

從鋼筋水泥到數據骨架： 以 AI 引領國家基礎建設新篇章



《人物專訪》

從半導體製造基地到 AI 新世代科學園區
專訪國家科學及技術委員會南部科學園區管理局鄭秀絨局長

《工程論著》

次世代科學園區虛擬電廠與微電網 AI 電能管理
次世代具身 AI 科技服務基礎設施—AI-RAN 與邊緣智慧之整合架構與運作設計

《專題報導》

AI 化 GeoDesign 與新世代園區規劃—以 UDiScape 為核心之園區規劃模式
AI 技術於智慧工地之推展與應用
AI 看見城市—瑠公綠廊的人本改造
智慧平台—科學園區邁向淨零排放推動作法
智慧橋梁的未來—以國道 1 號漁港高架橋為例
工程顧問公司知識作業的範式轉移—以 AI 驅動知識萃取技術革新

《特稿》

數據驅動橋梁數位孿生之溫度效應索力預估

July/2026 **151**

從鋼筋水泥到數據骨架：
以 AI 引領國家基礎建設新篇章

**中華
技術
CECI**

ENGINEERING
TECHNOLOGY

No.151

July/2026

目錄

Contents



訂閱
中華技術電子書



中華顧問
中華技術電子書平台



台灣世曦
中華技術電子書平台

本刊文章為作者提供，
內容正確性及法律責任
概由作者自行負責

匠心獨運

- 004 重塑工程永續與人本防線
AI 與智慧科技驅動新變革

人物專訪

- 008 從半導體製造基地到 AI 新世代科學園區
專訪國家科學及技術委員會南部科學園區管理局鄭秀絨局長

工程論著

- 016 次世代科學園區虛擬電廠與微電網 AI 電能管理
030 次世代具身 AI 科技服務基礎設施—
AI-RAN 與邊緣智慧之整合架構與運作設計

發行人 蔡宗倫
發行所 財團法人中華顧問工程司
地址 台北市辛亥路二段 185 號 28 樓
電話 (02)8732-5567
網址 <http://www.ceci.org.tw>
ISSN 1818-4464

編審工作小組
總召集人 鄭運鵬
副總召集人 黃炳勳

151 期召集人 蔣啓恆
151 期審查委員 吳嘉文、賴鈺蒨、陳明谷
總編輯 吳嘉文
副總編輯 蕭勝雄
企劃 台灣世曦工程顧問股份有限公司
設計編輯 天下雜誌股份有限公司

地址 台北市內湖區陽光街 323 號
電話 (02)8797-3567
網址 <http://www.ceci.com.tw>



封面故事

當 AI 從輔助工具走向決策核心，工程的思維也隨之改變。本期以「AI 與智慧工程應用於國家基礎建設」為題，從南科打造 AI 新世代園區談起，延伸至虛擬電廠電能管理、AI-RAN 邊緣算力等次世代基礎設施；園區規劃有 GeoDesign 生成式設計，工地現場有影像辨識守護安全，街道空間則以 AI 檢視人本環境；橋梁藉數位孿生預知劣化，工程知識更被萃取為可調用的數位資產。各篇文章分別自規劃、施工、維運與管理等面向，呈現智慧科技於工程實務之應用現況與發展方向。（照片由南科管理局提供）

專題報導

- 040 AI 化 GeoDesign 與新世代園區規劃—以 UDiScape 為核心之園區規劃模式
- 058 AI 技術於智慧工地之推展與應用
- 068 AI 看見城市—瑠公綠廊的人本改造
- 084 智慧平台—科學園區邁向淨零排放推動作法
- 106 智慧橋梁的未來—以國道 1 號漁港高架橋為例
- 132 工程顧問公司知識作業的範式轉移—以 AI 驅動知識萃取技術革新

特稿

- 144 數據驅動橋梁數位孿生之溫度效應索力預估
-

重塑工程永續與人本防線

AI 與智慧科技驅動新變革

隨著智慧科技迅速發展，AI 儼然已從輔助工具轉變為現代工程不可或缺的核心元素。它不僅能精準預測結構風險、提升第一線施工安全，更在低碳淨零與微電網調度上賦予工程前所未見的智慧決策力。在臺灣，這股科技浪潮正重塑科學園區、交通基礎設施、行人行走空間的維護與運作，使工程更有效率、更具韌性，並兼顧安全與永續。

AI 技術落地》南科從製造重鎮躍升為 AI 創新生態平台

像是過去 30 年來，成功構築以積體電路、光電、精密機械、通訊、電腦周邊、生物技術為六大產業核心的南部科學園區（以下簡稱南科），在 AI 時代就不只是單純的生產工廠，而是「AI 創新生態系的合作平台」。正因如此，臺灣在全球 AI / 先進晶片製造供應鏈中具關鍵地位，南科則為重要製造與應用基地，具有充足優勢推進基礎設施與內部管理系統 AI 化。

「AI 時代帶給臺灣最大的機會，是臺灣首度站在全球半導體製造核心與 AI 應用浪潮的交會點。」南科管理局局長鄭秀絨接受本刊專訪時指出，南科本身其實就是 AI 技術的重度實踐場域，如園區導入結合數位地理資訊、大數據的 AI 緊急應變系統，能自動判讀火災風向、化學品存放種類和應變處置方式，另外 AI 污水處理分析系統也使藥劑添加量大幅降低 25%，而智慧交通系統則有效緩解上下班尖峰時刻的塞車難題。

知識管理革命》將隱性專家經驗重塑為動態數位資產

然而，AI 在工程領域的應用，影響力絕非只是看得見的園區實體治理、環境硬體升級，也在工程顧問公司內部的大腦掀起變革。相較於過去高科技工程推動時，必須高度仰賴歷史文獻與專家的經驗，但以台灣世曦工程顧問公司為例，在 AI 與大語言模型技術成熟後，過去這些靜態的文件資產，也被改寫為可被 AI 調用的動態資產，使跨部門、跨專業的知識，得以透過標準化格式進行累積與重組。

如此一來，知識不再只是供人下載閱讀的檔案，而是能直接嵌入系統開發、流程執行與實務決策的「工作單元」。一旦能把這種過去高度依賴個人的「專家經驗」轉化為組織可控、可傳承的數位資產，就能奠定工程顧問公司的國際競爭力。

當 AI 成功把法規、歷史案例、專家智慧轉化為可調用的數位資產後，另一個核心課題，便是把這些資產轉化為守護工地施工安全的後盾。這不僅是把知識鎖在資料庫裡，而是要建立一套能和物理現場深度配合的專業工安知識庫，讓 AI 成為工地巡檢與監造人員的最佳拍檔。

為此，台灣世曦工程顧問公司開始蒐集各種天候、光線、角度下的多元場景，確保模型的適應力，用標準化文字說明施工活動與環境特徵，明確標註影像中墜落風險、防護不足等安全漏洞，並將各項缺失精確對應到國家法規、技術標準與行業規範，才能建立專業的工安知識庫。

預測性維運》數位孿生與 AI 驅動的智慧橋梁防線

從營建工地仍在施工階段的點狀安全防衛，延伸到國家交通生命線的長期守護，AI 的防護網也正發揮功效。傳統目視檢測、事後修補的被動維護模式，其實已經難以因應現代需求，但透過數位孿生（Digital Twin）技術與深度學習的無縫結合，AI 已能主動預測橋梁結構的疲勞與劣化趨勢，使橋梁維護管理從週期性的常規檢驗，進化到能主動預知、依條件維護的時代。

針對國道 1 號漁港高架橋這座結構複雜的「三跨連續翼板懸臂箱型橋梁」，台灣世曦工程顧問公司就和學術界攜手打造一套結合高精確度數值模擬與 AI 快速推論的力學數位孿生平台，讓工程人員能在高速車流下即時掌握高架橋的真實受力狀態、定位疲勞風險，更以主動預測能力降低橋梁生命週期維護成本。

永續與韌性》智慧電網、虛擬電廠與邊緣算力的整合

隨著 AI 成功在高架橋梁守護物理實體安全後，這股智慧科技的轉型力量，更進一步朝向更宏觀的「2050 淨零排放」願景擴展。面對半導體、高效能運算帶來的龐大能源、資源需求，未來的工程規劃不再是追求產業極致擴張，而是透過智慧平台整合低碳資源調度、智慧環境設計與自然碳匯的概念，在經濟發展、人本社區、生態保育三者間，取得高韌性且和諧共存的平衡點。

這項平衡理念，已經在南科打造綠色永續供應鏈的過程中得到實踐。南科管理局局長鄭秀絨分享，由於半導體與 AI 產業對水電供應穩定度要求極高，一旦斷水斷電損失動輒上億元，南科在追求高產值的同時，也把「永續供應環境」視為核心防線。

因此，南科為國內積極推動再生水使用的重鎮，台積電等晶圓廠在生產中已全面導入再生水供應，並持續提高再生水替代率。而園區在早期便為大廠建置雙迴路電纜，近年更積極導入太陽能與風力等綠色能源，以回應先進製程和 AI 算力的高耗電需求。更難能可貴的是，早在 30 年以前，南科便因保育燕鴿而劃設 30 公頃生態保護區，一直到現在，當地棲息鳥種已從早期的 69 種，大幅增加到 131 種。此外，園區建蔽率也控制在六成以下，保留大片綠地，證明科技發展能與環保共存。

特別是面對高科技晶圓廠與自動化生產線對電力穩定度近乎嚴苛的要求，為了在追求低碳的同時確保用電韌性，智慧平台進一步在電力供需端進行重構，一方面打破過去單一大型電廠的單向供電結構，引入多樣化的低碳分散式能源，並結合大型儲能裝置，由智慧電網系統進行雙向即時調控，提高電源的穩定性與可靠度；另一方面則利用物聯網與 AI 技術進行需求端的動態模擬，不僅能預測電力負載變化，更能把傳統單一設備的節能，擴大為系統級節能。

加上高科技供應鏈面臨 RE100 與更嚴苛的 24/7 全時無碳電力倡議，在此脈絡下，智慧平台更把次世代科學園區的能源角色徹底重塑，不僅聚合園區內部儲能系統、備用發電機與可控負載，組成虛擬電廠（VPP），參與台電電力交易平台，更配合時間電價，在離峰低價時儲能、尖峰高價時放電，並精準預測負載，以動態調整契約容量。透過 AI 管理智慧調度、降低轉供餘電的浪費，使得每度電在發生的當下就完成無碳匹配，創造極高的能源運籌經濟效益。

在此供需調度重構的基礎上，若把視野放大到更廣泛的區域級能源調度上，臺南沙崙綠能科技示範場域就推動「區域冷房調度中心」，各棟大樓的空調統一由管理中心調配，利用「夜間儲冰、白天融冰」進行削峰填谷，不僅降低園區大廠的電力契約容量、節省電費，也能協助電網減碳，相較於各棟獨立空調，可提升 10% 的能源使用效率。

這項綠色永續革命，並不只停留在大型建築與區域電網調度，更延伸到支撐自駕載具、巡檢機器人等「具身智慧」（Embodied AI）運作的微觀神經末梢。在次世代科學園區中，為了實現低於 10 毫秒的即時安全決策，傳統雲端運算必須走向在地化，促成結合通訊與算力的 AI-RAN（智慧無線存取網路）基地台誕生。

這些密佈在園區角落，全天候高負載運作的邊緣運算節點，同樣面臨龐大能耗考驗，為了不違背淨零排放初衷，這項關鍵基礎設施在規劃之初，便和「綠能自給」深度融合。在工研院與國立陽明交通大學共同規劃的次世代 6G 智慧園區藍圖中，AI-RAN 技術把傳統的基地台重構為「分散式 AI 算力節點」，提升邊緣運算節點之低碳備援與供電韌性，確保在低碳排前提之下，邊緣運算伺服器擁有 24 小時不斷電的韌性。

人本感知評估》以 AI 和專家思維鏈解碼都市景觀

當 AI 觸角成功深入科學園區的能源調度，這股智慧轉型的浪潮，也正以具備人文關懷的姿態，滲透進市民日常起居的都市開放空間。過去，公共工程的成效驗證多偏重於硬體設施的供給或綠化面積的增減，使用者難以名狀的空間感受、環境美學，往往被視為無法量化的自由心證。但如今，AI 也跨越物理力學測量界線，主動進行公共空間完工前後的美學與人本感知績效評估。

這在臺北市東區的瑤公圳綠廊人行環境改造工程中得到驗證。本案基地面積約 4,500 平方公尺，過去的天然陂塘與瑤公圳在都市發展中被加蓋轉作汽機車停車場，為喚醒水文記憶，台灣世曦工程顧問公司與學術界啟動「AI 景觀人本評估計畫」，運用生成式技術對場域改造前後的景觀、人本品質進行解碼。

系統以街景影像為基礎，採用開源多模態大語言模型（Gemma 3），並導入 Level 3 專家思維鏈（Chain of Thought）提示詞工程，透過明確的語意框架與逐步推理引導，有效降低 AI 輸出的隨機性，更針對六大感知構面、共 18 項細部指標進行量化評分，使其推理邏輯與人類景觀專家高度一致。

隨著物理世界與數位科技的深度融合，AI 已不再僅是優化工程的輔助工具，而是定義未來工程生命週期與彈性韌性的決策大腦。從毫秒級的微電網調度、橋梁疲勞預測，到無形的人本空間感知，AI 正在賦予基礎建設自我演進的生命力。這場智慧革命將引領工程產業跨越傳統極限，在永續與人本的雙軌上，構築智慧城市共生共榮的未來。



從半導體製造基地 到 AI 新世代科學園區



專訪國家科學及技術委員會 南部科學園區管理局 鄭秀絨局長

AI 科技浪潮席捲全球，創造出前所未見的技術革新，也為科技研發與製造實力堅厚的臺灣帶來一股新成長動能，尤其是南部科學園區（簡稱南科）提前起跑，多年前就已積極布建完整的 AI 產業鏈，更提出 AI 新世代科學園區概念，為臺灣與南科打造出新關鍵競爭力。

南科管理局局長鄭秀絨直言，AI 時代帶給臺灣最大的機會，是臺灣首次同時站在全球半導體製造核心與 AI 應用浪潮的交會點，「而且南科更有望從全球 AI 晶片製造重鎮，升級為全球 AI 算力核心。」

過去三十年，南科已成功建立出以積體電路、光電、精密機械、通訊、電腦及周邊、生物技術等六大產業為核心的產業聚落，2025 年進駐廠商逾 295 家，具備製造能力、供應鏈效率與產值規模等核心競爭力。

但進入 AI 時代後，鄭秀絨認為，「南科不應該只作為生產基地，還要成為 AI 創新生態系的合作平台。」尤其國科會正在積極推動大南方新矽谷計畫，將以擴增算力、引入人才、鏈結場域、擴展應用等 4 大策略，整合南科、沙崙生態科學園區，及嘉義、臺南、高雄、屏東等 4 縣市串起的半導體 S 廊帶，共同在南臺灣打造出 AI 產業化，產業 AI 化的示範區。



南科管理局鄭秀絨局長與台灣世曦團隊合影於南科，共同見證南科從半導體製造基地邁向 AI 新世代科學園區

打造 AI 硬實力

為配合大南方新矽谷計畫，南科積極推動 AI 新世代科學園區概念，預計從 AI 晶片研發、AI 算力基礎建設、資料應用、跨域創新與人才匯聚能力等多元面向，展開一場全方位的 AI 科技大革命。

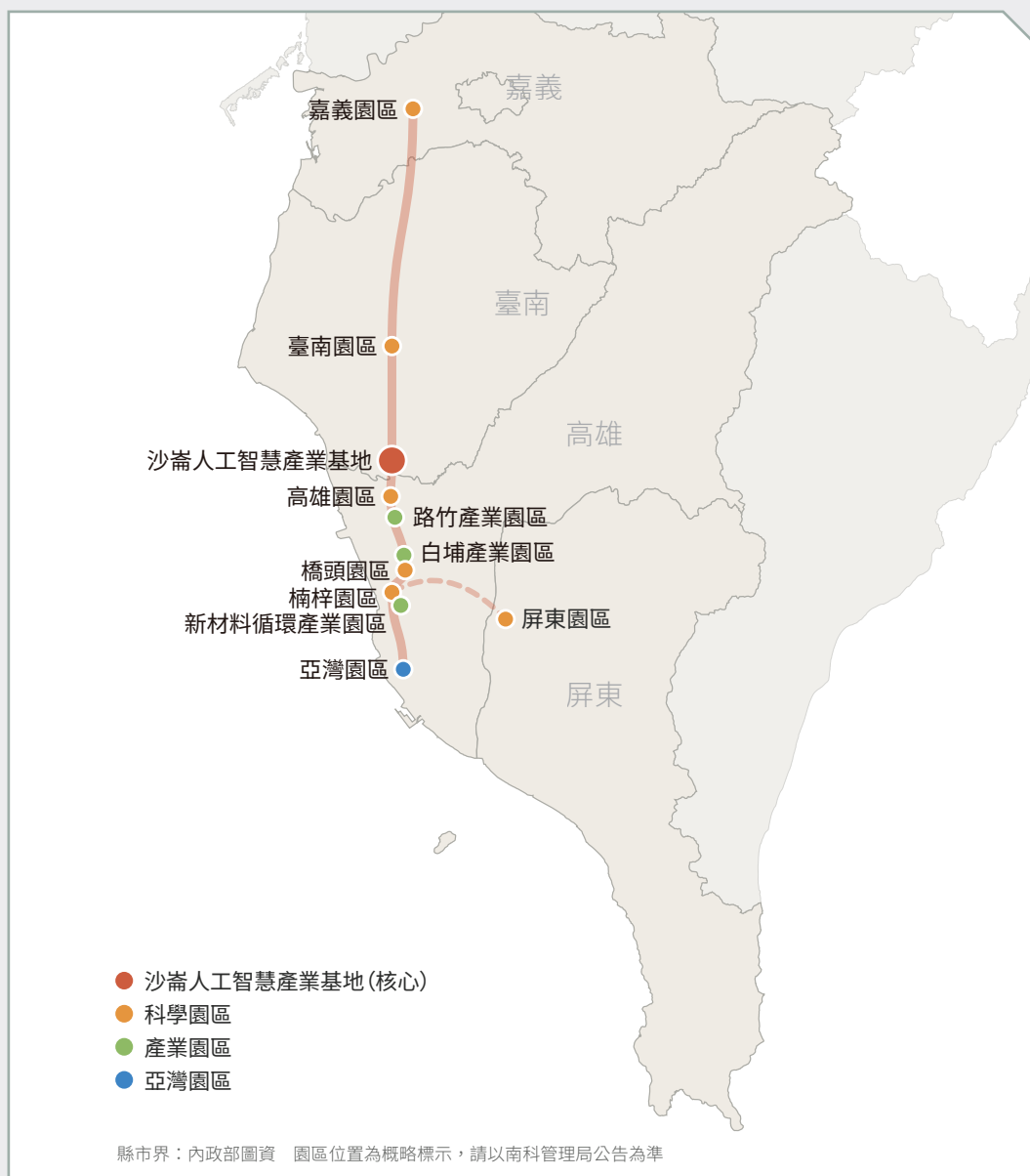
先從 AI 硬實力來看，鄭秀絨指出：「全世界 90% 的 AI 晶片都在南科生產，這是南科的優勢，也是支撐全球 AI 發展的重要基礎。」

經過三十年努力，南科以台積電、聯電為核心，已成功吸引全球前五大半導體設備商進駐，並往上游的晶片設計，及下游的關鍵零組件與伺服器代工延伸，發展出全球最完整的半導體產業聚落之一，包括 AI 晶片、先進製程、先進封裝，與高速傳輸、運算元件等關鍵技術，在南科統統看得見。

再者，南科全力建構 AI 基礎設施能力，隨著生成式 AI 快速發展，「算力、資料與應用能力已是影響產業競爭力的關鍵，」鄭秀絨指出，未來南科將結合國家算力資源、學研機構能量，及產業創新需求，逐步建構從晶片研發、算力支援到應用驗證的完整合作鏈結，協助企業縮短技術開發與落地應用之距離。

第三個層面則是 AI 應用與產業生態系的擴展，南科將推動 AI 技術從研發端走向實際應用，結合智慧製造、智慧醫療、智慧交通、智慧能源等多元場域，促進跨域合作與創新，鄭秀絨認為南科除了製造，也可以是實踐場域，「讓 AI 不只是提升產業效率的工具，更能創造新服務模式與產業價值。」

事實上，南科本身就是一個 AI 重度使用地，譬如南科管理局已運用 AI 科技打造出緊急應變的智慧防救災系統，這套系統結合數位地理資訊、大數據資料庫等技術，已架構出精準的分析能力，一旦哪個地方發生火災，這套系統會自動判讀當時風向



半導體 S 廊帶北起嘉義園區，南經臺南、沙崙、高雄、橋頭、楠梓至亞灣園區，並東接屏東園區，串聯科學園區與產業園區（資料來源：國科會「大南方新矽谷推動方案」）

會影響到哪些區域，而這些區域分別存放哪類化學品，這些化學品的特性是什麼、如何有效撲滅。

此外，南科的污水處理設備也加入了 AI 智慧化分析系統，可幫助南科不斷優化污水處理參數，現在南科的污水處理添加藥劑已較以往降低 25%。科學園區上下班尖峰時間的塞車潮向來是許多人的頭痛問題，南科引進智慧交通系統後，也能有效紓導車流量，這些例子都為 AI 導入園區治理做出最佳示範。

結合沙崙，打造雙核心 AI 聚落

除了打造自身 AI 硬實力，鄭秀絨不諱言，在 AI 產業競爭時代，單一園區的力量已經不足以因應全球科技發展的速度，未來大南方新矽谷推動方案的發展關鍵在於區域協作與資源整合，因此，南科不僅要扮演驅動 AI 創新的引擎，也要與沙崙園區共同建構出雙核心 AI 聚落。

其實在大南方計畫中，沙崙生態科學園區是一個兼具科技創新、生活環境與生態保育都能共存共榮的示範場域，定位為研發、試量產、算力支援、智慧醫療與綠能技術驗證的重要基地。

2025 年，在國科會的指導下，財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心在南科新建雲端算力中心，這座中心兼具大型 AI/HPC 算力基地與國際電信節點功能，是臺灣推動 AI 與大南方新矽谷的重要支點，預計 2029 年沙崙也將啟用智慧創新算力中心，這兩者將共同形成南臺灣科技廊帶的雙算力核心，幫助臺灣在全球 AI 算力上站穩領先地位。



沙崙生態科學園區將與既有的沙崙智慧綠能科學城整合，成為大南方新矽谷的核心（照片由南科管理局提供）

除了結合沙崙的 AI 與綠能研發能量，南科也與周邊重要發展據點形成更緊密的合作關係，包括嘉義的無人機產業聚落、高雄的半導體與智慧製造產業，藉此共同建構跨縣市、跨領域的創新合作網絡，「因此，未來競爭的不只是單一園區，而是整體創新生態系的競爭，」鄭秀絨指出。

在這個生態系中，人才與研發能量也是不可或缺，目前許多學研機構已經陸續進駐沙崙園區，包括陽明交通大學沙崙校區、成功大學沙崙醫療創新園區，及工業研究院、中央研究院等機構，還有 AMD 也在沙崙設立研發據點，這些布局都為南科推動 AI 新世代科學園區蓄積出強而有力的成長量能。

此外，沙崙園區的另一大特色是，將生態共融作為園區規劃的核心理念，南科管理局在規劃初期就同步納入生態、棲地、水環境及景觀系統等整體考量，「而不是把環境議題視為開發完成後才要處理的問題，」鄭秀絨指出，這樣的思維早在 30 年前蓋南科時就已經存在。



南科公共藝術「金龍」由連續拱門構成，設計概念取自 Yellow Ribbon (黃絲帶)，歡迎海外人才與廠商返鄉 (照片由南科管理局提供)



鄭秀絨局長於專訪中談及南科生態保育與永續供應環境的推動歷程



鄭秀絨局長與台灣世曦黃炳勳總經理進行專訪對談

打造永續供應環境

因應全球 AI 與淨零浪潮，持續形塑兼具生態保育與產業發展的永續環境也是南科建立 AI 新世代科學園區的重要一環，鄭秀絨坦言，隨著社會進步，大家對科技發展與環境保護的期待都比過去高出許多，「現在大家更多的關心在於科技發展同時，能否兼具環境永續與社會共好。」

維持生態、提升環境一直是南科付諸行動的社會責任，「所有規劃思考都是以生態先行，」鄭秀絨笑說，30 年前南科就為了幾隻燕鴿，設立 30 公頃生態保護區，最令人意外的是南科開發初期，僅記錄到 69 種鳥類會棲息在此，後來棲息的鳥種竟提升至 131 種，足見南科已打造出生態友善的永續環境。

生態先行之外，在南科，也處處可見富藏巧思的公共藝術空間，譬如從南科南邊走進來，就可以看見被稱為金龍的公共藝術，這條金龍其實是由一道道連貫的拱門構築而出，它在晨曦、夕陽或夜晚燈光的照耀下，很像是一條金龍徜徉在南科土地上，這個設計概念來自台灣世曦工程，意涵是 Yellow Ribbon（黃絲帶）歡迎每位在海外打拼的人才與廠商共同返鄉，共創南臺灣的科技高峰。

除了從土地規劃出發，南科形塑永續供應環境更包括水與電，「而且南科絕對不能斷電或斷水，否則廠商的損失有可能是上億起跳，」鄭秀絨指出，南科是全臺灣再生水用量最大的科學園區，台積電等晶圓廠已承諾未來新廠區生產時百分之百使用再生水，即使水費單價遠超過一般用水，但南科許多廠商依舊照單全收，同時，南科也持續推動多元供水與再生水利用，以降低對單一水源的依賴。



立體停車場屋頂的太陽光電，善用既有建築屋頂空間發電。南科推動綠電使用，未來風電也將納入供應鏈（照片由南科管理局提供）

在能源方面，早在南科開發初期，南科就已經為台積電等大廠建置雙迴路電纜，近年更積極推動太陽能等綠電使用，未來風電也將加入供應鏈，以因應 AI 與先進製程帶來的高用電需求。

水與電的不斷鏈供應為 AI 新世代科學園區創造出不斷攀升的生產能量，此外，鄭秀絨也直言：「南科是最大器的科學園區，」因為南科除了佔地大，更保留大面積的綠地、生態區供民眾共享，工業用地面積佔園區面積不到五成、再加上建蔽率六成，初衷就是希望提供南科人舒適的工作與生活空間，以吸引更多企業與人才進駐。

讓科技、自然與城市共存共榮

展望未來，AI 最重要的資源之一就是人才，「有效吸才、留才，將成為南科管理局與廠商共同的責任，」鄭秀絨指出，未來南科不只聚焦於產業布局，將更重視人才發展與生活環境建設。

過去，傳統科學園區多屬於封閉型、純製造的工業聚落，園區內是高科技廠房，園區外則是傳統生活圈，兩者互動較少，但南科保留生態區時，就已經逐步打破這個界線，讓更多人們願意常常走進來，有人來跑步，有人來騎單車，南科人也能享受到這片充滿活力的綠意。

同樣的，過去大家提到臺南，往往會想到深厚的歷史文化、人文底蘊，在 AI 新世代科學園區架構下，南科將協助臺南打造融合 AI 新智慧、科技研發、綠能與生態的新型城市典範，兼具文化底蘊與宜居品質，也為產業、城市與人才共同創造三贏局面。

其實高科技產業的競爭，本質上就是人才戰，長期以來，南科一直努力推動學研產無縫接軌；園區周遭有多所知名大專院校，包括中正大學、嘉義大學、成功大學、南臺科技大學、陽明交大、中山大學、高雄大學、高雄醫學大學、高雄科技大學、屏東大學、屏東科技大學等 50 多所公私立大專院校，學校與園區廠商透過課程與企業實習計畫等產學合作，規劃人才需求布局，充沛專業技術人力，廠商所需人才不虞匱乏。此外，愈來愈多科技大廠將具發展性的職缺大量在南科落地後，也讓愈來愈多頂尖人才願意在南科扎根。

這場新智慧轉型正在徹底改變大南方科技島，鄭秀絨指出，她希望 10 年後回頭來看，大家記得的不只是南科抓住了 AI 發展機會，更重要是南科在這個關鍵轉型時代，走出一條新發展道路，所謂 AI 新世代科學園區將是一個讓 AI 科技、自然與城市能夠共存共榮的驗證場域。



傳統科學園區是封閉的製造聚落，南科園區保留大面積綠地與生態區，以宜居環境吸引並留住人才（照片由南科管理局提供）

次世代科學園區虛擬電廠 與微電網 AI 電能管理

關鍵詞 Keywords

- # 虛擬電廠 Virtual Power Plant (VPP)
- # 人工智慧電能管理 AI-driven Energy Management
- # 區塊鏈電力交易 Blockchain-based Power Trading
- # 全時無碳電力 24/7 Carbon-Free Energy (24/7 CFE)
- # 交 / 直流混合微電網 Hybrid AC/DC Microgrid

國立成功大學 電機系

博士後研究員

廖建棠

博士生

陳禹丞

博士生

顏裕城

特聘教授

楊宏澤

壹、前言

一、國際發展趨勢

近年來人工智慧 (artificial intelligence, AI) 技術快速突破，已經從早期資料分析工具進一步演化為驅動產業升級與基礎建設革新之核心引擎。尤其生成式 AI、大型語言模型 (large language model, LLM)、智慧代理系統與邊緣運算技術蓬勃發展，使全球對高效能運算 (High Performance Computing, HPC) 與資料中心之需求大幅攀升。台灣在全球半導體與電子供應鏈中具關鍵地位，從晶圓代工、IC 設計、封裝測試、伺服器組裝至電源供應器、散熱與機電整合等領域，均扮演不可或缺之角色，推進台灣產業鏈進入新一波擴產週期。科學園區、工業區及產業聚落持續新增廠房、研發中心與高科技產線，帶動電力及再生能源需求快速成長。

然而高科技製造業對電力品質要求極高，例如晶圓製造廠、記憶體廠、高階封裝廠及精密電子產線，其設備包含曝光機、蝕刻機、真空系統、自動搬運設備與高度自動化控制系統，對瞬時電壓驟降 (Voltage Sag)、頻率偏移、諧波干擾與短時停電皆極為敏感。即使僅數百毫秒的電壓波動，亦可能



導致製程中斷或晶圓報廢，造成龐大經濟損失。

此外，由於高科技產能擴張，國內用電大戶數量劇增，尖峰負載成長速度將遠勝過去預期，故國內供電之備轉容量亦成為重要議題。同時企業淨零轉型壓力漸漲，國際品牌客戶普遍要求供應鏈使用綠電，亦使再生能源供給量、憑證機制與儲能調度能力備受關注。鑒此，未來科學園區電能管理之核心挑戰，將著重於如何在穩定供電、優質電力、低碳轉型與成本控制間取得最佳平衡，而 AI 技術應用與電能管理系統之整合將為實現此目標之關鍵。

二、挑戰與 AI 應用解方

（一）電力品質

科學園區對電力品質要求極高，若發生瞬時電壓驟降或頻率偏移，恐造成精密設備停機、製程中斷與產品報廢。為因應此挑戰，可導入靜止同步補償器（static synchronous compensator, STATCOM）或統一潮流控制器（unified power flow controller, UPFC）等彈性交流傳輸設備，提供快速虛功補償、電壓支撐與潮流控制能力，降低電壓波動對製程之衝擊。透過 PSS/E、DigSILENT PowerFactory 等電力

系統分析軟體建立園區電網模型，進行暫態與故障情境模擬，並結合 AI 演算法決策控制參數，可自動優化設備配置策略及動態響應過程，提升電網韌性與電力品質。

（二）韌性與可靠度

為提升科學園區供電韌性與可靠度，傳統作法多以雙迴路供電、變電站備援及關鍵設備冗餘設計實現，然而面對極端氣候、設備事故、區域停電與資料中心電壓等級需求等挑戰，較難滿足次世代科學園區之需求，因此須進一步導入具自主運轉能力之交 / 直流多重微電網架構。微電網可整合太陽光電、儲能系統與可控負載等分散式電力資源（distributed energy resource, DER），當外部電網異常時，可迅速切換為孤島運轉模式，維持關鍵設施持續供電。為延長孤島運行時間，需建立負載分級機制，優先供應晶圓製程、無塵室、資料中心與公共安全系統。進一步結合 AI 演算法，可考量再生能源與負載不確定性，進行最佳化電能調度與即時決策，以延長孤島存續時間強化科學園區整體韌性。

（三）用電成本

科學園區內之產業多屬高耗能用戶，全年運轉負載高且尖峰用電集中，使電費支出長期居高難下。隨燃料成本波動、電價調整及碳費制度逐步推動，企業面臨之能源成本壓力將持續增加。鑒此，可配合時間電價制度進行削峰填谷，將部分可調整製程、空調系統與非關鍵設備運轉時段移轉至離峰時段，以降低尖峰電費負擔，同時進一步結合 AI 排程調度，藉分析歷史負載曲線、生產排程、氣象條件與電價資訊，預測每日用電需求及再生能源發電，自動

規劃最適運轉策略與設備啟停時序。另可結合 DER 智慧化調控，進行即時需量控制與能源協同調度，在尖峰時段快速抑制負載，可達成動態調度、降低需量費用與能源成本，協助園區建立高效電能管理模式，在穩定生產前提下降低整體用電支出。

（四）參與電網調節

科學園區之高壓用電大戶，需肩負提升整體電力系統穩定之社會責任。隨再生能源占比提高，對電網頻率控制、備轉容量與供需平衡帶來挑戰。若大型用戶能參與電力輔助服務市場，不僅可協助電力系統進行電網調節，亦有利於容納更多綠電。整合儲能系統、備用發電機、空調群控與可調整負載，參與需量反應或備轉容量調度服務，可創造額外收益來源。進一步導入 AI 智慧調度，可即時分析負載變化、設備狀態、市場價格與負載抑低訊號，決策可調度投標容量並自動決策最佳參與策略，兼顧生產穩定與收益最大化。

（五）綠電需求

全球淨零排放趨勢正加速推進，國際品牌大廠陸續要求供應鏈提高再生能源使用比例，台灣高科技製造業亦面臨 RE100 與 24/7 全天候無碳能源（carbon-free energy, CFE）等倡議要求。對科學園區企業而言，綠電是維持國際競爭力與供應鏈地位之重要門檻。然而，再生能源具間歇性與區域差異，企業常面臨綠電供需時段不匹配、轉供餘電浪費及採購成本偏高等問題。為提升綠電使用效益，可導入 AI 能源管理技術，整合用電負載、綠電出力預測、儲能容量與轉供契約最佳化，即時控管各時段綠電供需情形，進而最佳化排程

調度。AI 可自動調整製程用電時序、儲能充放電策略與跨場域電力配置，提高綠電即時匹配程度以降低餘電，加速邁向低碳供應鏈目標。

貳、次世代科學園區能源管理架構

一、電力市場方案

在次世代科學園區中，可藉 AI 與區塊鏈技術參與電力市場方案，進而可望在提升供電韌性之餘創造額外收益。園區聚合儲能與備援電力資源，可參與台電電力交易平台之輔助服務，例如即時備轉或補充備轉，同時亦可執行需量反應 (demand response, DR)，於尖峰時段抑低負載，換取電費扣減。此外針對大型用電戶之時間電價費率，AI 系統可自動執行「削峰填谷」，在離峰低價時儲能、尖峰高價時放

電，並結合精準的負載預測，系統能動態調整契約容量，避免超約罰款，從而最大化能源使用效率。因應國際減碳趨勢，區塊鏈平台需結合 AI 預測，即時媒合園區自產與外部綠電資源，確保每度用電皆具不可竄改之綠電憑證，同時應對國際供應鏈對於 RE100 與 24/7 CFE 需求，亦可透過 AI 電能管理智慧調度儲能，以降低轉供餘電，促進園區內廠商成功邁向淨零轉型。

二、架構角色分工

次世代科學園區之電能管理不再僅單向消耗電力，而將演進為數位化、智慧化且具備高度韌性之整合式生態系統。圖 1 所示為次世代科學園區電能管理架構圖，其核心由「AI 電能管理系統」、「區塊鏈虛擬電廠管理與交易平台」及「分散式電力資源」三大層級構成。科學園區 AI 電能管理系

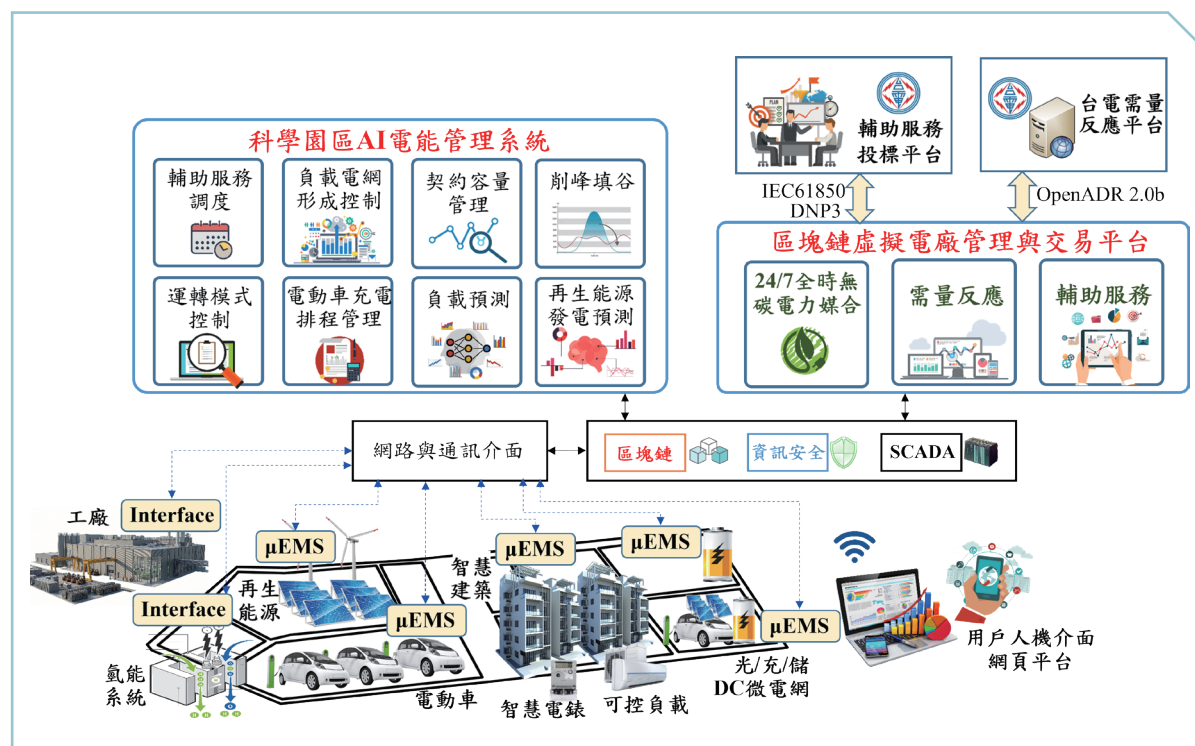


圖 1 次世代科學園區交 / 直流多重微電網能源管理架構圖

統扮演「大腦」角色，其整合了多項 AI 關鍵功能，包括負載預測與再生能源發電預測，作為決策基礎，在運行控制上，則涵蓋了削峰填谷、針對可控負載之電網形成控制、契約容量管理、電動車充 / 放電排程與微電網模式控制，以確保園區在不同情境下皆能穩定運行。

園區內之工廠、辦公大樓、再生能源站、氫能系統及儲能系統，均部署了微型能源管理系統 (μEMS)，其可各自管控轄下電力資源，並透過通訊界面與感測器，即時監控各用戶之用電狀態，同時與中央 AI 電能管理系統共享資訊，透過邊緣與雲端協同設計，確保電力調度之即時性。在市場與服務層，導入基於區塊鏈技術之虛擬電廠 (virtual power plant, VPP) 平台，此平台將園區內分散之儲能與可控負載等資源聚合，以與台電之需量反應平台與輔助服務平台介接。透過區塊鏈去中心化及不可竄改之特性，確保了電力交易與「24/7 全時無碳電力媒合」之透明度與資安防護。藉此，科學園區自單純之能源消耗者 (Consumer) 轉變為多元彈性之產銷者 (Prosumer)，並於維持高科技製程所需之供電穩定前提下，創造能源運籌之經濟價值。

三、先進資通訊架構

在次世代科學園區的能源管理架構中，通訊技術為連結實體設備與 AI 智慧大腦之「神經系統」。為了實現跨場域資源整合與即時調度，架構中採用多層級、標準化之通訊協定，確保「資訊流」可精準引導「電力流」。VPP 平台透過 IEC 61850 高可靠度電力通訊標準對接台電輔助服務市場，確保調度指令能快速達成電網平衡需求，並利用 OpenADR 協定接收需量反應訊號，

自動化調節 DER 以降低淨負載。用戶端資源聚合可透過 RESTful API，達成園區管理平台與各廠區、建築 μEMS 間之通訊需求，藉此標準化設計，各單位可即時上傳數據，並接收來自 AI 系統之調度資訊。

為支撐高科技製程對穩定性之極端要求，電能管理系統核心具備主備援 (Primary-Backup) 冗餘機制，平時主伺服器負責運算，備援端持續同步數據，一旦偵測異常即可快速接手，確保能源調度不中斷。此外，系統導入雙重權杖 (Token) 驗證，所有設備數據交換前皆須透過數位憑證識別，防止惡意指令滲透。當發生大規模停電轉入孤島運轉時，通訊架構將啟動緊急協作模式，由平台精確下達負載控制指令，協調氫能燃料電池與儲能系統完成全黑啟動，透過高韌性數位基礎，在智慧調度同時守護園區用電安全。

參、能源管理系統

圖 2 所示為電能管理系統架構示意圖，其透過網路及通訊介面與外部平台或設備介接，以取得關鍵數據或傳遞控制指令，核心運算功能包括負載與綠能發電預測、最佳化調度演算法及最佳投標參數決策，分別如下所述。

一、AI 負載與綠能發電預測

在智慧電網中，預測為所有調度決策之基礎。AI 電能管理系統透過整合歷史數據與氣象資訊，精準推估未來負載需求與再生能源發電量，促使電力調度自「事後反應」轉向「事前規劃」。預測系統準確度始於數據純淨度，原始資料常因通訊中斷或設備異常而產生缺漏與離群值，系統透過

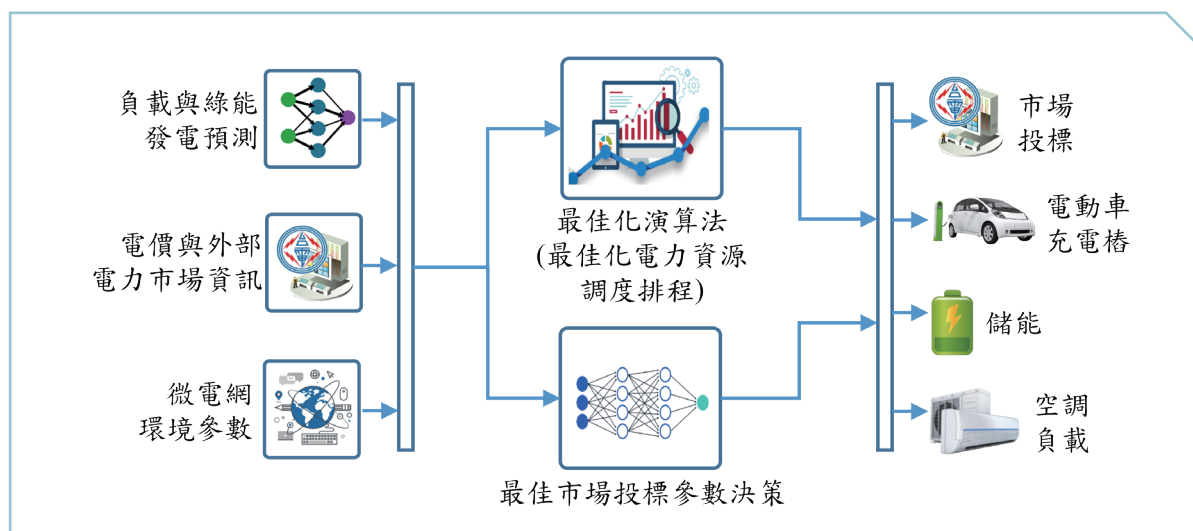


圖 2 電能管理系統架構示意圖

資料前處理，利用線性插值或迭代補值修正缺漏，並篩選出如氣溫、輻照度與歷史用電慣性等關鍵特徵，以確保 AI 在高品質基礎上學習。

由於不同類型之用戶用電行為不同，模型將依用戶類型執行建模策略。例如數據中心型設施規律性強，AI 將側重歷史規律；而工廠受設備啟停影響變動大，則需更靈敏地參考即時工況。太陽能預測則結合全球水平輻射與雲層遮蔽度，動態掌握綠電產出，維持微電網內供需平衡。為因應不同營運需求，一般預測系統提供不同預測模式，例如日前預測（Day-Ahead）與即時預測（Real-Time），實務顯示即時預測更可捕捉短期變化或某些突發行為，配合日前掌握趨勢且即時精準修正之調度策略，有利於科學園區提升能源效率，確保電力供應韌性。

二、最佳化調度演算法

在次世代科學園區中，EMS 已由單純監控工具進化為以 AI 為核心之運籌指揮中心。

面對再生能源間歇性與高科技製程負載變動，AI 是化解不確定性並創造經濟價值之關鍵引擎。由於氣象與負載難以百分百精準推估，AI 採納「預應排程」與「即時修正」之雙軌策略。在日前排程階段，AI 利用最佳化演算法進行全域搜尋，考量時間電價與預報資訊，產出成本最低之 DER 電能調度排程。當現實情況與預測產生偏差，系統依即時修正機制，即 AI 透過「移動滑窗控制」技術，每五至十五分鐘滾動重新計算，動態調度儲能或其他 DER 補足缺口，確保能源效率與電力品質不因預測誤差受損。AI 可協助扮演電力交易員，其根據時間電價執行「削峰填谷」，在離峰低價時蓄能、尖峰高價時放電，最大化套利空間。此外，固態氧化物燃料電池（solid oxide fuel cell, SOFC）被視為未來減碳關鍵助力，EMS 中應包含廢熱回收及吸收式冷卻設備之物理模型，從而實現冷熱電三能最佳化協作之運轉目標。園區電力資源將被聚合為虛擬電廠，自動判斷市場行情並參與台電輔助服務投標，將原本僅供備援之資產轉化為額外營收。

三、最佳投標參數決策

在電力市場中，AI 參與投標之核心在於將預測轉化為風險決策，面對預測不確定性，可結合隨機最佳化（Stochastic Optimization）與即時修正以最大化收益並降低風險。虛擬電廠之最佳投標決策將考量電力交易平台之即時價格、園區內負載預測及發電數據，並採用最佳化演算法求解最適化資源調度配置，以使電力資源在參與輔助服務或隨時間電價削峰填谷間取得最佳效益。

面對天氣或負載波動，AI 可採用兩種機制防禦，首先採用二階段滾動調度（Rolling Horizon Control, RHC），其除了在日前階段產出初步排程，並於進入即時階段後，透過移動滑窗控制（RHC），每隔特定時間間隔依最新感測數據（如突發雲遮或產線停機）重新預測並決策，藉由動態調整將預測誤差產生之衝擊降至最低。透過 AI 引擎計算投標容量時，亦可納入預測結果之信賴區間，若預測不確定性高，AI 將採取

相對保守之投標比例，保留部分電力作為緩衝，以避免因實際供電不足而面臨市場罰款風險。藉由預測、最佳化與即時修正之多重保險，將可於充滿變數之能源市場中，更穩健地促進科學園區參與電力市場之最大效益。

肆、區塊鏈綠電與輔助服務交易平台

一、區塊鏈架構

區塊鏈虛擬電廠聚合平台扮演了科學園區資源整合與市場參與之關鍵角色，其架構圖如圖 3 所示，該平台可將分散在各案場的太陽能、儲能系統及電動車等資源，透過數位化聚合成單一電力服務供應個體。區塊鏈技術的核心價值在於提供不可竄改、透明且安全之電力交易帳本，各案場之 μ EMS 與區塊鏈電力交易平台直接交接，使每一度綠電產出、儲存或交易資訊，皆被記錄於分散式帳本上，從而確保電力媒合與結算之公正性。

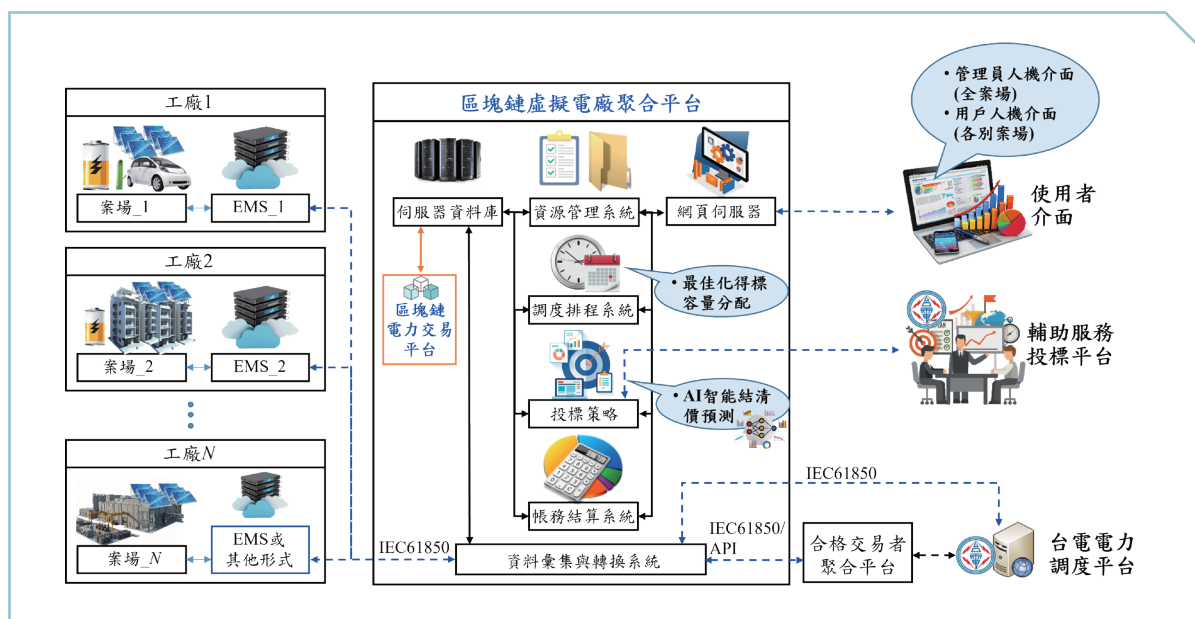


圖 3 科學園區區塊鏈電力交易平台

透過 AI 智慧結清價預測，可分析市場趨勢並提供精準價格參考。藉此 AI 將進行最佳化投標演算，根據各案場即時剩餘電力與預測需求，自動計算出最具競爭力之投標策略，並透過智慧合約自動化媒合並產生結清方案，同時將結果指令發送至各場域，使園區能以最優策略參與台電輔助服務與需量反應市場。平台提供多層次人機介面，管理員介面可掌握全案場資源配置與交易狀態，用戶介面則供個別案場即時監控自身電力貢獻與收益明細。整體架構可對外連接台電的電力交易與需量反應平台，形成自底層案場設備、中層區塊鏈平台至上層 AI 決策核心之完整生態系。

二、分散式帳本與智慧合約

科學園區中之虛擬電廠需整合跨企業、跨場域之電力資源，為確保各廠區間之電力調度、綠電交易與結算紀錄可靠，系統導入區塊鏈分散式帳本與智慧合約技術，建構出一去中心化之能源信用體系。傳統能源系統依賴中央伺服器記錄數據，易產生單點故障或資料造假風險。本架構採私有鏈或聯盟鏈技術，帳本由區塊鏈歷史紀錄與資料庫組成，詳實記錄每一筆交易之出價、調度指令與發電實績等。由於資料儲存於多個節點，即便單一廠區網路中斷，整體帳本仍可持續運作。此外企業間之敏感生產數據可獲得隱私保護，僅授權成員可讀取完整內容，兼顧透明與資安。

智慧合約為一段預先撰寫於區塊鏈上之程式碼，可作為虛擬電廠之自動執行官。當 AI 模型計算出最佳調度方案後，智慧合約自動執行交易撮合與結算，無需人工介入。其可自動驗證資料來源、追蹤能源去向，並在滿足特定條件時立即啟動儲能充放電指令。藉

上述數據上鏈與合約執行機制，將使科學園區之電能協作具備極高公信力，不僅縮短交易結算時間，更為未來綠電憑證追蹤與淨零稽核奠定穩固數位基礎。

三、電力交易與市場整合

虛擬電廠聚合平台，將 DER 轉化為具備市場競爭力之電力資產，促進企業在滿足產能之餘，盡可能達成預定之綠電匹配。國際大廠對供應鏈要求漸從早期 RE100 演進至更嚴苛之 24/7 CFE（全天候無碳能源），其意味著企業必須證明每小時用電皆來自當下之綠電產出。為此，園區透過 VPP 聚合商角色，建立一套涵蓋一、二次媒合機制之調度策略。當一次媒合後產生餘電時，將透過 AI 調度進行二次媒合，以將餘電媒合至其他有需求之案場，大幅降低轉供餘電浪費，並顯著提升綠電實質使用比例。除綠電媒合外，VPP 平台更引導園區參與台電電力交易平台，其可將園區內各案場之電力設備跨區聚合為一個大型電力資源，以參與輔助服務市場。當台電下達調度指令時，VPP 管理平台將依各案場剩餘容量，利用 AI 演算法進行「容量分配最佳化」，確保園區在獲取容量費收益同時，不影響產線的正常運作。

為極大化綠電使用效率並降低餘電，系統導入動態修正機制。例如儲能系統在白天綠電過剩時充電，並在高電價或綠電短缺時段放電，以藉此達成時間電價套利或舒緩綠電發用電時段不匹配問題。在「24/7 全時匹配方案」下，平台每五分鐘更新一次分配指令。若某一小時內偵測到新增餘電，VPP 將自動將其平攤至該時段後續區間。藉此即時調度邏輯，使園區可動態追蹤綠電產出脈動，將原先可能流失之餘電精準轉化為企業之減碳實績。

伍、交 / 直流多重微電網整合架構

一、需求與目的

科學園區作為我國經濟命脈，其內部晶圓製造與精密製程對電力品質存在近乎苛求之標準，因此對於電網不再僅是單向接收端，而將演進為具高度自主性與韌性之整合式多重微電網架構。由於半導體等產業失電成本極高，因此次世代科學園區必須在市電停電時具備持續供電與復原能力，透過多重微電網部署，可將風險分散並建立區域性電力互助網路。

隨著高效能運算需求攀升，園區內可能設置資料中心，傳統交流供電在轉換為直流驅動伺服器時可能產生多層轉換損失，因此導入直流微電網將成技術必然。次世代架構採用交 / 直流混合微電網，直流側可直接併接儲能系統、太陽能發電與資料中心負載，減少變壓損耗並提升效率；交流側則維持與既有廠房及傳統負載之相容性，兩者透過雙向電力轉換設備互聯，形成高度靈活之能量轉換機制。

二、韌性強化架構

圖 4 (a) 所示次世代科學園區併網供電架構，為了確保供電穩定，園區標配雙迴路供電系統，用電大戶亦可能自設 161kV 等級之變電站，其將作為主要電能供給來源，並可另設備用契約容量以透過其他外部「常開」饋線與他區用戶相連，一旦遭遇特殊時期或主要迴路受損，即可作為緊急電能輸送之戰略通道，確保園區電力相互融通且供應不中斷。因應 24/7 CFE 與淨零排放需求，未來 SOFC 可提供低碳基載電力，更能與電池儲能系統協作，其將具備孤島時之構網型電源 (Grid-Forming) 能力，以自主建立電壓與頻率。

