為是圓形構造，具拱（arch）效應而沒有應力集中問題，所以耐震上具有先天的優勢。核能電廠因地震而破壞的機率趨近於零，全世界各核能電廠也未有因地震出事的先例。即使日本三一一規模九點零、能量比九二一地震大約百倍的強震，位於福島但未受海嘯侵襲的女川核電廠也安然無恙。

耐震分析也必需符合美國核能管制委員會（NRC）的設計規範，和台電、原能會各種設計及施工重重審查，以確保耐震能符合各項要求。因此，即使地動加速度到達設計值 0.72g，因設計時各種安全係數之故，並不代表耐震不足，結構體會塌陷，輻射物會洩出。

根據筆者的核四風險評估（詳見「從地質和耐震觀點，試算核四輻射外洩的風險」一文，風傳媒），核四服務 50 年間，因地震（含海嘯）發生輻射外洩的機率，依保守值估算，約為百萬分之 3。核三廠的風險可能因為地震的規模較大而較高，假設增加 2.5 倍，在延長 20 年（非 50 年）服務期發生輻射外洩的機率也應與核四接近，在百萬分之 3 的範圍。而事實上，以上機率都是根據極端保守的假設，實際上可能發生的機率應該在千萬分之一的範圍內。

這比飛機失事或天然氣管線爆炸的機率要低很多很多，當然更比因燃煤造成空污而引起肺腺癌及心血管死亡的機率天差地遠。

台灣廢核政策列入民進黨的黨綱，但真正的廢核肇因始於 2011 年 3 月 11 日的日本福島核災。但是福島電廠出事，不是因為核能電廠本身結構無法承受規模 9.0 的強震而破壞，福島附近的女川核能電廠即安然無恙^[9,10]。

福島電廠出事是因 13 公尺高的海嘯入侵（福島核電廠高程僅 5.7 m），造成柴油發電機停止運作，反應爐無法冷卻，再加上核電廠工程師久久未獲得主管單位授權而貽誤戎機，未能斷然處置的結果使得輻射外洩。日本厚生勞動省報告顯示，其實並沒有人因福島電廠輻射而直接死亡。根據調查，甚至簽了生死狀到核電廠救災的福島 50 死士（Fukushima 50），日本政府與各國國際機構（例如 WHO、UNSCEAR）查核結果都指出，沒有因為事故中輻射暴露而立即死亡或得急性輻射病（只有一位多年後得到肺癌）。傷亡遠遠低於我們的想像。

核三廠附近的確有恒春斷層（Fault）存在，廠區下方或許可能有剪裂帶（Shear Zone）存在，讓人感覺到危險。危險的感知因人而異，而風險則可透過科學方法加以量化與比較。

人生於世，隨時都有風險。只要這風險是屬於可以被控管並可接受的低風險即可。

大哉問四 核能與天然氣、煤氣、風能、太陽能等風險的比較。何者較低？

美國富比世（Forbes）在 2018 年刊出的一篇文章，比較各種能源的致死率（詳如表 2）（每兆瓦／小時）。其中燃煤最多，是 10,000 人；天然氣是 4,000 人；核能最少，只有九十人。此數字比大家公認是綠能的太陽能（440 人）、風能（150 人）、水力發電（1,400 人）還要少很多。

另一份世界衛生組織（WHO）（表 3）所做的研究也獲得類似的結論：核能的死亡率是燒煤的萬分之四，天然氣的百分之一，風能的 1/4 和太陽能的 1/11。這兩份報告是否顛覆一般人的想像？

臺灣的能源目前以天然氣為最大宗，需要靠船運和 LNG 儲存槽，且安全儲存量只有 7 到 11 天。假設發生戰爭，對方不可能去轟炸核電廠（包括俄烏和中東戰爭都沒有開此禁例），但一顆飛彈就可能打到暴露

在地而且結構脆弱的 LNG 儲存槽，其風險不知道要比核能電廠因地震而輻射外洩的風險要大了多少萬倍。我們若能接受 LNG 儲存槽的風險，卻不能接受核三的耐震風險，不是很奇怪嗎？

我們若能接受 LNG 爆炸的風險，為何不能接受風險明顯較低、死亡人數可能為零的核三風險呢？

表 2 各種能源的致死率比較^[12]

能源類型 Energy Source	死亡率(每兆kWh) Mortality Rate (deaths/trillion kWh)	全球占比 電量(能源)
煤 Coal	100,000	41%
煤(中國) Coal (China)	170,000	75%
煤(美國) Coal (US)	10,000	32%
油 Oil	36,000	4% (33%)
天然氣 Natural Gas	4,000	22%
生質燃料 Biofuel/Biomass	24,000	2% (21%)
太陽能 Solar	440	<1%
風能 Wind	150	2%
水力 Hydro	1,400	16%
水力(美國) Hydro (US)	5	6%
核能 Nuclear	90	11%
核能(美國) Nuclear (US)	0.1	19%

表 3 WHO 各種能源的致死率比較^[13]

Table 6

Mortality rates for each energy source in deaths per billion kWh produced.
Source: Updated (corrected) data from: World Health Organization; CDC;
Seth Godin; John Konrad.