當市電因故停止供電，微電網控制系統將立即接管復電程序，內部交 / 直流微電網將依據事先設計好之流程完成全黑啟動 (Black Start)，以重新建立微電網之運轉。次世代微電網具備「外部救援能力」，其可透過操控原常開之備用饋線，並逆向將內部 SOFC 或儲能等分散式電力資源發出之餘裕電能，輸送至周邊其他關鍵用戶或重要設施，如圖 4 (b) 所示。藉此，科學園區之能源角色將自消耗端轉向區域韌性之穩定者，建構出結合 AI 及電力技術高度結合之次世代能源生態。



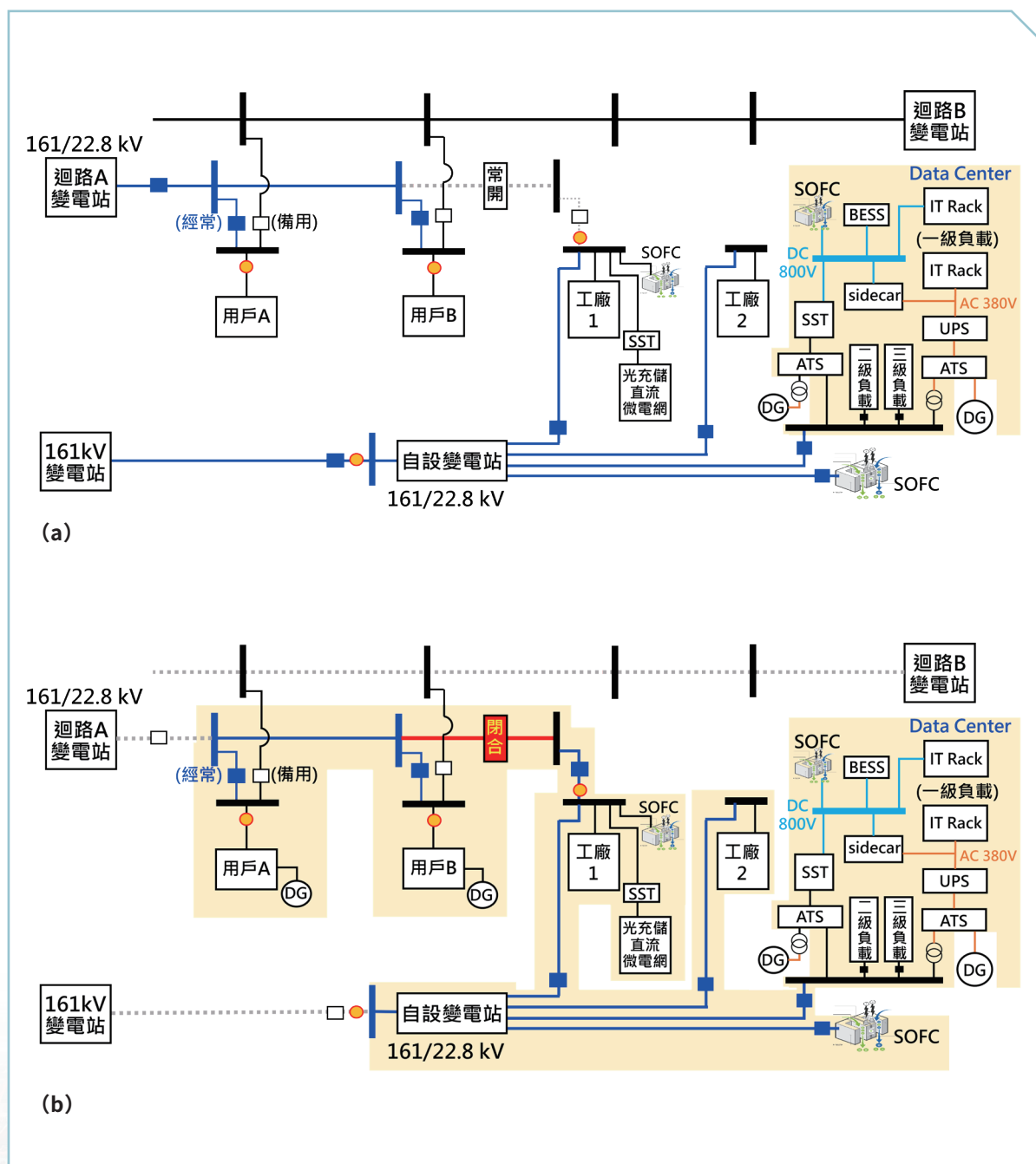


圖 4 次世代科學園區韌性強化交直流微電網架構 (a) 併網模式, (b) 離網模式

三、直流微電網應用

圖 5 所示為次世代科學園區中直流微電網之電力架構，因應新式高壓直流供電之運算伺服器需求，固態變壓器（solid-state Transformer, SST）被視為關鍵技術，其取代傳統變壓器以實現 AC 22.8 kV 高壓市電與 DC 800 V 直流匯流排間之雙向潮流控制。在直流側系統整合了 SOFC、儲能系統及高耗能之 IT Rack（資料中心），避免了多次交 / 直流轉換之能量損失，大幅

提升供電效率。當外部電網發生故障時，智慧能源管理系統（Energy Management System, EMS）將立即啟動孤島運轉機制，引導內部發電資源由「併網模式」轉為「構網模式」，守護關鍵負載不斷電。同時直流微電網可透過雲端 VPP 聚合平台，將分散之電力資源轉化為虛擬電廠，參與電力市場輔助服務。透過四路開關靈活調度，微電網可在特殊情境下透過備用饋線支援其他用戶，構建出兼具經濟性、低碳轉型與極致韌性之次世代供電系統。

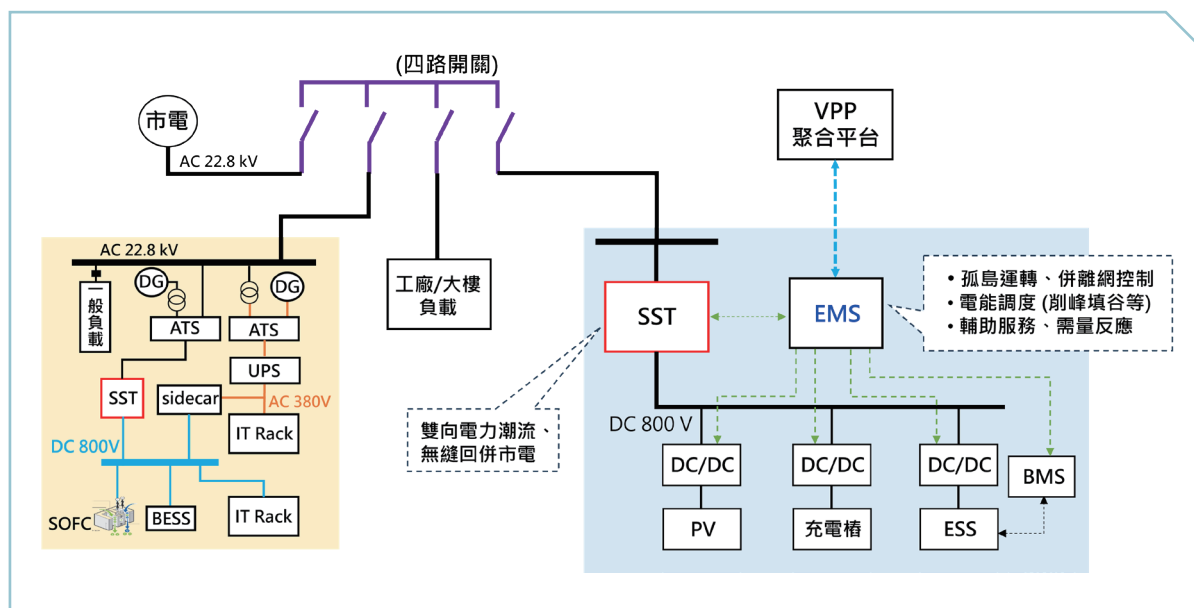


圖 5 次世代科學園區之直流微電網應用

陸、結論

本文綜述次世代科學園區在 AI 與綠能轉型浪潮下之智慧電網整合架構，面對半導體等高產值製程對電力品質之極致要求，傳統供電架構正進化為具備高度自主性之交 / 直流多重微電網系統，使科學園區自能源消耗者轉型為具備強大韌性之產銷者。在技術實踐上，AI 電能管理系統扮演了化解預測不確定

性之決策核心，透過「日前排程」與「即時滾動修正」雙軌調度，系統能有效平抑綠能波動，在確保生產穩定前提下，極大化削峰填谷與契約容量優化之經濟效益。隨著區塊鏈 VPP 聚合平台導入，利用不可竄改之帳本與智慧合約，建立起透明能源信任體系，協助園區企業接軌 RE100 與 24/7 CFE 等國際綠色供應鏈標準，並透過參與輔助服務市場創造額外收益。

最後，在實體電力架構層面，藉由固態變壓器（SST）與構網型電源技術，微電網不僅提升了能源轉換效率，更具備了全黑啟動與逆向支援之救援能力。當市電發生大規模停電時，園區能迅速轉為孤島運轉模式，守護關鍵產線不斷電。綜上所述，次世代科學園區透過資通訊、電力技術與 AI 之深度融合，成功建構出兼具低碳轉型、經濟效能與極致韌性之能源防線，亦為我國產業永續經營奠定堅實基礎。

參考文獻

1. B. S. Liang, "AI Compute Architecture and Evolution Trends," IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 26, no. 1, pp. 10-40 (2026).
2. Vries, "The growing energy footprint of artificial intelligence," Joule, vol. 7, no. 10, pp. 2191-2194 (2023).
3. Kumar and P. Samuel, "Power Quality Issues and Their Impact on Industrial 4.0: A Comprehensive Review," IEEE Access, vol. 10, pp. 91354-91375 (2022).
4. J. Naughton, H. Wang, M. Cantoni, and P. Mancarella, "Co-Optimizing Virtual Power Plant Services Under Uncertainty: A Robust Scheduling and Receding Horizon Dispatch Approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 5, pp. 3960-3972 (2021.09).
5. United Nations, "24/7 Carbon-Free Energy," Energy Compacts, [Online] Available: 24/7 Carbon-Free Energy (2026.05.02).
6. Zaboli, Y. -H. Kim, and J. Hong, "An Advanced Generative AI-Based Anomaly Detection in IEC61850-Based Communication Messages in Smart Grids," IEEE Access, vol. 13, pp. 89997-90016 (2025.05).
7. M. Esnaashari, M. Ansari, and A. Ejlali, "DReaM: Deep Reinforcement Learning for Joint Reliability and Power Management in Multicore IoT Devices," IEEE Internet of Things Journal, vol. 12, no. 24, pp. 54509-54522 (2025.12).
8. Zhang and M. Xu, "Time-Segment Photovoltaic Forecasting and Uncertainty Analysis Based on Multi-Objective Slime Mould Algorithm to Improve Support Vector Machine," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, no. 3, pp. 5103-5114 (2024.12).
9. K. Song, M. Kim, and H. Kim, "Graph-Based Large Scale Probabilistic PV Power Forecasting Insensitive to Space-Time Missing Data," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 16, no. 1, pp. 160-173 (2025.01).
10. Z. Lin, W. Hu, D. Cao, P. Zhao, and Z. Chen, "Anchor Graph-Based Subspace Clustering for Large-Scale Residential Load Profiling," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 17, no. 2, pp. 1746-1749 (2026.03).
11. R. Lyu, H. Guo, K. Zheng, M. Sun, and Q. Chen, "Co-Optimizing Bidding and Power Allocation of an EV Aggregator Providing Real-Time Frequency Regulation Service,"

IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 6, pp. 4594-4606 (2023.11).

12. K. Antoniadou-Plytaria, D. Steen, L. A. Tuan, O. Carlson, B. Mohandes, and M. A. F. Ghazvini, "Scenario-Based Stochastic Optimization for Energy and Flexibility Dispatch of a Microgrid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 5, pp. 3328-3341 (2022.09).

13. S. Nikkhah, A. Allahham, M. Royapoor, J. W. Bialek, and D. Giaouris, "Optimising Building-to-Building and Building-for-Grid Services Under Uncertainty: A Robust Rolling Horizon Approach," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 2, pp. 1453-1467 (2022.03).

14. Mu, T. Ding, M. Shahidehpour, S. Liu, B. Chen, and W. Jia, "A Light Blockchain for Behind-the-Meter Peer-to-Peer Energy Transactions in Cyber-Physical Power Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 15, no. 1, pp. 1063-1074 (2024.01).

15. Peng, Y. He, H. Gu, K. Lai, X. Zhou, and H. Luo, "Dominance Constraints for Risk Control of a VPP's Optimal Bidding Strategy," IEEE Access, vol. 12, pp. 59122-59133 (2024.04).

16. W. Guedes, C. Oliveira, T. A. Soares, B. H. Dias, and M. Matos, "Collective Asset Sharing Mechanisms for PV and BESS in Renewable Energy Communities," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 15, no. 1, pp. 607-616 (2024.01).

17. M. R. Hamouda, M. E. Nassar, and M. M. A. Salama, "A Novel Energy Trading Framework Using Adapted Blockchain Technology," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 3, pp. 2165-2175 (2021.05).

18. T. Zhong, H.-T. Zhang, Y. Li, L. Liu, and R. Lu, "Bayesian Learning-Based Multi-Objective Distribution Power Network Reconfiguration," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 2, pp. 1174-1184 (2021.03).

19. Farley, H. Belnap, and M. Parvania, "The Altruistic Aggregator: A Community-Oriented Approach for Energy Resource Aggregation and Management in Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 41, no. 3, pp. 1869-1881 (2026.05).

20. Y. Chen, K. Shi, M. Chen and D. Xu, "Data Center Power Supply Systems: From Grid Edge to Point-of-Load," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 11, no. 3, pp. 2441-2456 (2023.06).



次世代具身 AI 科技服務基礎設施——AI-RAN 與邊緣智慧之整合架構與運作設計

關鍵詞 Keywords

- # AI 無線接取網路 AI-RAN (AI Radio Access Network)
- # 具身 AI Embodied AI
- # 代理式 AI Agentic AI
- # 邊緣智慧 Edge Intelligence
- # 6G 整合感知與通訊 6G Integrated Sensing and Communication, ISAC

工業技術研究院
產業服務中心

資深研究員
王鄭翰

國立陽明交通大學
智慧與綠能產學研究所

所長
陳建志

國立陽明交通大學
光電學院

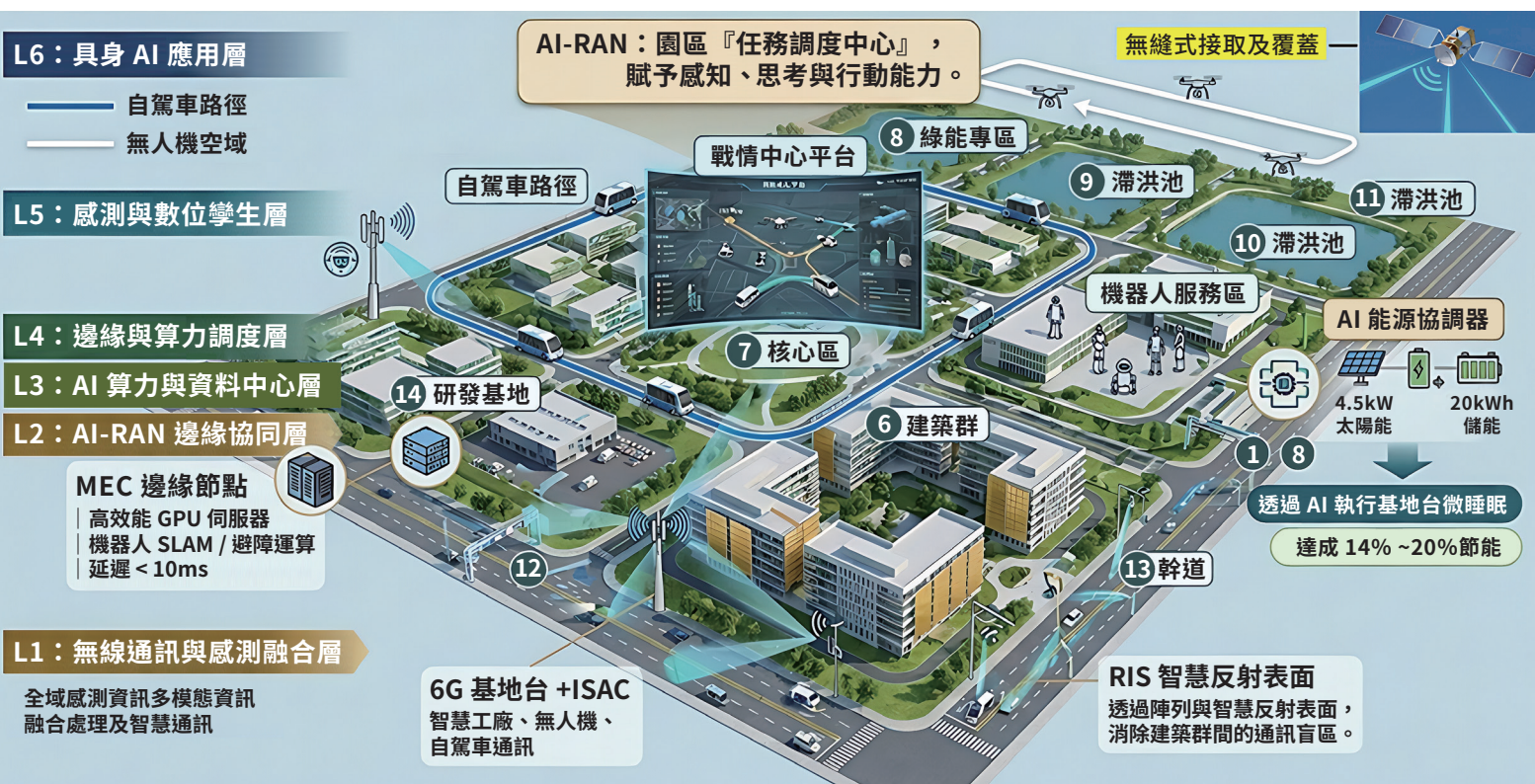
博士生
呂旻翰

本文探討因應 Physical AI 興起，如何建構結合 AI-RAN 與邊緣智慧的整合架構，以支撐自駕車、無人機及機器人等具身 AI 服務。傳統雲端架構因網路延遲無法滿足高動態場域中低於 10 ms 的決策需求，本文提出將基地台轉化為「分散式 AI 算力節點」，透過通訊與計算的深度融合，解決高動態資料處理與低延遲反應間的矛盾。

研究分析了 AI-RAN 核心架構，包含 O-RAN 開放框架、GPU 加速節點及網路切片技術。重點論述了四層式運作設計：從感知層的多模態數據採集、邊緣層的即時資訊融合、平台層的時空語意知識圖譜生成，到應用層的數位孿生與 Agentic AI 指令執行。此外，本文亦探討了 6G ISAC 感測與 AI 動態調度帶來的節能效益。此整合架構不僅提升了資源利用率，更為次世代科技園區提供了具備高韌性、可擴展性且低碳的智慧服務基礎設施，為具身 AI 的商轉奠定關鍵技術基礎。

壹、AI-RAN 在智慧場域的角色定位

在 AI 科技從 Agentic AI 走向 Physical AI 的大趨勢中，雲端 LLM 大腦的推理及決策結果，如何在最



短時間內應用到場域端或需求端，這樣的低延遲通訊、甚至自駕車所需的超低延遲通訊，催生了 AI-RAN 的需求。AI-RAN 因此有機會成為次世代 AI 園區所必備的基礎設施。

不只是自駕車，無人機、機器人、AR / VR、即時影音 AI 等服務系統也都需要更即時、更全面性的資料傳輸。為了搶佔決策零延遲應用商機，輝達總裁黃仁勳在 2025 年 12 月做了以下兩項重大投資（圖 1），

NVIDIA 200 億美元收購式招聘 Groq 取得 LPU 技術，推論成本壓低至 1/7
NVIDIA 10 億美元入股 NOKIA 開發 AI-RAN 技術，加速大腦應用到地端

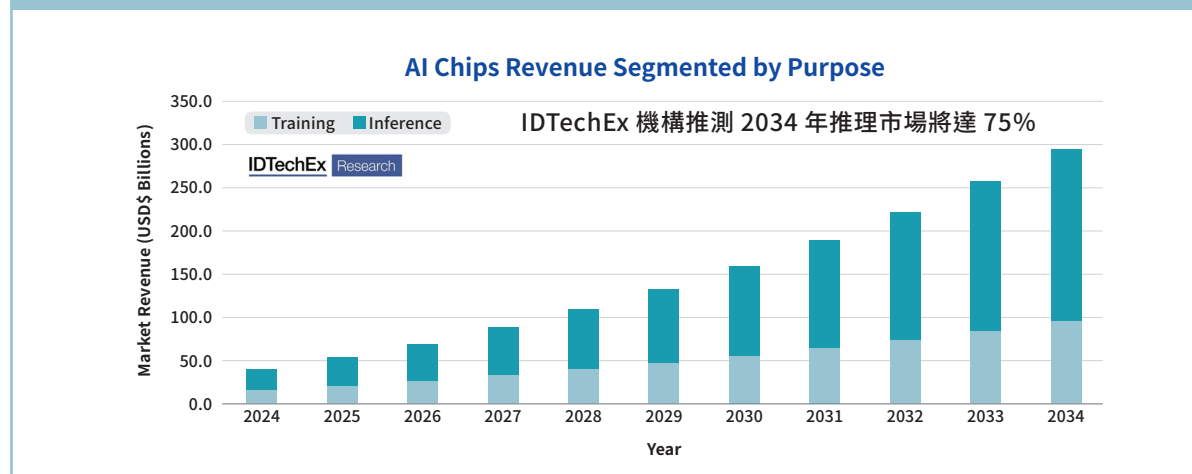


圖 1 AI 趨勢 1: 從雲端 AI 訓練走向邊緣 AI 推理驅動規模化應用

值得我們深入探討：

- 一、以 200 億美元收購式招聘 Groq 取得 LPU 晶片技術，以強化資料中心或邊緣運算 ASIC 晶片的推論能力，使其決策過程幾乎零延遲。同時，由於能源消耗降低 10 倍，並且可使用空冷系統，無需複雜的液冷設備，成本可下降到七分之一。
- 二、10 億美元入股 Nokia 開發 AI-RAN 技術，加速大腦應用到地端。背後的商業邏輯，就是重構電信產業來擴張 AI 算力版圖的戰略目標，讓基地台變成

「小型 AI 資料中心」，推動從 5G 向「AI 原生 6G」轉型，進一步控制 6G 架構，掌握未來數位基礎設施。將使 NVIDIA 的影響力不只是資料中心，更透過整合 Nokia 電信技術與 NVIDIA GPU 加速平台（如 NVIDIA Aerial），或結合邊緣運算 LPU 晶片與通訊晶片，構建 AI-RAN 設備，將推論直接在地端運作或者與雲端協作。為何黃仁勳要如此布局？根據研究機構 Omdia 的預測，RAN 市場 2030 年的累計規模，預計將超 2,000 億美元，而 AI-RAN 於 RAN 市場中具有重大潛力（圖 2）。

根據研究機構 Omdia 的預測，RAN 市場至 2030 年的累計規模預計將超過 **2,000 億美元**，而 AI-RAN 於 RAN 的市場中具有重大潛力



圖 2 AI 趨勢 2:通訊是應用關鍵——AI-RAN 崛起

另一方面，NVIDIA 更於 2026 年 3 月 1 日宣布，與 Ericsson、Nokia、BT Group、Cisco、Deutsche Telekom、SK Telecom、SoftBank Corp.、T-Mobile 等多家電信與

科技業者達成共識，攜手在「原生 AI、開放、安全」的技術框架上建構下一代 6G 網路（圖 3）。

NVIDIA 於 2026 年 3 月 1 日宣布與 Ericsson、Nokia、BT Group、Cisco、Deutsche Telekom、SK Telecom、SoftBank Corp.、T-Mobile 等共 12 個電信與科技業巨頭達成共識，攜手在「**原生 AI、開放、安全**」的技術框架上建構下一代 6G 網路



原生 AI

軟體更新驅動硬體升級（OTA）。

- ◆ AI 功能：實時智能、能源管理、動態覆蓋率
- ◆ 關鍵技術：GPU 運算（RAN+ 邊緣 AI）、智慧波束成形、頻譜感知、動態干擾消除、地理通訊（數位孿生）、Hybrid FDD/TDD、衛星物聯網終端與 ATG 天線等
- ◆ 以 AI 代理人為核心的自主網路管理框架
- ◆ 廠商：BubbleRAN（美國）、現觀科技（台灣）（地理通訊）、聯發科（SoC）、廣達（雲達 QCT）、技嘉、光寶、**啟碁**

低軌通訊

衛星在高速移動下的連線穩定度，以及衛星與衛星、衛星與地面間的海量數據傳輸為重點。

- ◆ AI 功能：AI 過濾、壓縮感測資料再回傳，節省頻寬資源
- ◆ 關鍵技術：星際雷射鏈路 ISL、智慧波束成形、D2C 通訊技術、太空邊緣 AI
- ◆ 廠商：SpaceX、Amazon、Eutelsat OneWeb、AST SpaceMobile（手機直連）、**昇達科**（射頻與微波元件）、**華通**（SpaceX 高階 PCB）、**耀華**（PCB）、**萊德光電**（ISL）、**穩懋**（砷化鎵功率放大器）、元晶（翼展太陽能電池）

圖 3 AI 趨勢 3：原生 AI、低軌通訊與 AI-RAN 三元匯流

黃仁勳的這兩大投資，一是在應用端特用晶片的布局、一是在降低通訊延遲的布局，係樂觀看待 AI 科技應用最終將在物理環境開花結果，而提前投資。

在這樣的前提下，智慧場域如國際機場、高科技園區、現代化醫院以及高度自動化的製造場域，將經歷一場前所未有的數位轉型。而這些場景的共同特點，在於其環境的高度動態性。以大型製造廠房為例，設備狀態、物流路徑上的障礙物以及人員流動，每秒鐘都會產生數以百萬計的感測節點資料。傳統的雲端 AI 架構雖然具備強大的運算資源，但數據往返雲端所產生的網路延遲（Latency），往往成為機器人執行即時決策時的致命傷。

智慧場域面臨的核心問題在於「高動態資料」與「低延遲決策」之間的矛盾。機器人或無人機在進行巡檢、精密控制或安全避障時，對反應時間的要求通常在 10 毫秒至 100 毫秒之間。一旦超過臨界值，機器人便無法有效應對突發環境變化，甚至可能引發工安事故。此外，傳統掛載在機器身上的邊緣 AI（Edge AI），雖然能解決部

分延遲問題，但受限於單機設備的算力負擔與電池續航力，難以處理如多模態大型語言模型（LLM）或複雜的 3D 場景重建任務。且更小的機器可以適應更多的環境限制以及維修及運送成本，更容易商業化。

因此，AI-RAN（AI 加上 Radio Access Network）被重新定位為「分散式 AI 基礎設施」。它不再僅僅是提供無線連線的管道，而是將通訊功能與計算功能深度融合。透過在基地台側部署具有算力的節點，AI-RAN 能夠在資料產生的源頭直接進行推論與任務調度。這種架構轉變解決了傳統雲端 AI 與單機邊緣 AI 的局限，為智慧場域提供了穩定且可擴展的算力支撐。

貳、AI-RAN 核心架構與技術組成

AI-RAN 的基本架構建立在 O-RAN（開放式無線存取網路）的基礎之上，並引入了異質運算資源。其核心組成包括分散式單元（DU）、集中式單元（CU）以及多接取邊緣運算節點（MEC）。與傳統基地台不同，AI-RAN 節點配置了大量的 GPU、ASIC 或 FPGA 等 AI 加速晶片，專門用於處理非通訊性質的 AI 訓練與推論任務（表 1）。

表 1 AI-RAN 技術模組與傳統網路之比較

比較項目	傳統 RAN	AI-RAN
主要定位	提供數據連線服務	算力、通訊與資料融合平台
硬體組成	ASIC、FPGA 處理通訊訊號	GPU 加速器、分散式算力節點
資源調度	靜態、手動配置頻寬	AI 自我優化、自動調度
延遲表現	受限於回傳網路（100 ms+）	邊緣極低延遲（<10 ms）
技術框架	閉鎖式專利架構	O-RAN 開放架構、軟體定義網路
應用支援	僅限連網	支援感知、LLM 推論、Agent 調度

關鍵技術模組中的「網路切片」(Network Slicing) 技術，能根據不同機器人任務的服務品質 (QoS) 需求，動態切割出專屬的通訊頻道。例如，遠端醫療手術機器人需要極高可靠性的切片，而一般的清潔機器人則可使用低優先級的資源。此外，AI-native RAN 則賦予了網路自我學習與維護的能力，基地台能根據歷史流量與干擾數據，自主調整發射功率與波束成型 (Beamforming) 策略，大幅降低了手動配置的營運成本。

在應用端，透過 AI-RAN 將部分算力放在小微型基地台上，可大幅縮小反應時間，增加前瞻科技商轉的可行性。例如視覺辨識、路徑規劃、群體協作等。傳統無線網路的資源利用率僅約為 33%，而 AI-RAN 架構下有望接近 100%。因此可使基地台於特定場景時，節能達 14%~20%，倘以一個基地台 2 kW 電力需求估算，共可節能約 280 ~ 400 W，這相當於兩片 1 平方米太陽能板的裝置容量。

參、邊緣智慧整合架構設計

為了達成固定操作成本下，智慧場域的最佳化整合運作，AI-RAN 必須與邊緣智慧形成多層次的架構設計。這不僅是硬體堆疊，更是從感知到決策的軟體流程整合。智慧場域多層架構設計如下：

一、感知層 (Perception Layer)

由智慧機器 (機器人、無人機、自駕車等) 身上的 3D 視覺感測器、LiDAR 以及遍布場域的 IoT 設備組成。這些設備負責採集高維度的環境資訊，包括聲音、影像、對話、文字指令等，並透過 AI-RAN 的高速上行鏈路傳輸。

二、邊緣層 (Edge Layer)

該層係 AI-RAN 發揮核心功能的地方。藉由 MEC 等伺服器，對採集到的串流資料進行即時處理 (Stream Processing)，例如進行 6D 位姿估計或多模態融合 (影像加上語音)。作業上需要一個「多模態資訊融合處理系統」。

三、平台層 (Platform Layer)

負責處理後資料與知識圖譜的整合。透過檢索增強生成 (RAG)、時空語意動態知識圖譜技術，將即時數據、場域 SOP 規定範疇下的歷史分析操作規程、場域人事物動態關係架構等相結合，提供給 LLM (可以是雲端或者是地端專用的大腦) 高層決策系統參考。

四、應用層 (Application Layer)

最終的智慧服務，透過「自動化建模與場域數位分身」，將模型上下文協定 MCP (Model Context Protocol)、場域自動化系統如自動化倉儲管理、遠端巡檢系統等納入數位分身管理系統。執行跨域、跨群、跨時空的決策指令。

此架構之整體運作流程為：

(1) 透過感知層之感測器接收場域端非結構化資訊，包括影音、環境數據等，以及資料輸入方式接受結構化資訊，如航班資訊、人員排班資訊等。(2) 透過邊緣層進行資訊融合等資料庫整備動作。(3) 結合平台層內粗、中、細三層知識圖譜的場域時空、人之間的關係知識，及 RAG 語意相似度高的資訊提取，擷取資訊給大語言模型 LLM 進行推理及決策。(4) 透過 MCP 指

揮應用層不同類型的機器人進行不同的服務。值得注意的是，服務過程仍可動態蒐集客戶或目標物的前後情形資訊，回饋平台層自主判斷決策。

此處採用 Agentic AI（代理型 AI），先將人類的自然語言意圖，依前述步驟轉化為具

體的機器人服務項目。總體來說，在這一架構中，AI-RAN 充當了「任務調度中心」。它不僅是資料的入口，更是推論任務的分發點。當基地台偵測到某區域的機器人算力負載過高時，可以動態將推論任務轉移到附近的另一個 AI-RAN 節點執行，確保決策的連續性與即時性（圖 4）。

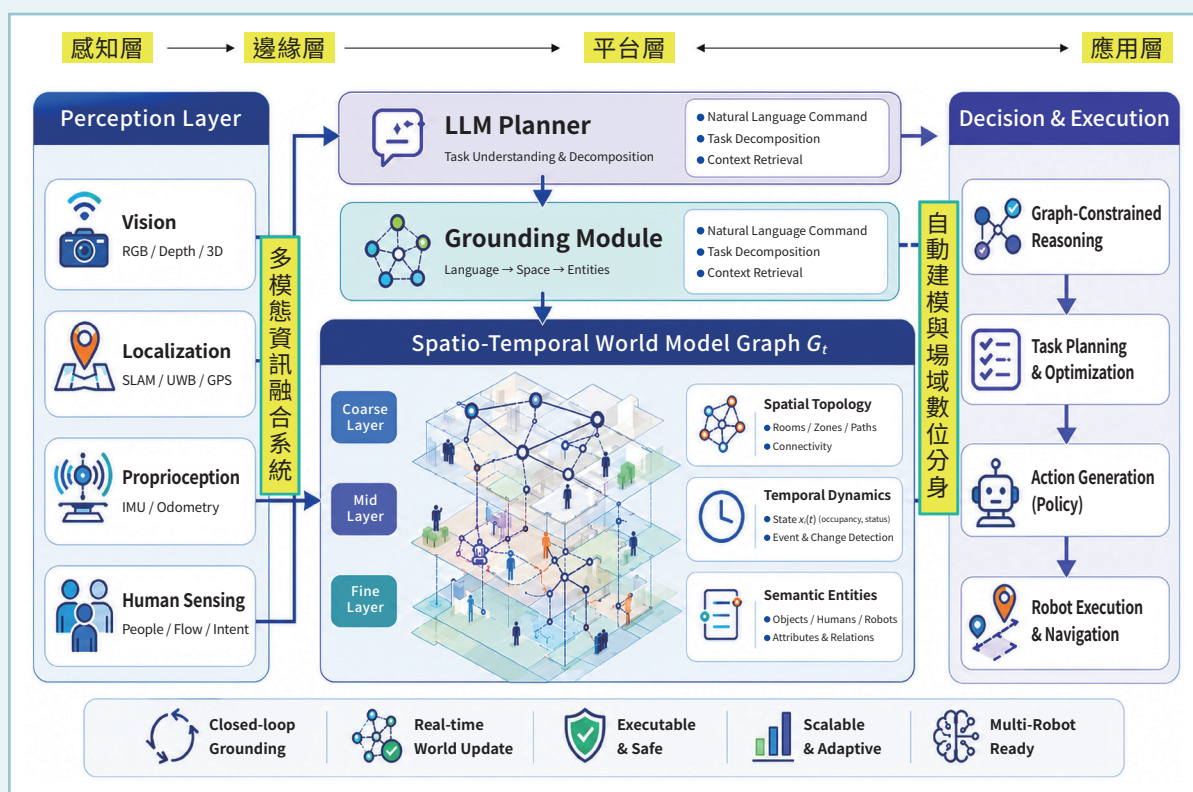


圖 4 邊緣智慧整合系統架構

肆、6G 智慧場域基礎設施

隨著未來可見具身 AI 的普及化，建立下世代科技園區 AI-RAN 6G 智慧場域，來提供自駕車、無人機、機器人等各式應用，已是必備的超前部署。需要的相關基礎設施，依其功能可區分成以下各類：

一、實體感知層（Infrastructure & Perception）

這是園區的「感官」與「能源心臟」，負責蒐集、整合所有物理感測數據。包含以下各種設備或設施：

- (一) 6G 基地台 (ISAC 整合)：布建於路燈與建築外牆，提供太赫茲 (THz) 訊號，兼具通訊與雷達感測功能。
- (二) 具波束成型大型天線陣列 (Massive MIMO)：具精準通訊、節能、防干擾特性。
- (三) 可重構智慧表面 (RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)：6G 世代傳輸率將是 5G 的 10 ~ 100 倍，但受限於繞射性差，導致基地台訊號容易被牆壁等阻擋。部署 RIS 可強化網路容量和覆蓋範圍。其係被動元件，為極低功率電子設備，乃環境友善且低成本解決方案，可部署在牆面、玻璃、天花板、廣告牌、燈柱、活動車輛等情境中，用於可重新配置的反射器或收發器，以執行大規模傳輸作業。
- (四) 多模態感測網路：整合道路旁的攝影機、LiDAR 與環境感測器。
- (五) 綠能儲能系統：例如 4.5 kW 太陽能板與 20 kWh 儲能單元，為邊緣運算節點提供不斷電的低碳能源。

二、網路與運算融合層 (AI-RAN & Edge Computing)

這是園區的「神經中樞及大腦」，將通訊與算力合而為一。包含以下各種設備或設施：

- (一) AI-RAN 節點 (vRAN / gRAN)：建立虛擬無線接取網路 (vRAN)，結合開放無線接取網路 (O-RAN)，形成開放式虛擬無線接取網路，降低硬體建置成本。硬體方面，在基地台端增加配置高效能 GPU 或 NPU 加速器 (如

NVIDIA MGX / Grace Blackwell 架構伺服器)，同時處理無線訊號與 AI 推論。軟體方面，例如加入 RIC (RAN Intelligent Controller) 中的 App (rApp / xApp) 進行節能演算法預測、支援硬體微睡眠 (Micro-sleep) 模式，執行深度節能工作。以及加入網路切片調度器，針對不同任務 (如：自駕車安全優先、一般環境監測) 動態分配頻寬與算力優先權。

- (二) MEC 邊緣運算叢集：部署於園區各區塊微基地台，進行低延遲推論。結合地理通訊高精度定位系統 (cm-level positioning)，提供具身 AI (如機器人) 最適路徑。過程需要在 10ms 以下完成感知到決策，傳統雲端架構將無法滿足。即使自駕車自身的雷達失效，AI-RAN 也能透過網路感測層提供「第三方視覺」輔助。

三、數位孿生與管理層 (Management & Digital Twin)

這是園區的「數位小腦」，進行行動模擬與全局監控：

- (一) 園區數位孿生平台：架構在戰情中心的伺服器上，即時呈現所有載具位置、能源狀態與網路流量。
- (二) 高精度空間語意地圖 (HD Map)：為具身 AI 提供公分級的導航座標與語意資訊。
- (三) AI 訓練工廠：蒐集場域數據，回傳至分散式資料中心進行模型微調 (Fine-tuning)。

四、具身 AI 應用層 (Embodied AI Applications)

這是園區的「執行終端」，落實智慧服務：

- (一) 自駕車系統：透過 V2X 與 AI-RAN 連動，實現無人接駁與智慧物流。
- (二) 無人機監測：執行空域巡檢、環境監測與即時影像回傳。
- (三) 智慧機器人 (AMR / 四足 / 人形)：進行室內外巡檢、導覽及人員協作等。

智慧場域的應用設計，例如結合不同類型的機器人，透過 AI-RAN 優化流程提升運作效率。應用場景包括機場與製造場域等。例如在機場服務場景中，AI-RAN 可支撐數以百計的移動式服務機器人。當大量旅客湧入時，基地台能透過視覺感知數據預測人群密度，並指揮導引機器人前往擁擠區域。

而在智慧製造中，設備監控與異常預測則依賴於對振動與溫度數據的毫秒級分析。一旦偵測到機械手臂的微小震動異常，AI-RAN 節點能立即發出減速或停止指令，避免昂貴的模具損毀。

伍、結語

綜上所述，隨著具身 AI 技術的快速發展，傳統以雲端為核心的 AI 運作模式已難以滿足實體場域對即時性與可靠性的要求。本文所提出之「AI-RAN 與邊緣智慧整合架構」，係回應此一轉變之重要基礎設計。透過將通訊、算力與資料處理能力整合於無線接取網路之中，AI-RAN 不僅提升了資料傳輸效率，更使基地台轉化為具備即時推論與任務調度能力的分散式運算節點，形

成支撐具身 AI 應用之關鍵基礎設施。

在整體架構上，本文以感知層、邊緣層、平台層與應用層所構成之多層次系統為核心，並結合數位孿生、語意知識圖譜與檢索增強生成 (RAG) 等技術，使 AI 系統得以整合即時感測資料與場域知識，進行高階推理與決策，最終透過具身裝置執行具體行動。此一由「感知理解到決策執行」所構成的高度自動化執行機制，不僅能有效降低延遲與運算負擔，更大幅提升系統在高動態環境中的適應能力與安全性。

此外，AI-RAN 結合網路切片與 AI 調度機制，可依不同應用需求動態分配通訊與算力資源，實現彈性化與智慧化的資源管理，進一步提升整體系統運作效率。在智慧機場、智慧製造及高科技園區等場域中，此架構可支援大量具身 AI 設備的協同運作，並透過即時監測與預測能力，降低營運風險與人力成本。

展望未來，隨著 6G 通訊技術成熟與 AI 算力持續提升，AI-RAN 與邊緣智慧之整合將成為智慧場域發展的核心方向。其不僅具備高度擴展性與可複製性，更可促進跨產業整合，帶動新興應用與服務模式的形成。對臺灣而言，若能結合既有通訊、半導體與智慧製造產業優勢，積極投入 AI-RAN 相關技術與場域建置，將有助於在全球次世代 AI 與通訊競爭中取得關鍵戰略地位，並推動智慧社會邁向全面自主化之新階段。

參考文獻

1. 工業技術研究院 (ITRI)，《6G 通訊感測一體化 (ISAC) 技術發展趨勢報告》(2025-2026)。

2. 電子時報 (DIGITIMES), 「AI-RAN 聯盟成立: NVIDIA 攜手電信巨頭重構 6G 架構之產業影響分析」 (2026.3)。
3. 國家通訊傳播委員會 (NCC), 《我國 6G 頻譜規劃與次世代通訊技術白皮書》 (2025)。
4. 王雲昇、李明憲, 「O-RAN 架構下結合邊緣運算之智慧化資源調度研究」, 《電信技術季刊》, 第 15 卷第 2 期 (2025)。
5. 財團法人資訊工業策進會 (III), 《具身智慧 (Embodied AI) 於智慧製造場域之應用架構探討》 (2025)。
6. AI-RAN Alliance, "AI-RAN Architecture and Use Cases: Integrating AI into the Radio Access Network," White Paper v1.0 (2026.3).
7. Letaief, K. B., et al., "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 1, pp. 84-90 (2024).
8. NVIDIA Corporation, "NVIDIA Aerial: A Cloud-Native Software-Defined 5G / 6G Wireless Infrastructure," Technical Documentation (2025).
9. 3GPP, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on AI / ML in NG-RAN(Relase 19)," TR 38.817 (2025).
10. O-RAN Alliance, "O-RAN Minimum Viable Plan and Acceleration of AI / ML Integration," O-RAN Working Group Reports (2025).
11. Omdia, "Radio Access Network(RAN) Market Forecast: 2024–2030," Market Research Report (2025).

AI 化 GeoDesign 與新世代園區規劃——以 UDiScape 為核心之園區規劃模式

關鍵詞 Keywords

- # AI 化 GeoDesign AI-enabled GeoDesign
- # UDiScape 園區規劃 Industrial Park Planning
- # 生成式 AI Generative AI
- # 數位孿生 Digital Twin
- # 智慧園區 Smart Park

人境工程技術顧問有限公司

負責人

鍾德頌

台灣世曦工程顧問股份有限公司 運輸土木部

資深協理

吳嘉文

經理

蕭勝雄

都市計畫技師

葉曉蓁

都市計畫技師

黃芳暄

朗晶企業股份有限公司

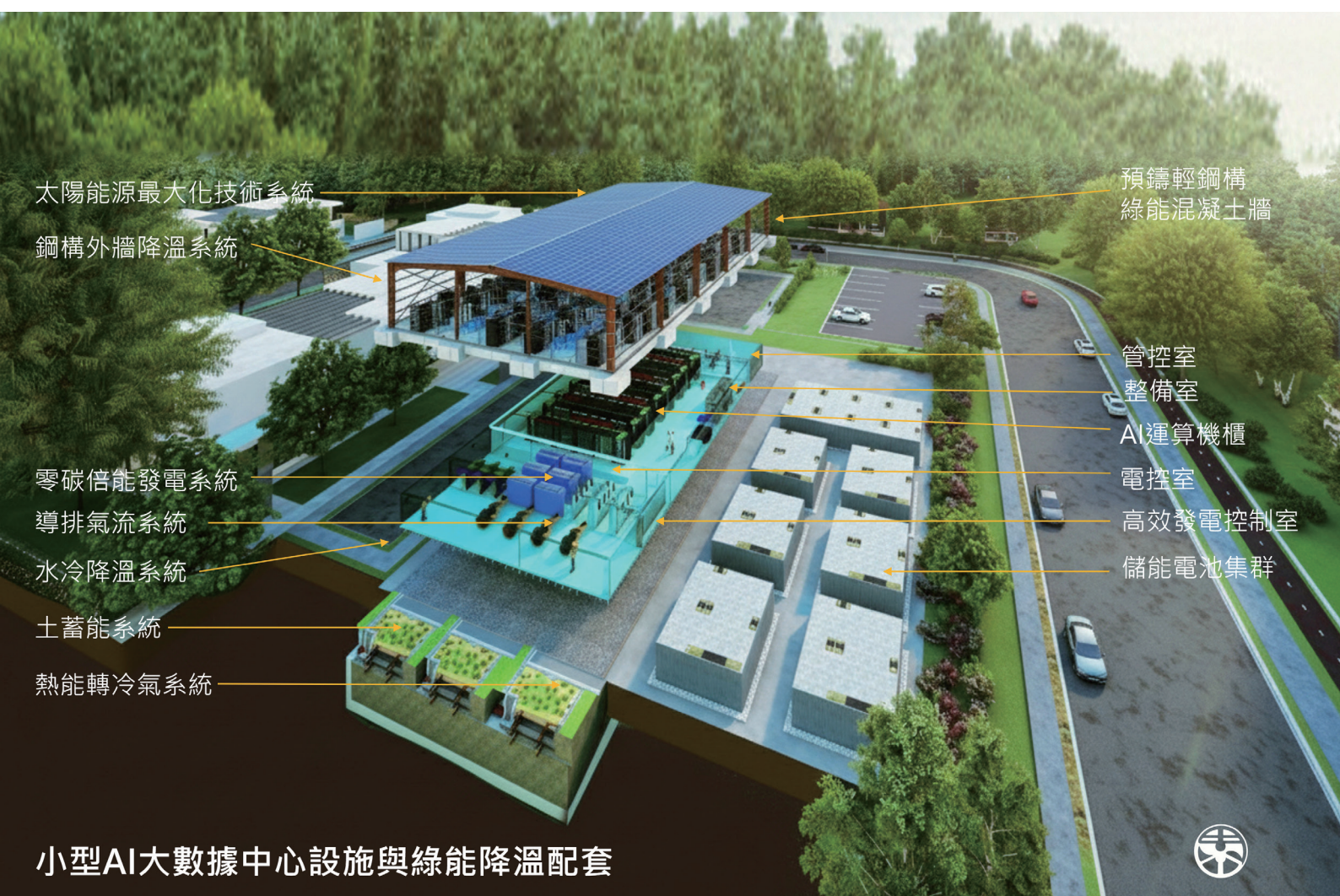
技術總監

盧美齡

近年生成式人工智慧、國土空間資訊、BIM、參數化設計與 Digital Twin（數位孿生）技術快速發展，正使科技園區與科學園區規劃由傳統的土地配置與工程分項作業，逐步轉向以資料整合、方案生成、模擬評估與決策支援為核心的智慧化工作模式。面對淨零轉型、能源韌性、高科技製程擴張、生態共融、資源循環與跨部門治理等複合課題，園區規劃已不再只是單一基地開發或功能分區問題，而是涉及空間、能源、水資源、交通、生態、產業鏈與治理制度整合的系統性任務。

本文以 GeoDesign 作為方法骨架，結合 UDiScape 生成式 AI 規劃平台，提出一套可應用於新世代園區之 AI 化 GeoDesign 流程。該流程包括資料建構、方案生成、模擬評估、決策落實與回饋修正等階段，並以能源轉型、產業轉型、空間整合、生態景觀、資源循環、社區連結及韌性治理等七項核心目標作為評估軸線。本文主張，UDiScape 不應僅被視為快速產生鳥瞰圖或意象圖的視覺化工具，而可進一步發展為支援跨尺度、跨專業與跨生命週期協作的規劃平台，使園區設計由靜態配置圖轉向可比較、可驗證、可迭代優化的決策過程。

研究認為，AI 化 GeoDesign 的核心價值不在於以 AI 取代規劃專業，而在於協助規劃團隊將多元來源資料、政策目標、工程條件與設計方案整合於同一工作流程中，降低跨專業溝通成本，提升方案推演效率，並強化園區面對能源、氣候、生態與治理風險的整體韌性。



壹、緒論：科技園區規劃的典範轉移

科技園區與科學園區長期扮演產業升級、技術創新與區域發展的重要載體。過去園區規劃多以土地使用配置、道路系統、公共設施與開發時程為核心，並透過都市計畫、開發計畫、環境影響評估及工程設計等程序逐步落實。此一模式在相對單純的產業需求與工程條件下，具有明確分工與制度可操作性；然而，面對高科技製造、AI 算力需求、淨零轉型與極端氣候風險疊加的新環境，傳統線性式規劃流程已逐漸不足以支撐多目標、多情境與跨尺度的決策需求。

新世代園區所面臨的挑戰，已從「如何配置足夠產業用地」擴大為「如何在有限空間內整合產業、能源、水資源、交通、生態與治理韌性」。例如，高耗能產業進駐使供電穩定、再生能源、儲能與需量反應成為園區規劃的重要條件；氣候變遷與極端降

雨使滯洪、排水、藍綠基盤與韌性設施不再只是附屬工程，而是園區能否持續運作的關鍵；生態保育與社會溝通也要求規劃過程更透明、更具可比較性，並能將專家意見、地方關切與工程方案納入同一決策框架。

在此背景下，園區規劃的核心任務應由傳統靜態配置，轉向能夠整合資料、生成方案、進行模擬比較並支援協作決策的智慧化規劃方法。本文所討論之 AI 化 GeoDesign，即是在此需求下形成的方法構想。其目的並非將人工智慧視為取代規劃師或工程師的工具，而是將 AI 作為提升資料整合、方案推演、視覺溝通與決策回饋效率的輔助平台。

本文以 UDiScape 為核心平台，探討生成式 AI 如何結合 GeoDesign、GIS、BIM、參數化景觀設計與數位孿生，形成適用於新世代園區規劃的整合工作流程；其中，UDiScape 串接智慧整合工具、AI 輔助規



劃與線上教育學習之核心策略布局，詳如圖 1 所示。本文的主要目的包括：第一，釐清 UDiScape 在園區規劃中的平台定位與技術角色；第二，建立 AI 化 GeoDesign 的

方法架構；第三，將新世代園區的規劃目標轉化為可操作的評估軸線；第四，說明此一方法在實務落實時應面對的制度、資料與工程整合課題。



圖 1 核心策略布局：以 UDiScape 串接智慧整合工具、AI 輔助規劃與線上教育學習，作為園區規劃方法轉型之平台基礎

貳、UDiScape 之平台定位與技術架構

UDiScape 的價值，並不僅在於快速產生高品質的設計意象圖或鳥瞰透視，而在於將複雜的生成式 AI 模型轉化為符合規劃設計實務操作邏輯的工作平台。對規劃團隊而言，真正重要的不是單張影像的視覺效果，而是能否在基地條件、規劃限制、設計理念與工程邏輯之間建立穩定且可重複操作的生成流程。

就平台架構而言，UDiScape 可分為資料輸入、生成控制、成果輸出與外部系統整合等

四類模組。資料輸入端可納入基地空拍、現地照片、配置草圖、土地使用圖、GIS 圖層、規劃說明文字及相關法規條件；生成控制端則透過提示詞、負面提示詞、原圖干預、提示詞權重、幾何控制與風格控制等方式，降低生成式 AI 的隨機性，使成果更符合空間結構與規劃邏輯；成果輸出端可產生概念意象、方案比較圖、剖面示意、透視圖及溝通通用圖像；外部整合端則可與 GIS、BIM、IFC、數位孿生與專案管理平台銜接，逐步形成由圖像生成走向資料驅動設計的工作環境。雖然目前最容易被看見的是影像生成力，但其真正價值在於支援整體規劃工作流程。

在規劃實務中，UDiScape 可對應不同階段的工作需求。於前期構想階段，平台可協助快速生成多組空間意象，降低抽象概念溝通成本；於配置推演階段，可透過色塊、線稿、深度圖或配置草圖進行空間結構控制，使方案生成不偏離基地邊界、道路系統與主要開放空間；於評估與溝通階段，則可將不同方案轉化為較易理解的視覺成果，作為跨專業討論、業主決策與利害關係人溝通之媒介。相關競標與執行案例可參見圖 2，規劃圖面由配置圖、使用分區與初步方案轉譯為園區空間意象之案例則如圖 3 所示。

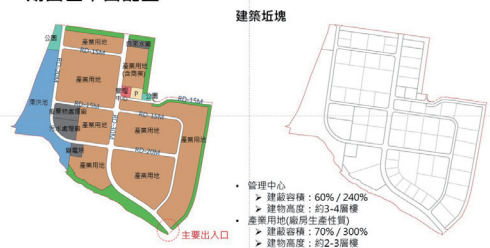
更進一步，UDiScape 若能結合檢索增強生成技術（RAG）與 AI Agent 工作流程，便可不僅處理圖像生成，也能協助整理法規條件、工程需求、案例資料、審查意見與專案知識。此時平台的角色將由「生成工具」提升為「規劃知識與設計推演平台」，其由資料擷取、文本分塊、向量資料庫、檢索問答至報告生成之工作流程，詳如圖 4 所示。其功能不再限於視覺化，而是支援資料檢索、方案生成、文件撰寫、指標比對與決策追蹤。自收到完整圖資至完成第一版視覺成果實際作業約 3 個工作天。

競標與執行 _ 以海豐園區為例

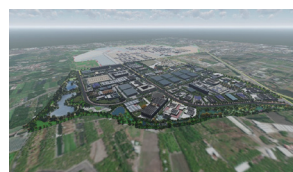
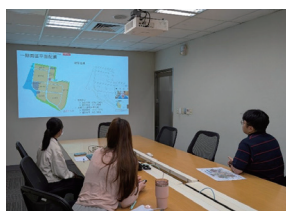
作業時間約 3 工作天

114.4.10 世曦公司提供規劃平面圖及案例

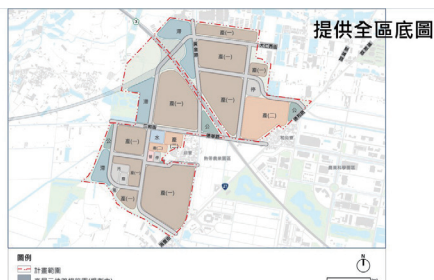
一期園區平面配置



114.4.11 視訊會議討論圖面需求



114.4.15 世曦公司提供全區一二期底圖



利用 UDiScape 生成平面圖及鳥瞰透視化



圖 2 競標與執行案例：以實際園區圖面、基地條件與會議需求，快速生成平面及鳥瞰視覺化成果

競標與執行 _ 以花創園區為例

作業時間約 2 工作天

世曦公司提供園區規劃平面圖及使用分區圖



園區規劃平面圖

園區使用分區圖

指定建物高度

使用 UDiScape 生成平面及鳥瞰透視實景化



UDiScape 產出不同角度透視圖及實景平面圖

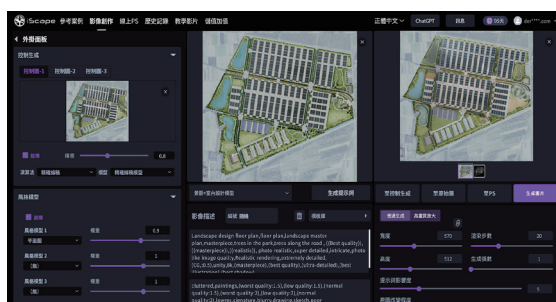
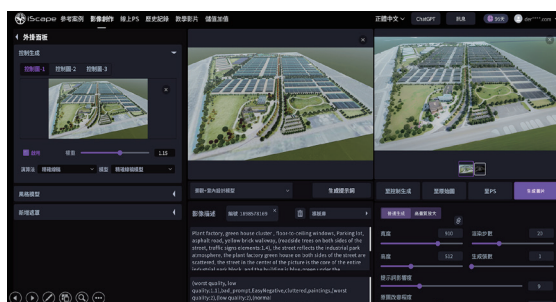