Energy source	Mortality rate (deaths per billion kWh)
Coal – global average	100 (50% of global electricity)
Coal – China	160 (75% of China's electricity)
Coal – U.S.	15 (44% of U.S. electricity)
Oil	36 (36% of global energy, 8% of global electricity, none in U.S.)
Natural gas	4 (20% of global electricity)
Biofuel/biomass	24 (21% of global energy)
Solar (rooftop)	0.44 (<1% of global electricity)
Wind	0.15 (~1% of global electricity)
Hydro – global average	1.4 (15% of global electricity, 171,000 Banqiao dead)
Nuclear – global average	0.04 (17% of global electricity, with Chernobyl & Fukushima – none in US)

大哉問五 萬一發生相同規模或震度的超大地震，核三廠與臺北市大樓何者影響更大？何者死亡人數較多？

根據 ChatGPT 5，如果「同樣規模或同樣震度」的強震分別發生在核三廠（恆春半島）附近與台北盆地，整體衝擊與死亡人數幾乎可以確定是台北盆地遠大於核三廠周邊。理由如下：

1. 設計耐震水準（結構能力）

- 核三廠（耐震一級 SCI）：設計 / 評估基準遠高於一般建築。官方公開版報告載明：

- SSE = 0.4g (設計基準)、RLE = 0.72g (2013 耐震餘裕評估)、RLGM = 1.306g (2019 起評估基準地震動)。2006 恒春地震廠址實測峰值 PGA ≈ 0.16g，遠低於上述基準。
- 台北一般建築：921 後法規大幅強化，但仍屬「一般建築」耐震目標，且受屋齡與細部設計／施工差異影響；整體水準不可能比核電耐震一級結構的保守度與冗餘更高。

2. 場址地質與放大效應（輸入地震動）

- 台北盆地：厚層鬆軟沉積物 + 盆地三維形狀，會放大長週期地震動並延長搖晃，對中高樓與老舊 RC 尤其不利；多項學術研究與數值模擬均證實「盆地放大效應」。另有土壤液化潛勢區廣布（例：市府圖資指出高潛勢約占 17% 量級）。
- 核三廠廠址：位於恒春半島增積岩體，耐震級結構基礎直接坐落於馬鞍山層砂質泥岩／砂岩等基岩，場址放大相對受控。

3. 綜合影響的直觀推論

同一外部震度下：輸入地震動在台北盆地往往被放大（尤其長週期）；同時一般建築之抗震冗餘低於核電 SCI 結構 → 故台北建築更容易出現中重度損壞／倒塌。

核三廠方面：除結構冗餘與設備耐震驗證外，過往實震（2006 恒春）顯示即使區域發生 $M_w \approx 7$ 的地震，廠址反應仍低於設計基準，以停機為主要應對，未見結構性災害。

此外，人口暴露差巨大：大台北都會約 700 萬人、極高密度；恒春鎮只有約 2.9 ~ 3.1 萬人。人口基數本身就把可能的死傷量級拉開了兩個位數以上。

以「山腳斷層南段 $M_w 6.6$ 」為例（行政院／國震中心計畫）：估計全倒 4,400 棟、死亡 + 重傷約 4,100 人；另一次審查簡報以白天時段推估雙北死亡合計約 3,379 人（台北 1,245、新北 2,134），全倒合計約 5.5 萬棟。

國震中心學者也給出區間：若震度 ≥ 6 ，台北市全倒 4 ~ 5 千棟、全倒 1 ~ 2 萬棟、傷亡約 4 千 ~ 1 萬人。

恒春半島的歷史對照顯示死傷相對很小：2006/12/26 恒春外海發生一組接連主震（ $\sim M_w 7$ ），全台僅 2 死 42 傷；核三二號機因震動大手動停機、未出現設備損壞或放射性外洩。