圖 3 規劃圖面轉譯案例

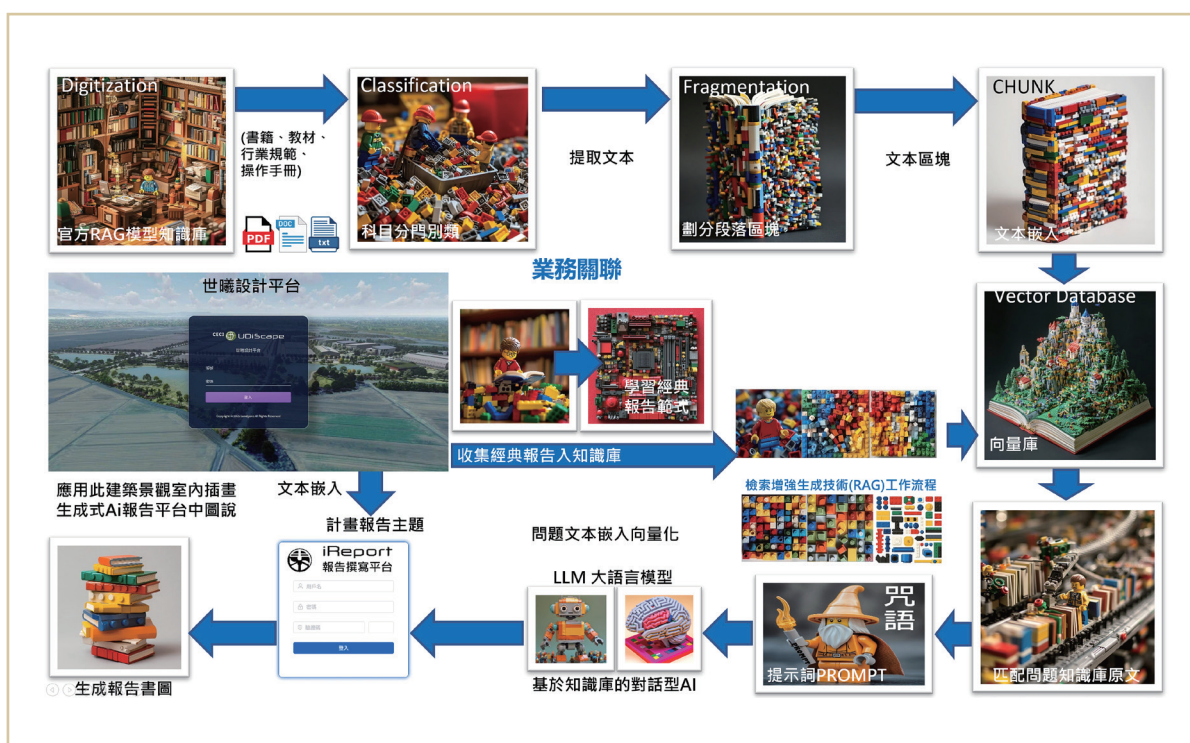


圖 4 RAG 與 AI Agent 知識工作流程

參、AI 化 GeoDesign 方法架構

GeoDesign 是一種結合地理資訊、設計思考與多專業協作的規劃方法，其核心精神在於將空間資料、政策條件、設計方案與評估模型納入同一個可比較的決策框架。當 GeoDesign 與生成式 AI、BIM、參數化設計及數位孿生進一步整合後，便可形成

更適合複雜園區開發的 AI 化 GeoDesign 流程；其從設計專業、地理設計群組至地理科學，並串接 2D、3D、4D 與數位孿生技術之整合架構，詳見圖 5。

本文所稱 AI 化 GeoDesign，並非以 AI 自動產生單一最適解，而是建立一套支援多方案生成、多指標評估與多方協作決策的工作方



圖 5 GeoDesign 與 AI 化規劃整合架構：從設計專業、地理設計群組至地理科學，串接 2D、3D、4D 與數位孿生技術

法。其核心在於透過資料與模型的串接，使規劃團隊能在較短時間內提出多組可比較方案，並依據工程可行性、環境影響、能源韌性、土地效率、成本、施工風險與社會接受度等條件進行綜合判斷；以利害關係人輸入、研究地區理解、模型演算、方案評估與決策回饋形成循環之 AI Agent 輔助 GeoDesign 工作流程，詳如圖 6。

此一方法可分為四個主要階段。第一為資料建構與情境定義階段，透過國土空間資訊、地形資料、土地使用、交通系統、水文資料、生態調查、能源條件、政策與法規限制，建立園區規劃的共同資料底圖。此階段的重點在於將分散於不同專業與單位的資料整合為可供討論與分析的基礎。

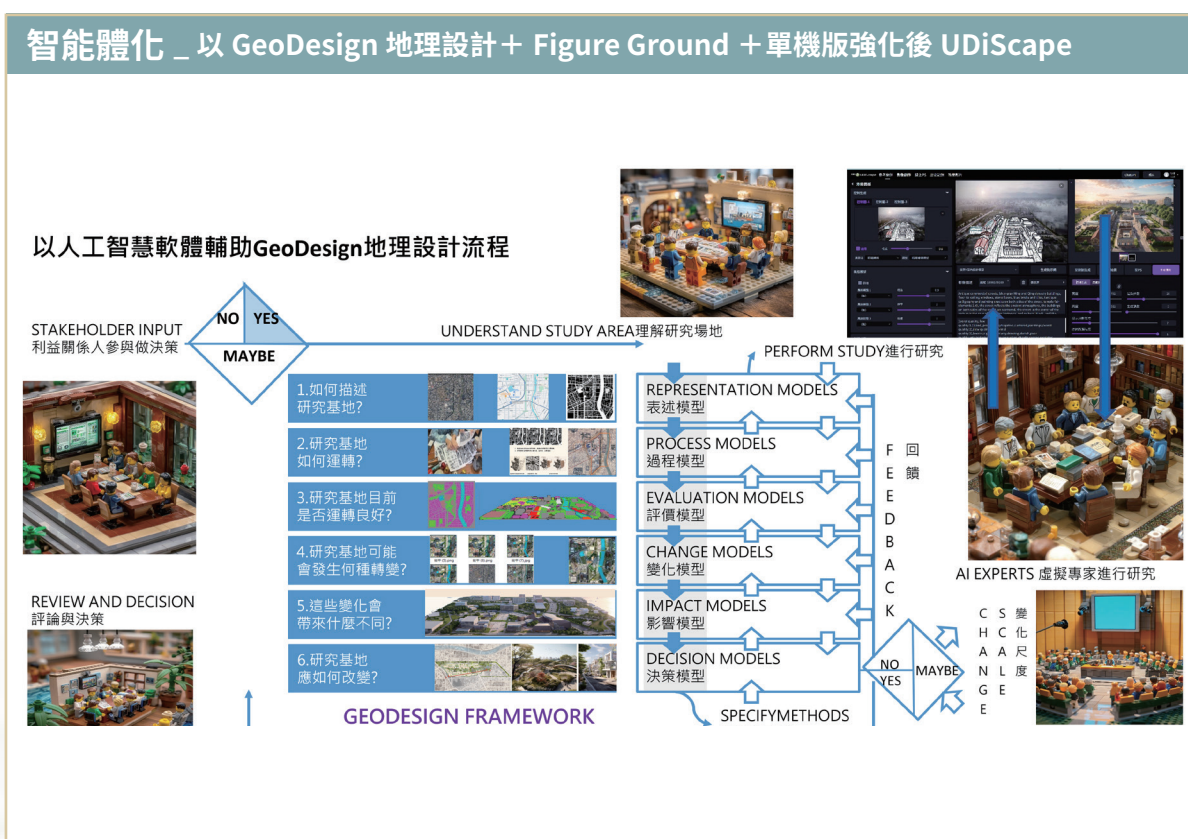
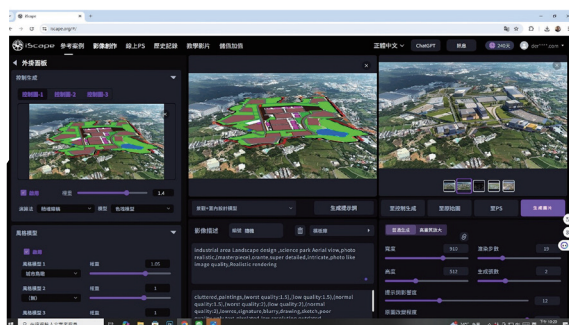


圖 6 AI Agent 輔助 GeoDesign 工作流程

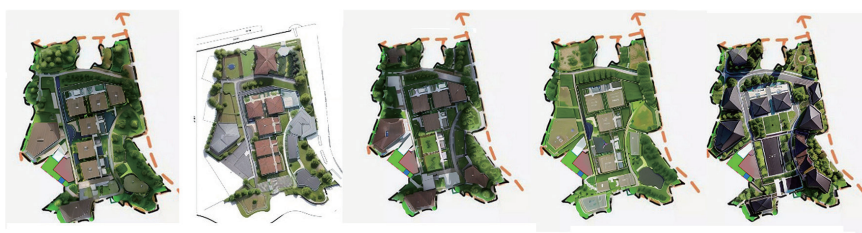
第二為方案生成階段。規劃團隊可在既有基地條件、功能需求、工程限制與政策目標下，利用 UDiScape、參數化工具與生成式 AI 快速產生多組空間配置與景觀基盤構想。此階段的重點不是追求單一美觀圖像，而是透過多方案並列，協助團隊探

索不同開發強度、開放空間配置、綠藍網絡、道路系統、公共設施與分期開發策略的可能性。以平面配置、空拍底圖與生成式 AI 推演園區方案之示例，詳如圖 7；由基地配置與周邊環境條件快速轉譯為多組鳥瞰意象之案例，則如圖 8 所示。

與台地埤塘地景共存之科學園區方案



選取視覺衝擊最小之適當透視圖



將平面配置用 Photoshop 斜貼在空拍鳥瞰圖上

將平面配置改成透視圖



圖 7 方案生成案例：以平面配置、空拍底圖與生成式 AI，推演兼顧經濟效益與生態之共榮園區方案



圖 8 AI 生成鳥瞰透視案例：由基地配置與周邊環境條件，快速轉譯為多組園區鳥瞰意象

第三為模擬評估階段。各方案應進一步納入能源、排水、交通、熱環境、生態、碳排、土方、成本與施工性等評估模型。此階段可結合 BIM、GIS、能源模擬、水理分析、熱環境分析、資源循環評估與數位孿

生技術，檢驗不同方案在效能、風險與實施可行性上的差異；同時，景觀元素、空間構成及生成模型亦可轉化為工程與景觀基盤整合設計之「場景導向工程設計造句法」，詳如圖 9。



圖 9 場景導向工程設計造句法：以景觀元素、空間構成及生成模型，支援工程與景觀基盤之整合設計

第四為決策落實與回饋修正階段。規劃結果不應停留於概念圖或簡報成果，而應回饋至法定計畫、工程設計、環評承諾、分期開發、施工管理與營運維護。透過持續

更新資料與模型，園區規劃可形成由規劃、設計、施工到營運的閉環流程，使設計決策不斷依據實際條件與政策目標進行修正，詳見表 1。

表 1 UDiScape 世曦設計平台應用與產出

階段	主要工作	UDiScape 支援角色	主要產出
資料建構 與情境定義	整合 GIS、土地、法規、工程、生態、能源與社會資料	協助資料分類、情境摘要、圖資解讀與議題盤點	共同資料底圖、限制條件清單、規劃議題矩陣
方案生成	產生多組配置、景觀、基盤與分期構想	依據草圖、色塊、線稿與提示詞生成多方案意象	配置方案、鳥瞰透視、剖面構想、比較圖
模擬評估	進行能源、水文、交通、生態、碳排與成本評估	輔助指標整理、成果視覺化與方案比較	多指標評估表、風險分析、方案優劣比較
決策落實 與回饋修正	轉化為法定文件、工程設計、施工與營運管理	協助會議紀錄、審查回覆、版本控管與決策追蹤	修正方案、執行計畫、管理平台資料



肆、新世代園區之規劃目標與評估指標

新世代園區的規劃目標，應由單純的產業用地供給，提升為支援產業創新、能源轉型、環境調適與社會共融的整合平台。本文將其歸納為七項核心目標：能源轉型、產業轉型、空間整合、生態景觀、資源循環、社區連結與韌性治理。這七項目標（詳見表 2）不宜僅停留於政策宣示，而應轉化為 AI 化 GeoDesign 流程中的評估軸線。

透過上述評估軸線，AI 化 GeoDesign 可將不同專業語言轉換為可比較的決策資訊。舉例而言，能源專業可關注負載、備援與儲能；水利專業可關注逕流、滯洪與排水；景觀與生態專業可關注棲地品質、連通性與微氣候；工程管理專業則可關注分期施工、成本、介面風險與維護責任。當這些資訊被整合於同一平台與同一方案比較框架時，園區規劃便能從部門式分工轉向系統式協作。

表 2 新世代園區七大核心目標與評估指標

核心目標	規劃內涵	可評估指標
能源轉型	導入再生能源、儲能、需量反應、微電網與能源管理平台	再生能源占比、備援容量、尖峰負載削減率、供電穩定性
產業轉型	支援低碳製程、智慧製造、AI 算力與高值化產業鏈	產業用地彈性、低碳設施配置、資料基礎設施服務能力
空間整合	整合交通、物流、能源、水資源、公共設施與開放空間	土地使用效率、設施共構程度、交通可及性、公共設施服務範圍
生態景觀	建構藍綠基盤、棲地網絡、滯洪空間與熱環境調適系統	綠覆率、棲地連通性、滯洪量、熱島改善、原生植栽比例
資源循環	推動再生水、雨水回收、餘熱利用、循環建材與廢棄物再利用	水回收率、資源再利用率、碳排減量、廢棄物減量
社區連結	強化公共服務共享、交通接駁、就業連結與資訊透明	公共設施可近性、地方參與次數、資訊公開程度、就業機會連結
韌性治理	配置分散式能源、備援系統、災害應變與快速復原機制	關鍵設施備援率、災後復原時間、系統冗餘度、治理權責明確程度

伍、應用流程與實務落實

AI 化 GeoDesign 在園區規劃中的實務價值，可從三個層面理解。第一是提高方案推演效率。傳統規劃過程中，從草圖、配置圖到透視圖往往需要較長的繪製與修正時間；透過 UDiScape，規劃團隊可在保留基地邊界、道路系統與主要功能分區的前提下，快速產生不同風格與配置強度的方案，作為早期討論與決策篩選的基礎。

第二是降低跨專業溝通成本。園區規劃涉及都市計畫、土木、水利、交通、電力、環境、生態、景觀、建築、資訊與營運管理等多種專業。若各專業僅以自身圖面與報告表達，容易造成介面斷裂與認知落差。AI 化 GeoDesign 可透過共同底圖、情境模型與視覺化成果，使不同專業在相同空間框架下討論問題，並將各項限制與評估結果回饋至方案修正。

第三是強化決策落實能力。園區開發往往需經歷可行性評估、規劃構想、開發計畫、環評、都市計畫、工程設計、施工與營運等階段。若前期 AI 生成成果無法轉化為法定圖說、工程條件或管理機制，則其價值將停留於展示層次。因此，UDiScape 後續發展應重視與 GIS、BIM、PMIS、數位孿生及文件管理系統的串接，使前期方案、審查承諾、工程設計與營運資料之間形成可追蹤的關聯。

在實務操作上，AI 化 GeoDesign 可採取「先建立共同資料底圖、再進行多方案生成、再導入指標評估、最後回饋至設計與管理」的流程。此流程可支援業主與規劃團隊進行方案選擇，也可作為與主管機關、審查委員、地方團體與專業顧問溝通的基礎。其最大價值不在於產生單一答案，而在於讓不同方案的代價、效益與風險能被清楚比較；由規劃草案、規劃模型至設計圖之持續轉譯與優化流程，可參見圖 10。

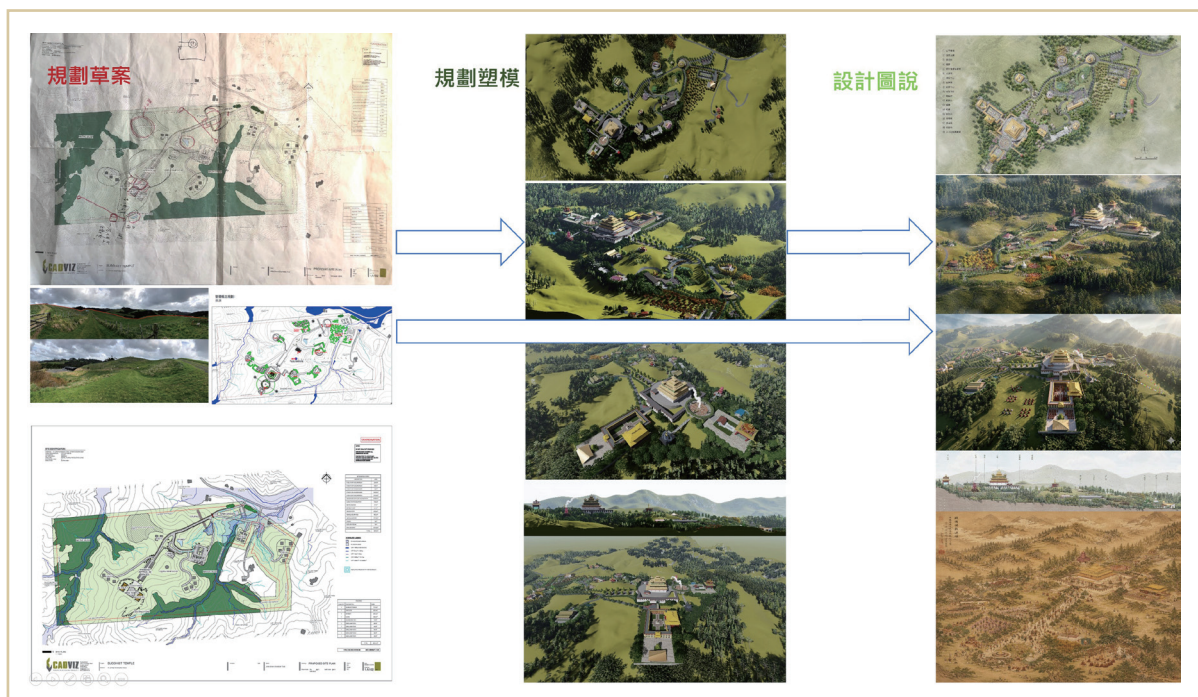


圖 10 規劃草案至模型與設計圖轉譯流程：由規劃草案、規劃模型至設計圖，呈現方案持續轉譯與優化之過程

陸、制度落實與後續發展課題

雖然 AI 化 GeoDesign 具有提升規劃效率與決策品質的潛力，但其落實仍需面對若干限制。首先是資料品質與資料權責問題。園區規劃涉及大量來自不同單位的圖資、工程數據、調查成果與政策文件，若資料版本不一致、精度不足或權責不清，將影響 AI 生成與模擬評估的可靠性。

其次是模型可信度與專業判斷問題。生成式 AI 能快速產生圖像與文字，但其成果仍須經規劃、工程、生態與法規專業檢核。尤其在法定計畫、環評承諾、工程安全與公共利益相關事項上，AI 只能作為輔助工具，不能取代專業責任與制度審查。

第三是跨階段銜接問題。若 AI 平台只服務於前期簡報或競圖，未能與後續設計、施工與營運資料接軌，將難以形成真正的數位治理能力。未來應進一步建立從 2D 圖面、3D 模型、4D 時程到 5D 成本與維護資訊的整合架構，使園區生命週期資料能持續累積與更新。以建築設施、能源系統、地形水文與生態綠網整合為例，其園區綠能協同剖面可參見圖 11。

第四是制度與組織調整問題。AI 化 GeoDesign 的推動，不只是導入軟體，而是改變規劃團隊的工作方式。它需要業主、規劃團隊、工程設計、環境顧問、地方溝通與營運管理單位共同參與，並建立明確的資料治理、版本控管、審查回饋與決策紀錄機制。

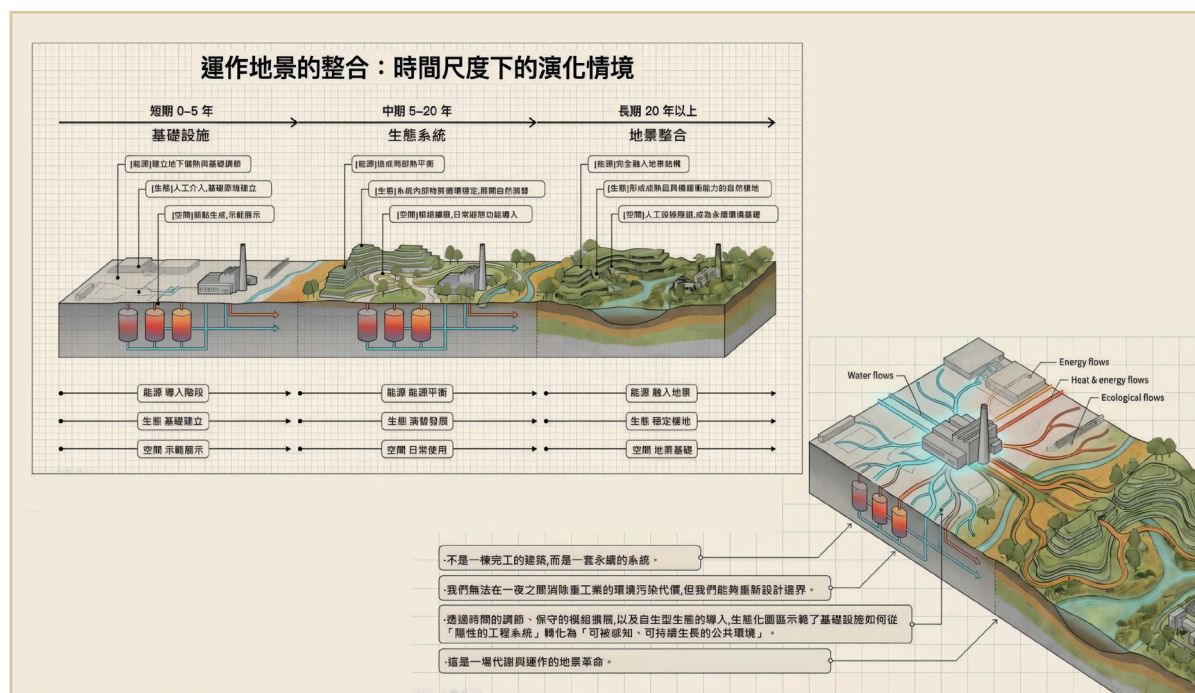


圖 11 園區綠能協同剖面：呈現建築設施、能源系統、地形水文與生態綠網之整合構想

柒、結論

本文主張，AI 化 GeoDesign 並非單一數位工具的導入，而是園區規劃方法的重構。面對淨零轉型、能源韌性、基礎設施複雜化、生態共融與跨部門治理需求，傳統以靜態配置與分項工程為主的規劃流程，已不足以支撐新世代園區所需的多目標決策任務。

以 UDiScape 為核心的 AI 化 GeoDesign，提供了一種由資料整合、方案生成、模擬評估到決策落實的整合工作流程。其價值不僅在於提升圖像生成效率，更在於協助規劃團隊建立可比較、可驗證、可迭代優化的園區規劃流程。透過此一方法，園區規劃可由單純的產業空間配置，轉向兼具能源轉型、生態整合、資源循環、社會溝通與韌性治理能力的智慧場域建構。

未來若能進一步補強量化評估指標、技術成熟度分級、案例驗證、資料治理與制度落實機制，AI 化 GeoDesign 有機會成為台灣新世代園區規劃的重要方法框架，也可作為工程顧問產業推動 AI 設計、數位工程與智慧治理轉型的重要基礎。

參考文獻

1. Deloitte，〈AI 資料中心加速落地，電力布局如何撐起算力與競爭力？〉，<https://www.deloitte.com/tw/tc/Industries/energy/perspectives/ai-data-center-power.html>（2026.3.1）。
2. 財團法人中華顧問工程司，《中華技術》第 145 期，<https://www.cec.org.tw/Resources/e-book/n145/index.html>。
3. 財團法人中華顧問工程司，《中華技術》第 139 期，<https://www.cec.org.tw/Resources/e-book/n139/files/basic-html/page210.html>。
4. 內政部建築研究所，〈整合 BIM 與人工智慧之低碳建築設計決策輔助〉，https://www.abri.gov.tw/News_Content_Table.aspx?n=807&s=327787。
5. Exyte，〈用於 BIM 和合規性的生成式 AI〉，<https://www.exyte.net/zh-TW/About-Us/Innovation-And--Experts/Transforming-BIM-engineering-and-code-compliance-with-generative-AI>。
6. 臺灣博碩士論文知識加值系統，〈人工智慧輔助 BIM 建築設計流程〉，[https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi/login?o=dnclcdr&s=id%3D"111NCKU5222023"&searchmode=basic](https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi/login?o=dnclcdr&s=id%3D)（2025.8.31）。
7. 超智諮詢，〈建築工程 AI 應用完全指南：BIM 智慧化與工地安全〉，<https://www.meta-intelligence.tech/insight-construction-ai>（2025.5.18）。
8. 內政部，〈國土空間資訊數位基礎建設及加值應用計畫〉，<https://ws.moi.gov.tw/001/Upload/407/refile/9716/316182/8600e578-03ae-45c4-8e0d-eebe9e33371f.pdf>。
9. 經濟日報，〈地緣政治衝突與 AI 算力競賽下的能源韌性思維〉，<https://money.udn.com/money/story/5612/9383597>（2026.3.15）。

10. FINDIT 平台，〈【新興領域 /2026.02 焦點】從矽盾到台美韌性共享，232 條款使台灣 ...〉，<https://findit.org.tw/tw/Res/2543>。

11. 行政院，〈4100 億特別條例項目金額重點一次看 支持產業與國土韌性〉，<https://www.cna.com.tw/news/aip/202504280089.aspx> (2025.4.27)。

12. 行政院，〈前瞻基礎建設——數位建設〉，<https://www.ey.gov.tw/achievement/BC7AFD18A8CE47E3>。

13. 台灣電力公司，〈TPC-EPRI 數位轉型論壇共議 AI 資料中心選址與電網韌性〉，<https://service.taipower.com.tw/tpcjournals/article/8006>。

14. UL Solutions Taiwan，〈因應現代化預製模組化資料中心的需求〉，<https://taiwan.ul.com/insights/addressing-needs-modern-prefabricated-modular-data-center/> (2025.11.11)。

15. BusinessNext，〈模組化資料中心是什麼？一個「鐵盒子」，改寫全球算力遊戲規則〉，<https://www.bnext.com.tw/article/85205/aidatacenter-ai-l12-server-2025> (2026.1.1)。

16. 天下雜誌，〈算力救火隊：貨櫃型 AI 資料中心 製造到落地，最快三個月能啟用〉，<https://www.cw.com.tw/article/5135502> (2025.6.9)。

17. Pure Storage，〈什麼是模組化資料中心？〉，<https://www.purestorage.com/tw/knowledge/what-is-a-modular-data-center.html> (2024.6.24)。

18. 行政院，〈臺灣 2050 淨零轉型「電力系統與儲能」關鍵戰略行動計畫〉，<https://www.ey.gov.tw/File/16D2A0935341E23?A=C>。

19. 台灣電力公司，〈擴大儲能布局打造更可靠的電力系統〉，<https://service.taipower.com.tw/tpcjournals/article/7690>。

20. iThome PR，〈台達於 COMPUTEX 2025 聚焦人工智慧與節能永續 AI 貨櫃型資料中心 ...〉，<https://www.ithome.com.tw/pr/169096> (2025.5.22)。

21. TechNews，〈面對 AI 高耗能挑戰，台達推 AI 資料中心微電網解決方案〉，<https://technews.tw/2025/10/31/delta-electronics-at-energy-taiwan-2025/> (2025.10.30)。

22. Reccessary，〈資料中心減碳戰 3》資料中心共址成趨勢！台達電搶先布局微電網〉，<https://www.reccessary.com/zh-tw/news/ai-data-center-energy-revolution-3-delta-blade-hydrogen> (2025.9.17)。

23. SoundEnergy，〈Our technology〉，<https://www.soundenergy.nl/our-technology/> (2024.11.24)。

24. LINE TODAY / 科技新報，〈新型熱聲冷卻系統，完全不耗電力將廢熱轉為零下冷空氣〉，<https://today.line.me/tw/v3/article/p2MBGG>。(2019.1.27)。

25. 台泥企業團，〈兼具永續及創新的低碳新建材——超高性能混凝土 (UHPC)〉，<https://www.tccgroup Holdings.com/tw/newsletterArticle.html?id=26>。

26. Airiti Library, 〈UHPC 材料性質與工程應用〉, <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/10155856-202203-202207150003-202207150003-89-97>。

27. LinkedIn, 〈Possible applications of WPE-DK UHPC concrete in the military〉, <https://www.linkedin.com/pulse/possible-applications-wpe-dk-uhpc-concrete-military-paul-hyper-p4cze> (2025.3.20)。

28. ESG Times, 〈SDGs 目標 7 是什麼？細項目標、國際案例、台灣 SDGs 7 實例分析〉, <https://esgtimes.com.tw/5464-2/> (2024.5.29)。

29. 中國工程師學會, 〈低碳智慧新世代園區規劃概念——以嘉義科園為例〉, https://www.cie.org.tw/var/file/0/1000/img/2/11112_chapter05.pdf。

30. 環境部氣候變遷署, 〈淨零路徑與關鍵戰略〉, <https://www.cca.gov.tw/affairs/response-policies/net-zero/2039.html>。

31. 桃園投資通招商網, 〈2050 淨零碳排永續意識帶動下的國際趨勢〉, 2022 年 12 月 5 日, https://invest.tycg.gov.tw/News_Content.aspx?n=3339&s=436642 (2022.12.5)。

32. Future City, 〈SDGs 懶人包：什麼是永續發展目標 SDGs？17 項目標一次掌握〉, <https://futurecity.cw.com.tw/article/1867> (2025.1.13)。

33. 國科會, 〈低碳轉型——112 年度中央政府科技研發績效彙編〉。

AI 技術於智慧工地之 推展與應用

關鍵詞 Keywords

- # 多模態模型 Multimodal Models
- # 大語言模型 Large Language Models (LLMs)
- # 工地安全 Construction Site Safety
- # 法規 Regulations
- # 智慧工地 Smart Construction Site

淡江大學
資訊工程學系

教授
許輝煌

雲林科技大學
資訊工程系

特聘教授
張傳育

淡江大學
土木工程學系

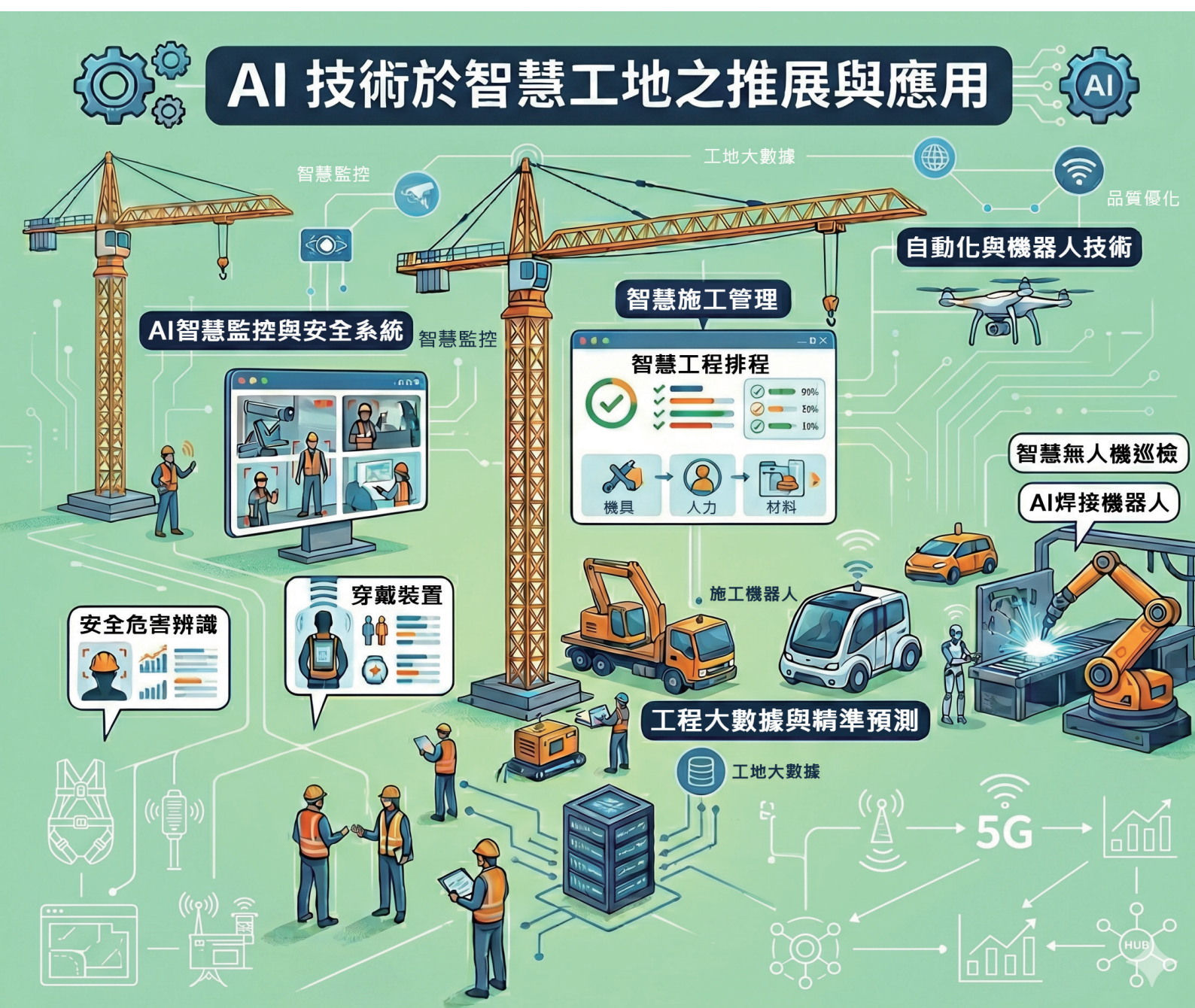
助理教授
蔡明修

台灣世曦工程顧問股份有限公司
BIM 整合中心

經理
盧祥偉

正工程師
李毓仁

智慧化營建工地為營建產業數位轉型之重要方向，然而其推動過程面臨多重挑戰，因此台灣世曦於 2023 年開始投入發展人工智慧技術如何輔助營建工地提升施工安全、效率與品質。本研究開發一套基於生成式人工智慧的「營建工地影像生成文字摘要系統」，透過整合多模態模型、大語言模型和圖像檢索技術，達成工地安全影像的智能分析與管理；系統透過建構影像辨識系統與資料分析機制，實現工地安全行為缺失之辨識。實測結果顯示，本系統在場景描述及缺失內容正確性方面表現優異，尤以法規檢索方面較其他已發展的 AI 模型展現顯著優勢。此外，本研究進一步導入實際工地案例，驗證系統於辨識缺失上的正確性與可行性，並得據以評估其在降低工安風險、輔助監造人員日常作業之成效。



壹、前言

隨著資訊科技的快速發展，人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 技術在各領域的應用愈加廣泛。營建工程作為一個高度複雜且資訊密集的產業，近年來也積極探索 AI 的潛力，尤其在工地管理、安全監控與品質控制方面展現出廣闊前景。然而，隨著工程規模與複雜度不斷提升，傳統管理方式已難以滿足需求，亟需創新解決方案。

在工地現場管理中，影像資料的處理與分析一直是重要卻耗時的工作。每天拍攝的大量照片記錄施工進度、安全缺失等狀況，蘊含關鍵訊息如施工缺失、潛在風險或進度延誤等。但人工分析不僅費時費力，還容易出現遺漏或判斷不一致，且隨著工程規模擴大，這類問題愈加突顯。經過研究與專家討論後，安全管理被認為是迫切需要突破的領域。以工地安全為例，巡檢照片中可能涉及防護設施缺失、違規操作或設備使用不當等多種風險。人工判斷之標準不僅難以維持一致性，更缺乏與工安法規及標準作業程序的有效連結，導致整體判斷準確度不足、安全知識難以累積與傳承。

近年來，深度學習 (Deep Learning) 與電腦視覺於影像識別方面取得突破；而生成式 AI (Generative AI, GAI) 如大型語言模型 (Large Language Model, LLM) 則展現跨模態理解能力，能將影像轉化為文字描述。然而單純依賴生成式 AI 仍存在資訊準確性不足的問題，難以符合工程領域的專業要求；對此檢索增強生成 (Retrieval-Augmented Generation, RAG) 技術的出現提供關鍵解方。透過整合專業知識庫與安全法規，AI 系統於影像分析時不再單純

依賴模型本身，更能進一步主動檢索相關規範，從而提升辨識結果的專業性與可靠性。這種架構既能保留生成式 AI 的效率優勢，又能確保分析結果與工程實務深度耦合，為工程師提供更具決策支持價值的安全建議。此外新型智慧巡檢載具的運用，使影像蒐集過程更為自動化與系統化，儘管這大幅提升執行作業效率，卻也隨之帶來海量資料處理之挑戰，這種資料超載的狀況，更突顯智慧影像分析系統的重要性。

綜上所述，本研究建構一套基於深度學習的工地安全影像分析系統，結合自動化影像處理、專業文字摘要生成與法規知識連結，並透過知識庫累積得以支援工程師的決策與學習。如此不僅減輕人力負擔，為營建業的 AI 輔助安全管理提供創新解決方案，更開啟營建工程安全管理智慧化的新篇章。

貳、AI 技術發展與特性

一、機器學習與深度學習概述

人工智慧的核心技術之一是機器學習 (Machine Learning)，其基本原理在於透過大量資料訓練模型，使系統能自動從經驗中學習並改善預測或判斷能力；而深度學習則是機器學習的進階形式，利用多層神經網路模擬人腦的運作方式，能夠處理更複雜的資料特徵。近年來，深度學習在影像識別、語音辨識及自然語言處理等領域取得突破性進展，成為推動 AI 快速發展的重要動力。其特點在於能自動提取資料中的高階特徵，減少人工設計特徵的需求，並在大數據環境下展現出高度的準確性與泛化能力。

二、AI 辨識於工程之應用能力

在營建工程領域，AI 影像辨識能力展現出廣泛的應用潛力。透過電腦視覺技術，AI 得以自動分析工地照片、辨識施工進度、設備狀態及安全隱患等；例如系統可檢測工人是否佩戴安全帽、防護設施是否到位，甚至能識別施工缺失或潛在風險。這項技術不僅提升巡檢效率，也減少人工判斷的誤差，其核心價值在於 AI 具備將影像分析結果與工安法規、標準作業程序結合之能力，從而提供具專業性的判斷資訊，此能力將使得工程管理者能即時掌握現場狀況並迅速採取改善措施，進一步保障施工安全與品質。

三、預測分析與決策支援系統

除了影像辨識外，AI 於預測分析與決策支援方面也扮演關鍵角色。透過對歷史資料的學習，AI 得以預測工程進度可能的延誤、設備故障或安全事故的發生機率，此預測能力使得管理者能提前規劃資源，降低風險並提升工程效率。同時，藉由整合檢索增強生成技術，AI 系統能在提供分析建議時，主動參考專業知識庫與法規標準，進一步確保建議的專業性與可靠性。在此發展趨勢下，AI 已不僅是輔助工具，更逐漸成為工程決策的重要支援系統，協助管理者在複雜環境中做出更精準的判斷。

參、營建工地影像生成文字摘要系統發展

一、問題背景與挑戰

在智慧工地的發展中，安全管理始終是核心的議題，利用生成式 AI 技術生成工地影像安全缺失摘要並引用相關法規，雖具備高效性與自動化潛力，但在實際應用中仍

面臨多重挑戰。

本研究首要面臨挑戰為工地場景高度多樣且環境不規則，由於設備、人員活動及施工流程差異顯著，加上光線、天氣與拍攝角度等外部因素，大幅增加影像辨識的複雜度；其二，影像中細節與背景資訊極為繁雜，模型需具備提取有效資訊與排除干擾的能力，否則可能錯失安全隱患；其三，系統生成的文字需兼具專業度與嚴謹性，影像辨識後的安全缺失描述，應能精確並正確對應相關法規，避免語言模糊或語意不符，而導致後續判斷偏差；其四，法規龐雜且因地區與工程類型而異，生成系統必須能精準匹配條文或透過檢索增強生成補充知識，以避免錯誤引用。

據此，系統在專業性、準確性與生成效率之間存在權衡關係，如何在不損及實用性的前提下，平衡系統分析深度與反應速度，為本研究之系統生成及優化的課題。

二、資料蒐集及知識庫建置

首先需定義與確認（一）資料蒐集項目含括工地影像取得、針對影像的場景描述、影像中工安缺失描述及違規行為所對應之法規；（二）資料蒐集原則及方法係定義蒐集項目之彙整原則，以確保知識庫資料準確與可靠度。再者依據前述原則蒐集資料，目的在於建立完整且精確的基礎，以支持工地影像安全缺失摘要的生成。

（一）資料蒐集項目

1. 工地影像：涵蓋多樣化場景、設備與工人活動，並包含不同天氣、光線與拍攝角度，確保模型能適應多變環境並辨識安全細節。

2. 場景描述：以標準化文字補充影像內容，清楚呈現施工活動、設備狀態與環境特徵，以提供判斷上下文。
3. 工安缺失描述：針對影像中安全問題進行標註，如防護裝備缺失或設備使用不當，具體指出缺失細節並涵蓋常見安全問題。
4. 違反法規：將缺失與相關法規條文對應，精準標註適用規則，以突顯缺失的合規性與法律後果。

（二）資料蒐集原則及方法

1. 工安缺失資料：來源為台灣世曦歷年影像與工程師文字描述，並依規則撰寫，確保描述與影像一致、細節清楚。所有輸入資料經 AI 及工程師清洗，包括錯字修正、冗字移除、同義詞統一及刪除不符影像的描述，最後依比例切分為訓練集與測試集。
2. AI 輔助生成描述：利用 AI 自動生成場景描述，提高效率並涵蓋更多潛在問題，並由人工審核剔除不準確或不相關內容，確保生成描述之可靠性。
3. 工安法規資料：人工撰寫並整理國家法規、技術標準與行業規範，建立結構化資料庫。流程包括確認缺失、檢索法規、提取條文及結構化整理，並透過專家審核、多重對比與動態更新以確保準確性。

三、系統架構與關鍵技術

本研究擬解決生成工地影像安全缺失摘要的核心問題，設計具備「AI 視覺」與「AI 推理」能力的解決方案。整體架構以多模態

技術為核心，結合多模態模型、大語言模型與檢索增強生成三大技術，以建構能準確分析影像並生成專業文本摘要的系統。

（一）三大關鍵技術

1. 多模態模型：同時處理影像與文字數據，透過視覺模型提取工地影像特徵，再由語言模型生成專業文字描述。
2. 大語言模型：具備強大推理與文本生成能力，能精確處理工安缺失描述並匹配相關法規，確保摘要的專業性與邏輯性。
3. 檢索增強生成技術：補充外部專業知識，特別是工安法規，提升生成結果的準確性與合規性。

（二）解題策略

採用「多模態模型 + 大語言模型 + 圖像檢索」：結合影像解析、語言推理與知識補充，提升生成結果的專業性與可靠性。

（三）方法概述

本方法整合多模態模型（眼睛）負責視覺處理，以識別複雜的工地場景、設備與人員活動，搭配大語言模型（大腦）生成邏輯嚴謹的缺失內容，並結合圖像檢索技術（記憶）進行專業知識補充，共同完成工地影像的場景描述、工安缺失、造成原因及違反法規的生成。實驗結果顯示，此架構最符合實際需求，只要持續擴充知識庫並更新效能更佳之模型，即可提升效能。

未來若要更準確生成工地場景與專業名詞，需進行模型微調或透過多階段問答補充知識，確保生成的名詞符合專業用語。同時，當場景描述能使用專業詞彙時，可將法規

條文結構化為資料庫，透過圖像檢索直接匹配，省去人工查找與撰寫的流程，進一步提升系統的自動化與專業性。

肆、AI 應用於工地安全實例

一、工地安全辨識

案例實測：系統建置、反覆回饋與優化後，由台灣世曦承攬專案之工地監造人員所提供

實際影像進行測試，結果顯示引擎能精確辨識工安缺失及違反的法規，並生成場景描述及安全風險說明（如圖 1～圖 4）。

二、系統生成工安缺失摘要成效評估

透過目前蒐集案例加以驗證工地缺失摘要生成引擎的效能，本研究設計專家評分五大構面及評分機制，進行系統量化評估，相關評分結果分析如下。



圖 1 案例實測生成辨識結果 (1)



圖 2 案例實測生成辨識結果 (2)



平均評分: 0.0(0 人評分)

進行評分

工地安全缺失

AI摘要

工安缺失: 預留鋼筋未彎曲處理或加護蓋。

違反法規: 營造安全衛生設施標準,第二章,第5條僱主對於工作場所暴露之鋼筋、鋼材、鐵件、鋁件及其他材料等易生職業災害者,應採取彎曲尖端、加蓋或加裝護套等防護設施。

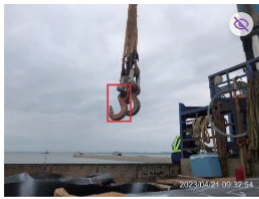
1. 場景描述

影像顯示一處混凝土結構施工現場,可見兩面垂直的混凝土牆體,表面有模板拆除後留下的紋理與孔洞,牆體底部地面為未鋪設完成的混凝土或泥土地面,數根鋼筋從地面垂直伸出,每根鋼筋頂端均套有黃色塑膠保護帽。右側有一根粗大的橙色管道斜向穿過畫面,管道旁有彎曲的鋼筋骨架結構。左側牆邊懸掛一塊藍色防水布或防護網,部分遮擋窗框或開口。影像右下角標註日期「114.08.11」。

2. 安全風險描述

影像中多根鋼筋從地面裸露伸出,頂端雖已加裝黃色塑膠保護帽,但鋼筋本身仍構成突出物,可能導致人員碰撞、絆倒或刺傷風險。橙色管道未見固定支撐或圍欄隔離,若位於通道或作業區附近,可能成為障礙或撞擊源。整體地面未平整或鋪設安全走道,且無明顯警示標誌或隔離措施,增加人員移動時意外接觸危險構件的可能性。

圖 3 案例實測生成辨識結果 (3)



平均評分: 0.0(0 人評分)

進行評分

工地安全缺失

AI摘要

工安缺失: 吊鉤無設定防滴舌片。

違反法規: 職業安全衛生設施規則,第四章,第一節,第90條僱主對於起重機具之吊鉤或吊具,應有防止吊舉中所吊物體脫落之裝置。

1. 場景描述

這張影像顯示了一個海邊的施工現場。前景中有一個起重鉤懸掛在空中,鉤子看起來有些老舊。背景中可以看到遠處的挖掘機正在進行填海造地的工作,海面上有一艘船。右側有一個穿著反光背心的工人,正在操作或檢查一些裝置。現場還有一些繩索、鏈條和一個藍色的保溫箱,這些物品都放置了一個金屬架子上。

2. 安全風險描述

起重鉤看起來有些破損,可能影響其承載能力。工人穿著反光背心,但無法確定是否佩戴了其他必要的安全裝備,如安全帽或手套。繩索和鏈條雜亂地掛在架子上,可能導致使用時出現混亂或意外。這些都是影像中清楚呈現的潛在安全問題。

圖 4 案例實測生成辨識結果 (4)

(一) 案例蒐集

1. 涵蓋大型機具、安全防護、物料堆置、施工架、個人（行為與裝備）、氣體鋼瓶、電氣安全、墜落、機具不當使用、鋼筋及環境衛生，具代表性與多樣性。

(二) 專家評分構面

1. 設定四大構面：場景描述準確性、缺失內容正確性、法規適合性、潛在缺失辨

識能力。

2. 專家依據構面對生成結果進行 1 至 5 分評分，兼顧技術正確性與實務應用價值。

(三) 評分結果統計

評分統計結果顯示（詳表 1），系統於多數工安類別中相關分析成果已展現高度準確與平衡性，總平均構面普遍落於 4.00 ～ 4.60 間，呈現整體研究成效已具備高度實

用性與專業度。其中系統於「大型機具」、「機具不當使用」之缺失類型皆取得平均 4.60 分，代表其對於具體物件（如機具、車輛）的特徵辨識與對應法規最為精準。

再者，於各類工安缺失之各構面效能分析上，以「場景描述準確性」與「法規合適性」兩大構面為本系統的核心優勢，此結果驗證多模態模型於場景、行為活動的識別精確度高；同時結合圖像檢索技術進行專業知識補充後，得以有效引用正確工安法規，大幅降低 AI 幻覺或法規錯置之風險。

然數據中表現相對弱勢類別為「環境衛生」，其中又於「缺失內容符合性」之得分（分數 2.40）較低，經分析研判主要因相關輸入資料數量較少，且環境衛生如積水、垃圾與雜物等往往處於非特定物件缺失，系統較難以識別其髒亂程度，因此於缺失內容生成上，往往與專業人員預期內容有所落差。

至於特定類別之理解與辨識落差較大者，以「安全防護」（總平均 4.12 分）、「施工架」（總平均 4.04 分）缺失類型取得分數雖高，但在「缺失內容符合性」構面卻降至 3.80 分，此差距顯示，系統雖辨識得到施工架、找到相關法規，但在描述施工架缺失細節時，語意與人員期望之內容仍有精進空間。

系統整體效能於各面向總結如下：

1. 場景描述正確性：能準確還原影像細節。
2. 缺失內容正確性：能有效反映真實安全問題。
3. 法規適合性：能顯示結合法規的專業性，但仍需擴充或更新法規知識庫。
4. 潛在缺失辨識：能有效反映隱性風險能力。

表 1 工安缺失各構面平均分數表

工安缺失	缺失內容正確性	潛在缺失辨識	場景描述準確性	法規適合性	類別總平均構面
大型機具	5.00 ↑	5.00 ↑	5.00 ↑	5.00 ↑	4.60 ↑
安全防護	3.80	4.00	5.00	4.80 ↑	4.12 ↑
物料堆置	4.67 ↑	4.33 ↑	5.00	4.67	4.33 ↑
施工架	3.80	4.20 ↑	4.80 ↑	4.40 ↑	4.04 ↑
個人	3.67	4.33	5.00	5.00 ↑	4.20
氣體鋼瓶	4.00 ↑	3.75	5.00	5.00 ↑	4.15 ↑
電氣安全	4.40	4.40	4.80	4.60 ↑	4.24 ↑
墜落	4.18 ↑	4.41 ↑	4.88	4.82 ↑	4.27 ↑
機具不當使用	5.00	5.00	5.00	5.00	4.60
鋼筋	4.25	4.25	4.75	5.00 ↑	4.25 ↑
環境衛生	2.40	3.80	4.20	4.20 ↑	3.52

伍、結論

一、系統優勢及特色總結

(一) 深度學習技術應用於工地影像分析具備可行性

透過多模態模型、大語言模型和圖像檢索技術的整合，能有效分析工地影像，生成高品質的工安缺失摘要。其優點與特色如下：

1. 場景描述生成：視覺的多模態模型能有效識別影像中的工地場景、設備和人員活動，並生成詳細的場景描述。
2. 工安缺失識別：模型能根據圖像檢索結果及知識庫內容，以及多模態模型的場景描述，具備識別影像中存在的工安缺失能力。
3. 缺失原因推論：多模態模型結合大語言模型推理能分析工安缺失的可能成因，例如設備擺放不當、人員操作失誤等。
4. 違反法規判斷：模型能根據圖像檢索提供的工安法規知識庫，判斷工安缺失是否違反相關法規，並列出具體的違規條款。

(二) AI 技術於工地的應用及推展有助於提升工地安全管理效率

便捷的影像管理、摘要生成和查詢功能，能協助工程師快速識別潛在安全風險，並提供相關法規資訊，提升工地安全管理效率。此系統效益包括：

1. 提高工地影像管理效率：提供便捷的影像管理、摘要生成和查詢功能，節省工程師的時間和精力。

2. 提升工地安全管理效能：自動識別工地安全缺失，並提供相關法規資訊，協助工程師及時處理安全問題，預防事故發生。

3. 促進工程知識學習與傳承：將工地安全管理的專業知識系統化，方便工程師學習和參考。

二、後續應用推動工作重點

為持續提升系統效能和優化模型應用，後續將導入驗證場域，以實證系統之應用價值，本研究未來將持續發展之重點工作包括：

- (一) 持續擴充知識庫：隨著新法規的頒布和新工安案例的出現，持續更新和擴充知識庫，以提升模型的準確性和覆蓋範圍。
- (二) 強化多模態模型的視覺理解能力：探索更先進的模型架構或引入領域知識圖譜，提升模型對工地場景理解能力，並生成更準確的場景描述。
- (三) 優化圖像檢索的準確度：嘗試不同的特徵提取模型或相似度計算方法，以提升圖像檢索的準確度，進而提升系統的整體效能。
- (四) 窄域 AI 的輔助：透過加入窄域 AI 的輔助，可以有效彌補生成式模型在特定領域應用中的不足。
- (五) 擴展系統功能：將單點服務整合至既有工程管理系统，例如介接本公司自行研發之 PMIS 或相片管理系统，以擴展更多工地管理相關應用場景的需求。

(六) 持續優化人機協作：簡化資料輸入流程，導入 AI 輔助摘要撰寫功能，以提升人機協作效率，並持續優化模型效能。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，《大語言模型與深度學習在營建工地影像識別中的創新應用成果報告書》(2024)。

2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，《多模型融合的工地安全與品質缺失識別與摘要生成成果報告書》(2025)。

3. 蔡明修、張傳育、許輝煌、盧祥偉、陳炳宏，「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 52 卷，第 1 期，頁 41-51，(2025.2)。

AI 看見城市—— 瑠公綠廊的人本改造

關鍵詞 Keywords

人工智慧 Artificial Intelligence

街景影像 Street View Imagery

人本環境 Human-centered Environment

景觀評估 Landscape Evaluation

瑠公綠廊 Liugong Green Corridor

步行環境 Walkability

台灣世曦工程顧問股份有限公司
運輸土木部

資深協理

吳嘉文

技術經理

蕭勝雄

副理

鄧大光

計畫副理

李致賢

計畫工程師

李怡葳

國立臺灣大學
園藝暨景觀學系

副教授

張伯茹

東海大學
景觀學系

教授

何立智



近年都市公共空間改善逐漸轉向以「人本環境」為核心目標發展。本文以「瑠公綠廊人行環境改造工程」為例，探討如何將原本缺乏全齡友善的停車空間，轉型為串聯臺北東區的人本綠廊，並重塑地方紋理與社區意象再造。為客觀檢核改善成效，導入「AI 景觀與人本評估系統」，結合街景影像與多模態大型語言模型，建構包含舒適性、美學性、通用性、安全性、使用性及整體滿意度等六大構面，並輔以 LaDeco 視覺構成分析工具。

評估結果顯示，改善後多數人本指標呈現正向改善，尤以安全性、通用性與舒適性之提升最為顯著。同時，視覺構成分析指出綠視率等自然元素比例變動甚微，證實本案成效源於人車關係重整與空間結構優化，而非單純依賴增加綠量，達到人本環境改善的目標。

本評估系統成功將主觀之空間感知轉化為可比較之量化評估結果，使工程成效從單純的「設施建置」邁向具說服力之「品質驗證」。該技術具備結合地理資訊系統 (GIS) 等應用之潛力，未來能為公共工程管理與都市治理提供堅實的科學實證基礎。



壹、前言

一、研究背景與問題意識

近年都市公共空間改善的核心目標，已逐漸由傳統工程設施供給，轉向兼顧步行安全、空間舒適、景觀品質與使用者感受之「人本環境」導向。尤其在高密度商業區、交通節點周邊與人車活動頻繁之街區，公共空間不再僅是交通通行的附屬設施，而是影響城市形象、地方活力與日常生活品質的重要介面。如何有效掌握環境改善前後之差異，並以更客觀、系統化的方式評估景觀與人本品質，已成為工程顧問、規劃設計與都市治理實務中日益重要的課題。

「瑠公綠廊人行環境改造工程」案例正反映此一都市更新需求。該基地位於臺北市大安區東區商業核心地帶，原先作為汽、機車停車場及穿越性通道使用，空間使用效率偏低，亦缺乏全齡友善、安全連續且具停留品質的步行環境。從歷史脈絡來看，基地原為天然陂塘，後續轉為瑠公圳系統之一部分，再因都市發展而逐步加蓋並轉型為停車空間，使地方原有水文記憶與空間特色逐漸隱沒。隨著東區商圈轉型及臺北市推動忠孝東區振興計畫，本案遂以「人本的步行環境」與「東區綠廊的串聯」為核心，透過空間整合與環境改造，重新思考商業街區中的公共開放空間價值。

本工程在 2024 年 6 月底完工啟用，讓東區正式從原本的车本空間轉向人本生活。當這些新設空間融入市民的日常生活軌跡時，後續課題在於如何精準衡量「人本環境」及「環境美學」的改造績效。然而，傳統公共空間改善成效判讀，多仰賴現地觀察、專家經驗或個案式描述，雖具實務參

考價值，但常面臨評估標準不一致、作業成本高、主觀性較強，以及不易進行跨時比較等限制。特別是當改善目標不僅涉及鋪面、植栽或交通設施等可見元素，亦關係到安全感、愉悅感、通用性與整體滿意度等人本感知時，更需要一套能同時處理空間視覺資訊與使用者感受的評估工具，以協助公共工程從「完成建設」進一步走向「驗證品質」。

二、AI 導入景觀與人本評估之必要性

本公司與國立臺灣大學合作，啟動「應用人工智慧於交通節點的景觀及人本評估系統」計畫（以下簡稱「AI 景觀人本評估計畫」）嘗試建立一套結合街景影像、多模態大型語言模型與人類主觀感知資料的智慧化分析方法。該系統以街景影像為基礎，整合多模態語言模型之圖像理解與語意推理能力，並輔以感知問卷、專家評分與指標定義建構，形成兼具效率、可重複操作性與人本判讀能力的評估架構。其目的不僅在於辨識環境中的可見景觀元素，更在於進一步分析舒適性、美學性、通用性、安全性、使用性與整體滿意度等空間品質指標，以作為都市環境診斷與改善成效檢核之依據。

相較於單純以綠視率、綠覆率或工程完成項目作為成果判讀基礎，AI 輔助評估的優勢在於能同時處理「景觀構成」與「人本感知」兩個層次。一方面透過影像辨識掌握各視覺景觀元素的構成比例；另一方面亦可藉由語意引導與指標模板，推估環境在安全、舒適、美感與步行體驗等面向上的整體表現。此種評估方式有助於補足傳統工程成果報告偏重硬體敘述之不足，並使改善前後之比較更具量化基礎與說服力。對工程顧問與都市設計實務而言，這不僅是一項技術工具

的導入，更代表公共空間評估思維由「設施導向」邁向「人本導向」的重要轉變。

三、本文目的與內容架構

基於上述背景，本文以「瑠公綠廊人行環境改造工程」完工後之場域為示範案例，說明 AI 景觀人本評估之應用方式，並透過改善前後資料比較，呈現場域在步行環境、景觀感知與空間品質上的變化。本文首先說明系統之建構邏輯與評估方法，其次分析瑠公綠廊改善前後之差異，最後討論此類工具於公共空間規劃、設計驗證與治理應用之潛力。

貳、AI 景觀與人本評估系統之建構

一、系統發展理念與評估流程

AI 景觀人本評估計畫所建構之評估系統，係以都市交通節點及公共空間周邊環境為主要應用場域，目標在於發展一套可結合街景影像、人工智慧模型與人類主觀感知資料之

智慧化分析工具，用以支援景觀品質與人本空間表現的診斷工作。此一系統發展理念，係回應公共工程與都市環境改善實務中對於「快速、標準化、可比較」評估方法之需求，建立一套可複製、可擴充且具人本導向的分析架構，使環境改善前後之變化能以一致的指標語言進行檢核，進一步提升工程成果評估的客觀性與可操作性。

此系統之建構流程，主要包括資料蒐集、指標建構、人類感知校準、模型評分與結果整合等步驟。資料來源首先包含 Google 街景影像，作為環境判讀的視覺基礎；其次為人類主觀感知資料，藉由問卷蒐集民眾對特定街景的空間感受；再者則為具景觀專業背景之研究人員所進行之專家評分，用以作為模型驗證與提示詞設計的參照基準。整體流程由影像資料出發，透過指標體系與提示詞模板，使 AI 模型得以對各項人本與景觀指標進行量化評估，最後再與人類感知結果進行比對分析，建構流程如圖 1 所示。

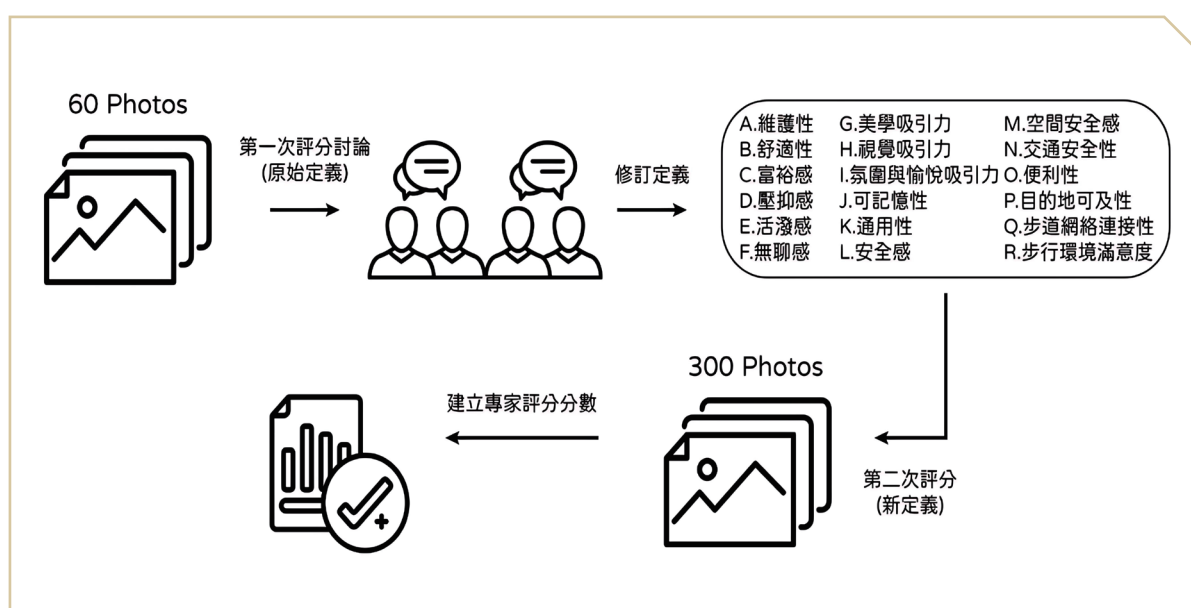


圖 1 專家評分示意圖

二、指標體系設計

為使 AI 評估不僅停留於影像辨識層次，而能回應人本空間與步行環境品質之需求，此系統建構六大評估面向，分別為舒適性、美學性、通用性、安全性、使用性與整體滿意度，共計 18 項視覺可辨且具感知語意之細部指標。此一指標體系同時考量環境的可見物理特徵與使用者之主觀感受，作為 AI 模型與人類評估之共同語言。

在細部內容上，舒適性構面包含維護性與舒適性；美學性構面則涵蓋富裕感、壓抑感、活潑感、無聊感、美學吸引力、視覺吸引力、氛圍與愉悅吸引力，以及可記憶性等八項子指標；通用性構面聚焦不同年齡與行動能力使用者之友善程度；安全性構面包括安全感、空間安全性與交通安全性；使用性構面則涵蓋便利性、目的地可及性與步道網絡連接性；最後以步行環境滿意度作為整體綜合評估。各項指標均對應文獻定義與主觀量測範例，並考量 AI 模型是否能由影像中辨識相關特徵，作為後續提示詞設計與系統輸出的依據。

此一指標體系的價值，在於將過去較難直接量化的空間感受，例如安全感、愉悅感、壓抑感或可記憶性，納入可操作的評估架構之中，使環境改善不再僅以綠量、鋪面或設施數量作為成果判斷標準，而能進一步反映使用者對空間整體品質之感受與經驗。對於公共工程與都市設計實務而言，此種兼顧景觀構成與人本感知的指標系統，亦更符合當前城市治理由設施導向轉向使用者導向的趨勢。

三、模型判讀與提示詞工程

在模型建構方面，此系統分別採用開源模

型 Gemma 3，並透過提示詞工程設計，測試多模態語言模型在景觀與人本評估任務中的推理能力與穩定性。為使模型評分具有一致性與可解釋性，研究團隊設計三種層級之提示詞模板。研究結果顯示，隨著提示訊息的增加，模型內部評分的一致性與穩定性均明顯改善，其中以加入專家思維鏈的 Level 3 表現最佳，顯示明確的語意框架與逐步推理引導，可有效降低模型輸出之隨機性，並提升其與人類專家思考邏輯的一致程度。此外，研究亦指出，模型在維護性、通用性、安全性與便利性等偏向客觀物理特徵的指標上，與人類評分具有較高一致性；相對地，在壓抑感、活潑感及可記憶性等較高層次心理構面上，模型表現仍受到真實情感經驗與文化脈絡不足之限制。此一結果顯示，AI 評估系統雖已具備作為環境診斷工具之潛力，但仍需透過更精細的語意引導與場域驗證，以持續提升其在人本感知判讀上的準確度。

參、瑠公綠廊場域與改善內容

一、場域背景

瑠公綠廊基地位於臺北市大安區東區商業核心地帶，周邊鄰接住宅、商業設施、公園、捷運站及地下商街，為東區重要之人流集散節點之一。基地位處忠孝復興站周邊高活動密度範圍，亦為東區前後綠廊與公園系統之銜接節點，兼具交通節點、商業街區與開放空間轉換介面之功能。基地面積約 4,500 平方公尺，本案整體改造以串聯東區綠廊系統及提升行人環境品質為主要目標。

就歷史脈絡而言，基地原址於百年前為天然陂塘，其後納入瑠公圳系統，隨都市

發展逐步轉變為街廓內之人工圳路，並於1980年代加蓋後轉作停車場使用，如圖2所示。雖位處繁華商業區核心，長期以來卻主要作為停車與穿越空間，與周邊高密度商業活動及人潮往來之區位特性並不相符。其後，隨臺北市政府推動忠孝東區振興計畫及相關空間擾動計畫，本案遂被納入東區再發展之重要節點，重新定位為兼具公共空間與人本街道功能之綠廊場域。

二、改善前之主要問題

改善前之基地範圍主要由汽、機車停車空間、計程車排班區及零碎人行通道構成，整體使用型態偏向服務私人運具，缺乏安全、連續且具停留品質的步行空間。原有空間雖藉由連續花臺形成長廊狀通行動線，可供行人短暫停留或穿越周邊街區，但整體仍欠缺全齡友善、安全及連續之步

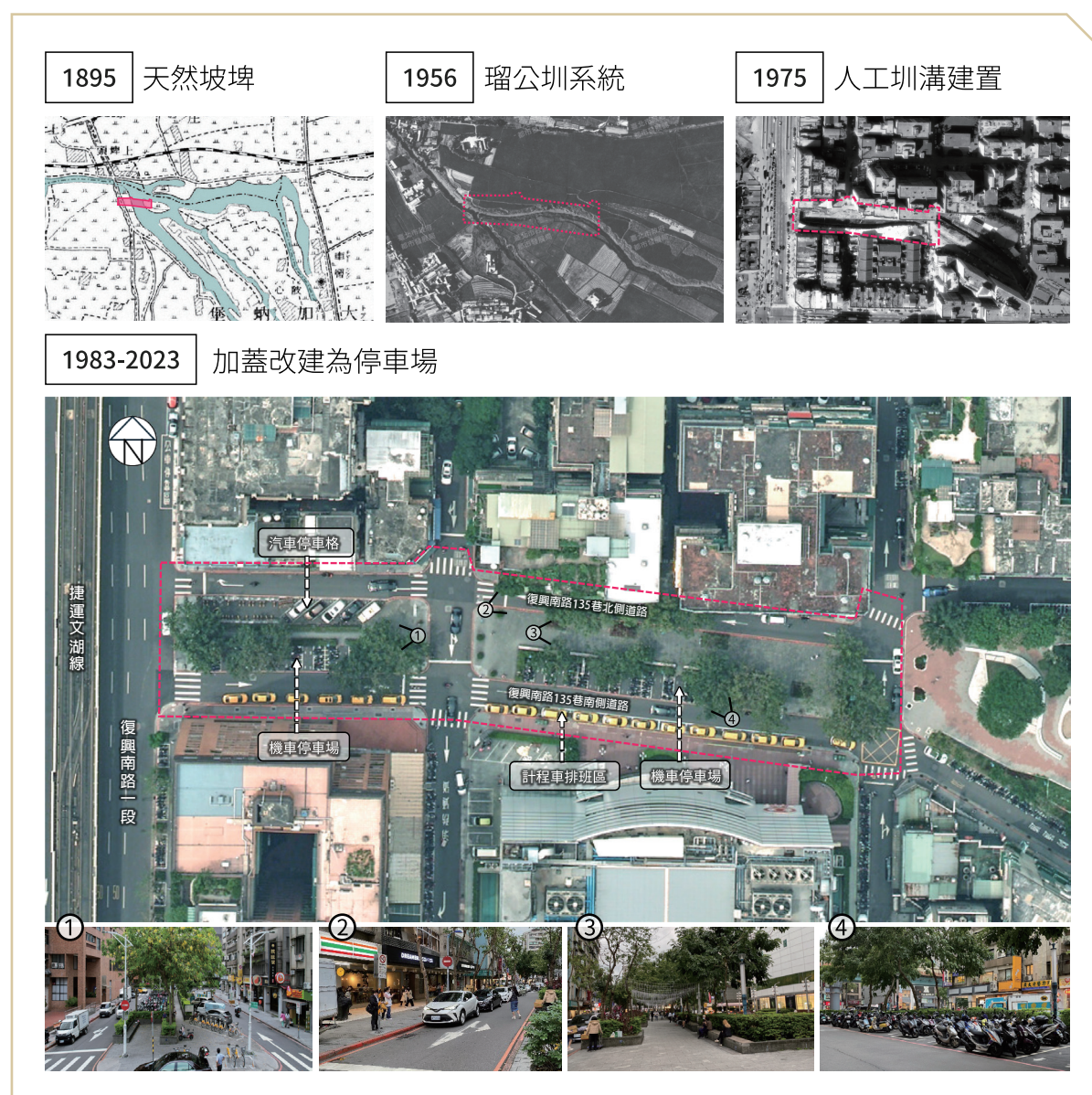


圖2 瑠公綠廊歷史演進

行環境。此外，基地大部分面積長期為停車場與道路占用，附屬空間狹窄且呈線性廊道狀，不利於多元公共活動、休憩停留與街區交流。再加上違規路邊停車、機車停車格占用率高、行人與車流衝突、夜間

辨識性不足，以及無障礙與高齡友善設計不足等問題，如圖 3 所示，使基地雖位於商業核心，卻未能充分發揮都市公共空間應有之集散、停留與地方辨識功能。



圖 3 瑠公綠廊工程改善前情況

三、改善內容說明

本案改造以四項核心策略推動瑠公綠廊由停車導向空間轉型為人本綠廊，改造手法如圖 4。首先，在道路整合方面，透過調整停車配置、整併道路與停車空間、縮減車道寬度及導入通用設計，建立連續無障礙步道與多方向步行網絡，改善原有以車

行為主的環境。其次，在水體記憶再現方面，藉由鋪面紋理、水霧裝置、魚形銅鑲嵌及歷史解說設施，重新詮釋瑠公圳與陂塘意象，強化場域識別性與地方特色。第三，在公共共享空間營造上，透過口袋廣場、休憩座椅、戶外用餐區及多功能活動空間配置，提升停留、交流與多元使用之

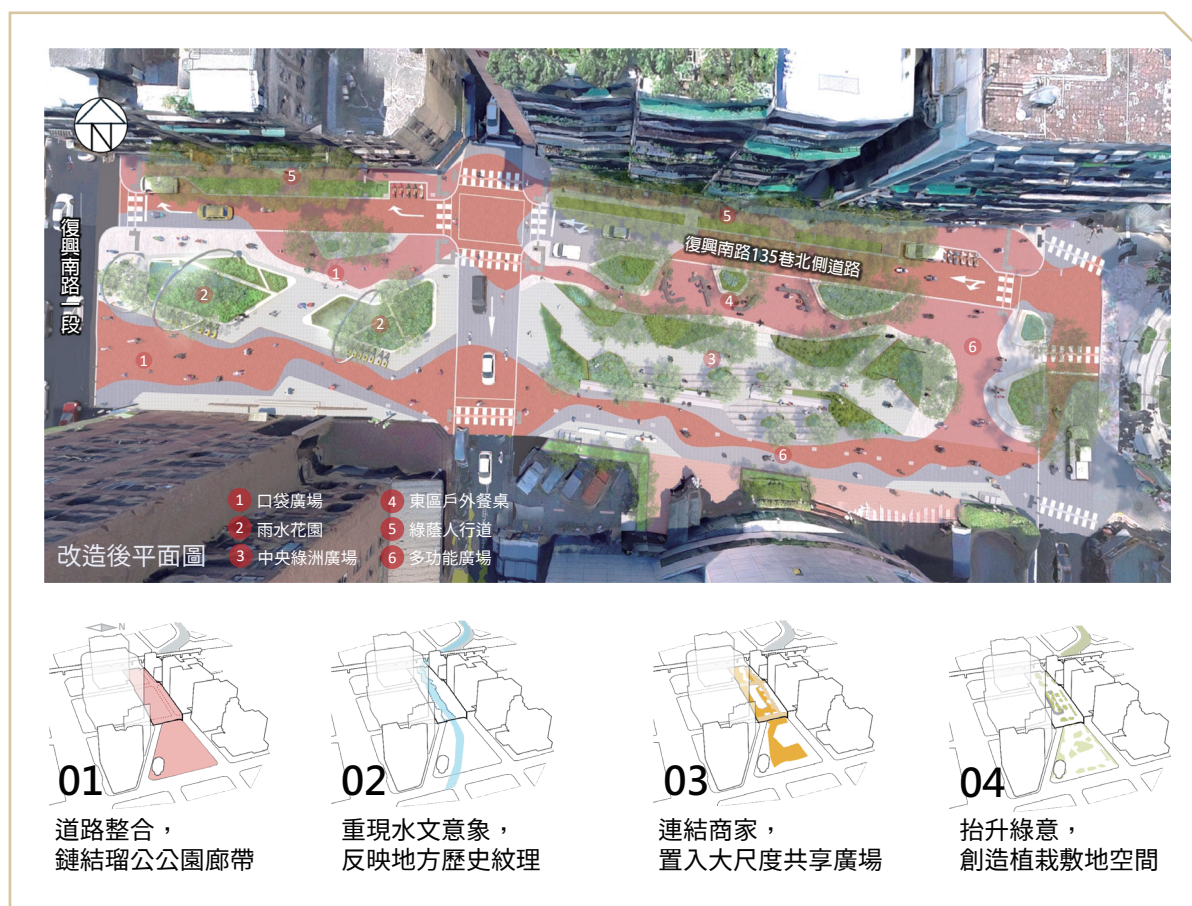


圖 4 瑠公綠廊工程改造手法

可能，強化街區公共性。最後，在植栽與韌性設計方面，除保留既有喬木外，並擴大綠化面積，導入連續綠帶、雨水花園、原生及馴化植物，以及透水鋪面、節水設備與節能照明等措施，兼顧生態韌性、微氣候調節與永續管理目標。整體而言，本案不僅改善步行環境與景觀品質，亦透過歷史再現、公共活動支持與綠色基盤強化，重新塑造東區核心街區之人本開放空間價值。

四、改善前後評估資料建置

本文將瑠公綠廊改善前後資料整理為改善前與改善後兩組，並套用相同指標系統進行比較。分析內容包括 LaDeco 視覺構成指標與 Walkability 人本評估指標。其中，LaDeco

(Landscape Decoder) 為 AI 景觀人本評估計畫共同主持人何立智教授開發之視覺景觀元素分析工具，主要透過人工智慧與語意分割技術，辨識街景影像中 vegetation、street、archi、sky 等景觀構成元素，並計算其比例變化，以掌握空間視覺組成之差異；Walkability（可步行性）人本評估指標則用於呈現舒適性、美學性、通用性、安全性、使用性及整體滿意度等面向之變化。本文所使用之人本評估架構，係承接 AI 景觀人本評估計畫所建構之指標系統與分析流程，並進一步應用於瑠公綠廊改善前後之成果比較。由於改善前後影像筆數並不完全一致，本文採平均值比較方式呈現整體變化趨勢，作為工程應用示範與成果檢核之基礎。

肆、成果分析

一、改善前後資料比較原則

整體而言，瑠公綠廊改善後之結果顯示，詳見表 1，人本步行環境相關指標整體呈改善趨勢，多數指標有所提升，且改善幅度以安全性、通用性、舒適性及步行連續性最為明顯，改善後現況如圖 5。相較之下，LaDeco 視覺構成指標的變化幅度相對有限，顯示本案成效並非單純來自綠量增加，而更可能與空間整理、人車關係重整、步行界面優化及整體人本品質提升有關。此一結果也正呼應瑠公綠廊原始改造策略中，道路整合、共享空間營造、地方記憶重塑與植栽多樣性提升等多重設計介入方向。

二、人本評估指標之改善趨勢

就 Walkability 指標而言，改善後最明顯的變化出現在安全性構面。空間安全性由 2.85 提升至 3.50，增幅達 0.65，為所有指標中改善幅度最大者；安全感由 3.23 提升至 3.63，交通安全性亦由 2.31 提升至 2.56。此結果顯示，瑠公綠廊改善後在行人防護、人車衝突緩解、視覺辨識性與心理安心感等面向均有實質進展，亦說明道路整合與人本交通設計確已轉化為可被評估系統辨識之空間品質提升。

除安全性外，與步行品質直接相關之指標亦呈現穩定改善。步道網絡連接性由 2.62 提升至 3.06，增幅為 0.45；通用性由 2.54

表 1 瑠公綠廊改善前後人本評估指標比較表

構面	指標	改善前	改善後	變化值
舒適性	維護性	3.31	3.66	+0.35
舒適性	舒適性	2.54	2.94	+0.40
美學性	富裕感	3.08	3.16	+0.08
美學性	壓抑感（註）	3.15	3.00	-0.15
美學性	活潑感	2.38	2.59	+0.21
美學性	無聊感（註）	4.00	3.97	-0.03
美學性	美學吸引力	2.15	2.41	+0.25
美學性	視覺吸引力	2.46	2.56	+0.10
美學性	氛圍與愉悅吸引力	2.46	2.72	+0.26
美學性	可記憶性	2.85	2.91	+0.06
通用性	通用性	2.54	2.97	+0.43
安全性	安全感	3.23	3.63	+0.39
安全性	空間安全性	2.85	3.50	+0.65
安全性	交通安全性	2.31	2.56	+0.25
使用性	便利性	2.92	2.88	-0.05
使用性	目的地可及性	2.92	3.00	+0.08
使用性	步道網絡連接性	2.62	3.06	+0.45
整體滿意度	步行環境滿意度	2.38	2.66	+0.27

註：壓抑感與無聊感屬負向感知指標，其數值下降可解讀為改善。



圖 5 瑤公綠廊工程改造後情況

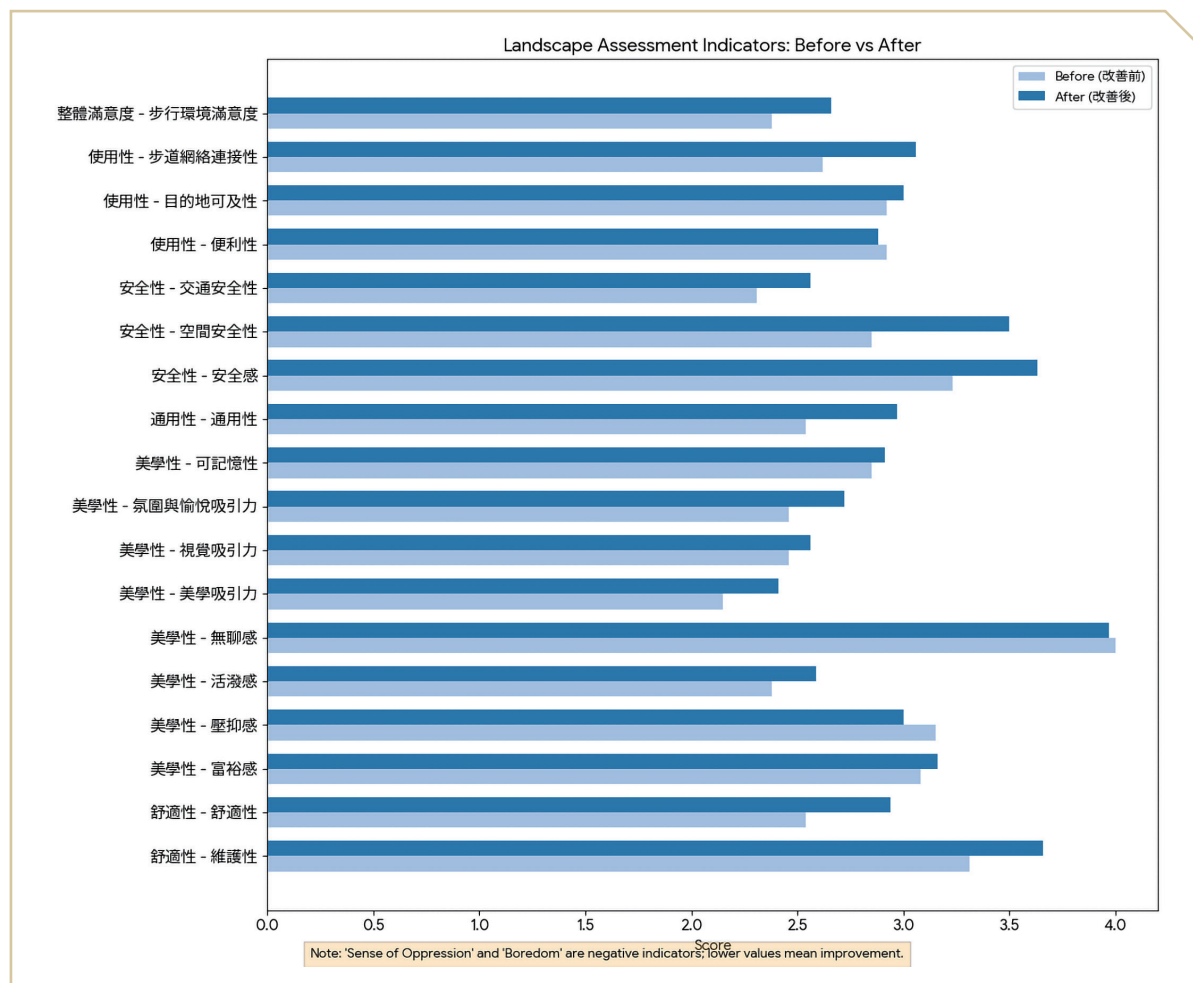


圖 6 瑤公綠廊改善前後人本評估指標比較分組柱狀圖

提升至 2.97，增幅為 0.43；舒適性則由 2.54 提升至 2.94，增幅為 0.40；維護性亦由 3.31 提升至 3.66，增幅為 0.35。上述結果顯示，本案改善並非僅止於景觀表層更新，而是有效提升步行動線的連續性、環境可使用性與不同年齡及行動能力使用者的友善程度，較符合全齡、無障礙及行人優先之空間目標。

在美學與感知氛圍方面，改善後整體亦呈現溫和但明確的正向變化，如圖 7 所示。氛

圍與愉悅吸引力由 2.46 提升至 2.72，美學吸引力由 2.15 提升至 2.41，活潑感由 2.38 提升至 2.59，視覺吸引力由 2.46 提升至 2.56，可記憶性亦由 2.85 提升至 2.91。另一方面，壓抑感由 3.15 降至 3.00，無聊感由 4.00 降至 3.97，雖降幅不大，但方向上均屬改善，顯示空間的負向心理感受已有所減弱。整體步行環境滿意度亦由 2.38 提升至 2.66，顯示改善成果已不僅反映在單一空間特徵，而能被整體性使用評價所感知。



圖 7 瑠公綠廊改造後之感知氛圍呈現正向變化

三、構面層級之整體比較

若進一步以六大構面平均值進行比較，如表 2 及圖 8，可見改善後之安全性由 2.79 提升至 3.23，增幅為 0.43；通用性由 2.54 提升至 2.97，增幅亦為 0.43；舒適性由 2.92 提升至 3.30，增幅為 0.37；整體滿意度則由 2.38 提升至 2.66，增幅為 0.27。相較之下，使用性由 2.82 提升至 2.98，美學性由 2.82 提升至 2.91，均呈現正向變化，但提升幅度相對較為溫和。

此一結果顯示，本案改造所帶來的主要效益，首先體現在行人實際使用經驗的改

善，而非僅止於視覺景觀形象的更新。亦即，瑠公綠廊改善後最具代表性的成果，在於安全、友善、連續且較具包容性的步行環境已逐步形成；而美學氛圍與街區吸引力則在此基礎上同步提升。此種結果也與本案「人本的步行環境」及「東區綠廊串聯」之核心目標相互呼應。

四、LaDeco 視覺構成分析結果

除人本評估指標外，本文亦同步比較瑠公綠廊改善前後之 LaDeco 視覺構成結果，如表 3。分析顯示，改善前後整體視覺構成比例之變化幅度相對有限，其中 archi 由

表 2 瑤公綠廊改善前後六大構面平均值比較表

構面	改善前	改善後	變化值
舒適性	2.92	3.30	+0.37
美學性	2.82	2.91	+0.10
通用性	2.54	2.97	+0.43
安全性	2.79	3.23	+0.43
使用性	2.82	2.98	+0.16
整體滿意度	2.38	2.66	+0.27

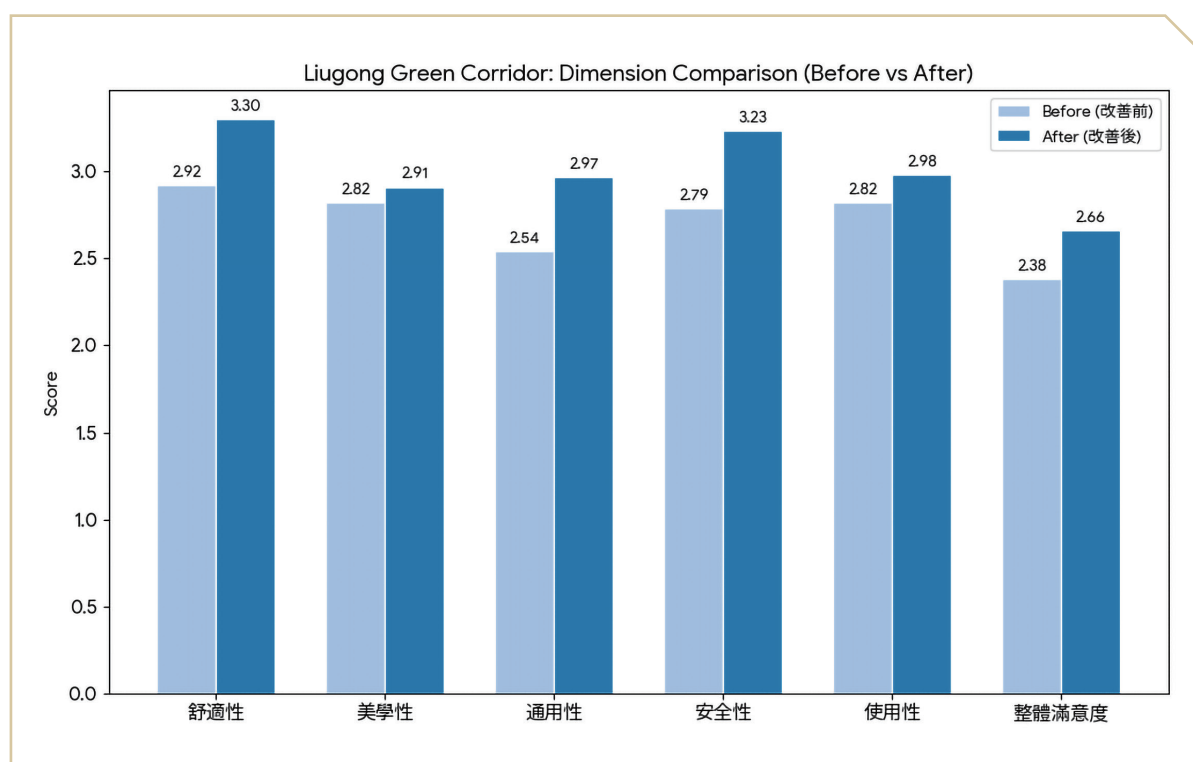


圖 8 瑤公綠廊改善前後六大構面平均值比較柱狀圖

表 3 瑤公綠廊改善前後 LaDeco 視覺構成比較表

指標	改善前	改善後	變化值
street	0.4024	0.3909	-0.0115
archi	0.3288	0.3381	+0.0093
vegetation	0.1795	0.1719	-0.0076
sky	0.0712	0.0760	+0.0047
others	0.0131	0.0181	+0.0050
LC_NFI	0.2590	0.2574	-0.0016
bio	0.0045	0.0044	-0.0001
water	0.0000	0.0001	+0.0001
landform	0.0004	0.0005	+0.0000

0.3288 增至 0.3381，sky 由 0.0712 增至 0.0760，others 由 0.0131 增至 0.0181；相對地，street 由 0.4024 降至 0.3909，vegetation 由 0.1795 微降至 0.1719，LC_NFI 則由 0.2590 降至 0.2574，整體仍維持相對接近的比例結構。

此一結果具有兩層重要意義。首先，瑠公綠廊改善後的正向成果，並非主要來自單一綠視比例的大幅提升，而更可能來自步行界面整理、路面與動線優化、停車與車流壓力下降，以及空間結構秩序改善等因素。換言之，本案的改善邏輯較偏向「人本空間品質優化」，而非單純「增加綠量」。其次，此結果也說明，若僅以視覺綠量或自然元素比例作為公共空間改善成效之判讀依據，可能無法完整反映實際的環境品質提升；相反地，結合 LaDeco 視

覺構成與人本評估指標的雙軌分析方式，更能完整掌握景觀改善與使用體驗之間的關聯，如圖 9。

五、綜合討論

綜合上述結果可知，瑠公綠廊改善前後最具代表性的變化，不在於單一景觀元素的大幅增減，而在於公共空間由停車與穿越導向，轉型為較安全、較舒適、較具通行連續性與較符合全齡使用的都市綠廊環境。尤其空間安全性、步道網絡連接性、通用性與舒適性等指標的明顯提升，顯示道路整合、人本交通改善、共享空間營造與環境整理等介入策略，已有效轉化為可被辨識的空間品質成果，如圖 10。這也說明，本文所使用之 AI 景觀與人本評估系統，具備作為公共空間改善成效檢核工具的應用潛力。

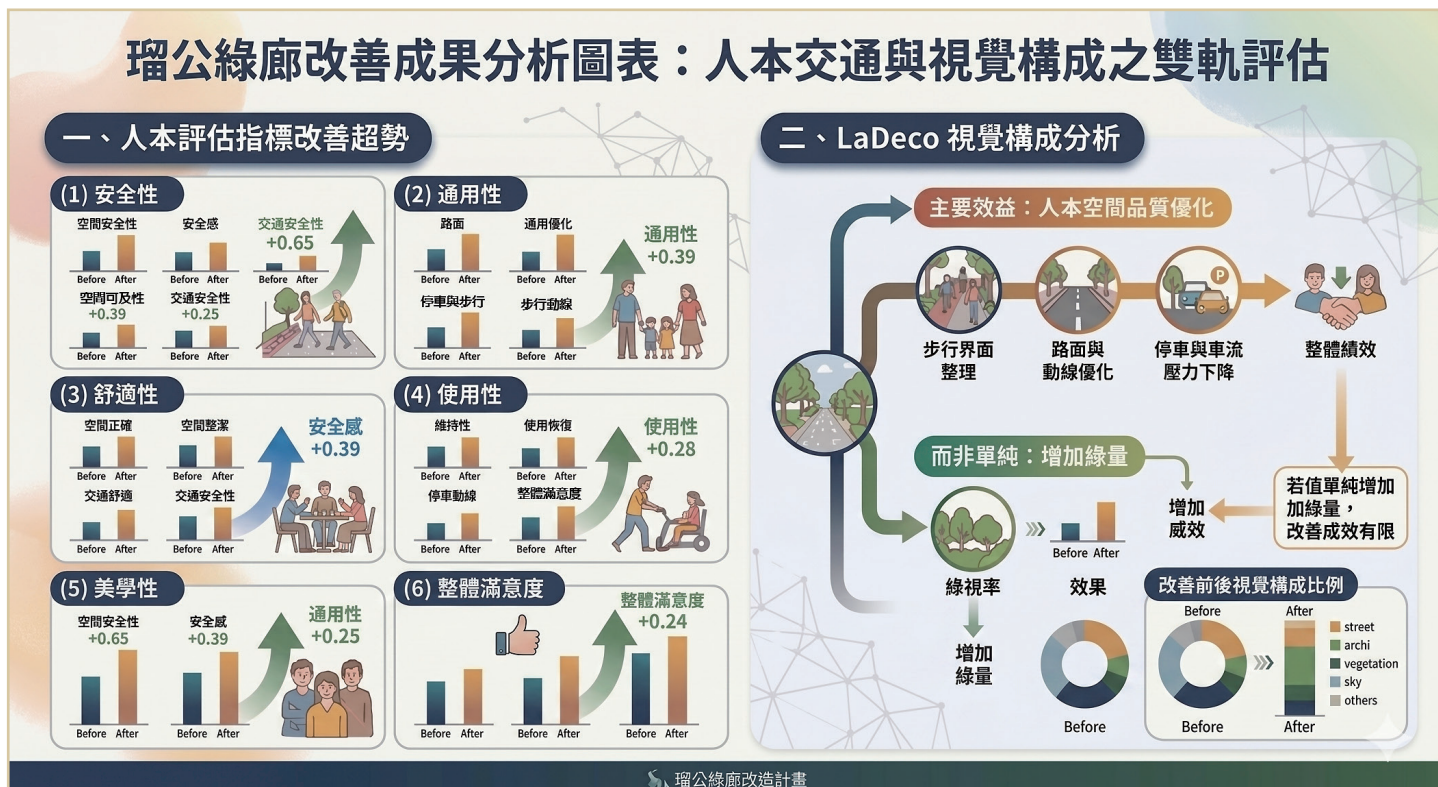


圖 9 成果分析圖說



圖 10 瑠公綠廊改造後使用情況

此外，LaDeco 視覺構成分析與 Walkability 人本評估結果之互補性，也進一步凸顯此系統的應用價值。前者可用以掌握街景構成的客觀變化，後者則可補足使用者感知與步行品質面向之判讀，使工程改善成果不再僅停留於照片展示或設計說明，而能轉化為較具量化基礎之比較結果。對工程顧問與都市設計實務而言，此一方法可提供規劃前問題診斷、設計中策略比較，以及完工後成果驗證等多重用途，未來亦可進一步應用於都市綠廊、交通節點及其他公共開放空間之環境改善評估。

伍、實務應用價值

本文所使用之 AI 景觀與人本評估系統，可作為公共空間改善前後之診斷與成果檢核工具。相較於傳統仰賴現地踏查、專家經驗與文字敘述之方式，此系統可結合街景影像、視覺構成分析與人本感知指標，以

一致架構進行改善前後比較，使工程成果之說明由「完成了什麼」進一步提升為「改善了什麼」與「改善到什麼程度」。其次，此系統亦可支援規劃設計流程中的決策判讀。於設計前期可用於盤點基地問題，於方案研擬階段可作為不同策略比較依據，於完工後則可再次導入評估，以檢視改善成果是否符合原始目標。此種應用模式有助於提升跨專業團隊之共同語言與溝通效率。從更長期角度而言，此系統亦具備與 GIS、熱點分析及網頁化平台整合之潛力，可作為公共工程管理、都市治理與政策溝通之輔助工具，並為未來人本環境改善與智慧城市發展提供技術基礎。

陸、結論與建議

本文以 AI 景觀與人本評估系統為核心，結合街景影像、多模態語言模型與人類感知資料，並以瑠公綠廊為示範場域，檢視改

善前後之空間品質變化。分析結果顯示，此系統可同時從視覺構成與人本感知兩個層次辨識環境差異，作為公共空間改善成效之診斷與檢核工具。瑠公綠廊案例進一步顯示，改善成效主要反映於安全性、通用性、舒適性及步行連續性等面向，其中以空間安全性、步道網絡連接性與通用性之提升最為明顯。另一方面，LaDeco 分析顯示改善前後綠視與自然元素比例變動有限，說明本案成效並非僅來自綠量增加，而更與空間界面整理、人車關係重整、步行秩序改善及整體氛圍優化有關。整體而言，本文顯示 AI 技術可作為景觀與人本環境品質分析之輔助工具，協助公共空間改善由成果展示進一步邁向品質驗證。

未來於都市綠廊、交通節點、人行環境及街區再生等公共工程中，建議可將 AI 景觀與人本評估工具納入規劃、設計、施工及驗證各階段，建立較完整之智慧化評估機制。由瑠公綠廊案例可知，公共空間品質之提升不僅與綠化增加有關，更涉及步行安全、動線連續、界面秩序、使用友善性及整體氛圍等面向，因此後續改善策略宜兼顧景觀構成與使用者感受。未來亦建議持續擴大不同場域與使用族群之驗證，並整合 GIS、熱點分析及網頁化平台，以提升系統於公共工程管理、都市治理及政策溝通上的應用價值。

參考文獻

1. Jiao, H., "Quantitative Evaluation of Friendliness in Streets' Pedestrian Networks Based on Complete Streets: A Case Study in Wuhan, China," *Sustainability*, Vol. 15, No. 13, Article 10317 (2023).

2. Liu, Y., Ding, X., and Ji, Y., "Enhancing Walking Accessibility in Urban Transportation: A Comprehensive Analysis of Influencing Factors and Mechanisms," *Information*, Vol. 14, No. 11, Article 595 (2023).

3. Lu, Y., and Chen, H.-M., "Using Google Street View to Reveal Environmental Justice: Assessing Public Perceived Walkability in Macroscale City," *Landscape and Urban Planning*, Vol. 244, Article 104995 (2024).

4. Zhao, X., Lu, Y., and Lin, G., "An Integrated Deep Learning Approach for Assessing the Visual Qualities of Built Environments Utilizing Street View Images," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 130, Article 107805 (2024).

5. Li, J., Zhang, X., Li, L., Wang, X., Cheng, J., Gao, C., and Ling, J., "An Estimation Method for Multidimensional Urban Street Walkability Based on Panoramic Semantic Segmentation and Domain Adaptation," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 136, Article 108905 (2024).

6. Yang, S. I., and Lee, S. P., "Measuring Neighborhood Walkability: Scope Review of Recent 20 Audit Instruments," *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 59, No. 2, pp. 5-18 (2024).

7. Li, Y., Yabuki, N., and Fukuda, T., "Integrating GIS, Deep Learning, and Environmental Sensors for Multicriteria Evaluation of Urban Street Walkability," *Landscape and Urban Planning*, Vol. 230, Article 104603 (2023).

8. Erturan, A., and van der Spek, S. C., "Walkability Analyses of Delft City Centre by Go-Along Walks and Testing of Different Design Scenarios for a More Walkable Environment," *Journal of Urban Design*, Vol. 27, No. 3, pp. 287-309 (2022).

9. Sahani, R., and Bhuyan, P. K., "Modelling Pedestrian Perspectives in Evaluating Satisfaction Levels of Urban Roadway Walking Facilities," *Transportation Research Procedia*, Vol. 48, pp. 2262-2279 (2020).

10. 吳可兒、賴宗裕、蘇偉強，「步行環境對民眾搭乘捷運意願之影響——以臺北市為例」，《都市與計劃》，第 49 卷，第 2 期，第 125-148 頁（2022）。

11. Xu, J., Xiong, Q., Jing, Y., Xing, L., An, R., Tong, Z., Liu, Y., and Liu, Y., "Understanding the Nonlinear Effects of the Street Canyon Characteristics on Human Perceptions with Street View Images," *Ecological Indicators*, Vol. 154, Article 110756 (2023).

12. Liu, C., Yu, Y., and Yang, X., "Perceptual Evaluation of Street Quality in Underdeveloped Ethnic Areas: A Random Forest Method Combined with Human-Machine Confrontation Framework Provides Insights for Improved Urban Planning—A Case Study of Lhasa City," *Buildings*, Vol. 14, No. 6, Article 1698 (2024).

智慧平台——科學園區邁向 淨零排放推動作法

關鍵詞 Keywords

智慧平台 Smart platform

節能減碳 Energy Conservation and Carbon Reduction

能源系統 Energy System

低碳生態園區 Low-carbon Ecological Park

台灣世曦工程顧問股份有限公司
運輸土木部

經理

蕭勝雄

專案工程師

葉曉蓁

國立陽明交通大學
光電學院

研究生

王詠生

教授

楊秉純

工業技術研究院
南部產業創新策略辦公室

執行秘書

張維仁

• 將能源管理、碳盤查

沙崙園區
特有自然碳匯條件



以南科既有
碳盤查系統為基礎

與周邊園區、產業或廠商合作，建
立相關產業鏈之資源循環利用

因應全球科技與能源轉型浪潮，台灣積極發展新興科學園區與綠能產業園區，布局高科技產業鏈。政府計畫設置科學園區，吸引包括半導體、人工智慧、資訊安全、智慧製造等高潛力產業進駐，打造晶圓製造與半導體材料研發及製造核心基地。此類新興園區的發展需兼顧產業與人本需求，除強化科技產業聚落發展外，亦注重社區融合與居民福祉，更應強化如何與生態共存。本文以南部某科學園區為實例，以 TOP-DOWN 模式執行碳排放快篩，以進行園區初步規劃；然後再以 BOTTOM-UP 結合精實製造循環式零碳排評估模式，評估進駐廠商永續經營的策略。

在分析過程中先以園區公共設施用地為主要對象，模擬計算高效太陽能系統、LED 智慧路燈、建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設置、建築能源管理 / 智慧能源管理中心、區域能源管理——大型儲能系統建置及碳匯系統等六項低碳措施的減碳潛力。目的為開發園區碳排放的計算模型，以作為未來因應區域特性的分析模組；依本文針對這六項措施的模擬結果顯示，這些措施年減碳總量約 5,862 公噸 CO₂e；此外，並參考國際成功案例，建議優先導入具政策支持與技術成熟的低碳方案，並結合能源技術服務業與補助資源推動，未來朝智慧、生態融合的低碳生態示範園區發展。

與低碳策略納入園區管理體系。



壹、前言

因應能源轉型浪潮及 2050 淨零排放的衝擊，再加上 AI 的快速發展，為能持續扮演全球半導體產業的核心角色，台灣積極發展新興科學園區或科技園區，架構高科技產業鏈。整體目標為吸引包括半導體、人工智慧、資訊安全、智慧製造等高潛力產業進駐，打造晶圓製造與半導體材料研發及製造的核心基地。半導體產業作為全球數位經濟的基石，產業鏈的完整及持續精進是台灣國際競爭力的關鍵。然而在地小人稠又高度缺乏能資源的台灣，也同時須面對能源、環境及生態的多重挑戰。

因此，為兼顧永續發展，政府以科技廊帶概念進行不同類型園區之開發；而這些新興園區的空間發展需兼顧產業與人本需求，除強化科技產業聚落發展外，亦注重社區融合、居民福祉與生態維護。因此在整體規劃上需透過智慧平台導入永續城市概念，藉由節能減碳設施與環境設計，串聯園區與周邊地區，改善區域交通流通性，維護既有生態。此舉不僅可降低碳排放，也有助於提升居民生活的便利性與品質，更有助於社區民眾的參與，在經濟發展及永續發展中取得平衡點，並能進一步促進園區與城市的共同發展。

依國科會導入跨域協作，搭配科技創新原則下，對未來科學園區之規劃，係期待透過跨域協作支持淨零科技，再透過淨零實場域驗證促成園區之群聚效益，以達到創新產業生態系；同時以促進技術產業化，結合公私協力模式以建構淨零科技樞紐，並促成產業落地。在推動上則期望將科學園區打造成邁向淨零排放的實證場域，在行動上則分成六個面向，即前瞻科技的

場域驗證、數位模擬與軟硬體整合研發驗證測試、淨零關鍵設施的整合、鏈結國際淨零技術與創新資源網絡、加速前瞻淨零技術商轉應用落地及促進前瞻科技發展與人才培育。當然在這六個面向外，尚有生態議題需要關注。

亦即台灣未來新科學園區之規劃布局與發展契機，仍將以半導體產業為核心動能；憑藉在晶圓製造與先進封裝領域之全球領先優勢，帶動南臺灣科技計畫推動，串聯嘉義、南科、沙崙及高雄等園區形成所謂的科技 S 廊道，結合 AI、5G 與綠能，並兼顧生態保育永續發展之產業聚落。隨著園區擴張與產業群聚效應持續深化，雖可促進投資與就業成長，惟其高能源需求與碳排放問題，亦成為邁向永續發展之重要挑戰。

為因應科學園區整體發展的需求，同時搭配近年來 AI 及數據化的快速發展，亟需以智慧減碳平台（圖 1）架構，整合再生能源、節能管理、智慧電網與碳匯機制，建構科學園區邁向淨零排放實踐路徑。

從圖 1 的路徑圖來分析，本文針對科學園區淨零排放的推動及落實分析，在執行上將區隔生產事業用地及公共設施用地，並從生活相關（節能為主）及能資源相關（減碳為主）；並透過文獻分析與實證分析兩種模式，蒐集並分析國內外成功案例，進而評估如何因應國內環境需求；再據以從碳足跡及生命週期角度進行合適項目之減碳潛力分析和估算；然後套用至生態科學園區所需的生態環境系統及智慧能源系統（又可區分為能源、碳管理及環境 / 資源等三個次系統）進行細部分析；最後則將這些資料及數據整合成智慧平台，進行量化減碳計算、淨零排放階段性措施及碳匯

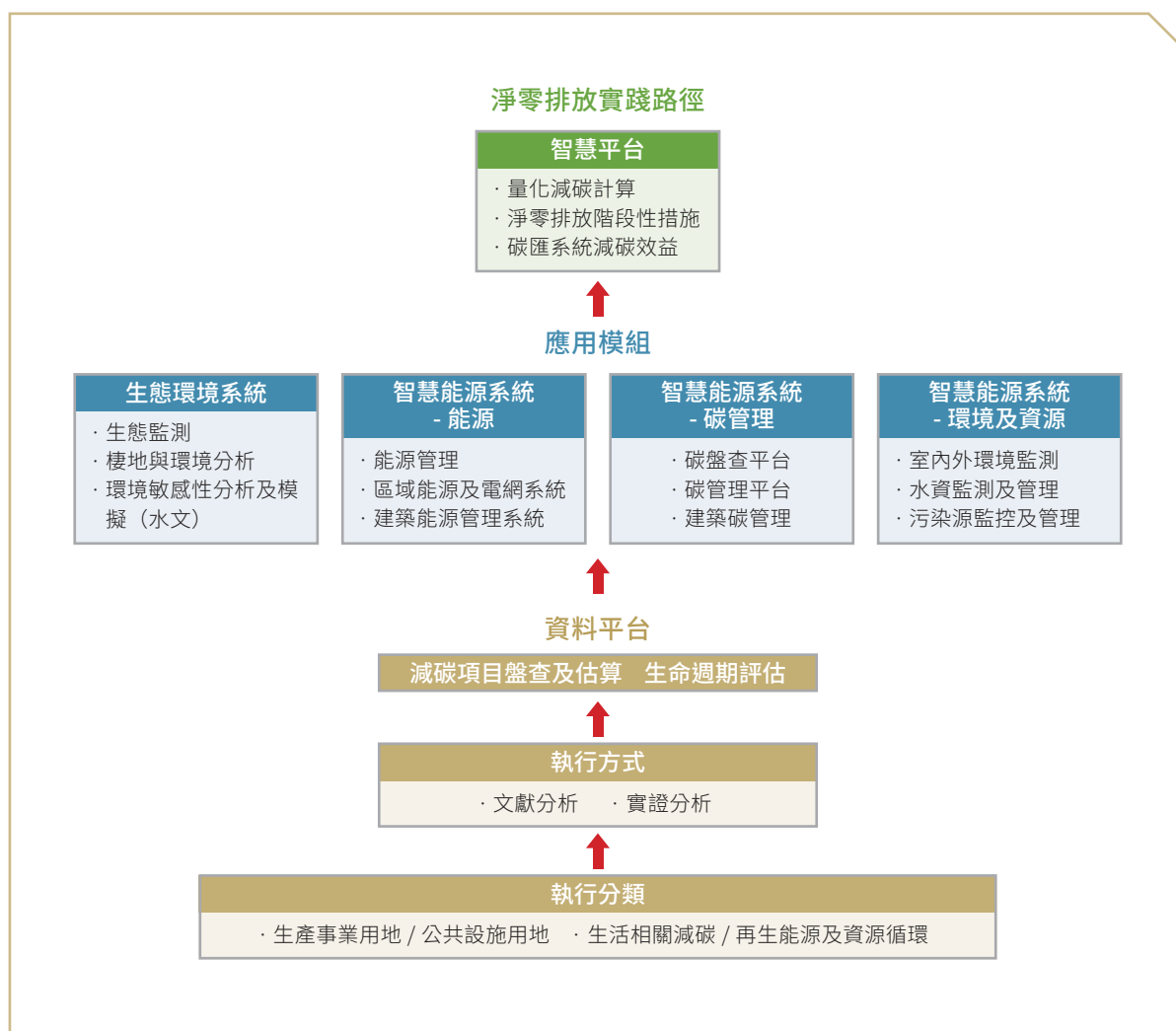


圖 1 淨零排放實踐路徑圖

系統減碳效益等詳細評估及分析，據以形成一套可以提供給科學園區推動淨零排放之參考和建議作法。

這項作法係以能源及環境為核心，結合建築整合與分散式能源配置，並搭配儲能系統提升供電穩定與調度彈性，再透過智慧化能源監測與碳排管理，串聯電網、建築與運輸系統，提升能源使用效率與自主性，同時再結合碳匯系統來加速園區邁向低碳與淨零發展，打造永續智慧園區示範模式。