核三廠的耐震設計與評估餘裕：主管機關公開文件載明，核三的安全停機地震（SSE）= 0.4g；2013 年耐震安全餘裕評估採 RLE = 0.72g；2019 年起的評估基準地震動 RLGM = 1.306g，均遠高於 2006 年實測的 0.16g。僅就核安風險而言，廠址本身設計裕度很大。

RLGM 之定義如下：

- 規範地震動基準值 RLGM (Regulatory-Level Ground Motion) 指年超越機率 (Annual Exceedance Frequency, AEF) 下，根據機率地震危害分析 (PSHA) 所得的代表性設計輸入值，經加上「確定性審慎調整」後的最大地震動基準值。

- 對核三廠而言（依 2019 SSHAC Lv.3 結果）：

RLGM = 1.306g (在岩盤上、5 Hz 頻率下的 PGA)。此與年超越機率 1E-4 (萬年一遇) 對應之 PGA 上限值為 1.384g 略有不同。RLGM = 1.306g 是正式核定的耐震設計基準值，而 1.384g 是年超越機率 1E-4 下 hazard 模型所推得的不確定性上限值，兩者雖接近，但 RLGM 已考慮此類上限與變異後，再經 SSHAC Lv.3 專家團隊審慎整合所定義之代表值。

另外，福島事故給的教訓是：公眾沒有急性輻射死亡案例（長期健康風險仍持續追蹤、疏散造成巨大社會健康代價），顯示「核災致死」並非地震衝擊的主要來源；多數死傷仍來自建築倒塌與基礎設施中斷。

時點補充：核三兩部機在 2024/07 與 2025/05 陸續除役（仍有用過核燃料池等設施，受法規監管）。即使討論運轉與否，在「同震度」比較下，恒春的總死傷量級仍會比台北小很多。

結論

核三廠廠址是否有斷層？

官方調查並未劃出活動斷層直接穿過核三廠。就近的主要構造是恒春斷層，距離核三廠約 1.1 ~ 1.2 公里。部分學者主張廠區存在剪裂帶或斷層帶，甚至認為恒春斷層跨入廠區，惟此屬專家爭議，非主管機關正式定論。

斷層長度與地震規模

恒春斷層陸域約 16 km，加上海域延伸，總長約

41 km。依 Wells and Coppersmith [1] 回歸關係，其潛在規模約 Mw 6.8 ~ 7.1。核安機關的機率式危害分析以此斷層作為控制震源之一，控制規模約 Mw 7.2。

耐震設計與補強

核三原始設計安全停機地震（SSE）為 0.4g，福島事故後經再評估（RLE）提升至 0.72g。需注意 1.384g 為模型推算的低年超越機率上限值，不等於設計基準。此外，美國 Sandia National Laboratory 曾實測 1/4 圍阻體模型，其耐震能力可達地表 2g。

核能電廠因地震而破壞的機率趨近於零，全世界各核能電廠也未有因地震出事的先例

福島核災啟示

福島事故主要由於 13 公尺海嘯淹沒柴油機，並非因地震導致結構毀損。厚生勞動省報告顯示，無人直接死於輻射。即使日本三一規模九點零、能量比九二一地震大約百倍的強震，位於福島但未受海嘯侵襲的女川核電廠也安然無恙 [11]。

與其他能源之風險比較

根據 Forbes [12] 與 WHO [13] 研究，不同能源的致死率（每兆千瓦小時）為：燃煤 ~ 10,000、天然氣 ~ 4,000、水力 ~ 1,400、風能 ~ 150、太陽能 ~ 440、核能 ~ 90。核能在所有能源中致死率屬最低。

萬一發生相同規模或同樣震度的超大地震，核三廠與臺北市大樓風險比較

核三廠之設計頗為保守，有多層層安全係數的保障，相較於臺北盆地因為盆地效應及眾多老舊房屋，推估死亡人數遠較核三廠嚴重甚多，不在同一個比較級別。

結語—民心之向背

核三廠的耐震設計與補強措施顯示其可承受規模七或更巨大的地震。即便強震來襲，發生輻射外洩之機率異常低，是屬於可以接受的風險程度。整體風險遠低於其他能源，與臺北盆地受強震的風險相較，亦低的非常多。

核三公投同意 434 萬 1,432 票、不同意 151 萬 1,693 票，同意票遠高於不同意票，可看出民意走向。本文之目的是以科普之方式，利用最新版 ChatGPT 5

收集完整資訊與數據，佐以諸多學者與核能電廠相關工程師之經驗，探討核三耐震的安全性，以利未來核三，甚至核一、核二、核四的重啟，善盡書生報國之本分。為求慎重，初稿完成后，承蒙下列專家學者的不吝指正，特此致謝。

誌謝

葉宗洸教授：國立清華大學核子工程與科學研究所特聘教授

林其璋教授：國立中興大學前副校長，地震專家，前核能研究所研究員

李咸亨教授：國立臺灣科技大學前副校長，地震專家

陳傳宗博士：前臺電公司核安處副處長

黃南鴻總工：前泰興工程顧問公司總工程師

劉泰儀博士：新亞建設總工程師，臺大土木系兼任副教授，前核四廠土木簽證技師

姚大鈞博士：風險管理專家，Eos Rhea Metis, Ltd. 首席總監

ChatGPT 5 主要引用資料

- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(4).
- 經濟部中央地質調查所 (2012)《台灣活動斷層調查成果報告》。
- 原子能委員會 (2013)《核能電廠地震危害與篩選報告》公開版。
- 原子能委員會 (2014)《核能電廠地震危害與篩選報告》公開版。
- 經濟部中央地質調查所 (2018)《台灣活動斷層調查成果報告》。
- Sandia National Laboratory (1982). Seismic Testing of Nuclear Containment Models. US DOE.
- US NRC (2007). 10 CFR Part 50 – Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities.
- IAEA (2011). Reports on Fukushima Nuclear Accident.
- IAEA (2015). Reports on Fukushima Nuclear Accident.
- 日本政府 (2012)《福島核災事故調查報告》。
- 日本厚生勞動省 (MHLW, 2013). Health management report on Fukushima.
- Forbes (2018). “Deaths per TWh by Energy Source”.
- WHO (2016). “Health risks of energy production”.

筆者撰文其他參考資料

- 周南山 (2025),「核三風險大哉問：恆春斷層若發生大地震，核三廠安全嗎？」，風傳媒。
- 周南山、李咸亨 (2021),「從地質和耐震觀點，試算核四輻射外洩」，風傳媒。
- Tai-Yi Liu, Po-Han Chen, and Nelson N.S. Chou (2020), “Technical and Non-Technical Challenges for the Lungmen Nuclear Power Plant Project in Taiwan”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*.





股票代號：8473

山林水環境工程股份有限公司

FOREST WATER ENVIRONMENTAL ENG'G CO., LTD.

山林水服務專案

品質、專業、使命必達



焚化爐底渣
活化再生

生質能發電

污水下水道系
統興建營運

再生水系統興
建營運

工業廢水
處理

海水淡化興
建營運

一般、事業
廢棄物處理

生活污水
處理

總公司：台北市中山區吉林路99號3樓
TEL : (02)2100-2195 /FAX : (02)2100-2196

台北辦公室：台北市中山區長安東路二段112號12樓
TEL : (02)2516-8358/FAX : (02)2516-8480
Email : mfw@mfw.com.tw

義力營造股份有限公司

EARTHPOWER CONSTRUCTION CO., LTD



義呈實諾 力呈卓越

義力營造創立於民國八十三年，甲等綜合營造業
深耕台灣，致力鑽研土木、環境、建築、區段徵收、開發工程
秉持追求全員工安、品質提升的精神
在誠信踏實的經營態度之下，堅守營建道德崗位
各項工程實績屢獲優良工程金安獎、公共工程金質獎



中沙大橋全國最大跨河鋼梁削坡改水換底補強
金質獎特優/金安獎優等

**土木
工程** 機場、整地、道路、排水橋梁
護坡、植生保固、管線工程

**環境
工程** 埋理廢棄物分類清除、土壤污染改良
淨水處理、舊管工程、廢棄物分類減量製造

**開發
工程** 工業園區開發
社區開發、社區管理

**建築
工程** 鋼筋大樓、廠辦新建
精緻建築、集合住宅

**區段
徵收** 區段徵收回購
土地重劃、公設工程施作

臺中市北屯區車庫街553號1樓

網址：www.earthpower.com.tw

郵箱：earth.power@msnshinet.net

Tel: 04-2245-0163

FAX: 04-2245-0169

卓越 | 誠信 | 安全 | 技術 | 品質



夢想和幸福 零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity . Excellence . Conservation . Integrity



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw

工法創新

最具溫暖的企業
最具未來性發展

國道4號 臺中環線豐原潭子段

潭子交流道工程
兩標同獲兩項金質獎



金路獎第一名

facebook



遠揚營造工程股份有限公司

fegc.com.tw 電話: (02) 2378-8008