因此本文將以探討國際城市減碳措施，節

選適合在地的項目，並依據地方發展特點及需求，針對不同減碳方案進行優化與調整；同時透過分析不同國家在城市或各類不同園區在減碳方面的創新做法與實踐經驗，從中研擬最具可行性及成效的策略，再根據台灣的特殊需求，選擇適宜的項目實施。研究過程以中南部某科學園區的規劃及建置為參考，進行不同措施的減碳潛力概算，架構出整個智慧管理平台，據以規劃及評估我國科學園區邁向淨零排放可能的作法；這些成果未來將可用以檢視及分析臺南沙崙生態科學園區之規劃及推動。

貳、科學園區智慧平台與技術體系

淨零減排技術的應用近年來已在全球智慧城市與園區中逐步落實，並且展現出各自的成果，從能源效率提升、綠色基礎建設發展到循環經濟模式的導入，各國皆積極推動相應策略，以達成永續發展與碳中和目標。在此趨勢下，本文首先以文獻分析模式針對幾個主要國際城市與科學 / 工業園區的減碳措施進行深入盤點與分析；主要涵蓋以下幾個大面向：全球減排技術的最新發展與應用案例、各國在政策層面推動低碳環境的策略與進展、不同產業與部

門的減碳對策與執行方式，以及社區層級的減排方案與居民參與機制等。透過這些國際案例的比較與評估，本研究評估新興科學生態園區擬設置地區的地理環境、產業結構與能源資源條件，同時根據國內生活習慣及環境特色，並以生態綠色廠房、國內交通減碳、生活相關食衣減碳、再生能源及循環利用、生態保育等五個不同面向篩選出國內在發展各類園區可以採用規劃且符合在地特色的減碳作法，以期為新興科學生態園區打造一個永續、智慧、低碳的創新典範，並為未來園區 / 城市發展提供可借鏡的實踐模式（如表 1 所示）。

表 1 科學園區推動淨零排放可能措施及作為

	生態綠色廠房	國內交通減碳	生活相關食衣減碳	再生能源及循環利用	生態保育
優先執行	建置高效率太陽能板	導入電動巴士系統	宣導使用低碳運具	回收水	生態評估及分析
	智慧電網及能源管理	布建充電樁	綠色採購及優先在地採買	再生水	在地生態復育
	商辦大樓能源管理	建置自行車道	智慧控制電器用品	廢棄物回收再利用	友善農業
	綠建築設計	提供共用自行車	小型智慧循環農場	循環科技	生態與氣候調適風廊
	智慧共桿	交通資訊整合及共享	智慧能源及資源管理系統	雨水蒐集及利用系統	水文分析
示範執行	建置碳匯系統	人行專用道	循環科技	環保市集、融合人文及減碳	生態科技平衡分析

評估這些項目的優先順序係以量化分析為基礎，透過科學數據與模擬技術，發展計算模組，計算各項減碳措施的實際成效與可行性。本文針對多種減碳方案進行深入探討，包括高效太陽能系統、LED 智慧路燈、建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設置、建築能源管理 / 智慧能源管理中心、區域能源管理——大型儲能系統建置及碳匯系統的建構等，分析這些措施對園區碳排放減少的貢獻度。此外也進一步評估各方案在技術可行性、經濟效益及

實施挑戰等層面的表現，以提供決策單位具體的數據支持與策略建議，確保所採行的減碳方案能夠切合園區需求，並具備長期推動的可行性與效益。

過程中採用電力排碳係數、EUI (Energy Use Intensity) 標準係數、智慧路燈布建數據、碳匯系統建置減碳效益計算方法，這些數據為本文各項環境指標的計算基礎，並將各項減碳措施和國內推動綠建築標章的九大指標加以對應（如表 2 所示）。這九

表 2 減碳措施和國內綠建築之對照表

指標群	指標名稱	評選要項	減碳估算工具							
			太陽能板建置	區域能源管理	能源管理中心	建築節能設計	管理中心	智慧路燈	碳匯系統	低碳運輸
生態	1. 生物多樣性指標	生態綠網、小生物棲地、植物多樣化、土壤生態							V	
	2. 綠化量指標	綠化量、CO ₂ 固定量				V			V	
	3. 基地保水指標	保水、儲留滲透、軟性防洪		V					V	
節能	4. 日常節能指標	外殼、空調、照明節能	V	V	V	V	V	V		V
減廢	5. CO ₂ 減量指標	建材 CO ₂ 排放量				V				V
	6. 廢棄物減量指標	土方平衡、廢棄物減量		V					V	
健康	7. 室內環境指標	隔音、採光、通風、建材		V	V	V				
	8. 水資源指標	節水器具、雨水、中水再利用				V				V
	9. 污水垃圾改善指標	雨水污水分流、垃圾分類、堆肥				V				V

項指標剛好可以呼應圖 1 智慧平台中的四個應用模組；同時也符合規劃科學園區執行分類上，以公共設施用地及生活相關減碳 / 再生能源及資源循環為初期目標，建構良好公共區域節能減碳的示範及優質生活環境，如此可作為未來科學園區招商時對進駐廠商（針對生產事業用地）的要求基準；並呼應國際間園區發展策略。

由於高科技及半導體為我國科學園區的重要產業，其對能源及電力的穩定供應有較高的要求，因此在智慧平台上能源供需就成為一項重要議題了。在電力供需上，首先是要能達成供需平衡，亦即在供應端及需求端需透過即時的管理和儲能系統的調整，以追求電力系統的穩定。如圖 2 電力供應系統所示，供應端已由單一的大型電

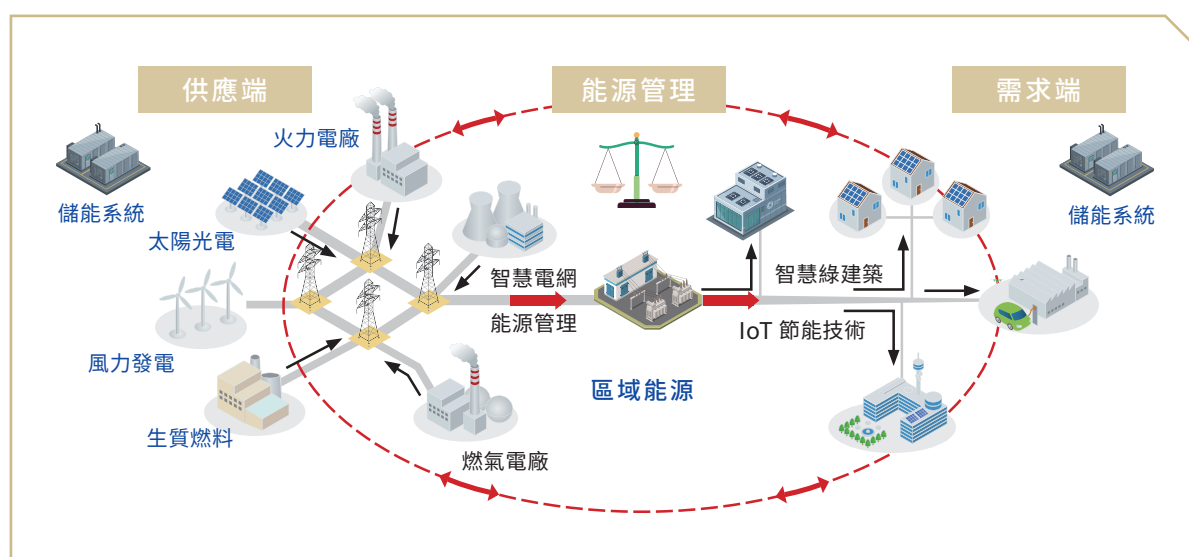


圖 2 電力系統示意圖

廠，增加了追求低碳或零碳（如風力、太陽光電……等）的各類分散式能源，並增加儲能裝置（電池、氫能……等）來提高供應端的穩定；至於在需求端，也增加很多獨立型的小型發電裝置（如太陽光電），同時善用 IoT 技術進行需求端的動態模擬和節能管理，逐步架構出獨立電網系統或導入區域能源的概念。

從圖 2 中亦可看出，供應端需要有完善之能源管理系統，透過智慧電網的即時調控，以在供應量及穩定性上滿足需求端的各項電力需求變化；而在需求端除了各分散式之電力供應外，更需要透過即時的動態模擬來預測電力需求的變化，同時在減碳的要求下，更有必要將設備節能擴大至系統節能，藉以呼應政府推動深度節能之訴求。因此為能在電力系統中達成供需平

衡要求，故亟需在園區內推動智慧電網，並以區域能源系統（或區域電網）之概念來強化能源供應之韌性（如圖 3 所示）。

如此電網之建置係透過資訊、通信與自動化科技，建置具智慧化之發電、輸電、配電及用戶的整合性電力網路，強調自動化、安全及用戶端與供應端密切配合，以提升電力系統運轉效率、供電品質及電網可靠度，並促進再生能源擴大應用與節能減碳之政策目標；也就是將智慧電網中的發電與調度、輸電、配電及用戶間的電流及資訊流加以結合，並從傳統的單向進化為雙向及即時性。如果再導入近期已逐漸成熟的 AI 及數位化技術，將可增加相關數據的蒐集分析及應用，並達成能源資訊透明化、電力供需即時評估及供需調度最佳化，故將使整個電網在能源系統中扮

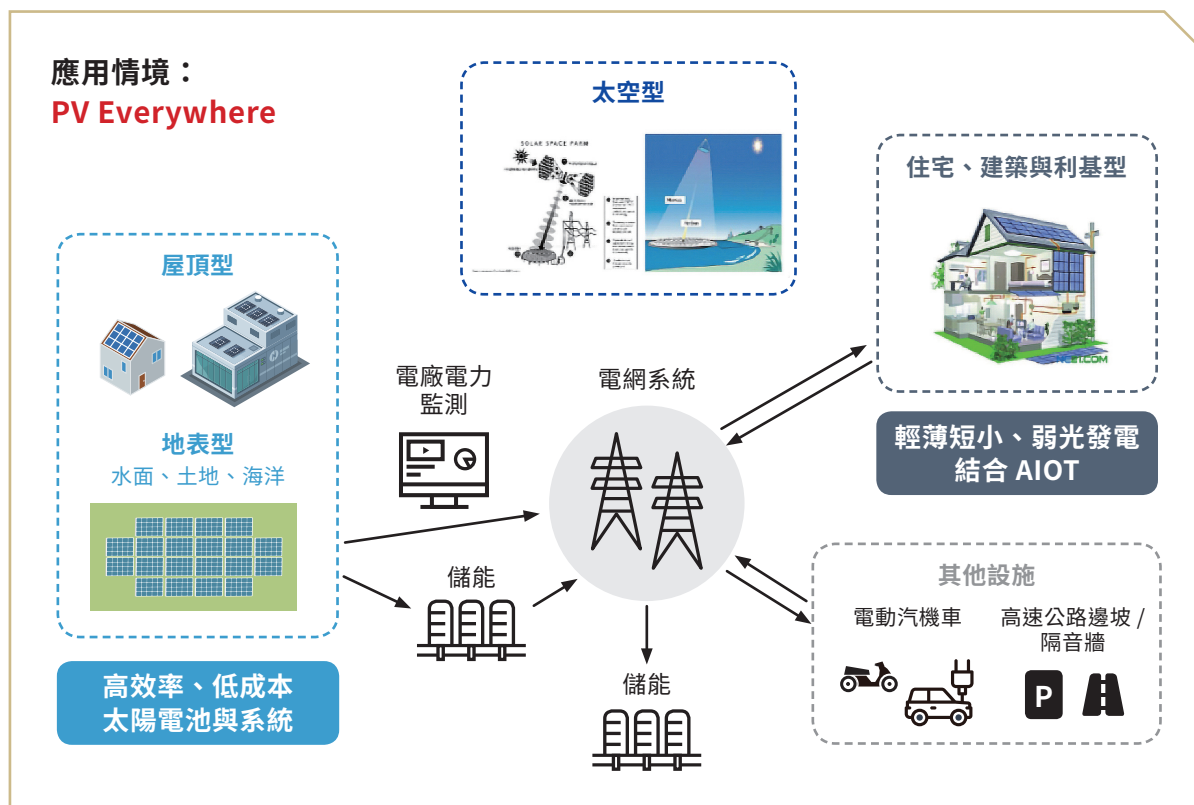


圖 3 智慧電網系統架構

演更為穩定供需的角色，也大幅提升電網的穩定性及韌性。而未來整個智慧電網系統將搭配區域能源系統之推動，同時亦邁向和工廠 / 建築 / 家庭能源系統之整合。

其次，在碳管理方面，本文針對國內園區的特性，在智慧平台上提出了兩步驟方式來進行，先以 TOP-DOWN 方式求快再求準（作為先期可行性規劃之參考），然後搭配 BOTTOM-UP 方式深入了解及分析園區及產業發展現況及趨勢，評估資源投入的先後順序（作為細部規劃，據以產生在基本規劃上可以強化減碳的可能作為）。所謂 TOP-DOWN 方式就是快速進行碳排計算，加速作業流程並提升資料品質，是有效管理的基礎（求快），並能成為細部規劃設計的參考；亦即根據及審酌園區及可能進駐企業型態並考量政府政策，並從環境保護等地區特性進行分析，再利用減碳方法學規劃初步減碳路徑，同時適時優化及擴充至整個園區的情境分析、減碳路徑、管理報表等面向，最後則依據過去類似園

區的開發經驗進行初步的驗證。因此 TOP-DOWN 方式的流程分為三階段如圖 4 所示。

如圖 4 所示，在園區邁向淨零排放第一階段規劃是以快篩方式，根據園區的初步規劃及擬進駐產業的特性，完成整體公共設施用地、生活相關減碳 / 再生能源及資源循環等領域所能達成之減碳需求及路徑規劃作法；然而園區碳排主體仍是佔多數進駐生產事業用地的不同類型廠商，因此亟需導入另一個所謂 BOTTOM-UP 方式，針對不同類型產業定位其碳排風險與方向策略、並以個體觀評估個案企業位處產業之風險、更可細化至重大排碳項目（SEU）衝擊風險及尋求資源投入優先順序。

但因整體碳排仍是以能源使用為大宗，因此整個 BOTTOM-UP 的執行模式係結合精實製造循環式零碳排評估模型，並從單位碳衝擊及技術導入管理等兩個角度切入；前者將依據重要性及緊急性分成四個象限，後者則是依據重大型及改善性分成四



圖 4 TOP-DOWN 執行內容及流程

個象限，評估結果之表示則如圖 5 所示。在單位碳衝擊分析中，分成 ABCD 等四類，分別表達在園區規劃或個別進駐廠商規劃及未來營運時投入的優先順序；至於

在技術導入管理部分，則是根據一般高科技廠商在能源消耗中的重點項目，依其排碳程度需在建廠前事先規劃或未來透過管理模式來降低其衝擊。

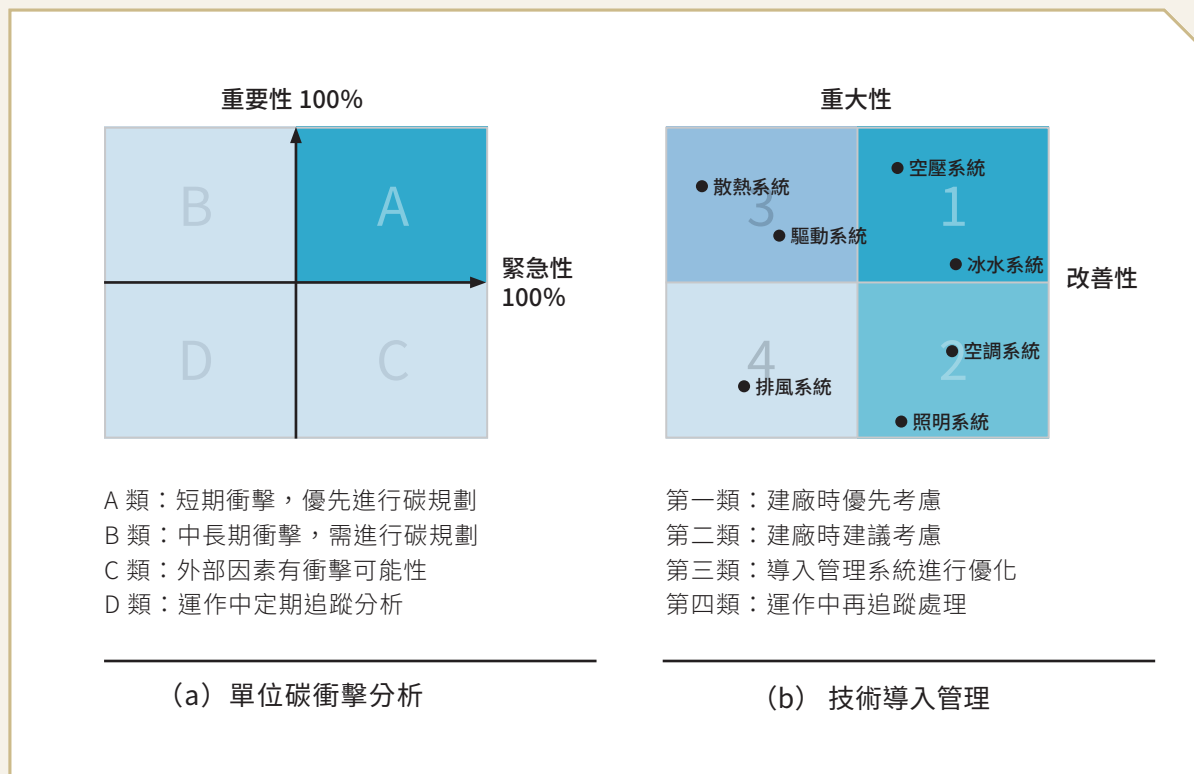


圖 5 BOTTOM-UP 評估結果表達模式

然而整體科學園區之開發除在初期各項公共設施之規劃外，更應著眼在未來長期營運，以持續在完善公共設施規劃下，再透過進駐廠商之努力及配合，讓科學園區可以長期及永續發展；此外，由於科學園區建置目標係期望將台灣從傳統製造產業，逐步轉型成應用數位製造生產技術的高科技產業，朝向產業聚落或群聚效應發展，深度串聯不同特色園區形成所謂科技廊道，藉以形成完整產業的群體，為個別產業或群體產業帶來顯著效益。亦即在

BOTTOM-UP 上導入所謂精實製造循環式零碳排評估模型，其中「數位製造生產技術」與「產業效益」以「綠色競爭力」及「精實生產」進行循環及鏈結，藉由導入應用數位科技提升製造業的綠色競爭力，從「開源」——增加產品附加價值（從功能提升 / 加值及市場開創投入）與「節流」——降低生產成本（從人力、原料及能效管控等面向投入）兩方面著手，達成上應下效、水到渠成之成果，如圖 6 所示。

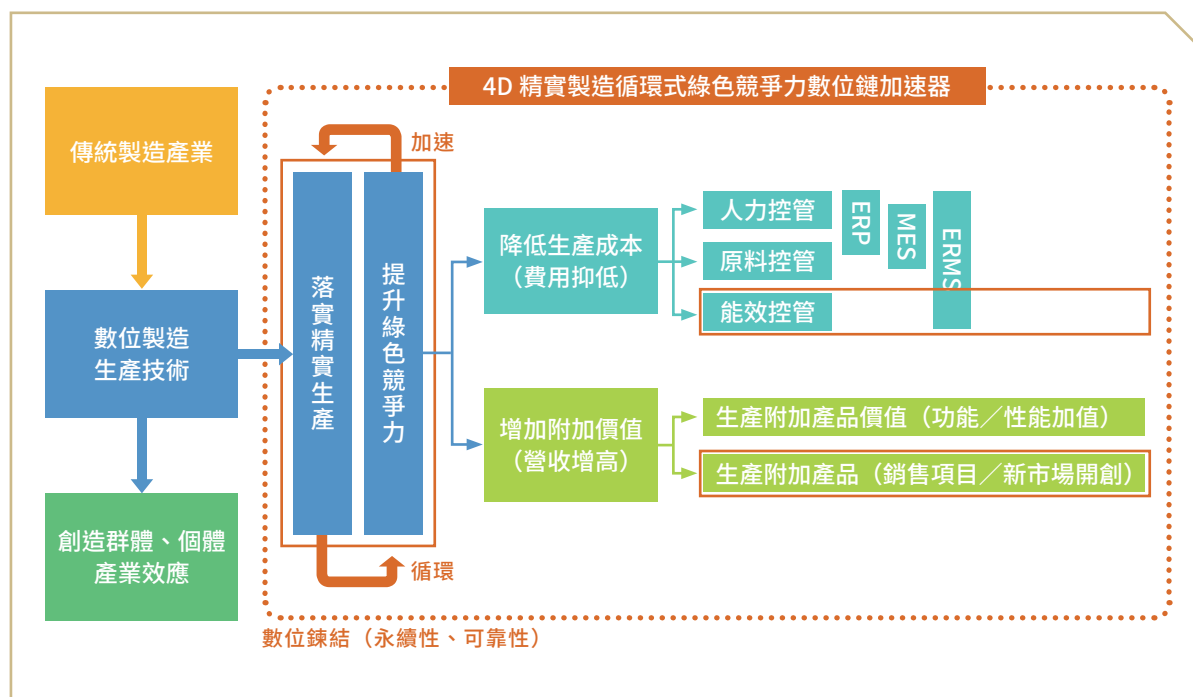


圖 6 精實製造循環式零碳排評估模型

因此在具體園區長期發展上，希望在規劃及營運時能以循環經濟的角度，在園區管理單位本身及進駐廠商部分均能藉由綠色競爭力改善的數位化、數位優化以及數位轉型，以「永續流程標準管理、永續審查驗證機制、永續競爭力維運」的精實循環式機制為主要核心，並以數位鏈確保其永續應用性與擴張性，為國內製造業業者帶來每單位生產成本降低、發掘隱性管理問題、開發附加產品價值與開發附加產品項目等效益；為國內帶來精準需量控管與降低不必要備載容量等貢獻；為國際環境帶來碳中和與協助國際運營企業高效率、掌握全球供應鏈生產資訊等價值。亦即在發展上係從提升傳統製造產業至結合數位製造之生產技術來創造群體、個體及整體產業效益；而在數位製造生產技術部分，則是透過落實精實生產和提升綠色競爭力來形成一個正向循環。

參、智慧平台應用及減碳實踐分析

在這樣概念下，本研究以南部某科學園區為分析對象，該園區總面積為 175.3 公頃，其中約 79.72 公頃（約佔 45.48%）為非屬管理中心可強制管理或規劃減碳方案之事業營運用地，故於計算園區整體減碳效益時，將該部分土地暫時排除於管理方案效益評估的範圍之外。換言之，在智慧平台應用及試算減碳效益時，基準情境中並不納入事業營運用地之電力需求，以維持在保守估算條件下的合理性與可行性。

另外，則是參考表一國外類似園區或智慧城市發展經驗及成效而列出科學園區推動淨零排放可能措施及作為，本文再參考這智慧低碳科學園區的招商對象及在地特色後，挑出六項主要減碳措施針對公共設施及生活相關減碳／再生能源及資源循環所能產生之減碳效益進行探討及分析；此六

項減碳措施含高效太陽能系統、LED 智慧路燈、建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設置、建築能源管理 / 智慧能源管理中心、區域能源管理——大型儲能系統建置及碳匯系統（如圖 7 所示）。

本文係以圖 7 的六項推動選項為基礎發展出一套計算邏輯及試算表；未來實際應

用時則可針對不同園區特色及實際執行上的需求，透過參數的修改或是不同節能減碳項目之導入，並可在園區規劃的 TOP-DOWN 及 BOTTOM-UP 階段，分別評估及分析可能的減碳作為和減碳量，以下先針對這六項減碳措施分別說明設計理念及可能的減碳效益。



圖 7 智慧低碳科學園區可能推動選項

一、高效太陽能系統

以目前國內環境及技術而言，太陽光電系統將是綠能及減碳的首要選項，同時因應政府規定「用電大戶」需使用至少契約容量10%的綠電。因此在評估上係以進駐廠商需於其建築物屋頂之可設置面積（即建築總面積的50%）中裝設太陽能光電系統。而園區內各類公共設施用地則依不同性質

有不同的可利用比例，進行全區太陽光電設置量及減碳量。計算上係依該地區年平均太陽能發電裝置發電量為計算基準，以及113年經濟部能源局公告年度全國電力排放係數為0.474公斤CO₂e/kWh進行估算；詳細計算結果如表3所示。其中亦將生產事業用地納入作為參考；然而初期統計時則將生產事業用地部分先不納入園區規劃初期的可能減碳量內。

表3 太陽光電系統減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	設置比例	設置面積 (m ²)	裝置容量 (kW)	創 / 節電量 (kWh/年)	減碳當量 (tCO ₂ e/年)
1	園區事業用地	757,500	0.3	227,250	22,275	26,974,575	1,335
2	氣體廠使用	39,700	0.3	11,910	1,191	1,413,717	70
3-1	研發創新大樓 (12小時營業空間)	16,500	0.3	4,950	495	587,565	29
3-2	研發創新大樓 (24小時營業空間)	3,000	0.3	900	90	106,830	5
3-3	研發創新大樓 (宿舍)	7,800	0.3	2,340	234	277,758	14
3-4	研發創新大樓 (公設)	2,700	-	-	-	-	-
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	0.25	19,425	1,943	2,305,748	114
5	資源循環中心	66,500	0.3	19,950	1,995	2,368,065	117
6	變電所	66,900	0.3	20,070	2,007	2,382,309	118
7	公園兼滯洪池使用	219,300	0.075	16,448	1,645	1,952,318	97
8	公園兼自來水使用	97,800	0.075	7,335	734	870,665	43
9	公園綠地	206,600	-	-	-	-	-
其他 -a	道路用地	169,000	-	-	-	-	6
其他 -b	停車場用地	22,000	0.05	1,100	110	130,570	1,949
總計		1,753,000	-	331,678	33,168	39,370,119	

註：本案例所在地區年均發電量為1,187度/kW（可依政府公布數據進行調整）；同時假設每1kW需10m²的面積；電力排放係數則可依政府每年公告數據進行調整。

二、LED 智慧路燈

若園區全面採用高效能的 LED 節能智慧路燈估算，同時假設傳統高壓鈉燈每盞耗電功率為 250 瓦，且根據交通部統計資料，路燈每年平均使用時間為 4,380 小時且依交通部運輸研究所資料顯示 LED 燈相比傳

統高壓鈉燈省電，每盞每年約可節電 588 kWh。具體評估及計算結果如表 4 所示。未來可能會朝向智慧共桿的方式推動，亦即燈桿會涵蓋通訊、安防、資訊提供，並連結長期自駕車的需求。目前這些新的技術應用示範已在沙崙智慧綠能科學城內進行示範及驗證。

表 4 LED 智慧路燈減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	裝置盞數 (盞)	創 / 節電量 (kWh/ 年)	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	201	118,034	5.84
2	氣體廠使用	39,700	11	6186	0.31
3-1	研發創新大樓 (12 小時營業空間)	16,500	4	2571	0.13
3-2	研發創新大樓 (24 小時營業空間)	3,000	1	467	0.02
3-3	研發創新大樓 (宿舍)	7,800	2	1,215	0.06
3-4	研發創新大樓 (公設)	2,700	1	421	0.02
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	21	12,017	0.60
5	資源循環中心	66,500	18	10,382	0.51
6	變電所	66,900	18	10,424	0.52
7	公園兼滯洪池使用	219,300	58	34,171	1.69
8	公園兼自來水使用	97,800	26	15,239	0.75
9	公園綠地	206,600	55	32,192	1.59
其他 -a	道路用地	169,000	45	26,334	1.30
其他 -b	停車場用地	22,000	6	3,428	0.17
總計		1,753,000	465	273,152	14

註：路燈盞數係參考臺南科學園區安裝密度進行評估；節能率則可依技術的進步進行調整；電力排放係數則可依政府每年公告數據進行調整。

三、建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設置

適當的建築用途規劃和區分，特別是被動式建物設計，其節省的能源消耗，常超過主動式建物，例如裝設太陽能板的效益，有時不如節能設計。各類建築透過空氣浮力塔煙囪

效應的自然通風、建築外殼隔熱材料應用、建築物座向、立面及開窗設計，預估節能率超過 38%。參考台達電南科廠設計，考量保守性與投資報酬性，本文暫以 20% 為預估參數，則減碳量可達約 1,765 公噸 / 年。請參考表 5 評估及計算結果。

表 5 建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設計減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	設置比例	節能效益	創 / 節電量 (kWh/ 年)	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	-	-	-	-
2	氣體廠使用	39,700	-	-	-	-
3-1	研發創新大樓 (12 小時營業空間)	16,500	0.5	0.1	52,400	26
3-2	研發創新大樓 (24 小時營業空間)	3,000	0.5	0.1	417,900	21
3-3	研發創新大樓 (宿舍)	7,800	0.5	0.1	39,000	2
3-4	研發創新大樓 (公設)	2,700	-	-	-	-
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	0.5	0.1	2,041,956	101
5	資源循環中心	66,500	0.5	0.1	30,874,620	1,528
6	變電所	66,900	0.5	0.1	1,758,132	87
7	公園兼滯洪池使用	219,300	-	-	-	-
8	公園兼自來水使用	97,800	-	-	-	-
9	公園綠地	206,600	-	-	-	-
其他 -a	道路用地	169,000	-	-	-	-
其他 -b	停車場用地	22,000	-	-	-	-
總計		1,753,000	-	-	35,653,008	1,765

註：此處所謂浮力塔係指在建築設計時考慮建築物座向、隔熱建材及導入自然通風方式來進行換氣以減少電力消耗。

四、建築能源管理 / 智慧能源管理中心

本文係參考德國柏林 Adlershof 科技園區內之「Future Living® Berlin」社區為例，該社區藉由導入多元互聯網裝置與智慧應用服務，並強化建築能源管理系統之整合，有效提升能源使用效率，據相關實證資料顯示，最高可達 15% 之節電效益。然而本文目前僅先針對公共設施之相關建築進行評估，因此為符合實務推動過程中對於投資回收與風險控管之保守性考量，本文採

用較為審慎之預估參數，設定導入建築能源管理系統之節能效率為 5% 進行試算。此外，EUI 標準係數參考建築動態 EUI 指標（亦稱綜合 EUI 指標）之研究（蘇梓靖，103），以及內政部建研所「公共建築能源總量指標評估研究」。具體計算內容詳列於表 6。表中雖列入生產事業用地的建築，然而其會因不同類型的廠商而有不同設計和管理模式，所以暫不列入初期評估分析的計算範圍內。

表 6 導入建築能源管理 / 智慧能源管理中心減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	節能效益	創 / 節電量 (kWh/ 年)	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	-	-	-
2	氣體廠使用	39,700	-	-	-
3-1	研發創新大樓（12 小時營業空間）	16,500	0.05	260,700	13
3-2	研發創新大樓（24 小時營業空間）	3,000	0.05	208,950	10
3-3	研發創新大樓（宿舍）	7,800	0.05	19,500	1
3-4	研發創新大樓（公設）	2,700	-	-	-
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	0.05	1,020,978	51
5	資源循環中心	66,500	0.05	15,437,310	764
6	變電所	66,900	0.05	879,066	44
7	公園兼滯洪池使用	219,300	-	-	-
8	公園兼自來水使用	97,800	-	-	-
9	公園綠地	206,600	-	-	-
其他 -a	道路用地	169,000	-	-	-
其他 -b	停車場用地	22,000	-	-	-
總計		1,753,000	-	17,826,504	882

註：本案例目前分析僅先針對未來園區管理單位所能直接影響的建築；同時 EUI 則參考學者研究報告及內政部建研所的評估報告；電力排放係數則可依政府每年公告數據進行調整。

五、區域能源管理——大型儲能系統建置

大型場域契約容量的決定，根據的是尖峰用電需求。智慧化的需量管理及搭配儲能系統的能源調度，可以將用電型態扁平化（削峰填谷），降低契約容量，亦為系統性的節省電費。此外，集中化處理空調冷氣，相較於各棟獨自建置空調系統，理論上可提高能源效率，預估可節能約 10%。以沙崙綠能科技示範場域區域能源管理為例，五棟建築體的中央 D 棟有一能源管理中心，各棟空調及用電由能源管理中心統一管理調度。利用

儲冰系統夜間儲冰、白天融冰供應空調冷氣，雖然只是儲能後在不同時間點使用的效果，無節能效應，但藉由儲能轉換可以削峰填谷，降低契約容量，節省電費，協助台電減碳。同時集中供冷較分散式供冷，有更高的節能效果。因此未來如果整個科學園區建置一個包含能源管理、區域冷房的調度中心，將可有效降低電費及能源消耗。評估係依建築物功能不同，而在節能效益上亦分別設定為 10% 和 1% 之基準，計算結果參考表 7 所示。

表 7 導入區域能源管理 - 大型儲能系統建置減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	節能效益	創 / 節電量 (kWh/ 年)	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	-	-	-
2	氣體廠使用	39,700	-	-	-
3-1	研發創新大樓（12 小時營業空間）	16,500	0.10	521,400	26
3-2	研發創新大樓（24 小時營業空間）	3,000	0.10	417,900	20
3-3	研發創新大樓（宿舍）	7,800	-	-	-
3-4	研發創新大樓（公設）	2,700	-	-	-
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	0.01	204,196	11
5	資源循環中心	66,500	0.01	3,087,462	153
6	變電所	66,900	0.01	175,813	9
7	公園兼滯洪池使用	219,300	-	-	-
8	公園兼自來水使用	97,800	-	-	-
9	公園綠地	206,600	-	-	-
其他 -a	道路用地	169,000	-	-	-
其他 -b	停車場用地	22,000	-	-	-
總計		1,753,000	-	4,406,771	219

六、碳匯系統

在未來科學園區發展及開發係將生態環境列為一項重要指標，因此在園區規劃上均會有甚多綠地的保留；所以可以進行規劃及評估小型自然碳匯所能產生之減碳效益，同時如果結合小型溫室進行立體農場之設計，亦可呈現在地食材的額外效益。整體而言，在園區規劃時可以結合植物的自然吸碳能力，導入「綠色碳匯」概念，作為園區永續發展與溫室氣體減量的重要策略之一。透過植物行光合作用吸收並儲存

二氧化碳，可有效降低區域碳排放，且目前我國已具備初步的碳匯減量計算依據。雖然都市綠地作為碳匯來源目前尚未納入《溫室氣體自願減量專案管理辦法》所規範之認證類型，且相關登錄與核證制度仍待主管機關研議完善，但基於環保署公告之「碳匯潛勢評估方法」與既有造林吸碳係數，園區綠化用地仍可依據現行技術資料作為溫室氣體減量潛力之初步估算依據；故在本文研究開發試算表中亦先將邏輯及計算模式納入，以利未來之參考。具體計算內容詳列於表 8。

表 8 小型碳匯系統減碳評估表

編號	說明	土地面積 (m ²)	節能效益	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	-	-
2	氣體廠使用	39,700	-	-
3-1	研發創新大樓 (12 小時營業空間)	16,500	0.2	3.30
3-2	研發創新大樓 (24 小時營業空間)	3,000	0.2	0.60
3-3	研發創新大樓 (宿舍)	7,800	0.2	1.56
3-4	研發創新大樓 (公設)	2,700	-	-
4	污水處理廠及再生水廠	77,700	0.3	23.31
5	資源循環中心	66,500	0.2	13.30
6	變電所	66,900	0.2	13.38
7	公園兼滯洪池使用	219,300	0.6	131.58
8	公園兼自來水使用	97,800	0.6	58.68
9	公園綠地	206,600	0.6	123.96
其他 -a	道路用地	169,000	-	-
其他 -b	停車場用地	22,000	-	-
總計		1,753,000	-	370

註：碳匯系統設置比例預設參數： $(1 - \text{公告建蔽率}) \times 0.5$ (即預設非建物土地面積 50% 為植栽綠化區)

以上為規劃低碳園區，初期較有機會投入的項目及減碳效益，僅彙整初期園區管理單位可以投入及直接管理的區域進行評估及計算，並在較為保守條件下評估，全年在導入以上六種不同的減碳模式，預估可較此園區初步規劃時減少碳排放量約 5,862

公噸碳排放量；其中以初步將非公共設施土地所可能建置的太陽光電系統及 LED 智慧路燈納入，其餘四項則因牽涉到進駐產業特性及個別建築和製程設計，故未納入評估範圍。初步整理本文的評估結果如下表 9 所示。

表 9 園區公共設施用地減碳項目總體效益估算

編號	說明	土地面積 (m ²)	原規劃 碳排放當量 (tCO ₂ e/ 年)	高效 太陽能	LED 智慧路燈	建築節能 / 管理中心及 廠辦大樓 空氣浮力塔 設計	建築 能源管理 / 智慧能源 管理中心	區域 能源管理 - 大型儲能 系統建置	碳匯 系統	減碳當量 (tCO ₂ e/ 年)
1	園區事業用地	757,500	476,277	1,335.24	5.84	-	-	-	-	1,341
2	氣體廠使用	39,700	9,124	69.98	0.31	-	-	-	-	70
3-1	研發創新大樓 (12 小時 營業空間)	16,500	258	29.08	0.13	25.81	12.90	25.80	3.30	97
3-2	研發創新大樓 (24 小時 營業空間)	3,000	207	5.29	0.02	20.69	10.34	20.68	0.60	57
3-3	研發創新大樓 (宿舍)	7,800	19	13.75	0.06	1.93	0.97	-	1.56	18
3-4	研發創新大樓 (公設)	2,700	7	-	0.02	-	-	-	-	0
4	污水處理廠 及再生水廠	77,700	1,011	114.13	0.60	101.08	50.54	10.11	23.31	300
5	資源循環中心	66,500	15,283	117.22	0.51	1,528.29	764.15	152.83	13.30	2,576
6	變電所	66,900	870	117.92	0.52	87.03	43.51	8.70	13.38	270
7	公園兼 滯洪池使用	219,300	95	96.64	1.69	-	-	-	131.58	230
8	公園兼 自來水使用	97,800	636	43.10	0.75	-	-	-	58.68	103
9	公園綠地	206,600	90	-	1.59	-	-	-	123.96	126
其他 -a	道路用地	169,000	71	-	1.30	-	-	-	-	1
其他 -b	停車場用地	22,000	10	6.46	0.17	-	-	-	-	7
總計		1,753,000	503,961	1,949	14	1,765	882	219	370	5,196

肆、結語及未來展望

台灣半導體產業在全球晶圓製造與先進封裝領域具領導地位，成為國家經濟與數位科技發展的重要支柱。為強化國際競爭力並促進南部產業升級，政府推動「南臺灣科技計畫」，針對目前南部地區的產業特色及區域資源，發展先進製程、AI、5G 及綠能技術。從國際案例可觀察到，歐盟、德國、日本、新加坡等先進國家在推動低碳智慧園區方面，已發展出多項具體且成效顯著的策略。歸納其核心措施，主要包括高比例再生能源導入、智慧能源管理、節能建築與綠色交通系統建構。例如德國柏林 Adlershof 智慧科學園區則導入智慧能源管理系統（EMS），透過運用即時用電數據進行監控與調節，有效提升用能效率並降低碳排放。

借鏡上述國外經驗，本研究已針對國內環境特色建議出如表 1 的可能導入技術或作為，同時也依可能採用的優先順序列出；但為呈現估算邏輯及發展試算表，本文先以六項方案（高效太陽能系統、LED 智慧路燈、建築節能 / 管理中心及廠辦大樓空氣浮力塔設置、建築能源管理 / 智慧能源管理中心、區域能源管理 - 大型儲能系統建置及碳匯系統）作為詳細說明計算模式。

展望未來，完整科學園區將以建置智慧資料管理為核心，然後納入能源治理體系及碳盤查平台，同時可納入台灣世曦工程顧問股份有限公司在規劃沙崙生態科學園區所提出如圖 8 所示的園區管理體系中其他可能或需考慮的項目。此外，因科學園區主要的碳排放仍是來自能源消耗（尤其是電力需求），然而能源的使用會因產業別及

規模而有較大差異，因此在本文中並未在進駐廠商部分如何進一步進行節能減碳多做著墨；但因近年來政府大力推動電力需求端的深度節能，亦即透過 ESCO（Energy Service Company）產業在量測驗證及績效保證的機制下，期待能大幅減少能源的消耗，一方面舒緩台灣能源供應端的壓力，一方面透過減少能源消耗來協助達成減碳目標。而為達成這樣的目標，亟需充分利用已成熟的 AI 及數位科技，再透過智慧監測技術，建立全面的能源供需及環境品質監控系統，即時掌握園區內能源消耗及生態環境變化，支援園區管理單位進行即時因應及持續改善，讓科學園區不僅是技術創新及經濟發展的核心，更可成為永續生態的示範場域。

參考文獻

1. 南部科學園區官方網站（2023.06.09）。
2. 高雄市政府經濟發展局官方網站（2023.06.09）。
3. 李政鴻「國家科學及技術委員會 111 年度科技行政研究報告——探討科學園區科技產業聚落之推拉動力」，國科會南部科學園區管理局。<https://www.nstc.gov.tw/nstc/attachments/efad0c40-70a1-4807-a3d2-dd87ccea9d50>（2022.12）。
4. 「國發會第 109 次委員會議新聞稿」，國會及新聞聯絡中心。<https://ws.ndc.gov.tw/Download.ashx?u=LzAwMS9hZG1pbmlzdHJhdG9yLzEwL3JlbGZpbGUvNjIwMi8zNjkyMC8yM2QwNzU0ZS0zN2MyLTRmMGU0YmY1My0wNTcyOWM2NDVhYTUucGRm&n=5ZyL55m85pyDMTEyMDUyMuaWs>

OiBnueovy3lnlvnmbzmnIPnrKwxMDnmr
KHlp5Tlk6HmnlPorbDmlrDogZ7nqL8ucG
Rm&icon=.pdf (2023.05.22)。

5. 「國家科學及技術委員會南部科學園區管理局投資攻略」，南部科學園區投資科。
https://www.stsp.gov.tw/STSIPA_UPLOAD/InvestInfo/1581381829110.pdf (2023.05.29)。

6. 林耀文「國發會通過南科高雄第三園區430 億開發今年環評完成納科學園區」，
《自由時報》。<https://estate.ltn.com.tw/article/16857> (2023.05.29)。

7. 「『楠梓產業園區設置計畫』可行性規劃報告公聽會暨『變更高雄市主要計畫（楠梓區）（原中油公司高雄煉油廠）（配合楠梓產業園區設置計畫）案』變更前座談會簡報」，
高雄市政府經濟發展局 (2021.09.17)。

8. 「國科會430 億擴建高雄楠梓園區，預估新增4,500 億產值」，《中央社》。
<https://finance.technews.tw/2023/05/22/kaohsiung-nanzih-technology-industrial-parkpark-ii/> (2023.05.29)。

9. 侯駿霖「楠梓第3 園區計畫已核准企業將掀搶地潮」，《大紀元》。<https://www.epochtimes.com/b5/23/2/14/n13929610.htm> (2020.08.18)。

10. 顏瑞田「南台灣3 園區開發年產值估250 億」，《工商時報》。<https://ctee.com.tw/news/industry/815767.html> (2020.08.18)。

11. 「全臺設置LED 路燈技術規範」，經濟部能源局 (2015.02.17)。

12. 「南部科學園區管理局路燈統計資料」，

國家科學及技術委員會南部科學園區管理局。<https://data.gov.tw/dataset/41319> (2020.08.18)。

13. 「半導體業需求大台積南科用電 比苗栗還多」，《人間福報》。<https://www.merit-times.com/NewsPage.aspx?unid=594734> (2020.08.18)。

14. 「各縣市太陽光電容量因數」，台灣電力公司。<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=207&cid=165&cchk=a83cd635-a792-4660-9f02-f71d5d925911> (2020.08.18)。

15. 羅綺，「環署：森林碳匯計算方法已上路造林1 公頃年減10 噸溫室氣體」，《自由時報》。<https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/3884448> (2020.08.18)。

16. 張金豐副局長，「2016 年參訪英法未來智慧城市出國報告」，科技部新竹科學工業園區管理局 (2016.07.12)。

17. 「環保署新亮點『資源循環辦公室』接軌循環經濟商機」，《天下雜誌》。<https://www.cw.com.tw/article/5119034> (2020.08.18)。

18. 「柏之葉智能城市：利用區域能源，開展未來城市建設」，日立製作所城市 & 社會推進本部。https://social-innovation.hitachi/zh-tw/case_studies/smartcity_kashiwanoha/ (2017.07)。

19. 서울시, 「그린뉴딜」로 탄소배출제로 도시 실현 ,」。<https://mediahub.seoul.go.kr/archives/1288254> (2020/07/08)。

20. Inside Songdo, "The City Designed From Scratch To Be Sustainable", Adele Peters,

Fast Company. <https://www.fastcompany.com/3064402/inside-songdo-the-city-designed-from-scratch-to-be-sustainable> (2020/07/08).

21. Hiroki ICHINOMIYA, "Case Study: Smart Community Demonstration Project in Lyon, France", Mitsubishi Research Institute, Inc. <https://www.nedo.go.jp/content/100871965.pdf>

22. Lyon Confluence Website. <https://www.lyon-confluence.fr/en/sustainable-and-innovative-city>, accessed on (2020/07/08).

23. 「臺灣 2050 淨零排放路徑與策略總說明」，國發會。

24. 「智慧共桿系統」，中華電信官方網站 (2025.01.19)。

25. 「112 年度永續報告書」，台灣積體電路股份有限公司。

26. 楊秉純教授，「交大能源系統設計與能源應用系統」，國立陽明交通大學，新竹市 (2022)。

27. 台灣世曦工程顧問公司，「南部科學園區新設科學園區規劃報告」 (2026.03)。



智慧橋梁的未來—— 以國道 1 號漁港高架橋為例

關鍵詞 Keywords

- # 數位孿生 Digital Twin
- # 結構健康監測 Structural Health Monitoring
- # 預測維護 Predictive Maintenance
- # 車橋互制 Vehicle Bridge Interaction
- # 有限元素分析 Finite Element Analysis
- # 深度學習 Deep Learning

國立高雄科技大學 土木工程學系

助理教授

許信翔

台灣世曦工程顧問股份有限公司 第二結構部

正工程師

林聖學

副理

戚樹人

技術經理

陳炳宏

協理

陳明谷

隨著全球基礎設施逐漸老化，傳統以「目視檢測」與「事後修補」為主的維護模式，已難以有效因應日益增加的交通需求與極端氣候所帶來的挑戰。近年來，土木工程領域逐步朝向結合感測、資料分析與即時回饋的主動式維護策略發展，其中「數位孿生（Digital Twin, DT）」技術被視為支援該轉型的重要工具之一。本應用以國道 1 號漁港高架橋為研究對象，探討數位孿生技術於橋梁結構安全監測與預測維護上的應用潛力。

本研究透過 ANSYS 建立高精度三維有限元素模型，並結合現地車載試驗與微振量測資料，進行橋梁、車輛、鋪面及車橋互制（Vehicle-Bridge Interaction, VBI）系統之模型校正。相較於傳統僅考量靜態幾何資訊之建築資訊模型（BIM），數位孿生模型進一步納入時間歷程與力學行為，有效提升連續翼板懸臂箱型橋梁在動態扭轉載重評估上的描述能力，並為結構健康監測（Structural Health Monitoring, SHM）提供可靠之分析基礎。

為提升即時監測與分析效率，本研究進一步結合深度學習技術建立代理模型（Surrogate Model），以取代傳統耗時的有限元素運算。研究結果顯示，代理模型可將運算時間縮短至毫秒等級，且預測誤差可控制於 $\pm 5\%$ 以內，使橋梁在高速車輛行駛下之關鍵反應可即時掌握，相較於傳統間歇性檢測方式具有明顯優勢。

此外，本研究透過 Unity 平台進行數位孿生模型之視覺化呈現，使橋梁健康狀態得以透過應力分布特徵直觀顯示，有助於工程人員進行結構狀態判讀與潛在疲勞風險評估。此一方法可支援未來由週期性檢修轉向依條件維護（Condition-based Maintenance）之決策機制，進而降低維護成本並延長橋梁服務年限。

整體而言，本應用展示數位孿生結合有限元素分析與深度學習技術應用於智慧橋梁之可行性，並說明其在「結構監測與預測維護」方面的潛在價值。隨著感測與運算技術的持續發展，數位孿生有望成為未來智慧交通基礎設施管理之重要技術基礎。



壹、研究緣起

行駛在公路橋梁上的車輛載重因受到多種因素的影響，對橋梁產生的動態效應通常大於其靜止作用在橋上所產生的靜態效應，此動態效應與車輛動態特性、橋梁結構動態特性、車速、橋面平整度、車輛數量及行駛位置有關，Yang 與 Yau (1997) 提出車橋互制元素 (VBI element)，將車輛之自由度與橋梁有限元素節點整合於一致之分析架構中，使車橋系統可在有限元素法下進行耦合動力分析。

Deng 與 Cai (2010) 指出，橋梁反應除受車橋互制作用影響外，亦與路面條件及車速密切相關。其研究從動態車軸載重辨識觀點出發，說明車輛行駛過程中輪載並非固定不變，而是隨路面條件與車速改變而產生波動。Frýba (1996) 於《Dynamics of Railway Bridges》一書中，系統性整理移動載重作用下橋梁之動力問題，包含臨界速度、共振現象與動態放大機制等，為後續橋梁動力分析研究提供重要理論基礎。

Lalthlamuana 與 Talukdar (2014) 亦指出，車輛偏心行駛路徑及橋梁彎曲 / 扭轉剛度比，皆會影響橋梁反應之動態放大程度。此結果說明偏心載重不僅會改變橋梁垂向反應幅值，也可能改變橋梁扭轉反應之放大程度及整體動態行為。以往國內法規只規定車輛垂直向載重的衝擊係數影響，並作為橋梁動態活載重設計的準則，隨著翼板懸臂箱型梁的大量使用，高速移動車輛所產生的動態扭轉載重之衝擊係數在法規上卻幾乎沒有提及，然而動態扭轉載重之衝擊係數通常大於垂直向載重的衝擊係數並且造成翼板懸臂箱型梁的損壞，並造成結構複雜的動態力學行為，但現地

橋梁試驗受限於時間、經費與感測佈設條件，通常難以掌握完整的結構受力過程。因此本研究將使用有限元素程式模擬現地橋梁之動態衝擊係數與扭轉放大效應，以及分析現地橋梁裂縫位置之主應力大小和方向，並基於 3D 數值模型建立可持續更新之高精度數值模型與數位孿生平台，以補足現地量測之不足，並支援後續即時監測、結構健康監測與維運決策。

數位孿生，是現實世界的物理實體在數位平台上的虛擬「雙胞胎」，它通常是一種三維的虛擬模型，可以模擬物體或系統的運行狀態，並通過資料和演算法來預測未來的行為。數位孿生可以應用於各種產業，主要的角色在監控和管理設備、預測故障、改善生產效率、減少成本和提升顧客服務等。目前數位孿生技術已應用於機械製造業及航空工業，並透過感測器捕捉之即時訊息，同步模擬機械產品與飛機結構於製造過程或運轉過程中之各項動態力學反應，不但能即時監測結構動態反應，也可即時反饋分析是否需要維修或調整，進一步改進設計，減少故障率。

目前在土木營造業，數位孿生技術僅初步應用於規劃設計階段之 3D 建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM) 的數位模擬上；另在橋梁工程上，已有一些學者做了下述研究：Song 等人 (2023) 總結了關鍵指標的橋梁數位孿生性能層次結構，並提出了 DT 增強型 BIM 框架，增進生命週期數位橋梁工程的推動。Dan 等人 (2022) 提出了一種機器視覺融合監測橋梁交通荷載的數位孿生系統，實現區域交通網路中所有橋梁的工作狀態監測和安全預警，形成智慧交通基礎設施系統的重要支撐。

Kang 等人 (2021) 提出使用數位孿生進行橋梁健康監測，根據蒐集到的資料進行分析，預測維護的最佳時間點，將其應用於實際橋梁上，可降低成本和延長使用壽命。Jiang 等人 (2021) 提出了數位孿生導向的鋼橋全生命週期疲勞管理架構，並討論了橋梁生命週期的設計、建造、使用和除役四個階段數位孿生的執行機制。Nieborowski 等人 (2023) 為數位孿生橋梁模組化整體概念及實踐提出了重要的依據。

Ye 等人 (2019) 提出橋梁數位孿生架構時，即強調其應能隨新資料蒐集而近即時更新，並整合 BIM、以物理為基礎的方法、資料導向方法以及以資料為核心之工程方法。Yang、Zhu 與 Cai (2024) 進一步回顧橋梁數位孿生研究時指出，橋梁數位孿生之概念仍常與橋梁資訊建模 (BrIM) 混淆，因此有必要從元素組成、系統特徵、擬真程度與服務功能等面向加以區辨。Kaveh 與 Alhajj (2025) 指出，數位孿生可提升土木基礎設施系統之效率、安全與永續性，但其推廣仍受高成本、資料整合、相容性與資訊安全等問題限制。

綜上所述，雖然航空飛機結構與精密機械工程已經利用數位孿生技術模擬各種結構動態力學反應，但此種技術幾乎沒有在土木結構動態力學反應上應用；故本研究首先將透過有限元素程式模擬國 1 漁港高架連續翼板懸臂箱型橋梁之 3D 模型，使用箱型橋梁內部的動態感測器所測得之即時位移或應變，並與有限元素 3D 橋梁模型分析之歷時資料進一步比對，以驗證 3D 數值模型的精確度，並分析其承受車輛動態扭轉載重所造成箱型梁頂板與腹板應力變化及橋跨中央處撓度之動態放大程度，其中衝

擊係數 I 將以撓度及應變之頂板、底板與腹板來分別求得。

藉由此技術的應用，未來不僅能數位化橋梁全結構之即時動態力學反應，以供維管單位監管應變之用，也能藉著數位孿生模型進行橋梁結構物的各項動態模擬，作為未來橋梁動態活載重設計參考之依據，以提升橋梁工程品質與經濟性。

貳、理論回顧與研究方法

一、橋梁結構動力平衡方程式

橋梁於移動車載作用下之反應，若以有限元素法表示，其基本結構動力平衡方程可寫為：

$$[\mathbf{M}_b]\{\ddot{\mathbf{u}}_b(t)\} + [\mathbf{C}_b]\{\dot{\mathbf{u}}_b(t)\} + [\mathbf{K}_b]\{\mathbf{u}_b(t)\} = \{\mathbf{P}_b(t)\} \quad (1)$$

式中， $[\mathbf{M}_b]$ 為橋梁系統之質量矩陣； $[\mathbf{C}_b]$ 為阻尼矩陣； $[\mathbf{K}_b]$ 為剛度矩陣； $\{\mathbf{u}_b(t)\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{u}}_b(t)\}$ 與 $\{\ddot{\mathbf{u}}_b(t)\}$ 分別代表橋梁節點位移、速度與加速度向量； $\{\mathbf{P}_b(t)\}$ 則為作用於橋梁系統之等效外力向量。

二、車橋互制效應

車橋互制 (Vehicle-Bridge Interaction, VBI) 係指車輛通過橋梁時，車輛系統與橋梁系統並非單純的「外力——結構反應」關係，而是透過輪胎與橋面接觸點形成雙向耦合。車輛行駛時，輪載會使橋梁產生位移與振動；而橋梁位移、速度及橋面粗糙度又會反過來影響車輛懸吊變形與輪胎反力，因此橋梁反應應視為車輛與橋梁共同作用下的耦合動態行為。

三、路面粗糙度理論

橋面粗糙度為橋梁動態反應之重要激振來源之一。依 ISO 8608:2016 之表示方式，橋面縱向高程可用空間頻率功率譜密度 (PSD) 描述為：

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (2)$$

式中， $G_d(n)$ 為空間頻率 n 下之路面高程功率譜密度； $G_d(n_0)$ 為參考空間頻率 n_0 下之粗糙度係數； w 為頻譜斜率指數。透過 $G_d(n_0)$ 之大小，可區分不同等級之路面平整度。

若欲由功率譜密度隨機生成路面高程序列，則可採用反傅立葉表示式為：

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2G_d(n_k)\Delta n} \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (3)$$

四、MLP 之基本架構

多層感知器 (Multi-Layer Perceptron, MLP) 屬前饋式全連接神經網路，其目的在於學習輸入特徵與輸出響應之非線性映射。對第 l 層而言，其線性組合可表示為：

$$\mathbf{z}^{(l)} = \mathbf{W}^{(l)} \mathbf{a}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)} \quad (4)$$

而經過活化函數後之輸出為：

$$\mathbf{a}^{(l)} = \phi(\mathbf{z}^{(l)}) \quad (5)$$

式中， $\mathbf{a}^{(l-1)}$ 為前一層輸出； $\mathbf{W}^{(l)}$ 為第 l 層之權重矩陣； $\mathbf{b}^{(l)}$ 為偏置向量； $\mathbf{z}^{(l)}$ 為線性輸入； $\phi(\cdot)$ 為非線性活化函數，如 ReLU、sigmoid 或 tanh。Rumelhart、Hinton 與 Williams (1986) 提出反向傳播學習法，奠

定了前饋式神經網路參數訓練之理論基礎。

五、卷積運算與局部特徵提取

卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 之核心在於以共享權重之卷積核對局部區域進行特徵擷取，使模型得以保留輸入資料中的空間結構資訊。對第 l 層第 k 個特徵圖而言，其卷積運算可表示為：

$$h_{i,j,k}^{(l)} = \phi \left(\sum_{c=1}^{C_{l-1}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n,c,k}^{(l)} h_{i+m-1,j+n-1,c}^{(l-1)} + b_k^{(l)} \right) \quad (6)$$

式中， $h_{i,j,k}^{(l)}$ 為第 l 層第 k 張特徵圖在位置 (i,j) 之輸出； $w_{m,n,c,k}^{(l)}$ 為卷積核權重； $b_k^{(l)}$ 為偏置項； C_{l-1} 為前一層特徵圖數； $\phi(\cdot)$ 為活化函數。LeCun、Bottou、Bengio 與 Haffner (1998) 所建立之卷積網路理論，為此類模型之經典基礎；Upreti (2022)、Ayani (2022) 與 Thakur 等人 (2025) 亦對 CNN 之架構與發展脈絡做了整理。

六、數位孿生之基本概念

數位孿生之核心，不在於建立單一三維模型，而在於形成一套可持續接收實體資料、同步更新虛擬模型並支援分析決策之虛實整合系統。Tao 等人 (2018) 指出，數位孿生之價值在於透過物理實體資料、虛擬模型資料與其間之資料連結，使虛擬系統可持續更新；Ye 等人 (2019) 將此觀念延伸至橋梁工程，提出橋梁數位孿生應整合 BIM、物理模型與資料導向模型；Yang、Zhu 與 Cai (2024) 進一步指出，橋梁數位孿生與傳統 Bridge Information Modeling 之差異，在於前者更強調資料回饋與預測分析能力。

若由抽象系統觀點表示，數位孿生可視為一隨時間演化之狀態空間系統：

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{w}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

式中， $\mathbf{x}_k$ 為第 k 時刻之數位孿生狀態； $\mathbf{u}_k$ 為輸入載重或控制量； $\boldsymbol{\theta}$ 為模型參數； $\mathbf{w}_k$ 與 $\mathbf{v}_k$ 分別為系統與量測雜訊； $\mathbf{y}_k$ 為觀測量。

七、混凝土開裂強度

在 ACI 318 中，所稱的「開裂強度」通常指混凝土彎拉強度（modulus of rupture, f_r ），用來代表混凝土在彎曲作用下第一次開裂時的名義拉應力能力，主要應用於撓度與裂縫控制的服務性狀態分析，而不是抗彎強度設計。本規範將 f_r 視為由實驗統

計回歸而得的經驗值，對正常重量混凝土（ $\lambda=1$ ）採用下列形式：

$$f_r = 0.62 \lambda \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

八、橋梁動態放大效應

橋梁動態放大效應常可用衝擊係數或動態放大因子表示。若以同一觀測位置之動態最大反應 R_{dyn} 與靜態最大反應 R_{sta} 定義，則衝擊係數可寫為：

$$I = \frac{R_{\text{dyn}} - R_{\text{sta}}}{R_{\text{sta}}} \quad (10)$$

而動態放大因子可寫為：

$$DAF = \frac{R_{\text{dyn}}}{R_{\text{sta}}} \quad (11)$$

參、有限元素模型建立與設定

一、三維橋梁數值模型建立

本研究以國 1 漁港高架 S14－S16 全長 170m，三跨連續翼板懸臂箱型橋梁為對象，斷面詳如圖 1 所示，混凝土材料參數為 $f'_c=6000\text{psi}$ ， $E=3.07\times 10^9\text{ kgf/m}^2$ ，利用

ANSYS SpaceClaim 建立橋梁、車輛、AC 鋪面及車橋互制之三維數值模型如圖 2 所示，橋跨配置為 50m-70m-50m。依據 ISO 8608:2016 (2016) 提到之路面粗糙度生成公式及路面評級，使用 MATLAB 程式生成 B 級路面之隨機粗糙度，並在 ANSYS 中依粗糙度資料進行建模如圖 4 所示。

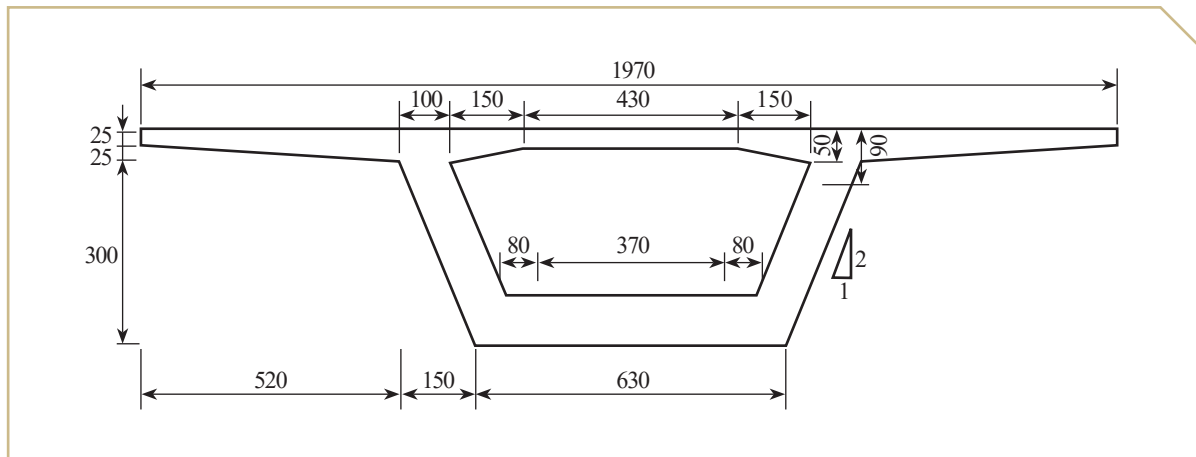


圖 1 翼板懸臂箱型橋梁斷面 (單位:cm)

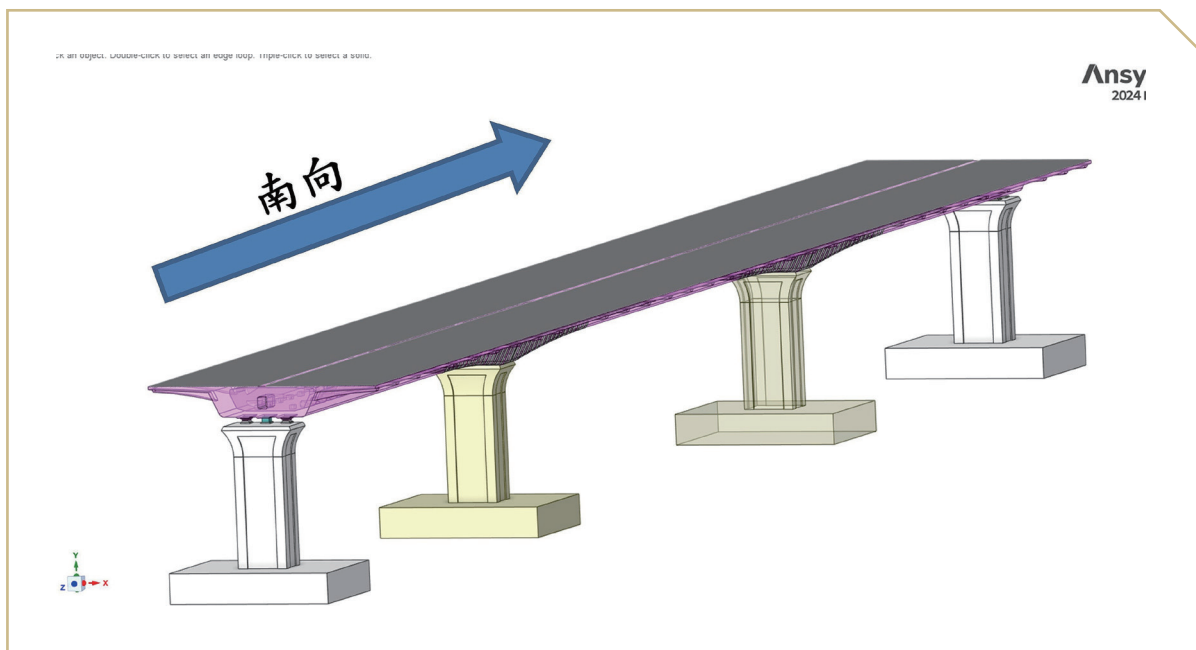


圖 2 ANSYS 橋梁模型

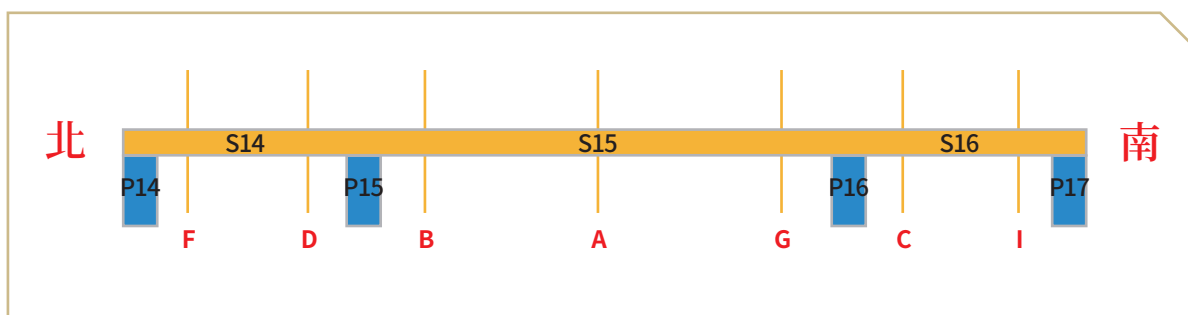


圖 3 三跨連續梁橋墩與各斷面定義

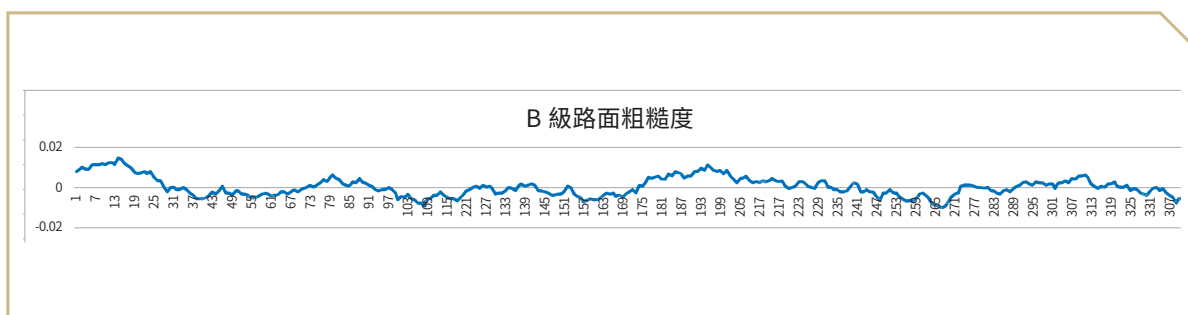


圖 4 路面粗糙度

二、橋梁數值模型準確性驗證

為了確認模型準確性，本研究使用 ANSYS Mechanical 根據現地載重試驗如圖 5，進

行相同的載重試驗方法，靜態輕車載重（8 輛 20 噸卡車）、重車載重（16 輛 20 噸卡車）與動態載重（2 輛 20 噸卡車以 50km/h 通行）進行比較。



圖 5 橋梁現地載重試驗



圖 6 載重試驗卡車－20 噸

表 1 靜態輕載結果比較

現地試驗 (50 km/hr)	現地靜態沉陷量 (mm)	有限元素靜態沉陷量 (mm)	靜態資料平均後 誤差百分比
S14 跨	-3.35	-3.453	3.0%
S15 跨	-3.9	-3.960	-1.5%
S16 跨	-3.05	-3.184	-4.2%

表 2 靜態重載結果比較

現地試驗 (50 km/hr)	現地靜態沉陷量 (mm)	有限元素靜態沉陷量 (mm)	靜態資料平均後 誤差百分比
S14 跨	-6.75	-6.499	3.9%
S15 跨	-8.35	-8.099	3.1%
S16 跨	-5.2	-5.390	-3.5%

表 3 動態結果比較

現地試驗 (50 km/hr)	動態沉陷量 (mm)	有限元素分析動態沉陷量 (mm)	動態資料平均後 誤差百分比
S15 跨	-2.65	-2.662	-0.5%

三、橋梁數值模型分析設定

(一) 靜態載重分析純扭轉效應

為了更具體評估扭轉效應對多跨連續箱型梁實際受力行為之影響，本研究將建立非對稱車載配置之數值模型。透過模擬偏載情境下

橋梁腹板的最大剪應力，並與對稱載重結果相互比較，可釐清車輛偏載所引致之扭轉效應最大剪力的放大程度，作為後續結構安全評估與箱型梁斷面設計之重要依據，除了分析彎矩最大處以外，根據現場 P15 處腹板裂縫位置（圖 7）進行應力分析。

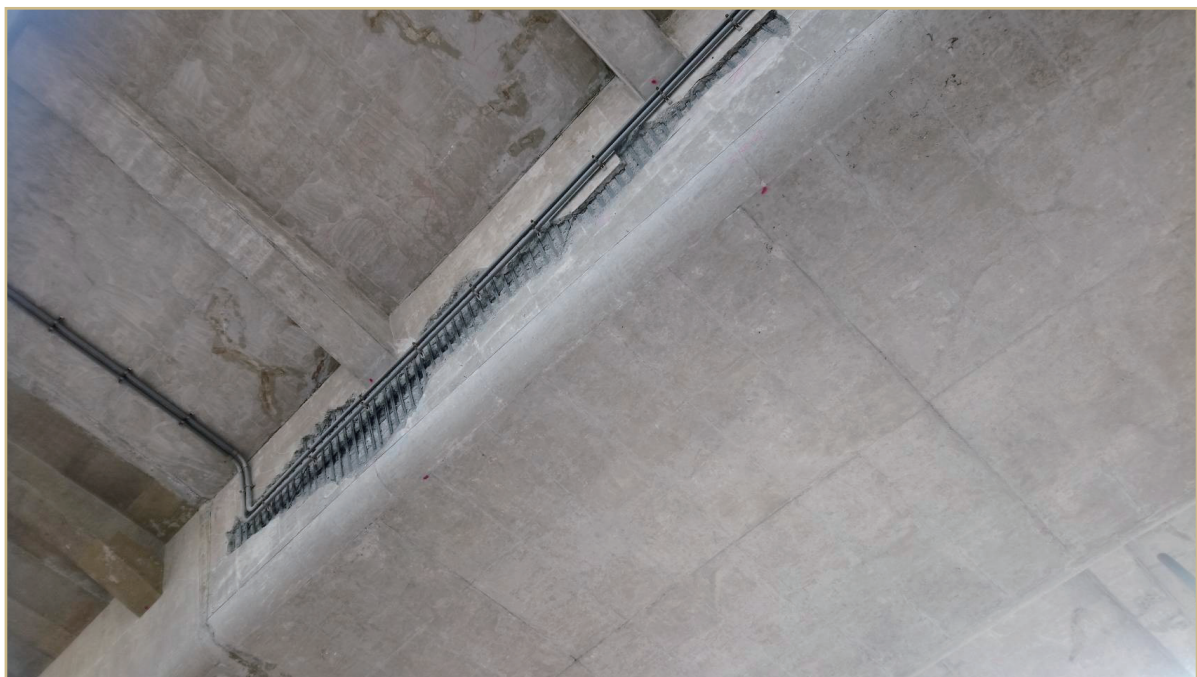


圖 7 橋墩 P15 處腹板裂縫

有限元素靜態分析，車載位置為 S15 跨中央處和 P15 處，並模擬 2 種車載情境：

1. 輕載對稱：8 輛 20 噸卡車（圖 8）。
2. 輕載非對稱：8 輛 20 噸卡車配置於單側（圖 9）。

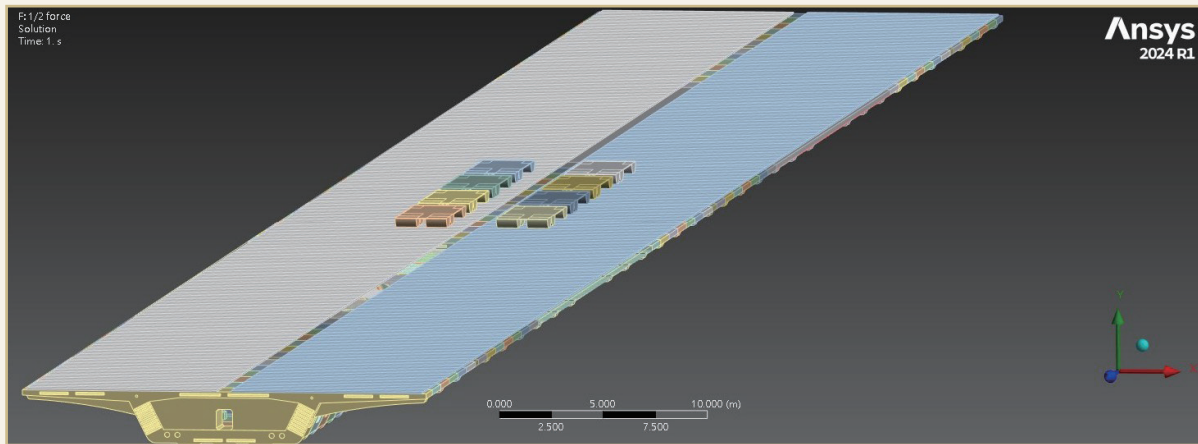


圖 8 輕載對稱：8 輛 20 噸卡車

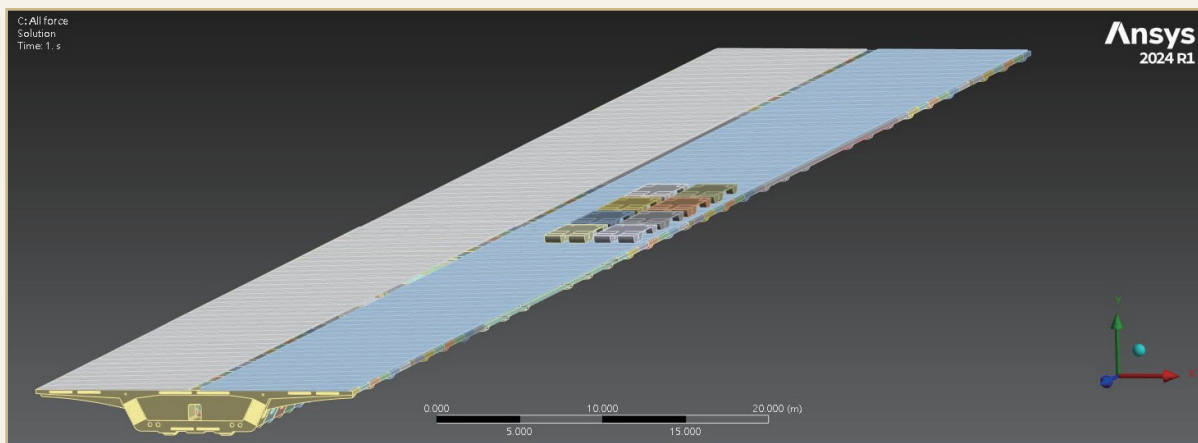


圖 9 輕載非對稱：8 輛 20 噸卡車配置於單側

（二）動態載重分析衝擊係數與扭轉效應

本研究之動態載重結果分析，重點在於分析車輛行進時所造成之動態效應，對多跨連續箱型梁中跨斷面應力的影響程度。首先，針對 S15 跨中央斷面，分別在頂板、腹板及底板重要位置量測車輛通過瞬間的應力，並以動態分析所得之應力值與相同

載重條件下靜力分析之應力值相比，定義斷面應力之衝擊係數，此外，考量實際行車多呈偏向外側車道之非對稱載重情境，本研究進一步比較對稱載重與非對稱載重下，S15 跨 AA 斷面各構件應力之差異，據此定義非對稱扭轉放大係數，用以分析扭轉效應對局部應力的額外放大量。

有限元素動態分析模擬 3 種車載情境：

1. 南、北向車道各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過（圖 10）。
2. 南、北向車道（外車道）各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過（圖 11）。
3. 南、北向車道（非對稱）各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過（圖 12）。

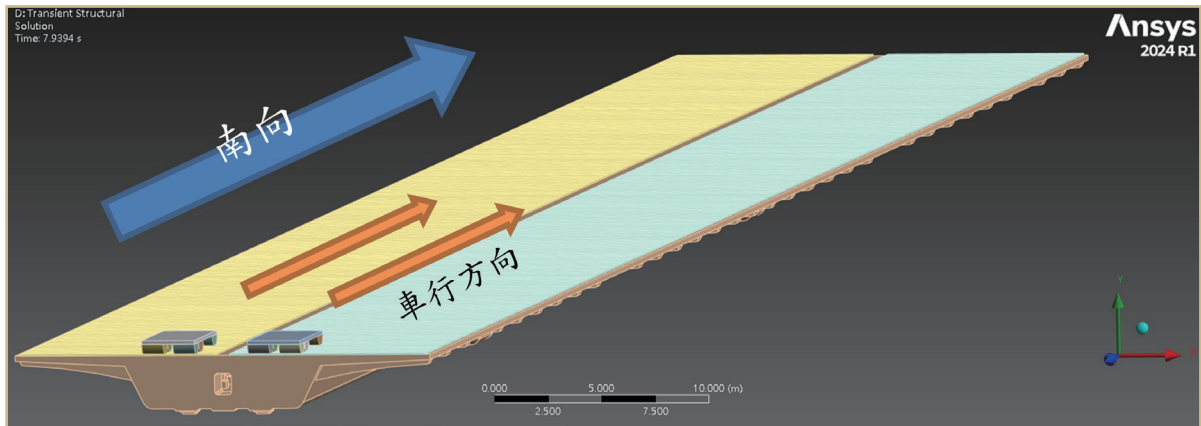


圖 10 南、北向車道各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過

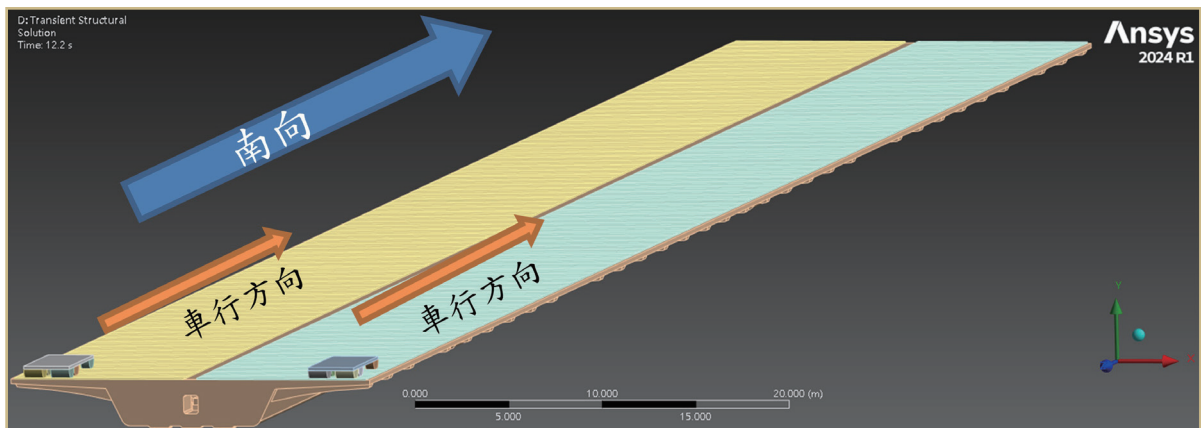


圖 11 南、北向車道（外車道）各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過

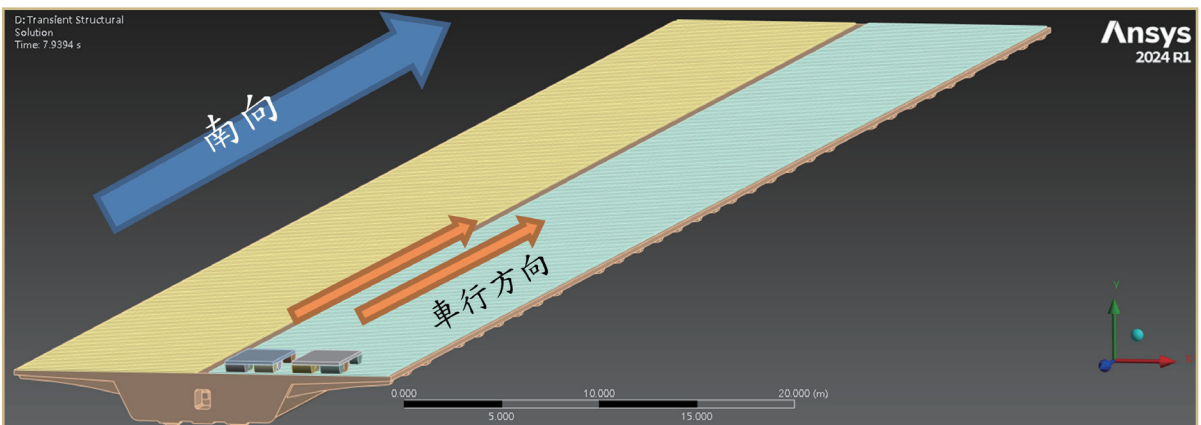


圖 12 南、北向車道（非對稱）各一輛 20 噸卡車以時速 50km/h 向南通過

肆、有限元素分析之研究結果

一、靜態純扭轉分析資料

從結果來看，若僅檢核對稱載重組合，設計雖可滿足彎矩需求，但在實際營運時，外側車道偏載才是常態，偏載側腹板長期承受較高剪力與扭轉。因此，箱型梁斷面

設計與配筋規劃必須同時考慮對稱與非對稱車載組合，以偏載案例作為剪力與扭轉驗算的關鍵，避免因忽略扭轉效應而低估偏載側腹板與底板之安全需求。

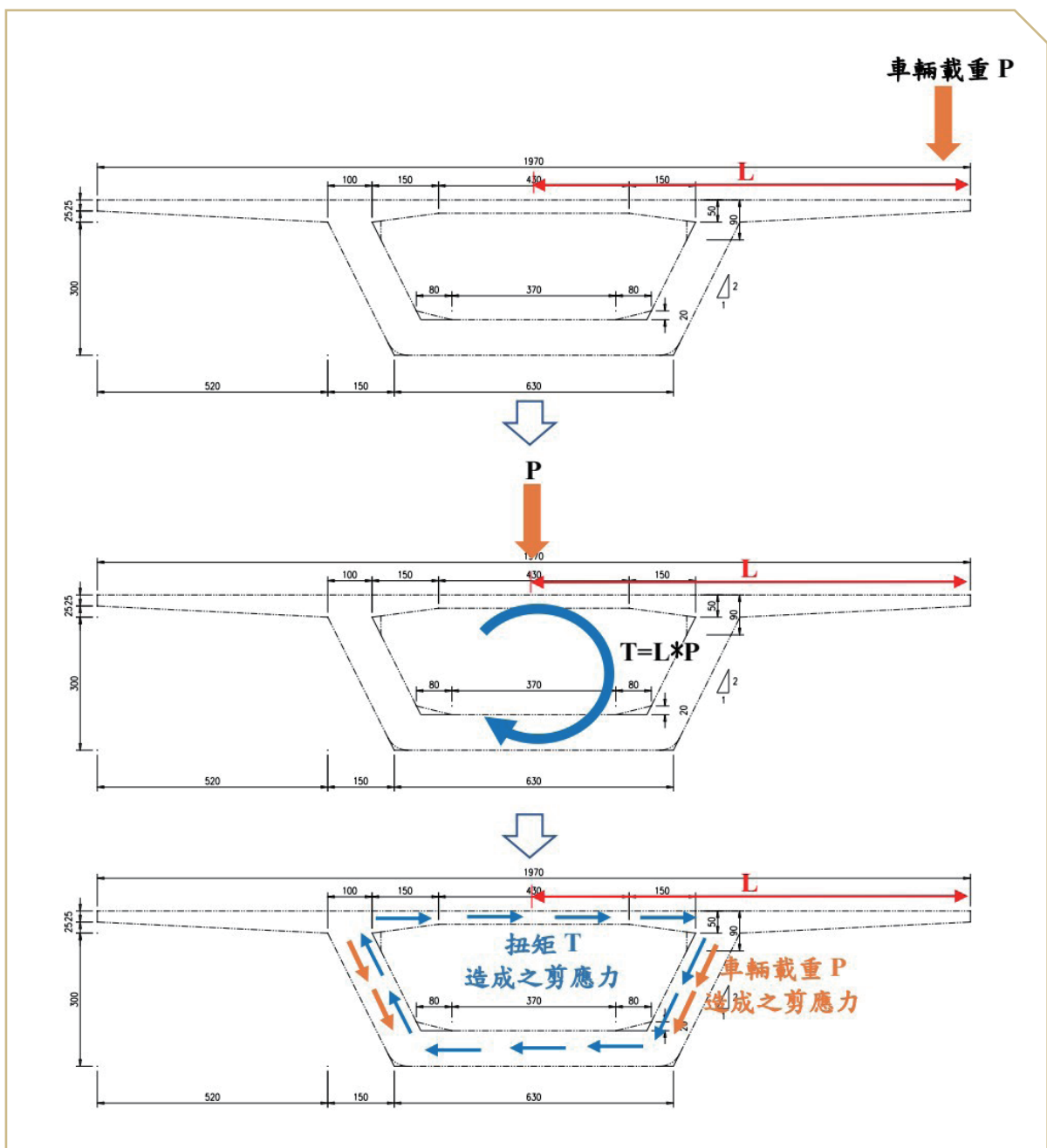


圖 13 車輛行駛於外側車道時對翼板懸臂箱型梁造成扭轉效應示意圖

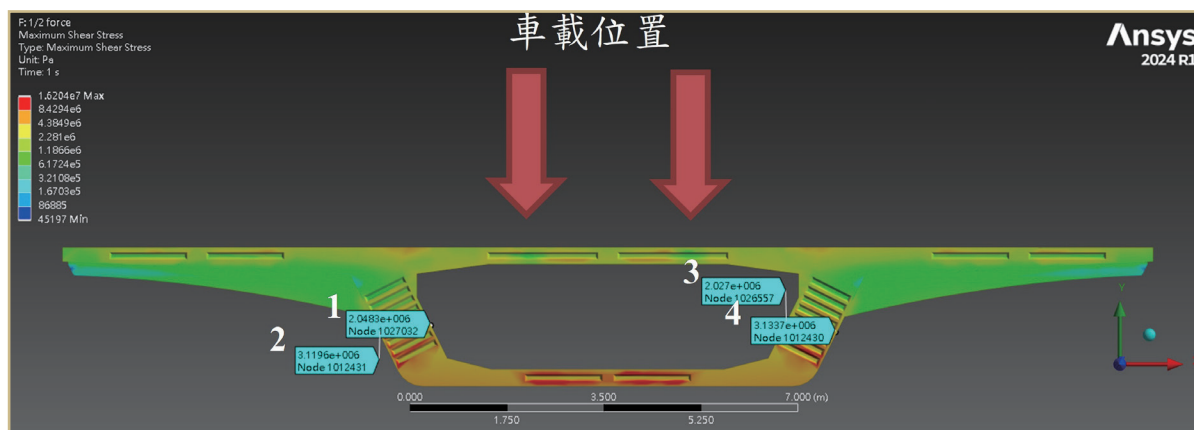


圖 14 輕載對稱 最大剪應力－ S15 A-A 斷面

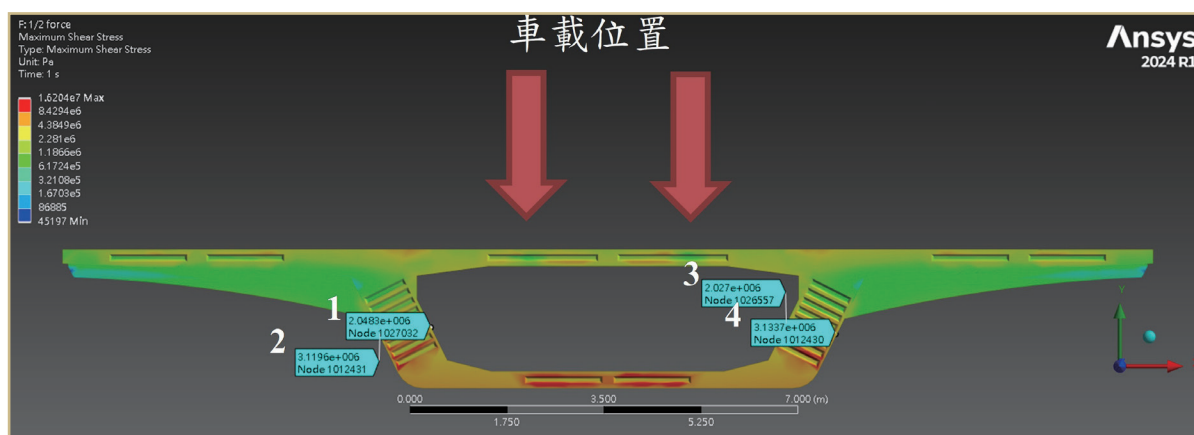


圖 15 輕載非對稱 最大剪應力－ S15 A-A 斷面

表 4 輕載扭轉分析 最大剪應力－ S15 A-A 斷面

位置	非對稱剪應力 (kgf/cm ²)	對稱剪應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 左側內腹板	19.8	20.5	0.97
2. 左側外腹板	24.6	31.2	0.79
3. 右側內腹板	29.1	20.3	1.43
4. 右側外腹板	41.5	31.3	1.33

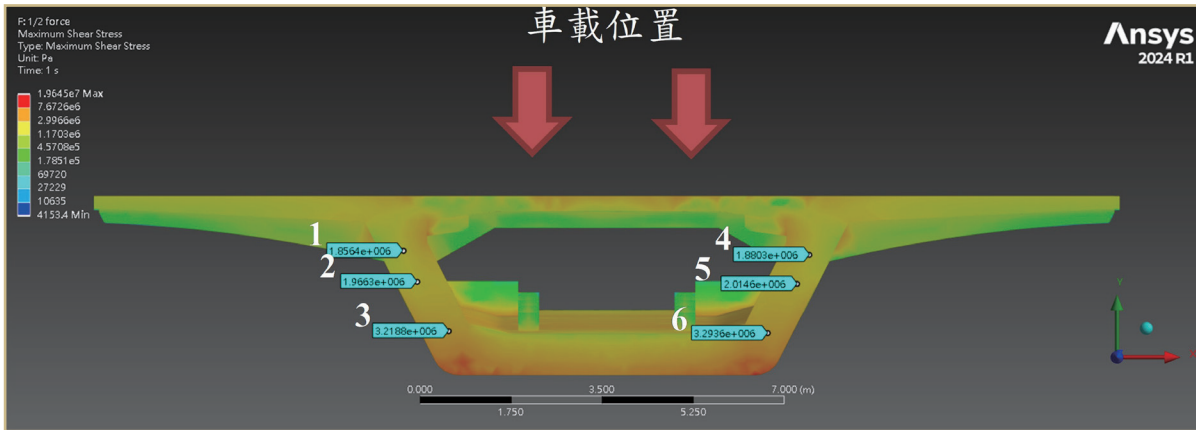


圖 16 輕載對稱 最大剪應力－P15 斷面

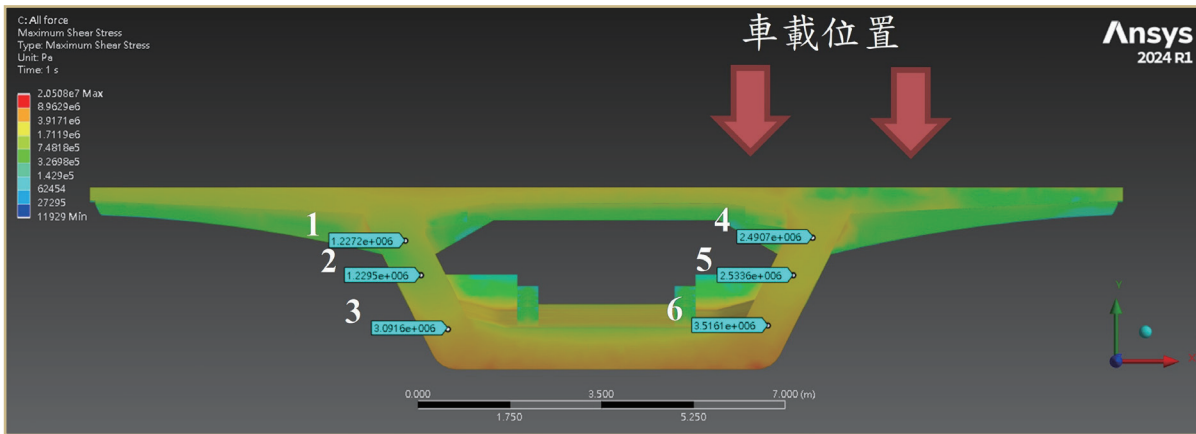


圖 17 輕載非對稱 最大剪應力－P15 斷面

表 5 輕載扭轉分析 最大剪應力－P15 斷面

位置	非對稱剪應力 (kgf/cm ²)	對稱剪應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 左側腹板 - 上	12.3	18.6	0.66
2. 左側腹板 - 中	12.3	19.7	0.62
3. 左側腹板 - 下	30.9	32.2	0.96
4. 右側腹板 - 上	24.9	18.8	1.32
5. 右側腹板 - 中	25.3	20.1	1.26
6. 右側腹板 - 下	35.2	32.9	1.07

二、動態放大與扭轉分析資料

根據圖 18 ~ 23 所示各種載重情況與不同軸向應力的數值結果，可以明確區分南北車行方向（Z 軸）與東西橫向（X 軸）兩種應力放大機制的差異。首先，Z 軸方向為車輛行進與主梁縱向一致之方向，其應力放大係數可視為典型的動態放大效應。由中跨頂板、底板以及左右腹板位置之 Z 軸正應力可見，動態分析所得之應力值相較於靜態分析大致提升 10% ~ 30%，放大係數多數落在 1.10 ~ 1.30 範圍內，最大約為 1.33。此一結果顯示，車輛通行所引致之慣性效應與路面不平整度，確實會使中跨斷面應力略為放大，但整體幅度仍控制在一般設計規範所建議之動載放大因子約 30% 以內，代表在主梁縱向彎矩與軸力評估方面，現行設計方法對動態效應並未有明顯低估。

相較之下，東西向 X 軸為橋面橫向方向，該向之軸向應力主要反映箱型梁在車輛偏載下所產生的扭轉與翹曲效應。由 X 軸應力分析結果可見，當載重呈對稱配置時，中跨各測點之放大係數多略高於 1.0（或靜態值），約介於 1.2 ~ 1.4 之間，動態扭轉

放大尚不顯著；然而，在非對稱載重（例如單車道偏載或車輛集中於外側車道）情境下，X 軸動態應力較靜態值有明顯提升，多數位置的放大係數接近或超過 1.5，部分接近 2.0，多數位置之應力放大幅度約達 50% 或以上。換言之，非對稱行車導致箱型梁產生顯著扭轉振動，進一步放大橫向拉壓應力與扭轉組合作用，其放大量已顯著高於設計規範中對一般動載放大因子約 30% 的假設水準。

綜合以上分析，車行方向 Z 軸的應力放大可視為「可預期且受控」的動態放大效應，現行設計公式大致足以涵蓋；但 X 軸所對應的動態扭轉放大係數在非對稱載重下卻呈現明顯高於設計假設的情況，顯示若仍僅以縱向動載放大因子作為整體安全評估基準，將可能低估箱型梁在偏載狀況下的橫向拉壓應力與腹板、加勁梁的扭轉需求。對於多箱室或設有加勁梁的箱型梁而言，未來於斷面設計與耐久性檢核時，除應檢討傳統動載放大效應外，亦有必要將「動態扭轉放大」納入設計考量，特別是偏載側腹板與加勁肋附近，作為配筋量、局部加勁及防裂措施的重要依據。

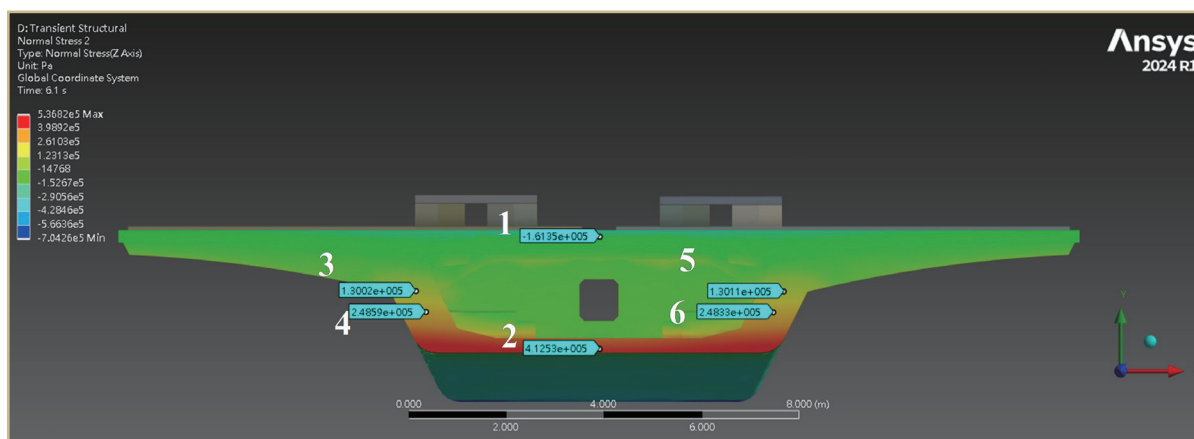


圖 18 動態載重 [1] S15 A-A 斷面－Z 軸（車行方向）正向應力

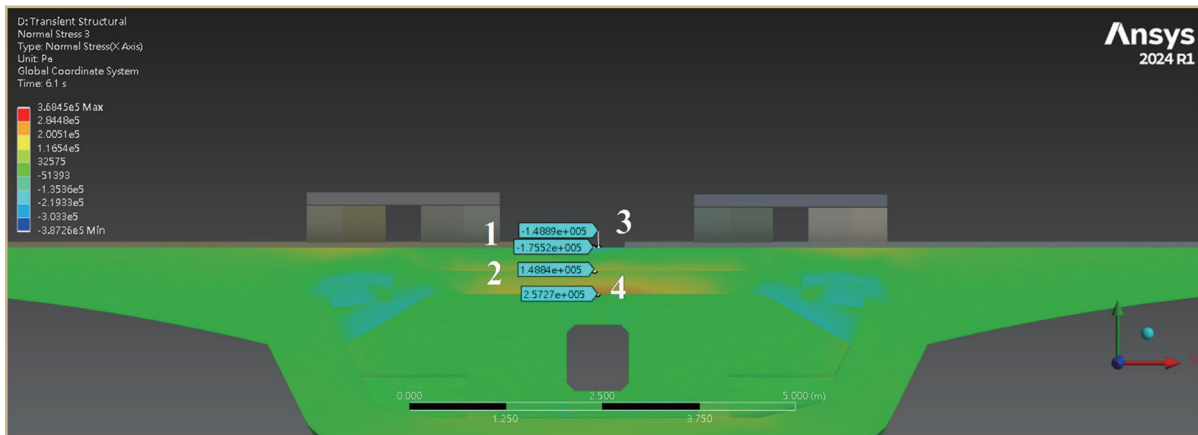


圖 19 動態載重 [1] S15 A-A 斷面－X 軸(橫向)正向應力

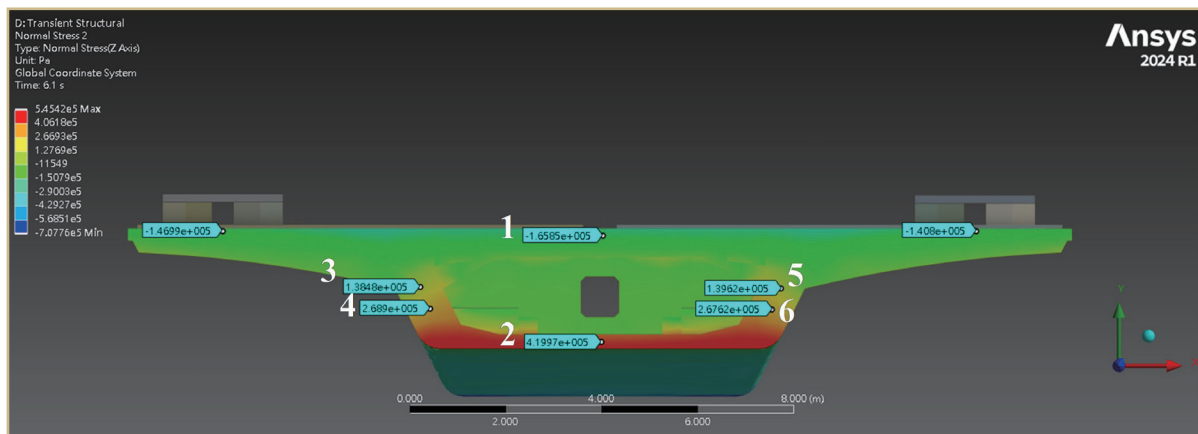


圖 20 動態載重 [2] S15 A-A 斷面－Z 軸(車行方向)正向應力

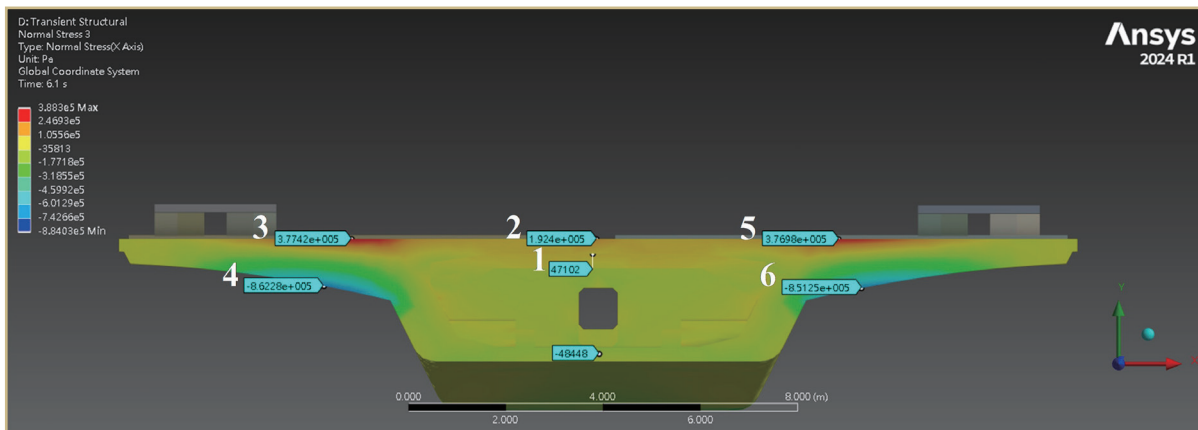


圖 21 動態載重 [2] S15 A-A 斷面－X 軸(橫向)正向應力

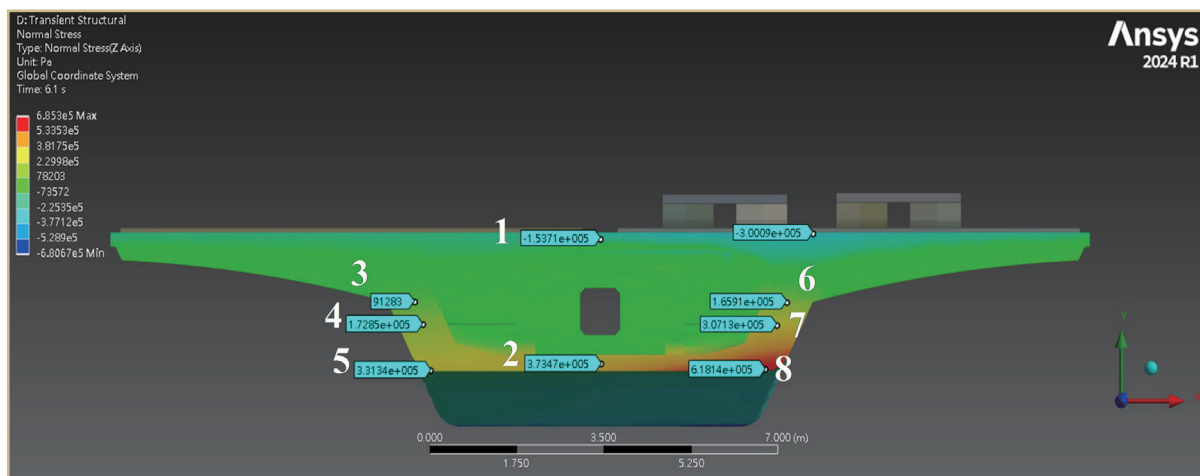


圖 22 動態載重 [3] S15 A-A 斷面－Z 軸（車行方向）正向應力

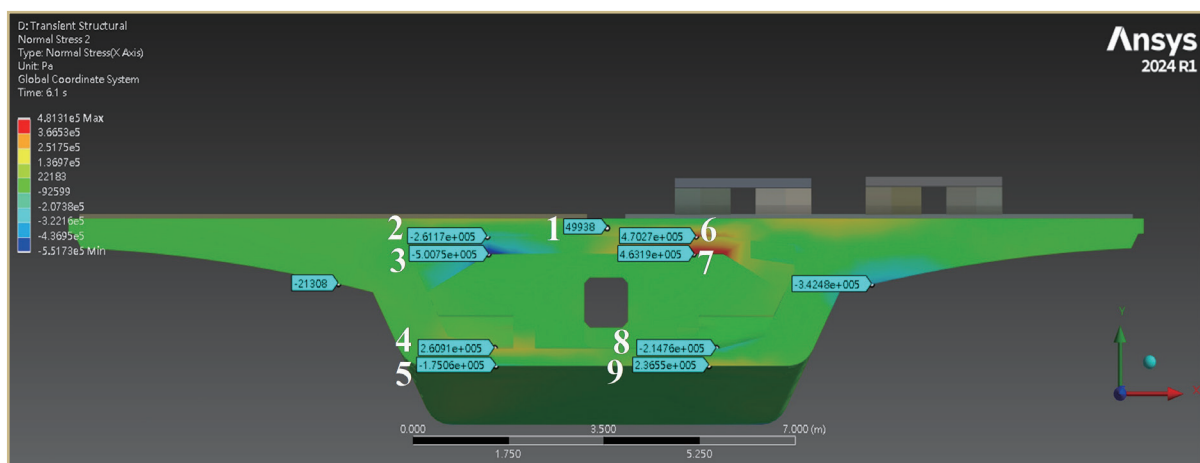


圖 23 動態載重 [3] S15 A-A 斷面－X 軸（橫向）正向應力

表 6 動態載重 [1] S15 A-A 斷面－Z 軸（車行方向）分析結果

位置 (圖 17)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 中央頂板	-1.45	-1.61	1.11
2. 中央底板	3.38	4.13	1.22
3. 左側腹板 - 上	1.01	1.30	1.29
4. 左側腹板 - 下	1.96	2.49	1.27
5. 右側腹板 - 上	1.02	1.30	1.27
6. 右側腹板 - 下	2.00	2.49	1.25

表 7 動態載重 [1] S15 A-A 斷面－X 軸（橫向）分析結果

位置 (圖 18)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 中央外頂板	-1.45	-1.76	1.21
2. 中央內頂板	1.14	1.49	1.31
3. 加勁梁頂	-1.23	-1.49	1.21
4. 加勁梁底	1.74	2.57	1.48

表 8 動態載重 [2] S15 A-A 斷面－Z 軸（車行方向）分析結果

位置 (圖 19)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 中央頂板	-1.34	-1.66	1.24
2. 中央底板	3.39	4.20	1.29
3. 左側腹板 - 上	1.11	1.38	1.24
4. 左側腹板 - 下	2.02	2.69	1.33
5. 右側腹板 - 上	1.11	1.40	1.26
6. 右側腹板 - 下	2.09	2.68	1.28

表 9 動態載重 [2] S15 A-A 斷面－X 軸（橫向）分析結果

位置 (圖 20)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 內頂板中央	0.59	0.47	0.80
2. 外頂板中央	1.65	1.92	1.16
3. 左側翼板處	3.23	3.77	1.17
4. 左側加勁梁	-6.85	-8.62	1.26
5. 右側翼板處	3.30	3.77	1.14
6. 右側加勁梁	-7.20	-8.51	1.18

表 10 動態載重 [3] S15 A-A 斷面－Z 軸（車行方向）分析結果

位置 (圖 20)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 中央頂板	-1.18	-1.54	1.31
2. 中央底板	3.26	3.73	1.14
3. 左側腹板 - 上	0.78	0.91	1.15
4. 左側腹板 - 下	1.47	1.73	1.18
5. 左側底板	3.07	3.31	1.08
6. 右側腹板 - 上	1.30	1.66	1.28
7. 右側腹板 - 下	2.53	3.07	1.21
8. 右側底板	5.35	6.18	1.16

表 11 動態載重 [3] S15 A-A 斷面－X 軸（橫向）分析結果

位置 (圖 21)	靜態應力 (kgf/cm ²)	動態應力 (kgf/cm ²)	放大係數
1. 中央頂板	0.29	0.50	1.72
2. 左側內頂板	-1.70	-2.61	1.54
3. 左側內加勁梁	-3.51	-5.01	1.43
4. 左側內底板	1.64	2.61	1.59
5. 左側外底板	-1.21	-1.75	1.45
6. 右側內頂板	3.07	4.70	1.53
7. 右側內加勁梁	2.38	4.63	1.95
8. 右側內底板	-1.44	-2.15	1.49
9. 右側外底板	1.41	2.37	1.68

伍、數位孿生平台初步建置

本研究之數位孿生平台，目的在於建立一套由有限元素分析、資料集生成、深度學習代理模型訓練，至 Unity 之即時應力可視化整合流程。相較於僅以有限元素模型進行離線分析，本研究進一步將 ANSYS 分析結果轉換為可供機器學習訓練之資料集，再以代理模型取代高成本之即時有限元素重算，使橋梁結構反應之推估可由「高精度但耗時」之分析模式，轉為「可快速推論並即時呈現」之應用模式。此一流程與本研究原先所設定之平台目標一致，即由感測或參數輸入，經代理模型推估結構應力反應，最後以三維介面進行視覺化展示。由於受限硬體規格與時間成本考量，三跨連續箱型梁（S14-S15-S16）取中間跨（S15）進行數位孿生模型建立。

一、ANSYS 批次參數分析與訓練資料生成

為建立深度學習所需之訓練資料，本研究首先於 ANSYS Workbench 環境中建立橋梁三維有限元素模型，並以 Journal Script

進行批次參數分析。實作上，使用腳本自動控制 Workbench 之設計點與參數更新，將不同幾何或載重情境參數依序寫入模型中，再觸發求解與結果更新。腳本係採 6 個參數、4 個離散水準之全組合掃描方式進行批次分析，共產生 4096 組案例，其中特徵參數設定為：P1、P2、P5、P6 之離散水準為 0、-1、-2、-3 mm；P3、P4 之離散水準為 0、-3、-6、-9 mm；另以 P9 作為案例編號，用以對應各組分析結果。

腳本執行流程可概分為四個步驟：

1. 讀取預先建立之參數表；
2. 將每一列參數值依序指定至 Workbench 參數 P1 ～ P6 與案例編號 P9；
3. 清除前一案例之 Solution 與 Results，並重新整理 Setup 與 Results；
4. 重新執行分析更新，以完成新案例之有限元素求解。

透過此一方式，可避免人工逐案修改模型參

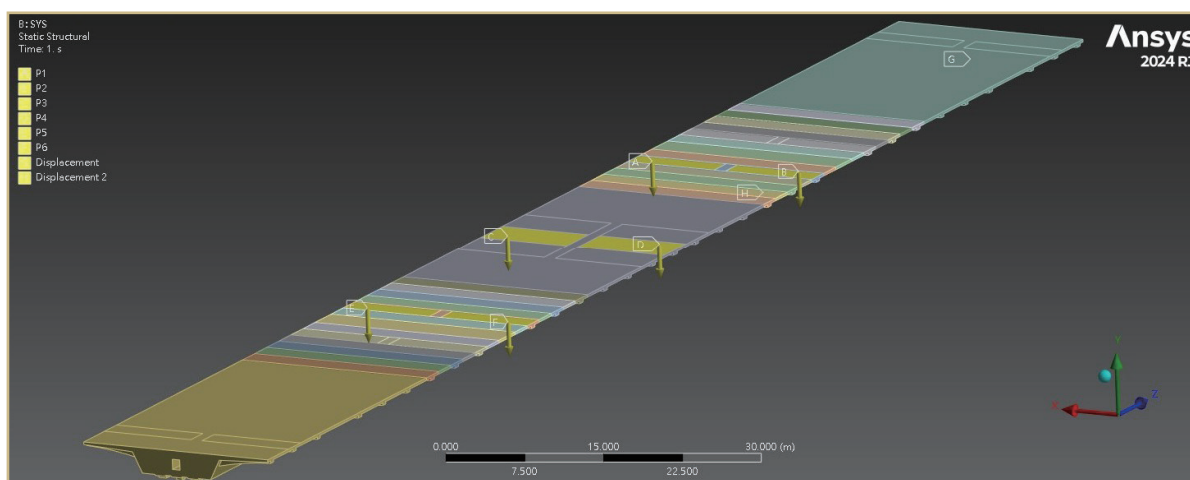


圖 24 本研究 ANSYS 腳本模型

數之繁複作業，並確保大量案例資料在相同模型架構與求解流程下產生，提升後續訓練資料之一致性。對本研究而言，ANSYS 有限元素模型扮演的是高精度資料生成器之角色，而非直接作為即時預測工具；其主要任務在於建立橋梁應力反應與輸入參數之對應資料庫，供深度學習代理模型學習。

二、ANSYS 結果匯出與訓練資料集整理

在完成單一案例求解後，為使有限元素結果可供外部程式讀取與訓練，本研究進一步利用 ANSYS Mechanical 之 Python Code 於後處理階段自動匯出應力結果。匯出內容以「最大主應力（Maximum principal stress）」為主，並依案例編號 P9 命名輸出檔案，使每組有限元素結果均可與其對應之輸入參數建立對應關係。

此一匯出機制之目的，在於將原本存在 ANSYS 專案中的結果資料，轉換為外部 Python 可直接讀取之結構化文字檔。完成 4096 組案例之分析後，即可形成一組由「輸入參數」與「有限元素應力結果」構成之資料集。其中，輸入端為 P1 ～ P6 六個

控制參數，輸出端則為對應案例之應力分布結果。為利於後續模型訓練，匯出之資料尚需經過格式整理，包括欄位統一、節點或元素排序一致化、遺漏值檢查，以及資料正規化等前處理步驟。

由研究架構而言，此階段是有限元素分析與深度學習之間的關鍵轉換層。若無自動匯出與編號對應機制，則大量有限元素案例雖可被求解，卻難以有效轉換為機器學習可直接利用之訓練樣本；因此，腳本控制與結果匯出機制，實為本研究數位孿生流程中不可或缺之一環。

三、PyCharm 環境下之代理模型訓練

在完成 ANSYS 結果匯出後，本研究於 PyCharm 開發環境中，使用 Python 建立深度學習代理模型，作為橋梁應力反應之快速推論工具。代理模型之基本概念為：以大量有限元素分析案例作為監督式學習資料，建立輸入參數與結構應力反應之間的映射關係，使模型於輸入新條件後，無須重新進行完整有限元素求解，即可快速近似推估橋梁之最大主應力分布。

本研究以六組載重參數 P1 至 P6 作為模型輸入，並以 ANSYS 匯出之節點最大主應力作為模型輸出。由於本研究目的在於建立可應用於數位孿生平台之即時應力推估模型，因此模型輸出並非單一最大值，而是對應至橋梁全域節點之最大主應力向量。此作法可使後續 Unity 數位孿生平台依據節點應力值進行色階映射，呈現橋梁整體應力分布與局部高應力區域。

為避免模型僅記憶訓練案例而缺乏泛化能力，本研究將有限元素資料依比例分為訓練集與驗證集。其中總資料數為 4,096 筆，採用 80% 作為訓練資料、20% 作為驗證資料，因此訓練集共 3277 筆，驗證集共 819 筆。訓練資料用於更新神經網路權重，驗證資料則不進行模型訓練，而是用來檢查模型對未見案例之預測能力。此資料切分方式可降低模型過度擬合之風險，並提升模型正確性評估之可信度。

本研究分別建立 CNN（卷積神經網路）與 MLP（多層感知器）之兩種代理模型進行比較。MLP 模型僅以六維載重參數作為輸入，屬於基準模型；CNN 模型則進一步將

載重條件轉換為具有空間意義之 voxel（體積像素）輸入，藉由卷積層擷取載重分布之局部空間特徵，再結合六維參數進行整體應力場預測。透過 CNN 與 MLP 之比較，可檢驗加入空間特徵後，是否能提升橋梁節點應力場之預測能力。

模型訓練過程中，以 ANSYS 有限元素分析結果作為基準值，透過損失函數逐步修正模型權重，使代理模型之預測值逐漸接近有限元素分析結果。訓練完成後，本研究進一步使用驗證集進行正確性分析，並以平均絕對誤差（Mean Absolute Error, MAE）、均方根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）、決定係數（ R^2 , Coefficient of Determination）、皮爾森相關係數（Pearson correlation coefficient）作為主要評估指標。其中 MAE 可反映整體平均誤差，RMSE 對局部較大誤差較為敏感， R^2 可評估模型對 ANSYS 應力分布變化之解釋能力，而皮爾森相關係數則可檢查預測結果與有限元素結果之線性一致性。

驗證結果顯示，CNN 代理模型於驗證集中之 MAE 為 0.003080 MPa，RMSE 為 0.009050

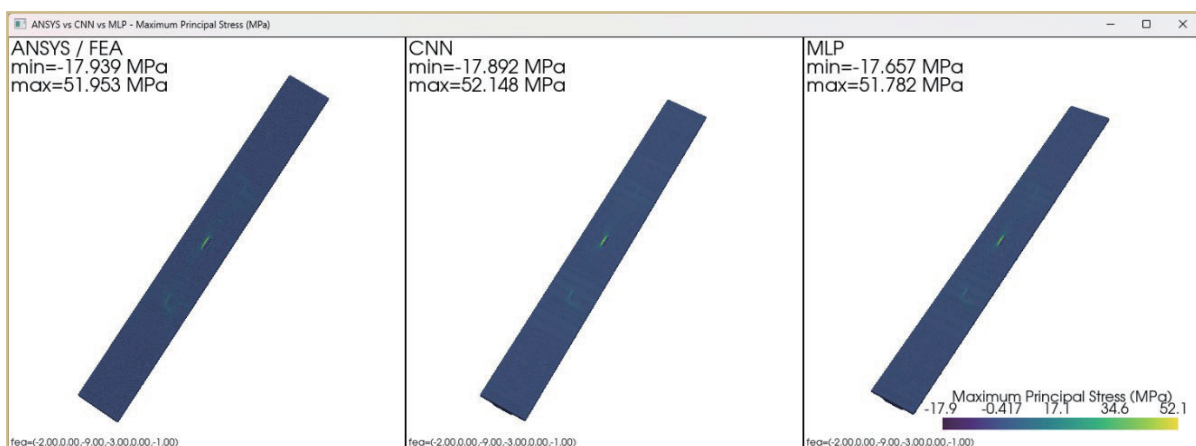


圖 25 本研究隨機選取之 ANSYS 有限元素分析結果與相對應之 CNN 代理模型、MLP 基準模型的最大、最小主應力比較圖

MPa， R^2 為 0.99991，皮爾森相關係數為 0.99996；MLP 基準模型之 MAE 為 0.004017 MPa，RMSE 為 0.012678 MPa， R^2 為 0.99983，皮爾森相關係數為 0.99992。由結果可知，CNN 代理模型於平均誤差（MAE）、均方根誤差（RMSE）及整體趨勢一致性上皆優於 MLP 基準模型，顯示加入 voxel（體積像素）空間特徵後，對全域最大主應力預測具有提升效果。

本研究提出之代理模型目的，並非取代有限元素法於理論分析與高精度求解之角色，而是在數位孿生應用中扮演快速近似求解器。當有限元素模型需數分鐘甚至更長時間方能完成單一案例分析時，深度學習代理模型可在極短時間內產生近似結果，使其適合用於近即時監測、參數敏感度分析與視覺化展示。依本研究之整體結果，代理模型之預測誤差可控制於合理範圍內，顯示其作為數位孿生即時應力推估核心具有可行性。

四、Unity 應力可視化與即時展示

在完成代理模型訓練後，本研究進一步將其與 Unity 三維視覺化平台整合，以建立橋梁數位孿生之使用者介面。Unity 端之主要功能，在於接收輸入參數或感測資料，呼叫已訓練完成之代理模型進行推論，並將輸出之橋梁應力結果轉換為顏色分布、熱區或數值資訊，呈現於三維橋梁模型上。換言之，Unity 並不直接進行有限元素求解，而是扮演即時展示與互動操作之平台角色。

在視覺化呈現上，可將橋梁構件表面依應力大小對應不同顏色，例如低應力區域以冷色系表示，高應力區域以暖色系表示，並於介面中同步顯示最大應力位置、潛在危險區域標記或特定斷面之反應值。若代理模型輸出結果與有限元素網格具有固定對應關係，則 Unity 可依節點、元素或區塊將結果映射回橋梁三維模型，形成可供使用者即時判讀之應力雲圖。此類呈現方式相較於傳統圖表或

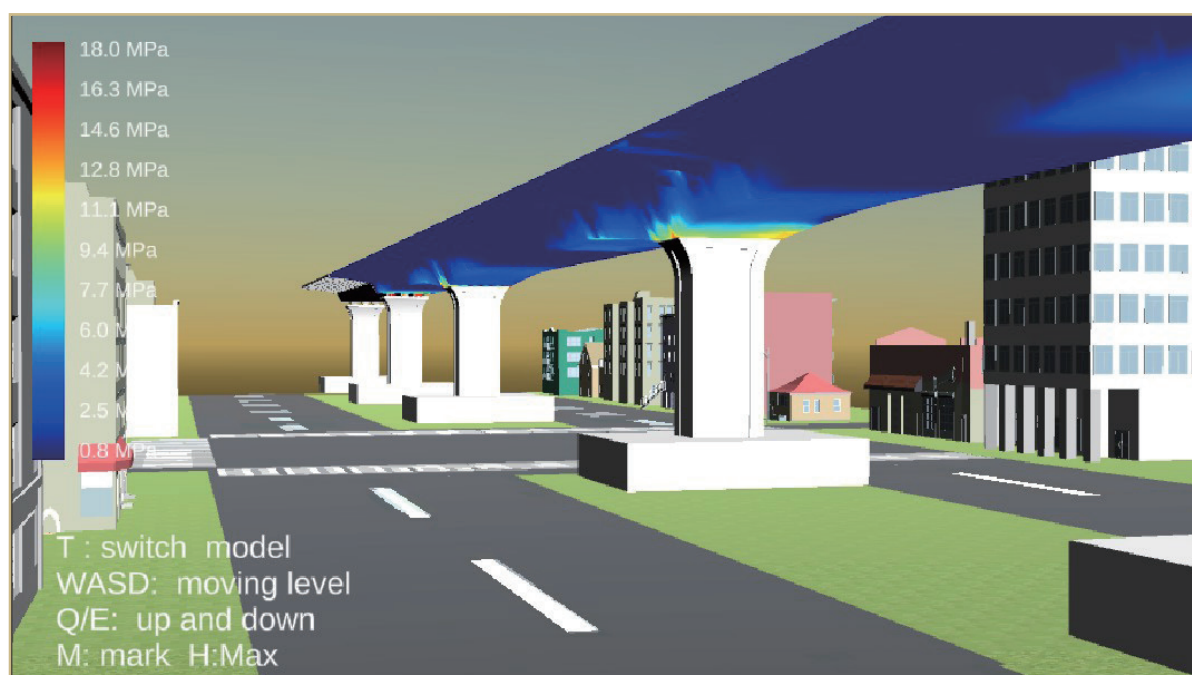


圖 26 本研究 Unity 三維視覺化應力雲圖

靜態數值表格，更有助於辨識局部高應力區、裂縫敏感區與扭轉效應集中位置。

對橋梁數位孿生而言，Unity 平台之價值不僅在於圖形展示，更在於使分析結果具備即時互動與決策支援潛力。當使用者改變輸入條件、選取不同案例或接收新感測資料時，平台可快速更新橋梁應力分布狀態，形成由資料輸入、模型推論到視覺化輸出之循環流程。此一功能亦使本研究之數位孿生平台，由單純之離線分析成果展示，進一步發展為可操作、可更新之結構狀態展示系統。

五、本研究平台之整體意義

綜合上述流程，本研究建構之平台可概括為「ANSYS 批次分析生成資料 → 自動匯出訓練樣本 → PyCharm 訓練代理模型 → Unity 即時可視化展示」四個主要階段。此一架構中，ANSYS 有限元素模型負責提供高精度力學結果，批次腳本與匯出機制負責建立可訓練之資料集，深度學習模型負責近即時推論，而 Unity 則負責將推論結果轉化為可理解之三維結構反應畫面。

因此，數位孿生平台之重點，不在於單一軟體之功能展示，而在於建立不同工具之間可相互銜接之技術流程。對橋梁工程應用而言，此流程可作為後續擴充至即時感測資料輸入、長期監測資料更新、疲勞熱點預警與維護決策支援之基礎架構，亦使有限元素分析、深度學習與可視化介面之整合更具工程實用性。

陸、結論

本研究以國道 1 號漁港高架三跨連續懸臂箱型橋梁為研究對象，建立三維有限元素

模型，並結合現地載重試驗、靜態與動態分析、深度學習代理模型及 Unity 可視化平台，完成橋梁動態反應分析與數位孿生技術初步建置。整體研究流程由 ANSYS 高精度有限元素模型產生分析資料，再透過 PyCharm 環境進行資料整理與代理模型訓練，最後將預測結果導入 Unity 平台進行三維應力視覺化展示。依據本研究分析結果，可歸納以下結論。

一、本研究所建立之三維有限元素模型可合理反映實橋受力行為

由靜態輕載、靜態重載與動態載重試驗比對結果可知，有限元素模型與現地量測結果之差異大多可控制於工程可接受範圍內，顯示模型在整體剛度、支承條件與載重反應上具有合理性。因此，該有限元素模型可作為後續動態放大分析、扭轉效應探討與數位孿生高精度資料生成之基礎模型。

二、靜態扭轉分析結果顯示，車輛偏載會明顯改變箱型梁斷面之局部剪應力分布

相較於對稱載重情境，非對稱車載配置會使偏載側腹板及鄰近構件承受較高之剪應力與扭轉作用，部分位置之放大係數明顯大於 1。此結果顯示，若僅以對稱載重進行箱型梁安全檢核，可能低估實際營運狀態下外側車道偏載所造成之局部不利效應。

三、動態分析結果顯示，車行方向之 Z 軸正向應力放大主要反映一般車橋互制與路面粗糙度所引致之動態效應

放大程度多落於約 1.10 至 1.30 範圍內，整體仍屬可預期之動態放大反應。然而，橫向 X 軸正向應力在非對稱載重情境下呈現較明顯之放大趨勢，部分控制點之放大係

數可超過 1.5，顯示偏載所引致之扭轉與翹曲效應對局部構件應力具有較高敏感性。此結果指出，橋梁動態安全評估不宜僅以垂直向或縱向動態放大作為判斷依據，亦應考量橫向扭轉放大對腹板、翼板及加勁梁附近局部應力之影響。

四、深度學習代理模型可有效近似 ANSYS 有限元素分析結果，具備作為數位孿生快速推論核心之潛力

本研究以 4,096 組有限元素分析案例建立資料集，並採用 80% 訓練、20% 驗證之方式進行模型訓練與正確性檢核。驗證結果顯示，CNN 代理模型之 MAE（平均絕對誤差）為 0.003080 MPa，RMSE（均方根誤差）為 0.009050 MPa， R^2 （決定係數）為 0.99991，皮爾森相關係數為 0.99996，整體表現優於 MLP 基準模型。進一步檢視最大主應力預測結果，CNN 對最大主應力之平均誤差百分比約為 0.412%，且所有驗證案例之最大應力誤差皆可控制於 5% 以內，顯示其對全域最大主應力分布與局部高應力區域具有良好預測能力。

五、CNN（卷積神經網路）與 MLP（多層感知器）兩種代理模型之比較

結果顯示，加入 voxel（體積像素）空間特徵有助於提升橋梁應力場之預測精度。MLP 模型主要依據六維參數進行表格式映射，而 CNN 模型除使用六維參數外，亦將載重作用區域轉換為具空間意義之 voxel（體積像素）輸入，使模型能進一步學習載重位置與應力分布之關聯。由於橋梁應力反應具有明顯空間分布特性，CNN 架構較能捕捉局部高應力區與整體應力場變化，因此更適合作為本研究數位孿生平台之代理模型。

六、Unity 平台之建置使有限元素分析與深度學習預測結果具備即時視覺化與互動展示能力

本研究將節點應力結果映射至三維橋梁模型中，並透過色階方式呈現低應力區、高應力區及可能之應力集中位置。相較於傳統表格或單張應力圖，Unity 可視化平台可提供更直觀之結構狀態展示，並可作為後續整合感測資料、即時更新、疲勞熱點辨識與安全預警介面之基礎。此結果說明，有限元素分析、深度學習與三維視覺化平台之整合，具備發展為橋梁數位孿生系統之可行性。

本研究完成由有限元素高精度建模、車橋動態與扭轉效應分析、深度學習代理模型訓練，到 Unity 數位孿生平台展示之初步整合流程。研究成果顯示，有限元素模型可用於建立可靠之力學資料來源，深度學習代理模型可大幅降低即時推估所需之計算成本，而 Unity 平台則可將分析結果轉化為可視化、可互動之橋梁狀態資訊。未來若能進一步導入長期監測資料、實橋感測回饋、疲勞累積分析與模型持續更新機制，將可提升本平台於橋梁維護管理、損傷預警與防災決策支援上之工程應用價值。

參考文獻

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI (2019).
2. Ayeni, J.A., "Convolutional Neural Network (CNN): The Architecture and

Applications," *Applied Journal of Physical Science*, Vol.4, No.4, pp.42-50 (2022).

3. Dan, D.H., Y.F. Ying, and L.F. Ge, "Digital Twin System of Bridges Group Based on Machine Vision Fusion Monitoring of Bridge Traffic Load," *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.11, pp. 22190-22205 (2022).

4. Deng, L. and C. S. Cai, "Identification of Dynamic Vehicular Axle Loads: Theory and Simulations," *Journal of Vibration and Control*, Vol.16, No.14, pp.2167-2194 (2010).

5. Frýba, L., *Dynamics of Railway Bridges*, Thomas Telford, London (1996).

6. International Organization for Standardization, *Mechanical Vibration—Road Surface Profiles—Reporting of Measured Data*, ISO 8608:2016, Geneva, Switzerland (2016).

7. Jiang, F., et al., "An architecture of lifecycle fatigue management of steel bridges driven by Digital Twin," *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol.8, No.2, pp.187-201 (2021).

8. Kang, J.S., K. Chung, and E.J. Hong, "Multimedia knowledge-based bridge health monitoring using digital twin," *Multimedia Tools and Applications*, Vol.80, No.26-27, pp.34609-34624 (2021).

9. Kaveh, H. and R. Alhajj, "Advancing Civil Infrastructure with Digital Twins: A Review of Applications and Challenges," *Journal of Civil Engineering and Management*,

Vol.31, No.8, pp.828-842 (2025).

10. Lalthlamuana, R. and S. Talukdar, "Dynamic Response of Bridge Subjected to Eccentrically Moving Flexible Vehicle: A Semianalytical Approach," *Shock and Vibration*, Vol.2014, Article 546156 (2014).

11. LeCun, Y., L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition," *Proceedings of the IEEE*, Vol.86, No.11, pp.2278-2324 (1998).

12. Nieborowski, S., et al., "Digitaler Zwilling Brücke in Betrieb-Mögliche Anwendungsfälle," *Bautechnik*, Vol.100, No.2, pp.86-93 (2023).

13. Rumelhart, D.E., G.E. Hinton, and R.J. Williams, "Learning Representations by Back-Propagating Errors," *Nature*, Vol.323, No.6088, pp.533-536 (1986).

14. Song, H.H., et al., "Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering," *Automation in Construction*, Vol.147 (2023).

15. Tao, F., J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.94, No.9-12, pp.3563-3576 (2018).

16. Thakur, A., S.K. Biswas, S. Majumdar, and D.M. Thounaojam, "A Comprehensive Review on Different CNN Architectures," *Proceedings of the 2025 3rd International*

Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT), pp.1997-2004, IEEE (2025).

17. Upreti, A., "Convolutional Neural Network (CNN): A Comprehensive Overview," International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, Vol.3, No.4, pp.488-493 (2022).

18. Yang, Y. B. and J. D. Yau, "Vehicle-Bridge Interaction Element for Dynamic Analysis," Journal of Structural Engineering, Vol.123, No.11, pp.1512-1518 (1997).

19. Yang, Y., Y. Zhu, and C.S. Cai, "Research Progress and Prospect of Digital Twin in Bridge Engineering," Advances in Structural Engineering, Vol.27, No.2, pp.333-352 (2024).

20. Ye, C., L.J. Butler, B. Calka, M. Iangurazov, Q. Lu, A. Gregory, M. Girolami, and C. Middleton, "A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring," Structural Health Monitoring 2019, Vol.1, pp.1619-1626 (2019).

工程顧問公司知識作業的 範式轉移——以 AI 驅動知識 萃取技術革新

關鍵詞 Keywords

- # 檢索增強生成 Retrieval-Augmented Generation (RAG)
- # AI 代理技能 Agent Skills
- # 代理型 AI 驅動開發平台 AI Agent Developer Platform
- # 知識萃取 Knowledge Extraction
- # 工具封裝 Tool Encapsulation
- # 工程 Skills Engineering Skills

台灣世曦工程顧問股份有限公司 BIM 整合中心

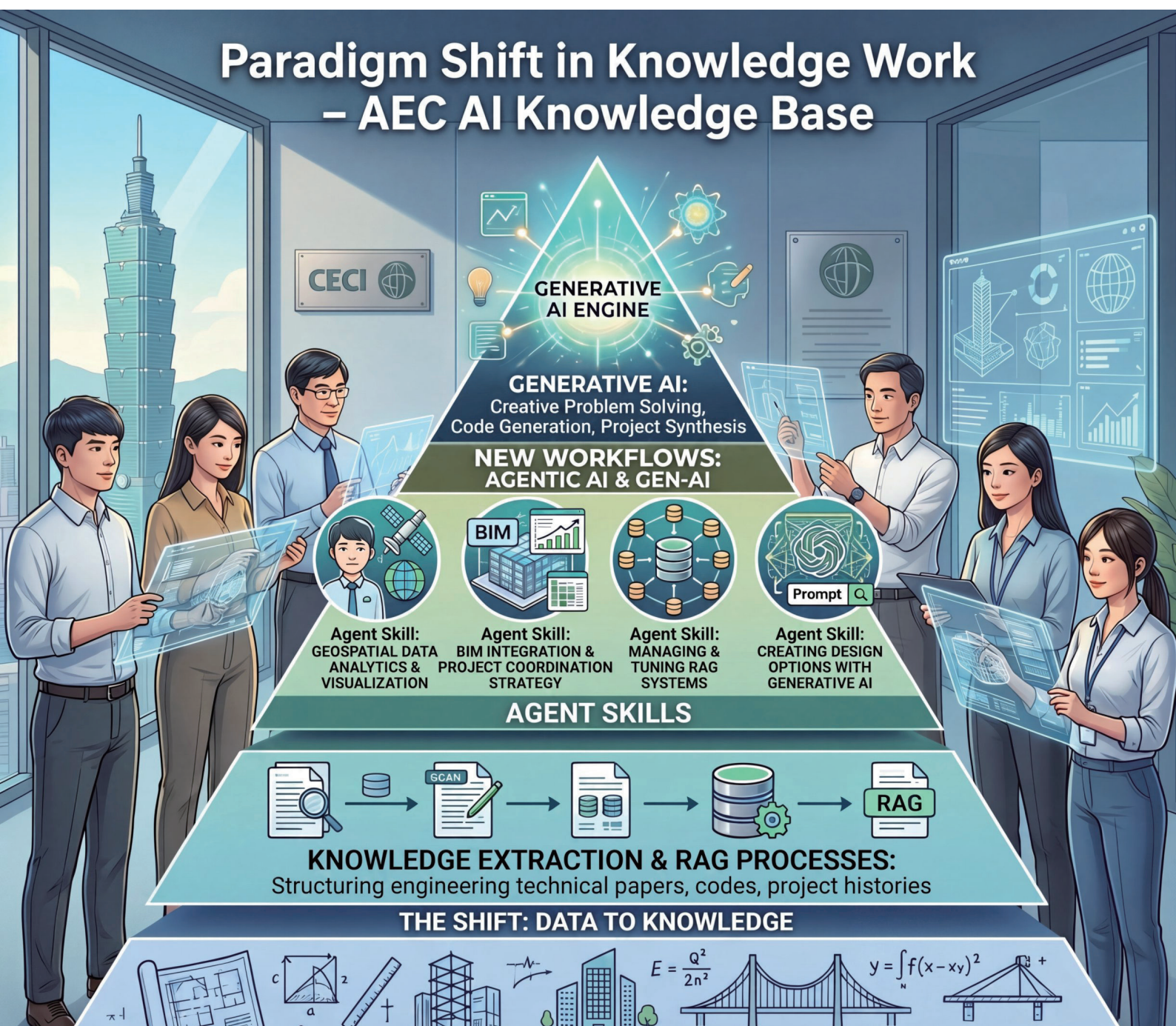
副理
蘇瑞育

工程顧問公司的知識管理長期以文件保存、目錄分類與人工檢索為主，但工程知識本質上具有跨專業、跨情境與高度推理導向的特性，使傳統做法難以支援研發成果再利用與實務決策。

本文以工程顧問公司之 AI 知識庫建置為個案，分析工程顧問公司如何透過生成式 AI、檢索增強生成、知識圖譜、Agentic AI（代理型 AI）與 Agent Skills，將年度研發成果、技術報告、程式源碼與專家經驗轉化為具備執行力之工程職能——工程 Skills。

研究材料為 2025 年各部門提案研發計畫後納入 RAG 知識庫的 23 項研發成果，涵蓋 AI 與前瞻科技應用、基礎設施韌性與防災、工程系統與專業自動化，以及永續發展、營建工法與品質管理等四大領域。

本文主張，工程 Skills 之所以會帶來知識作業的範式轉移，在於其將原本停留於文件中的專業知識，轉化為可標準化、可部署、可組合與可迭代的能力模組，使工程顧問公司的知識作業重心由「保存與查找」轉向「萃取、部署、協作與優化」。在此基礎上，研發成果可被持續萃取為工程 Skills，進一步供代理型 AI、Agent 驅動型開發平台與自動化工具學習與調用，支援工程分析、方案研擬、成果審查與系統開發，並形成跨領域知識整合與企業複合式成長的新機制。



壹、緒論

工程顧問產業的核心知識資產不光是文件本身，而是蘊含於報告、模型、法規、案例與專家經驗中的判斷能力。近年的研究指出，AI 導入知識管理後，組織競爭力的關鍵不再只是資料保存，而在於知識能否被創造、流動、擴散與再利用。對工程顧問公司而言，如果知識仍停留在文件層，則專案經驗與研發成果很難穩定轉化為企業可運用的知識。

知識庫的核心是大型語言模型、RAG 檢索技術、代理型 AI 與非結構化文件理解技術的整合系統，為工程知識轉譯提供了新的技術基礎。然而，真正的關鍵問題在於如何建立符合工程顧問公司 AI 應用之知識庫，如何把工程知識由可閱讀的內容轉為可調用的能力。本文將這一能力形式稱為工程知識 Skills，並透過實作驗證其是推動工程顧問公司知識作業轉型的核心機制。

本文聚焦一個核心問題：為何工程知識 Skills 會為工程顧問公司知識作業帶來範式轉移？本文的基本論述是，工程 Skill 化至少帶來四個改變。第一，它將工程知識由靜態文件資產改寫為可被代理調用的動態能力資產。第二，它讓跨部門、跨專案與跨專業的知識得以用標準化格式累積與重用。第三，它讓知識能直接進入流程執行、系統開發與決策支援，而不再停留於檔案保存。第四，它將專家經驗由個人依賴轉為組織可治理資產，重塑工程師角色與企業知識成長模式。

從產業競爭角度看，這項轉型也具有急迫性。國際大型工程顧問公司已將 AI 納入

治理、平台與交付模式重構。上述趨勢顯示，國際領先企業已將 AI 從輔助層次提升至治理與交付層次。

AECOM 在 2025 年年報中揭露 AI 治理政策、超過 200 名 AI 相關專業人員，以及 AI for Engineering 平台，並表示其平台有助於材料節省與效率提升。WSP 於 2025 年宣布與 Microsoft 建立為期 7 年、潛在超過 10 億美元的策略合作，以推進 AEC 產業數位化並解鎖工程知識資產。Jacobs 於 2026 年發布面向 AI 資料中心的數位孿生解決方案，而 Arcadis 亦在 2025 年年報中將自動化、數位工程交付及 AI 納入企業成長主軸。這些公開動向顯示，AI 已不再只是輔助工具，而是未來工程顧問公司的競爭力的問題。

貳、AI 技術在工程顧問業發展脈絡

近兩年的研究顯示，AI 與知識管理的結合已由輔助搜尋轉向組織知識創造、知識管理系統升級與企業創新能力重構。關於 AI 轉化企業知識創造的系統性回顧指出，AI 已被用來促進顯性與隱性知識之間的轉換，並推動知識生成與更新。關於 AI 與知識管理系統整合的回顧則指出，企業的核心課題已由導入工具，轉向流程治理、知識整合與數位轉型。AI 效能外溢化能為工程顧問公司提升創新表現及生產力增長效果。

在代理型 AI 層面，近期研究已清楚區分一般對話式模型與具規劃、記憶、工具調用及自我改進能力的代理系統。相關綜述

指出，代理系統的核心價值在於將模型嵌入任務執行鏈，而代理生成本身也可被系統化。在知識檢索領域中，檢索增強生成（RAG）與非結構化文件分析的研究一致指出，企業對多樣化知識格式的穩定處理能力，已成為實現知識資產重用（Knowledge Reuse）的核心關鍵。

就建築土木工程顧問產業應用而言，生成式 AI 研究已由單點功能逐步走向工作流程導向。相關研究顯示，AI 已可進入設計、文件生成、知識導引審查、指令建模與設計作業工作流程。近兩年的研究與產業動向共同指向同一件事：工程顧問公司將面臨整體知識作業重構的問題。



參、台灣世曦 AI 知識庫發展背景及知識作業流程

本文研發基礎是基於台灣世曦 2025 年內部研發計畫——AI 知識庫成果為基礎，該研發計畫重點在如何重構工程顧問公司的知識作業流程，如何將知識文件向量化——檢索增強生成 RAG，以提升 AI 檢索知識及

回應正確率。研究成果包括前端工作台、後端服務模組、核心資料型別與 AI 代理的操作邏輯，可參考圖 1 文件向量化與圖 2 工程圖說向量化介面。

知識來源方面，本研究聚焦於 2025 年各部門提出後納入知識庫的 23 項年度研發計畫（排除機密計畫）。這些計畫橫跨四大領域：

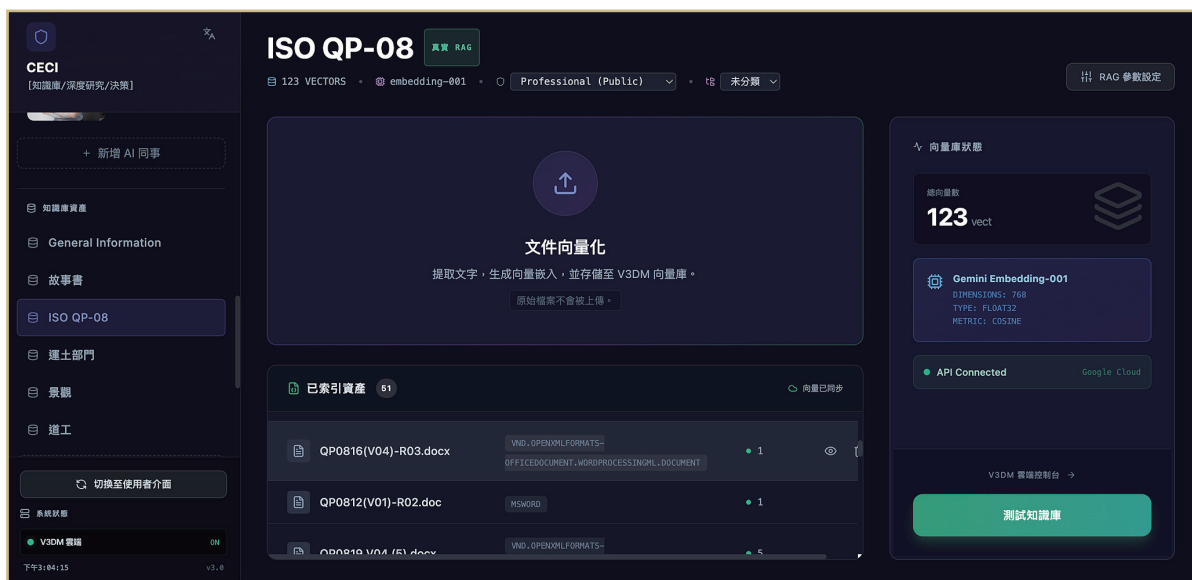


圖 1 台灣世曦 114 年度研發計畫 AI 知識庫中文件向量化介面

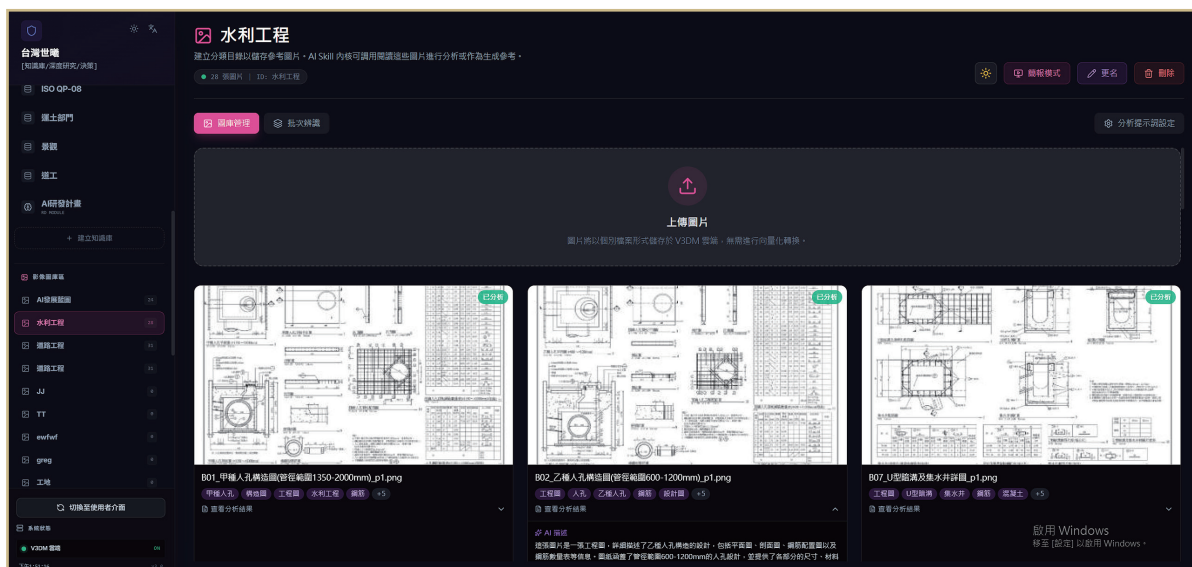


圖 2 台灣世曦 2025 年研發計畫 AI 知識庫中工程圖說向量化介面

AI 與前瞻科技應用 10 項、基礎設施韌性與防災 6 項、工程系統與專業自動化 3 項，以及永續發展、營建工法與品質管理相關計畫。代表主題包括橋梁耐震與損傷模擬、岸線變遷預測、AI 輔助公路設計、交通景觀評估、數位孿生、洪水與土砂風險、港灣模擬、電力分析平台與 ESG 平台等。

本研究導入「知識工具封裝 (Tool Encapsulation)」之概念。所謂知識工具封裝，係指將專家隱性知識 (Tacit Knowledge) 透過知識萃取轉化為結構化知識，進而生成可執行之智慧體技能 (Executable Agent Skills)。

在工程顧問公司 AI 知識庫基礎之上建構 AI 技術媒合檢索中心，係將工具封裝概念應用於工程知識領域之嘗試。前端整合知識庫管理、AI 技術媒合檢索中心、技術分析報告、Skills 市場與已訓練程式庫；後端則整合技術分析、Skill 合成、品質稽核與代理人具現化等服務。

肆、AI 技術媒合檢索中心為核心與工程知識萃取流程

AI 技術媒合檢索中心模組架構可概括為三層：知識與資產層、轉譯與治理層，以及應用層。知識與資產層包括研發技術模組、技術分析報告、Skills 市場與已訓練源碼庫；轉譯與治理層包括 RAG、技能合成器 (Skill Synthesizer)、品質審查與代理人服務；應用層則以 AI 技術媒合檢索中心為核心，如圖 3 所示 AI 技術媒合檢索中心模組整體架構圖。透過此分層架構，使知識來源、轉譯與應用得以在單一系統中整合，有效避免工具切換導致之資訊斷層。平台的關鍵不在單一模型，而在知識轉譯引擎。相關服務使工程知識能由原始報告進入分析、封裝、稽核與部署流程，並讓知識作業流程與開發流程被標準化。

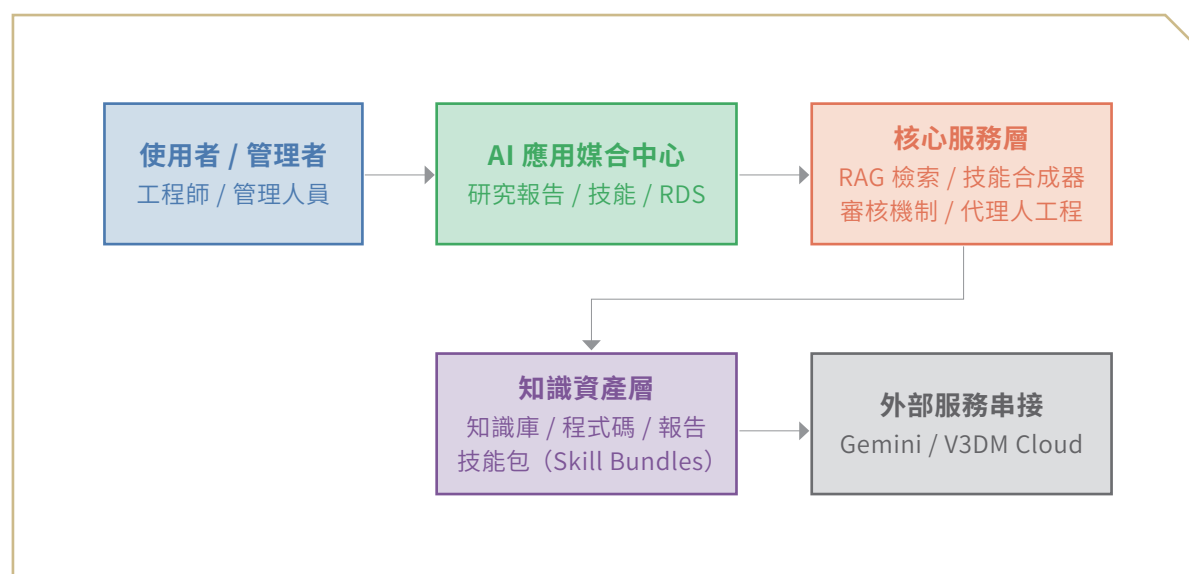


圖 3 AI 技術媒合檢索中心模組整體架構圖

伍、研發成果轉工程 Skills 的方法

Anthropic 公司為首家發表 Agent Skills AI 技能標準之企業，Agent Skills 可供代理系統在需要時載入的模組化能力。Claude API (Anthropic 公司的 AI 開發工具) 官方文件指出，Agent Skills 是封裝指令、元資料及可選資源與腳本的能力模組；其結構至少包含始終載入的 YAML 元資料、觸發時載入的 `SKILL.md`，以及按需存取的資源與程式碼。這種分層式載入機制，非常適合資料量大、規則密集且高度情境化的工程知識。

在本研究中，研發計畫成果轉工程 Skills 至少包含七個步驟：文件匯入與解析、

技術潛力分析、技術分析報告生成、Skill 候選主題確認、Skill Bundle 合成、品質稽核，以及發布到 Skills 市場與 Agent Factory。平台不是把工程知識壓縮成短提示，而是將研發計畫報告成果，轉譯為代理可理解、可調用且可驗證的 Agent Skills 結構，並且可不斷迭代優化萃取方法，工程 Skills 生成方法詳見圖 4。

在這個過程中，Skill 不只是產物，也是標準化流程的載體。研究計畫、分析報告、驗證邏輯與部署說明被封裝於同一能力包中，使 AI 參與知識作業與系統開發的方式由臨時問答轉為可繼承、可審核、可重複

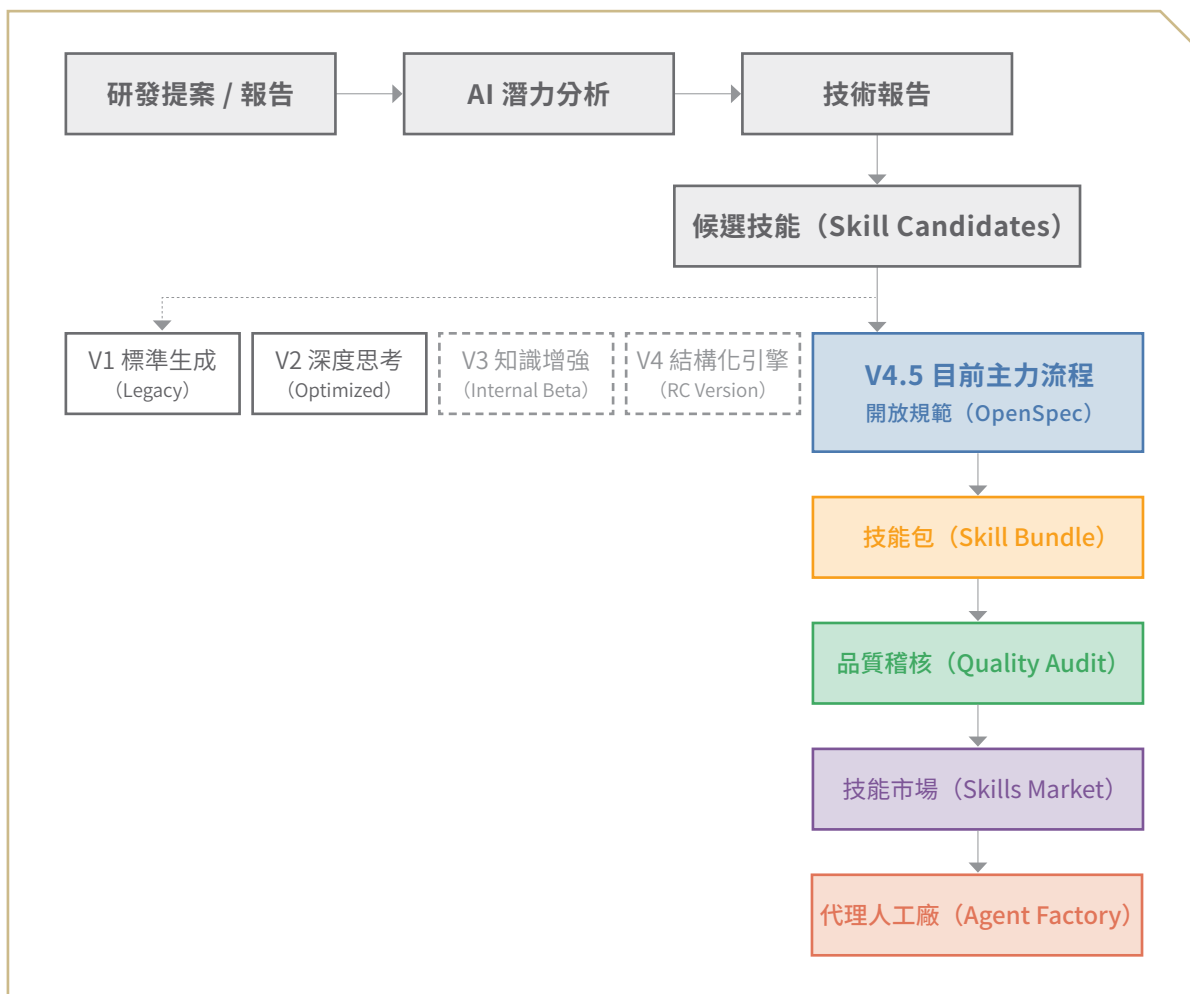


圖 4 工程 Skills 的生成方法

執行的作業規格。真正的創新不在於建立 Skill 容器，而在於建立一套將研發成果報

告轉為工程知識 Skills 的方法，生成工程 Skill 的模組介面參考圖 5。

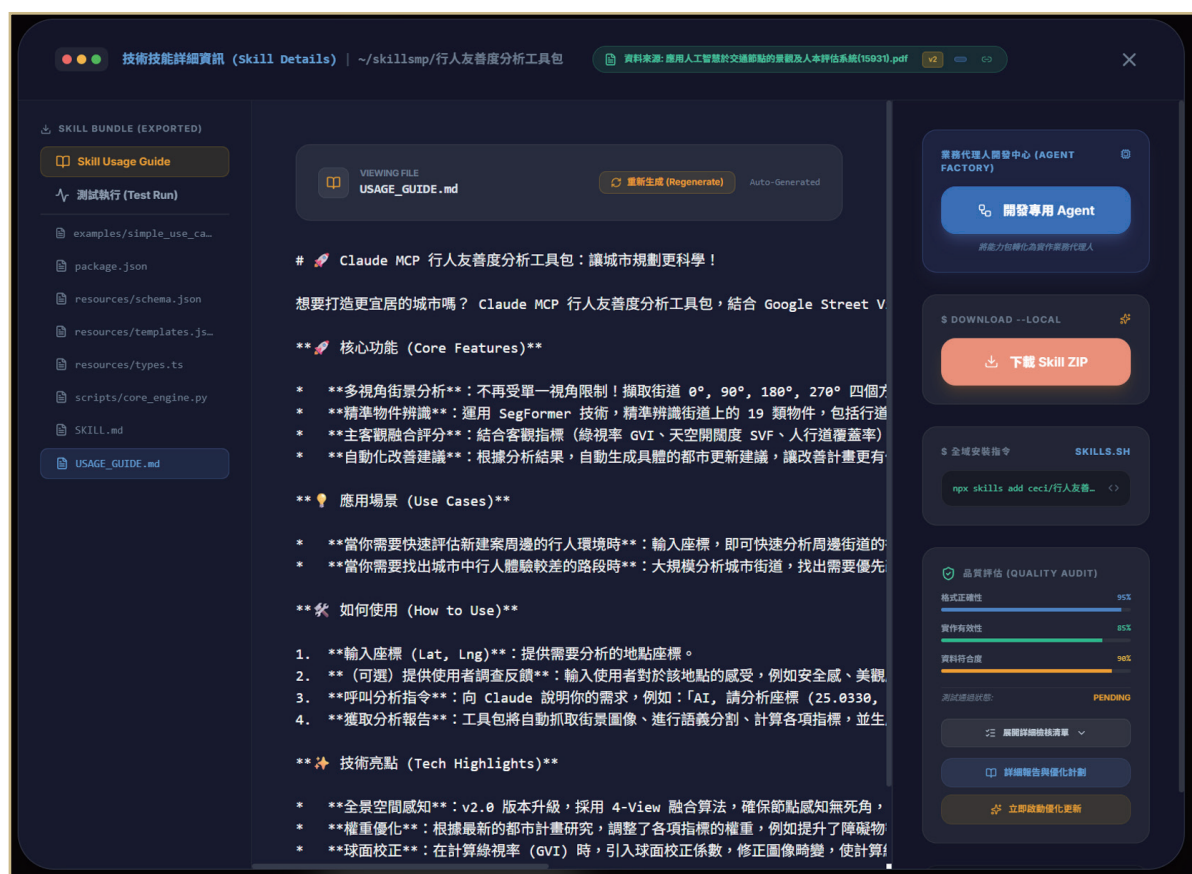


圖 5 工程 Skills 生成介面

陸、工程 Skills 的實作應用與落地成效

工程知識 Skills 的價值，在於其已開始進入實際工作流程。研發成果先被轉為可驗證的工程 Skills，再由代理型 AI、Agent 驅動型開發平台與自動化工具載入，進一步支援工程分析、方案研擬、報告研究、成果審查與修正。這使 Skills 由知識封裝成果，進一步成為可驅動實務作業的工作單元。

就工程顧問公司的應用方向而言，Agent

Skill 最直接帶來的改變，是流程自動化與效能飛躍。許多原本高度依賴人工的工作，可以轉為由代理型 AI 主動執行。例如，衝突檢測可由 Agent 自動掃描模型並標記異常；法規比對可由 Agent 自動進行條文對照與合規性檢查；物料清單則可由 Agent 讀取模型資料後自動生成數量表與基本估算。這些工作過去往往占用大量高階工程人力，且容易因資料量龐大而產生遺漏；在 Skill 化之後，工程師可將更多時間投入判斷、審查與方案優化，而非停留在反覆性的人工處理。

為了更具體說明上述概念，我們以「橋梁耐震設計與初期可行性評估」的研發場景為例，檢視工程 Skill 如何在實際業務中落地，發展為橋梁耐震 AI 評估工具包，參考圖 6，網站可快速設定橋梁上構、下構、載重、地震波等參數，透過橋梁損傷理論進行快速分析，動態模擬生成橋梁震動及損傷 SVG 圖及損傷狀態模擬圖。

在傳統的工程研發與概念驗證（POC）流程中，必須使用 SAP2000 或 Midas 等專業軟體進行模型建立、分析運算與結果整理，往往需要耗費數天至數週的迭代時間。此外，傳統研發成果多半以數百頁的工程計算書呈現，非專業的專案主辦難以理解複雜的數據，導致許多創新概念的驗證往往需要長達一年的時間才能看出成效，甚至

結構週期 (T) [秒] 0.8 **韌性比 (R)** 4.5

材料強度 (MATERIAL)

RC 強度 (F'c) [KG/CM2] 210 鋼筋強度 (FY) [KG/CM2] 2800

下部結構 (SUBSTRUCTURE)

結構類型 橋墩 (Pi) 截面類型 矩形 RC

橋柱 (COLUMN)

橋柱高度 (H) [MM] 4000 寬度/厚度 (W) [MM] 600

長度/總寬 (L) [MM] 1000 縱向面比 0.015

蓋梁 (CAP BEAM)

長度 [MM] 10000 寬度 [MM] 2000 高度 [MM] 1500

上部構造 (DECK INFO)

跨徑 [M] 20 淨寬 [M] 12 板厚 [M] 0.25

地震情境設定

PGA (G) 0.25 分區 一般場址

☒ 近斷層效應 (Near-fault Effect) ☐ 脈衝效應 (Pulse Effect)

啟動耐震 AI 分析序列

計算追蹤 (CALCULATION TRACE)

總質量 (Total Mass): 240.5 Tons
地震需求力 (Demand): 152.2 Tons
結構抗震容量 (Capacity): 52 Tons
反應位移放大係數: x2.53

AI 視覺化邏輯 (MAPPING LOGIC)

Input DI: 1.711

IF DI < 0.11 THEN Grade I; IF 0.11 ≤ DI < 0.4 THEN Grade II; IF 0.4 ≤ DI < 0.77 THEN Grade III; ELSE Grade IV.

診斷結論 (CONCLUSION)

倒塌 (GRADE IV)

動態損傷模擬

SVG PHYSICAL DYNAMICS

DI: 1.711

RESIDUAL

STRUCTURAL FAILURE / COLLAPSE (GRADE IV)

CRITICAL STRUCTURAL FAILURE, REBAR BUCKLING DETECTED.

AI 損傷視覺化合成目標

AI 實時生成：物理特徵合成

PARAMETRIC LOGIC VIA STRUCTURAL ENGINE

系統日誌 (SYSTEM_LOG): 影像提示詞生成

圖 6 橋梁耐震 AI 評估工具包——損傷計算及影像生成

在耗費大量時間與沉沒成本後，才發現方案不具可行性。

透過導入「Agent-First」架構並將高階工程知識轉化為具體的 Agent Skills，具備 AI 開發能力的工程師與 AI 代理工具及工程知識 Skill，在以下兩個核心應用場景中展現了顯著提升作業效能：

一、「參數化敏捷迭代」Skill 的落地（設計研發的效率革命）

透過網頁端融合分析引擎取代傳統繁瑣的軟體操作流程，工程師只需調用「參數化評估 Skill」，系統便能自動進行毫秒級的邏輯運算（如彎矩 / 剪力應力分布圖生成）。這使得設計收斂時間從「數週」驟降至「小時等級」。在一個下午內，研發工程師即可完成 10 種以上方案的快速比選，找出安全

性與經濟性的黃金平衡。這種 AI 敏捷式開發賦予了團隊「快速大量試錯」的能力，使研發概念驗證的速度從「1 年大幅縮短至 1 個月」，甚至讓研發成果至市場應用的時間壓縮至數週，大幅提升商業競爭力。

二、「抽象數據直覺轉譯」Skill 的落地（溝通決策的視覺衝擊）

研發成果若僅停留在抽象數據，難以發揮商業價值。透過結合 3D WebGL 即時渲染與生成式 AI 技術的「視覺轉譯 Skill」，代理系統能自動將生硬的結構損傷指標（如 $DI=0.8$ ）轉化為擬真的 3D 破壞影像模型，如圖 7 所示。這種將「抽象數據」轉化為「直覺感知」的應用，在初期精準避險與預算爭取上具備極高的說服力。「眼見為憑」的衝擊力加速了方案拍板，有效避免了後期修改所產生的巨大沉沒成本。

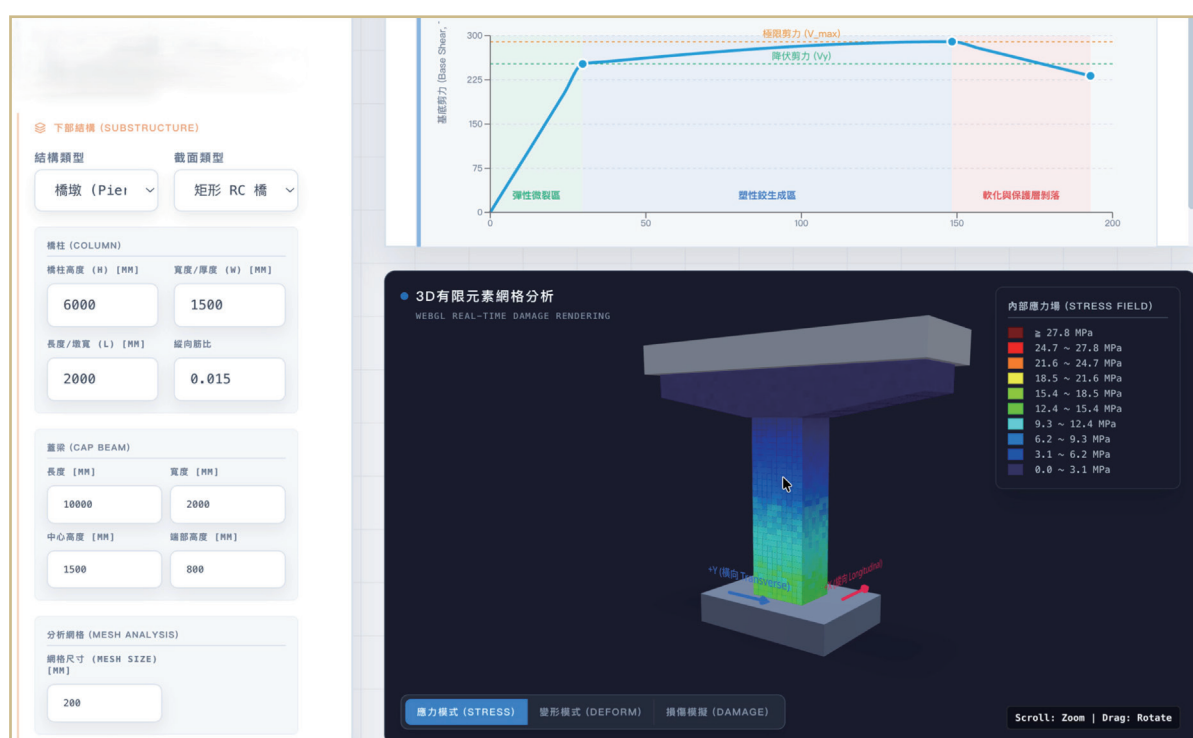


圖 7 橋梁耐震 AI 評估工具包 3D 應力應變模擬功能

柒、企業知識治理與組織轉型影響

工程知識 Skills 之所以構成知識作業的範式轉移，原因在於它同時改變了知識的存在形式、流通方式、應用場景與組織邏輯。Skill 化之前，工程知識多半以報告、圖說、模型與個人經驗形式存在；工程知識 Skill 化之後，這些知識被轉為可被調用、組合、迭代與治理的能力模組。知識作業因此不再只是「資料檢索、文件閱讀與專家諮詢」，而是進一步進入「萃取能力、部署能力、協同能力」的新階段。

這種轉型首先回應了工程顧問公司長期存在的兩個問題：知識孤島，以及非結構化資料難以標準化與重用。當研究報告、會議紀錄、模型、程式與個人經驗被萃取為工程 Skills 後，知識便能從「可閱讀」進一步成為「可調用」。同時，Skills 市場、源碼庫、技術分析報告與代理人開發中心被放在同一平台後，知識內容、實作邏輯與對外服務不再分離，而是形成一條連續的轉譯與部署鏈。

其次，Skill 標準化也開啟開放生態系統與 Skill 市集成為可能。企業內部可以累積與共享能力模組，不同團隊也能針對特定專業場景發布與評價專用 Skill。不同 Skill 還可串接為組合式工作流程，例如建模、衝突檢測、法規比對到成本估算的連續流程。

第三，工程知識 Skills 使企業得以形成持續演進的知識循環。企業先以年度研發成果與專案經驗作為原始材料，經由平台進行工程知識萃取，生成為工程 Skills，再透過測試、實作回饋與治理機制持續迭代與管理。新的 AI 技術、分析方法與實務工程案例又可重新整合進既有 Skills，進一步

推動下一輪的應用優化。這種「萃取、生成、迭代、管理、整合、應用、再優化」的閉環，使企業知識不再只是靜態累積，而是以更快節奏完成跨領域知識整合與 AI 技術更新，從而促成複合能力持續成長。

最後，Skill 化也改變了工程師角色。工程師不再主要扮演手動編修模型、整理表單或逐項核對文件的執行者，而是成為設計 Skill、規劃流程、組合多代理協作鏈的策略者。個人專業能力藉由技能化過程得以規模化擴散與永續傳承。從組織角度看，這不只是技術自動化，而是知識傳承方式、團隊協作模式與專業角色價值的重構。

捌、結論

本文以台灣世曦 AI 知識庫及 AI 技術媒合檢索中心模組為例，說明工程顧問公司知識作業正由文件管理轉向能力管理，並由問答式 AI 走向代理型 AI。與傳統知識平台不同，該系統並非只支援知識查詢，而是建立了一條由研發技術模組、技術分析報告、Skills 市場與程式碼庫所組成的知識轉譯鏈。透過這條鏈路，研發成果得以經由 AI 分析、Skill 合成、品質稽核與代理人具現化，轉化為可被反覆調用的工程能力。

回到本文的核心論述，工程知識 Skills 將為工程顧問公司帶來範式轉移，根本原因在於它將知識從「靜態文件資產」改寫為「動態能力資產」。一旦知識可被封裝、調用、組合與迭代，企業的知識作業重心便不再是保存與查找，而是萃取、部署、協作與優化。將影響工程顧問公司累積專業能力、跨領域整合知識，以及專家經驗轉化為可持續擴張的企業級生產力。

對工程顧問公司而言，工程知識 Skills 並非附屬於知識庫的功能，而是驅動知識作業邏輯重組的核心機制。當 AI 知識庫成為基礎設施，研發成果得以持續生成工程 Skills，而這些 Skills 又能被代理型 AI、Agent 驅動型開發平台與自動化環境反覆學習、調用及進程式開發時，企業便能在知識資產之上，同步推進多個複合系統開發任務與跨專業分析工作。這也正是本文認為工程 Skills 將為工程顧問公司帶來知識作業範式轉移與複合式增長的根本原因。

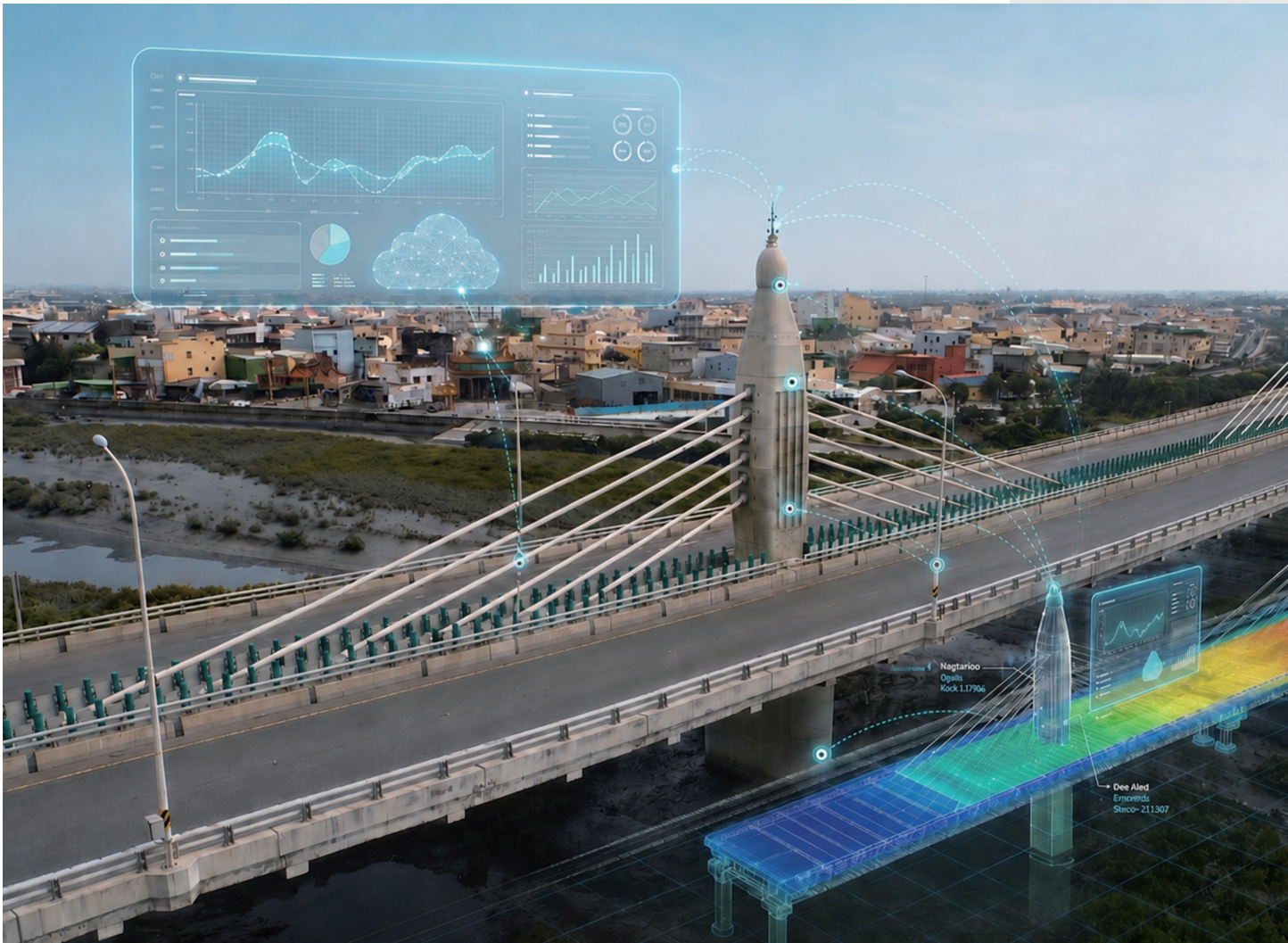
參考文獻

1. L. Wang et al., "A survey on large language model based autonomous agents," *Frontiers of Computer Science*, vol. 18, article 186345 (2024).
2. D. Edge et al., "From Local to Global: A Graph RAG Approach to Query-Focused Summarization," *arXiv preprint arXiv:2404.16130* (2024).
3. S. V. Mahadevkar et al., "Exploring AI-driven approaches for unstructured document analysis and future horizons," **Journal of Big Data**, vol. 11, article 92 (2024).
4. AECOM, "2025 Annual Report" (2025).
5. WSP, "WSP and Microsoft partner to drive digital transformation in the AEC industry," *press release* (2025.2.13).
6. Arcadis, "Annual Integrated Report 2025" (2025).

7. Anthropic, "Computer use (beta) - Anthropic API Documentation," 取自：<https://docs.anthropic.com/en/docs/build-with-claude/computer-use> (2026.5.15)。註：此為 Agent Skills 核心技術規範來源。

8. Anthropic, "Tool use (function calling) - Anthropic API Documentation," 取自：<https://docs.anthropic.com/en/docs/build-with-claude/tool-use> (2026.5.15)。註：此為定義 Skills 封裝指令與 Schema 之來源。

數據驅動橋梁數位孿生之溫度效應索力預估



本研究以脊背橋為案例，利用橋上已建置之鋼纜索力、箱梁混凝土與大氣溫度、應變、加速度及位移等監測儀器與雲端資料管理平台，建構雲端監測資料驅動之橋梁數位孿生架構。透過 Python 圖形化使用者介面串接橋梁監測平台 Web API 與 MIDAS Civil NX API，自動執行監測資料擷取、鋼纜預拉力迭代校正、溫度荷載更新、數值分析及結果比對。分析以每日清晨之量測索力與溫度建立基準模型，再依各時點之箱梁混凝土及大氣溫度變化預估全天鋼纜索力。經不同日期之比較結果顯示，模型能合理掌握鋼纜索力於一日內的整體變化趨勢，且預估結果與雲端量測資料大致吻合。結果顯示，所建立之架構可自動整合現地監測資料與數值模型，並建立即時數位孿生模型更新策略，未來可進一步導入系統識別及模型參數最佳化，以提升數位孿生之模型更新、狀態評估與預估能力。

關鍵詞 Keywords

即時數位孿生模型更新策略 Real-time Digital Twin Model Updating Strategy

雲端資料管理平台 Cloud-based Data Management

溫度荷載 Temperature Load

應用程式介面 Application Programming Interface (API)

財團法人中華顧問工程司
設施技術中心

國立成功大學
土木工程學系

正工程師

廖啓揚

主任

蔡欣局

正工程師

鐘立庭

工程師

許翊琳

正工程師

黃進國

教授

朱世禹

壹、前言

近年來，數位孿生（Digital Twin, DT）的概念逐漸被引入土木工程領域，並應用於建築與橋梁結構。透過物聯網（Internet of Things, IoT）技術蒐集結構資訊，並結合建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）所建立的幾何模型，以及施工與營運資訊交換標準 COBie（Construction Operations Building Information Exchange）彙整之設施維運資訊，有助於使設計階段建立的數位模型延續至結構完工後之營運維護階段。由於結構完工後的實際特性可能與設計階段的假設有所差異，因此有必要進一步整合竣工資訊與實際量測資料，使數位模型能夠反映結構的實際狀態。

Edirisinghe 整理並分類數位孿生相關研究，提出數位孿生未來於智慧工地中的應用方向，Zhang et al. 回顧數位孿生於智慧施工中的發展，並說明實體結構與虛擬模型之間雙向資訊傳遞的重要性。在實際工程應用方面，Ding et al. 於工業 4.0 架構下，提出結合 BIM 與物聯網技術的智慧鋼橋施工架構，著重於利用量測

資料與數位模型進行橋梁全生命週期管理。Hossain et al. 則提出整合感測器資料與行動應用程式的智慧安全管理系統，用以支援建築營運期間的即時資訊呈現與安全管理，並透過現地量測資料與 BIM 模型的連結，持續掌握結構安全狀態。

為了使數位模型能進一步反映橋梁完工後的動態行為，可結合結構健康監測 (Structural Health Monitoring, SHM) 的概念。結構健康監測主要透過感測器蒐集結構反應，並依據不同階段取得的量測資料進行系統識別。針對橋梁的長期監測，可將現地取得的振動資料經由通訊設備與雲端平台進行傳輸及處理，再將識別所得的橋梁動態特性與結構狀態回饋至數位模型中。

由於實際橋梁所承受的環境激振、風力與交通載重通常難以直接量測，因此唯輸出系統識別方法 (Output-only system identification methods) 常被應用於橋梁動態特性與模態參數的識別。Liao et al. 利用橋梁斷面模型的風洞試驗資料，分別採用協方差型隨機子空間識別法 (SSI-COV) 與資料型隨機子空間識別法 (SSI-DATA) 進行氣動力參數識別，其結果與修正亞伯拉罕時域分析法 (MITD) 具有良好一致性。相關研究顯示，唯輸出系統識別方法可利用結構量測反應識別模態頻率、阻尼比及其他動態參數，並進一步應用於橋梁動態行為分析。

透過系統識別所得的模態參數，可作為數位模型更新與結構狀態評估的依據。如此一來，BIM 不再僅用於儲存結構的幾何與相關資訊，而可進一步整合結構健康監測資料、系統識別結果與結構分析模型，使數位模型能隨實際量測結果持續更新，

逐步形成反映橋梁實際狀態的數位孿生模型。在此整合架構下，數位孿生可視為一個整合平台，用以連結 BIM 所建立的幾何資訊、結構健康監測資料及結構分析模型。其主要目的為建立能夠與實體結構保持即時或近即時同步的虛擬模型。

透過量測資料的持續更新，數位孿生除了可呈現結構狀態外，亦可進行模態參數追蹤、數值模型更新及結構性能評估。Liao 整合振動台試驗、風洞試驗與橋梁現地監測，利用不同系統識別方法分析橋梁在地震、風力及環境激振下的動態反應，並比較數值模型、實驗模型與實際橋梁之間的動態特性。該研究亦結合數位孿生模擬、數值模型更新及多尺度試驗結果，建立涵蓋設計、實驗驗證與完工後監測階段的橋梁動態研究架構，可作為橋梁數位孿生模型建立及後續性能評估的基礎。

因此，對於橋梁等大型土木結構，數位孿生可整合設計階段的數值模型、實驗階段的驗證結果及完工後的現地監測資料。透過結構健康監測、系統識別與數值模型更新，可進一步掌握橋梁在不同階段及不同激振條件下的動態行為，並提供橋梁長期監測與安全評估所需的分析依據。

貳、橋梁監測系統及模型基本資料

一、橋梁概述

本研究橋梁結構形式為三跨雙塔單索面脊背橋，全長約 230m，跨距配置為北跨 70m、中間跨 90m 及南跨 70m，如圖 1 所示。每座橋塔兩側各配置 6 束斜索，全橋共 24 束。橋面結構採預力混凝土箱型梁，配置雙向各二車道，斜索則採外置預力鋼纜系統。

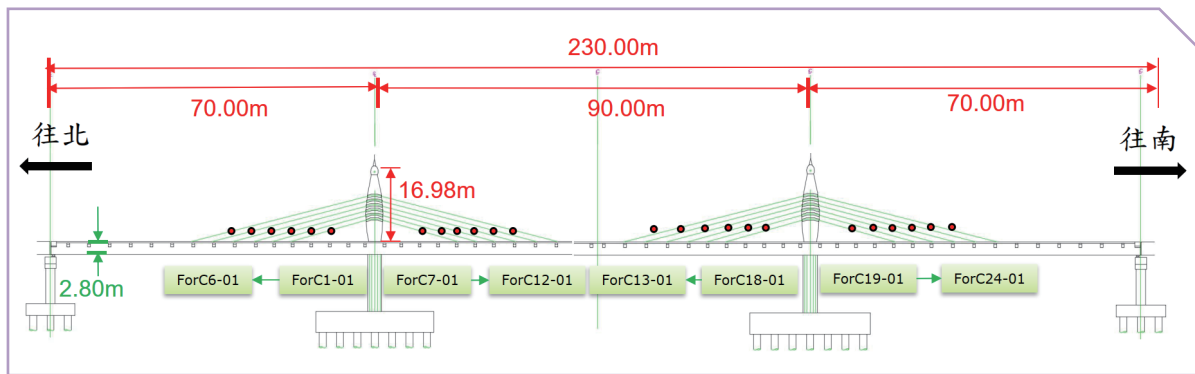


圖 1 橋梁立面、跨徑與鋼纜配置

二、監測系統與雲端平台

本橋遠端監控系統採 Web 網頁操作介面，使用者經帳號授權後，即可透過一般瀏覽器登入監測管理平台，如圖 2 所示。系統主要監測項目包括斜索索力、主梁加速度、箱梁混凝土應變、相對位移、撓度、溫度及風速等，並設置 CCTV 攝影機掌握橋梁現地狀況，各項監測儀器配置如圖 3 及圖 4 所示。

一般感測器主要透過實體線路連接至主控機箱內的動態或靜態資料擷取器，再經中央控制系統將資料傳送至雲端平台。NB-IoT 多通道無線動態應變計則採用不同的資料傳輸架構，感測器可透過電信基地台直接連接網際網路，將量測結果傳送至雲端伺服器，現場不需另外設置資料接收主機，可降低佈線需求並提升安裝及維護便利性。使用者可於雲端平台查看最新監測



圖 2 橋梁監測管理平台登入畫面

數值及歷時變化曲線，並依感測器與日期區段進行資料查詢及匯出。此外，平台可設定預警、警戒及行動值，當監測數值異

常或資料傳輸中斷時，透過電子郵件或簡訊通知管理人員。

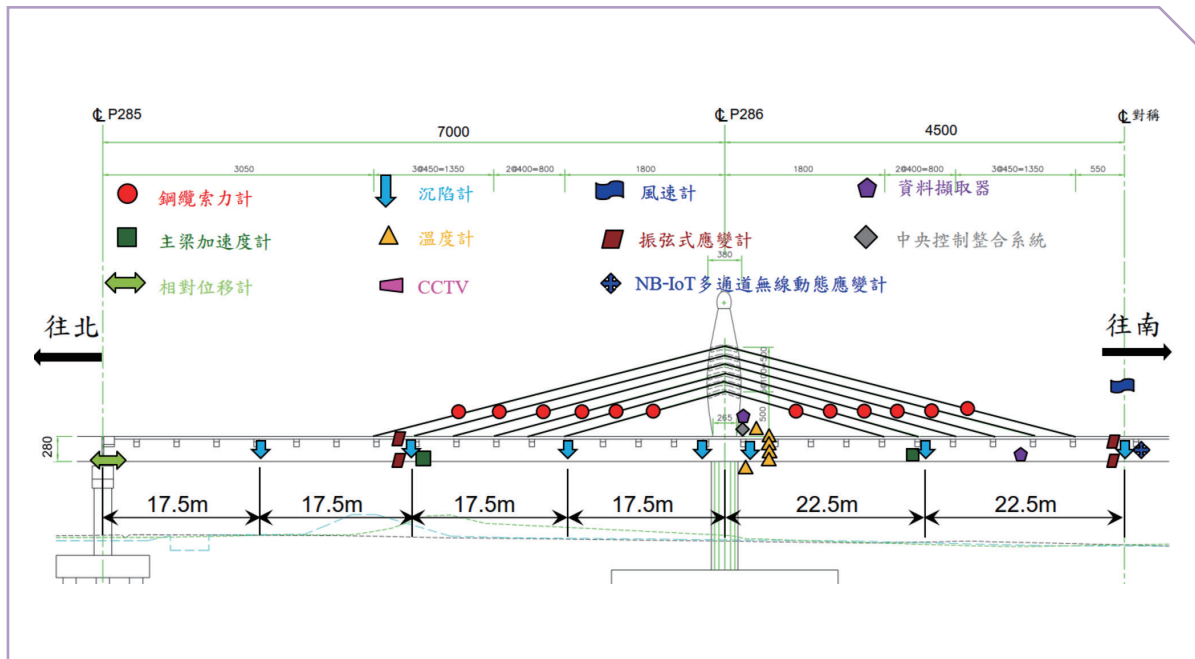


圖 3 橋梁北塔監測儀器配置

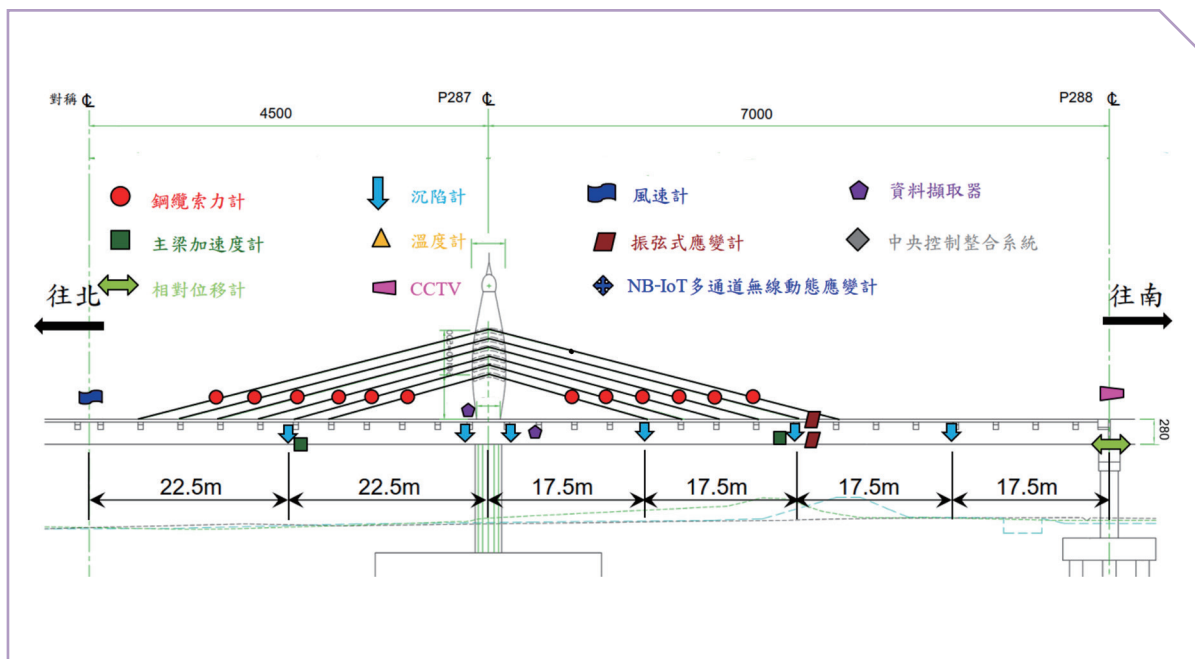


圖 4 橋梁南塔監測儀器配置

三、MIDAS 數值模型

本研究以商用有限元素軟體 MIDAS Civil NX 建立橋梁之三維數值模型。橋梁上部結構採梁元素模擬，並依竣工圖建立預力混凝土箱型梁之標準斷面、加勁斷面及橋塔漸變斷面；內置預力鋼腱與外置鋼纜則依實際配置、材料性質及施加預力進行設定。全橋共設置 24 束鋼纜，南、北橋塔各配置 12 束。模型邊界條件依支承形式設定，其中中間橋墩與上部結構固接，兩側橋墩則

以彈性連結模擬支承墊之平移勁度。

此外，模型之主梁等效勁度與整體動態特性已分別依據現地載重試驗及橋梁微振動試驗結果進行調整，使校正後之數值模型結構反應與自然頻率符合現場量測結果。分析荷載包含結構自重、預力作用及鋪面、管線等附屬結構物載重，上述模型作為後續溫度荷載分析及鋼纜索力自動預估之基礎，橋梁三維數值模型如圖 5 所示。

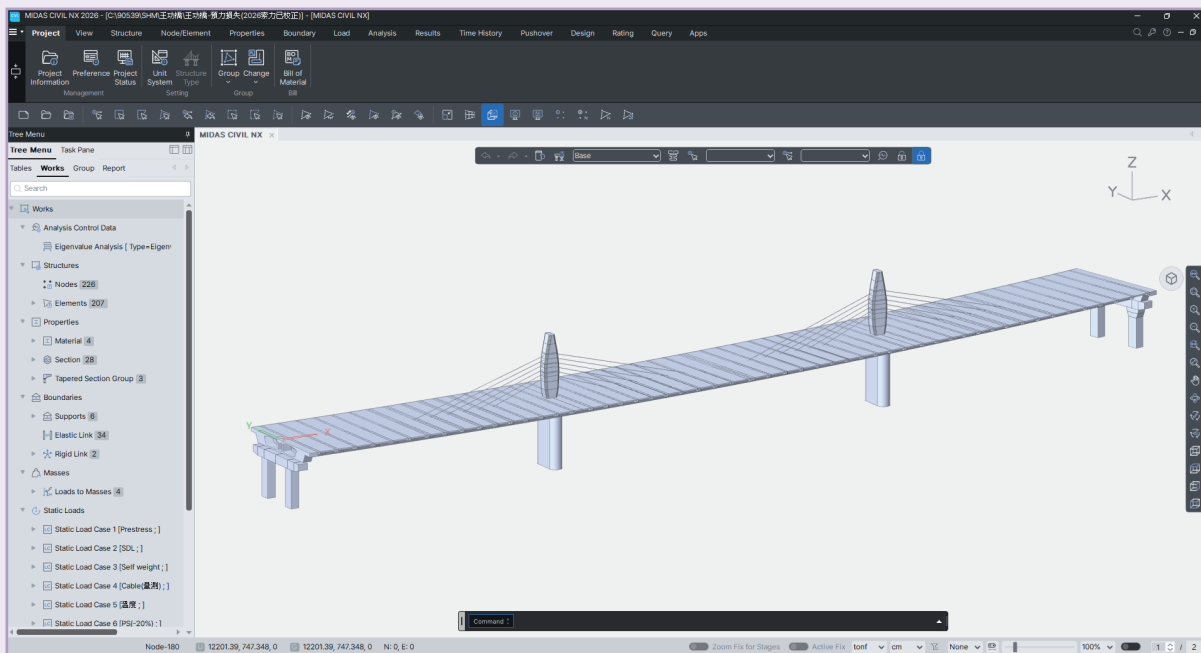


圖 5 MIDAS Civil NX 三維數值模型

參、雲端監測資料驅動之數位孿生架構與初步應用

一、橋梁數位孿生整體架構

本研究建構之橋梁數位孿生架構如圖 6 所示，主要分為「實體橋梁與監測系統」、「資

料介接與模型更新」及「虛擬橋梁與分析模型」三個部分。實體橋梁端的有線感測器，經由現地中央控制系統及 4G 網際網路傳送至橋梁監測雲端平台；NB-IoT 多通道無線動態應變計則可透過電信基地台直接將量測資料上傳雲端，形成多元監測資料的整合

來源。Python 程式為實體橋梁與虛擬模型之間的資料介接核心，透過 Web API 及工作階段 Cookie (Session Cookie) 取得雲端索力、溫度及動態反應等監測資料，並進行時間同步、單位轉換及感測器與模型元素對應。模型端則透過 MIDAS Civil NX API 及 MAPI-Key，自動更新斜索預拉力與溫度荷載、執行數值分析並擷取靜力、動力與模態分析結果，再將模型預估結果與現地量測資料進行趨勢比對及誤差分析。

現階段以溫度效應整合與鋼纜索力預估為主要應用，未來若能進一步取得加速度與動態應變之原始時序資料，即可導入唯輸出系統識別方法，自動識別自然頻率、模態振型及阻尼比，並追蹤橋梁動態特性的長期變化。此外，亦可結合基因演算法進行模型參數最佳化，逐步提升數位孿生模型之更新、分析與預估能力。

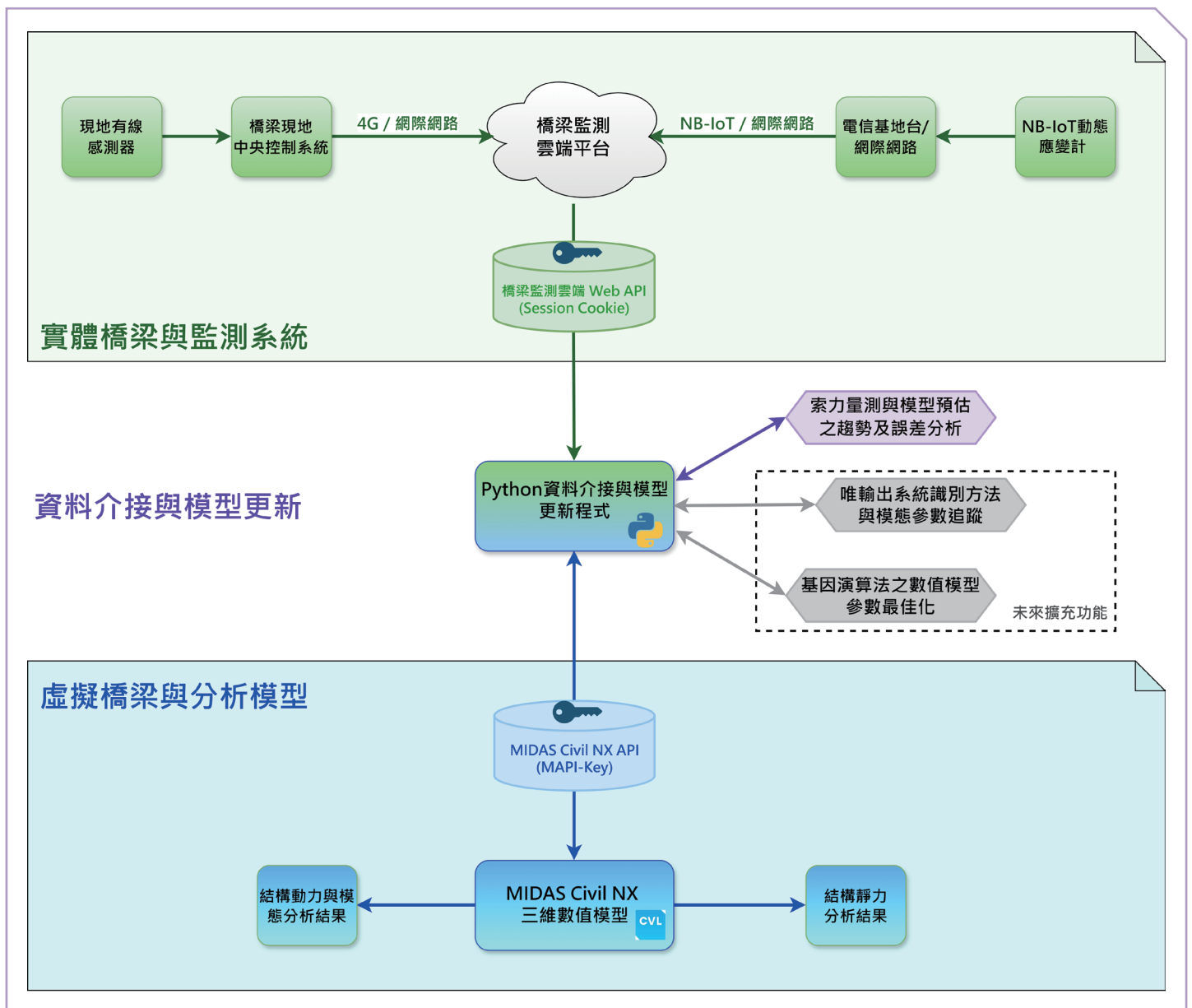


圖 6 雲端監測資料驅動之橋梁數位孿生架構

二、數位孿生溫度效應作用下之索力自動預估流程

MIDAS 模型自動控制與溫度效應整合流程如圖 7 所示，主要分為「04:00 基準模型建立」及「溫度效應與索力預估」兩個階段。考量凌晨 4 時 (04:00) 尚未受到明顯日照影響，且車流量相對較低，為降低日間溫度快速變化及交通作用對基準索力的影響，本研究選取 04:00 作為每日基準時間點。Fujino et al. 於明石海峽大橋的長期監測研究中，亦採用每日 04:00 溫度與 GPS 位移資料進行六個月的趨勢比較，並指出日出前的大氣溫度接近每日低點，且橋梁位移與代表性纜索溫度具有高度相關性，可作為本研究選用固定清晨時間點建立比較基準之參考。

索力自動預估流程第一階段透過 Web API 自動擷取 04:00 之雲端量測索力及溫度，並利用 MIDAS API 設定數值模型之鋼纜預拉力及執行分析。程式接續計算量測索力與模型索力之殘差，判斷其是否符合設定容許值；若尚未符合，則依修正係數更新

鋼纜預拉力並重新分析，直至符合收斂條件後，儲存 04:00 基準模型與校正後之鋼纜預拉力，並以該時點溫度作為後續分析基準。

第二階段依序透過 Web API 讀取雲端各分析時間點之箱梁混凝土及大氣溫度，分別計算其相對於 04:00 基準時間點之變化量，並依構件類型轉換為數值模型中的溫度荷載。箱梁混凝土溫度主要用於模擬箱梁之溫度變化，大氣溫度則用於模擬鋼纜及其他構件之溫度效應，各構件之熱膨脹係數依模型材料參數設定。

程式再透過 MIDAS API 自動載入該時點之溫度荷載、執行數值分析及擷取各鋼纜索力，並與相同時點之雲端量測索力進行比對。完成單一時點分析後，程式將自動讀取下一分析時點並重複上述流程；待全部時點分析完成後，統一輸出鋼纜索力變化趨勢及誤差分析結果。此溫度效應索力自動預估流程僅於 04:00 進行鋼纜預拉力校正，後續各時點均沿用該基準模型，並依實際監測溫度之變化進行索力預估。



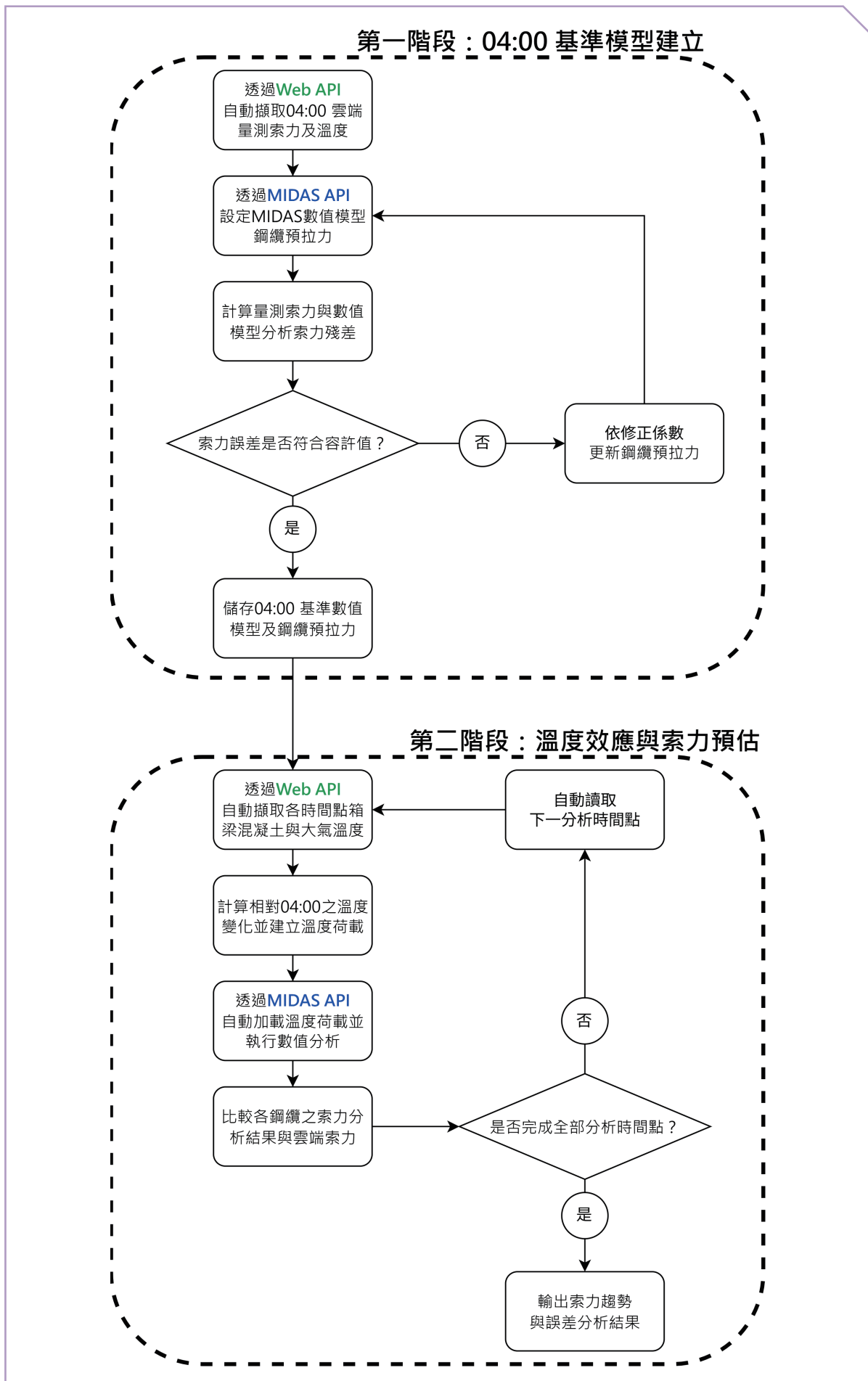


圖 7 04:00 基準模型建立與溫度效應索力自動預估流程

為了簡化雲端監測資料介接、MIDAS 模型更新及分析作業，本研究以 Python 建立圖形化使用者介面 (Graphical User Interface, GUI)，如圖 8 所示。使用者完成分析條件設定後，即可透過 GUI 一鍵啟動自動化流程，由程式連接橋梁監測雲端 Web API，自動擷取最新索力與溫度資料，完成資料整理及溫度荷載轉換後，再透過 MIDAS Civil NX API 即時更新數值模型、執行分析並回傳結果，大幅減少人工下載、輸入及重複操作所需時間。

操作介面主要分為三個區域：第一部分

為「介接與分析參數設定區」，用於設定 Web API 之 Session Cookie、MIDAS API 之 MAPI-Key、分析日期、感測器編號、基準溫度、分析時點、索力容許誤差及迭代修正係數等參數。第二部分為「自動化分析流程控制區」，依序執行 04:00 基準資料建立、溫度荷載設定、鋼纜預拉力迭代校正及各時點溫度分析。第三部分為「監測資料與模型結果檢視區」，顯示箱梁混凝土與大氣溫度、雲端量測索力變化、MIDAS 模型預估結果及兩者殘差，使用者可由單一介面快速掌握模型更新狀態與分析成果。



圖 8 雲端監測資料介接與數位孿生模型更新之 GUI 介面

三、數位孿生預估與雲端量測鋼纜索力比較
本研究為檢視數位孿生在不同日期的索力預估表現，選取同一條鋼纜（ForC2-01），比較兩個不同日期之雲端量測索力與數位孿生模型預估結果，用以初步檢視數位

孿生模型反映不同日期溫度變化趨勢的能力，如圖 9 及圖 10 所示。兩張圖之上半部為 24 小時內數位孿生模型預估索力與雲端量測索力絕對值之歷時曲線，下半部則為兩者之誤差百分比，本研究之索力誤差百

分比定義為數位孿生模型預估索力與雲端量測索力之差值，除以雲端量測索力後再乘以 100%。正值表示模型預估索力高於量測結果，負值則表示模型預估索力較低。

第一個分析日（2026 年 7 月 14 日）之量測索力具有較明顯的短時間起伏，尤其上午約 09:00 至 11:00 之間，隨著大氣溫度上升、車流、環境振動的影響，索力量測值常出現上下跳動的變化，使數位孿生模型預估結果與量測值稍有差異。由全日變化趨勢可發現，數位孿生模型可依溫度變化合理預估鋼纜索力，第二個分析日（2026 年 7 月 15 日）之索力同樣於上午逐漸下降、中午前後達到較低值，並於傍晚後逐步回升，顯示數位孿生模型可依溫度效

應反映一日內的索力變化型態，但對部分短時間波動仍無法完全重現。

綜合兩個不同日期的結果，數位孿生模型均能掌握索力由上午下降、午後轉折及晚間回升的整體趨勢。兩日誤差大致維持於 $\pm 2\%$ 以內，多數時間點之誤差位於 $\pm 1\%$ 以內，顯示以 04:00 建立基準模型後，再由實際監測溫度驅動數值分析，可初步預估同一條鋼纜於不同日期的日間索力變化。至於量測曲線中的短時間波動，可能仍受到車輛通行、局部溫度差異及其他環境作用影響；後續可再配合更多日期資料，並引入系統識別方法及模型最佳化方法，以進一步校正及提升數位孿生模型的預估能力。

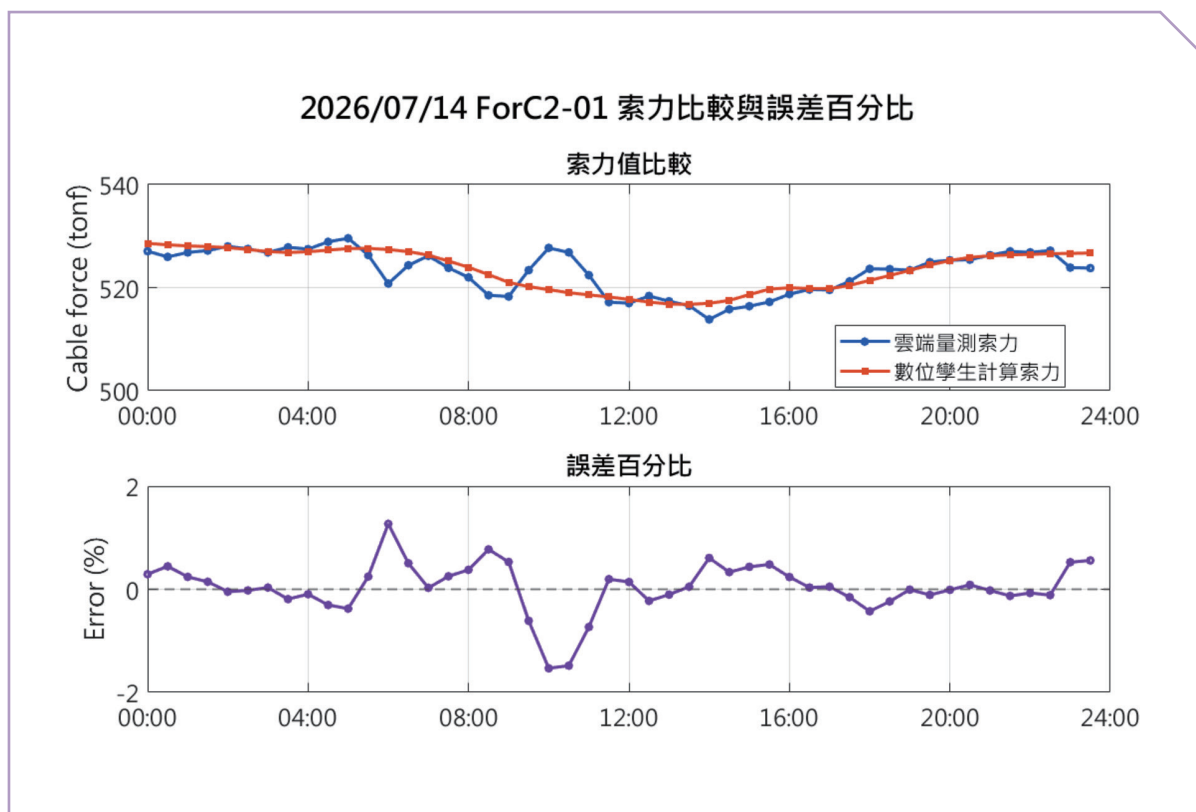


圖 9 2026 年 7 月 14 日 ForC2-01 鋼纜量測與計算索力及誤差比較

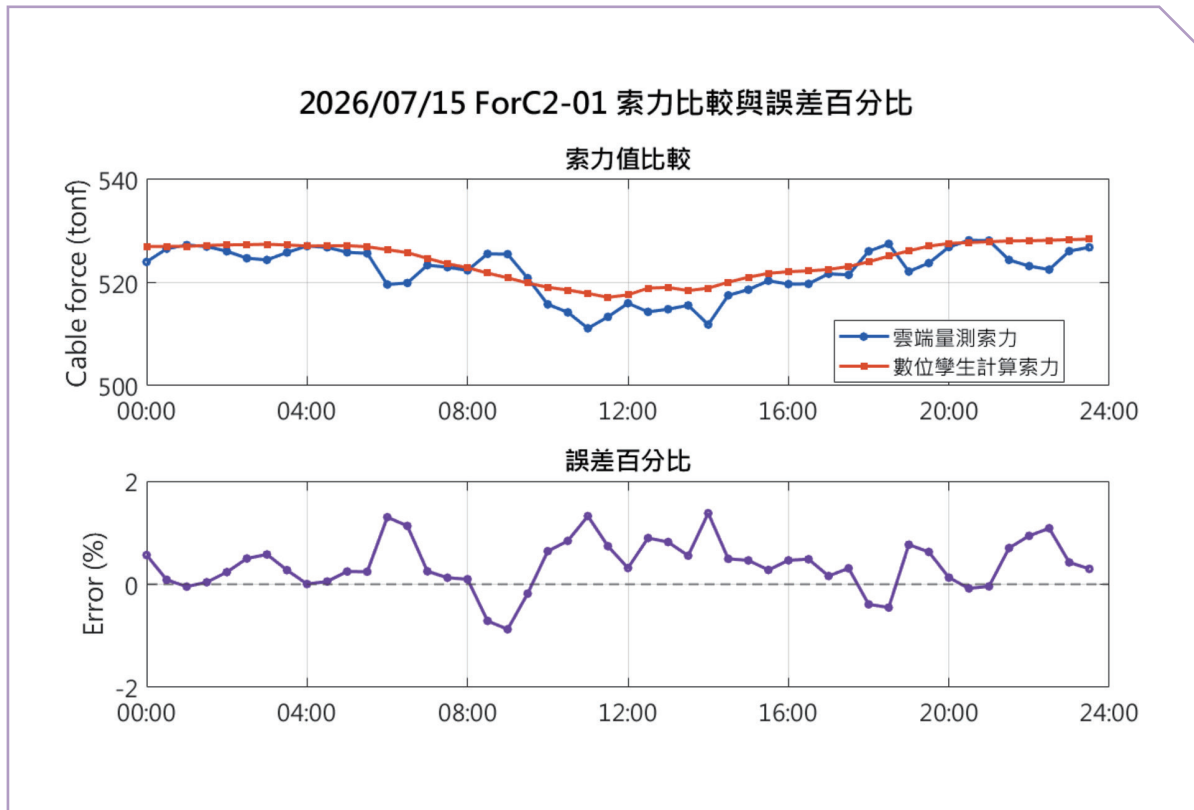


圖 10 2026 年 7 月 15 日 ForC2-01 鋼纜量測與計算索力及誤差比較

肆、結論

本研究橋梁已建置完整的自動化監測儀器及雲端管理平台，監測項目涵蓋鋼纜索力、箱梁混凝土與大氣溫度、箱梁應變、加速度、位移及風速等資料，具備發展橋梁數位孿生的良好基礎。本研究以 Python 建立圖形化使用者介面及資料介接程式，整合橋梁監測雲端 Web API 與 MIDAS Civil NX API，實現雲端即時資料自動擷取、監測資料處理、模型更新、數值分析及結果回傳等功能，降低人工下載、輸入及重複操作所需的時間。

在模型建立方面，程式首先透過橋梁監測雲端 Web API，自動擷取每日 04:00 之量測索力與溫度，並以該時點作為基準。

Python 程式再透過 MIDAS Civil NX API，自動寫入鋼纜預拉力、執行數值分析及擷取模型索力，並依據模型索力與量測索力之殘差進行迭代校正。完成 04:00 基準模型建立後，程式持續透過 Web API 讀取雲端各分析時點之箱梁混凝土及大氣溫度，計算相對於基準時點（04:00）的溫度變化，再透過 MIDAS Civil NX API 自動更新模型溫度荷載及執行分析，使數位孿生模型可由實際監測溫度驅動，進行全日鋼纜索力預估。

由同一條鋼纜於 2026 年 7 月 14 日及 7 月 15 日的比較結果可知，數位孿生模型能良好掌握 24 小時內索力由上午下降、中午前

後達到較低值，以及傍晚後逐步回升的整體趨勢。兩日預估誤差均維持於 $\pm 2\%$ 以內，多數時間點之誤差位於 $\pm 1\%$ 以內。整體而言，初步成果顯示本研究所建立的數位孿生架構，已具備整合雲端監測資料、溫度效應與數值模型，自動預估鋼纜索力日間變化趨勢的能力。

後續研究將增加不同季節、不同日期及更多鋼纜之監測資料，以持續驗證數位孿生模型的穩定性與適用性，並可在既有 Python GUI 與 API 介接架構上，增設輸出系統識別模組及數值模型參數最佳化模組。系統識別模組可利用加速度及動態應變資料，自動識別自然頻率、模態振型與阻尼比，並追蹤橋梁動態特性的長期變化；模型最佳化模組則可將量測結果與數值模型分析結果之差異作為目標函數，透過基因演算法等方法調整材料性質、構件剛度及邊界條件，進一步提升數位孿生模型之自動更新、狀態評估與預估能力，期使數位孿生模型能更快速且準確反映現地橋梁之實際結構行為與狀態變化，並提升其於橋梁安全評估及維護管理上的應用價值。

參考文獻

1. East, E. W., "Construction Operations Building information exchange (COBie)," USACE ERDC, Retrieved 8 October 2012.
2. National Institute of Building Sciences, "Construction Operations Building Information Exchange (COBie) : Version 2.40 Update." (2010).
3. Edirisinghe, R., "Digital skin of the construction site: Smart sensor technologies towards the future smart construction site." Engineering, Construction and Architectural Management, Vol.26, No.2, pp.184-223 (2019).
4. Zhang, H., Zhou, Y., Zhu, H., Sumarac, D., and Cao, M., "Digital twin-driven intelligent construction: Features and trends." Structural Durability & Health Monitoring, Vol.15, No.3, pp.183-206 (2021).
5. Ding, K., Shi, H., Hui, J., Liu, Y., Zhu, B., Zhang, F., and Cao, W., "Smart steel bridge construction enabled by BIM and Internet of Things in Industry 4.0: A framework." Proceedings of the 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control, Zhuhai, China, pp.1-5 (2018).
6. Hossain, M. M., Ahmed, S., Anam, S. M. A., Baxramovna, I. A., Meem, T. I., Sobuz, M. H. R., and Haq, I., "BIM-based smart safety monitoring system using a mobile app: A case study in an ongoing construction site." Construction Innovation, Vol.25, No.2, pp.552-576 (2025).
7. Liao, Q. Y., Kang, C. J., Wu, C. C., Chu, S. Y., Fang, C., Chung, C. Y., and Chou, C. C., "A comparative assessment of modal parameters and flutter derivatives using multiple output-only system identification methods." Wind and Structures, Vol.40, No.4, pp.221-235 (2025).
8. Liao, Q. Y., "Comprehensive Identification and Multi-Scale Experimental Study of Bridge Structures via Shaking Table, Wind

Tunnel Testing, and In-Situ Monitoring."
Ph.D. Dissertation, Department of Civil
Engineering, National Cheng Kung
University, Tainan, Taiwan (2026).

9. Fujino, Y., Murata, M., Okano, S., and
Takeguchi, M., "Monitoring System of the
Akashi Kaikyo Bridge and Displacement
Measurement using GPS." Nondestructive
Evaluation of Highways, Utilities, and
Pipelines IV, Proceedings of SPIE,
Vol.3995, pp.229-236 (2000).



投稿本刊之稿約及格式說明，請參考：

https://www.cec.com.tw/page/book/ceciet_submit_format.html

夢想與幸福

零距離接軌

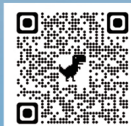
技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



台灣世曦官網



台灣世曦即時職缺



台灣世曦人才招募



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

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