

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

October
2025



營建自動化與智慧化專輯

ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 52, No. 5

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

114年年會暨
土木水利工程論壇

敬邀參加

災害面面觀

馬太鞍溪橋
AI 復健方案

營建自動化
與
智慧化

專 輯

夢想和幸福

零距離的接軌

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



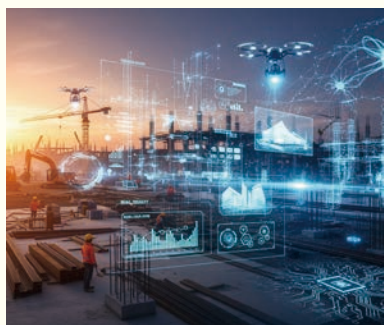
Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

CECI



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

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



營建自動化與智慧化
專 輯

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



發行人：高宗正

出版人：社團法人中國土木工程學會

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

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十六屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：高宗正

常務理事：朱惕之 余信遠 廖學瑞 賴建信

理事：王宇睿 王昭烈 林子剛 林祐正 林聰利 胡宣德 高銘堂

張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃一平 楊正君

楊偉甫 歐善惠 謝尚賢 謝震輝

常務監事：宋裕祺

監事：王藝峰 吳文隆 呂良正 沈景鵬 邱琳濱 賴建宏

先進工程

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

永續發展

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

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

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

學會活動

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

出版活動

- 中國土木工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

中國土木工程學會任務

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

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

中國土木工程學會和您一起成長！

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

「營建自動化與智慧化」專輯 (客座主編：吳翌禎教授)

📖 專輯序言：營建自動化與智慧化	吳翌禎	3
📖 AI 賦能建築設計：以穩定擴散模型提升創意與生產力	陳上元／吳建禾／鄭泰昇	4
📖 ROSO 營建機器人研究：邁向營建自動化與智慧化的一小步	盛郁庭	14
📖 機廠界面管理之智慧化—以 AppSheet 整合 RAG 與 LLM 應用研究	陳懿佐／鍾增煌	21
📖 智慧型代理人於公共工程採購風險預警之應用	陳致霖／薛文蔚	28
📖 智慧化人本環境舒適度監測與視覺化平台	林佳穎／吳翌禎	32
📖 xModel Designer：AI 驅動的三維建模及設計解決方案	劉其昌	38

工程技術及發展

📖 淡江大橋及其連絡道新建工程施工階段減碳成效	陳奕仲	45
-------------------------	-----	----

災害面面觀

📖 馬太鞍溪橋的破壞機制與 AI 復建方案選擇及加權評分	周南山	54
------------------------------	-----	----

學會資訊看板

📖 114 年會暨土木水利工程論壇 114 年 11 月 21 日於台北格萊天漾大飯店盛大舉行，敬邀參加！	封底
📖 114 年 12 月 11 日「建築物耐震之理論與實務研討會」免費參加，歡迎報名！	封底裡

廣告特搜

台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌	封面裡
艾凡斯頓科技有限公司 — 科技降災 & 智慧工地	20
交廣工程顧問有限公司 — 誠信 創新 品質 服務 永續發展	53
中華民國全國營造業工地主任公會 — 優良工地主任 2026 選拔 12 月受理報名	63
亞新工程顧問股份有限公司 — 服務品質 ASSET	64
義力營造股份有限公司 — 義呈實諾 力呈卓越	64



營建自動化與智慧化

專輯序言

專輯客座主編 吳翌禎*／國立高雄科技大學土木工程系 教授

營建自動化與智慧化已成為現代營建產業的重要趨勢，目標是利用先進科技提升施工效率、品質和安全性。自動化主要應用工程機具、營建機器人以及自動控制系統，讓重複性和高風險的工作以機器取代，減輕人力負擔，同時提升效率及現場安全。

而智慧化發展則是結合了人工智慧、大數據分析與雲端運算，來帶動營建產業在設計、施工管理到後續營運維護各階段的全面升級。AI 技術能協助建築設計與結構模擬，預測材料需求，並即時分析施工進度與品質。此外，數位雙生（Digital Twin）技術透過虛擬模型監控與協調施工流程，確保作業精準無誤；而智慧管理

平台則整合龐大的工程數據，協助管理者做出更科學的決策，進而降低工期延誤與成本超支的風險。

未來，營建自動化與智慧化將推動營造業朝向更高效、永續且安全的方向發展，促使整體產業模式轉型升級，達成更低碳、智能且具競爭力的目標，成為全球建築業的重要創新動力。

本期「營建自動化與智慧化」專輯精選了六篇來自不同領域的文章，涵蓋 AI 建築與機電設計、營建機器人、機器學習和人工智慧等技術創新及實務應用，全方位呈現土木營建產業推動自動化與智慧化的多元努力與成果。🏡

* 通訊作者，kwu@nkust.edu.tw



AI 賦能 建築設計：以穩定擴散模型 提升 創意 與 生產力

陳上元^{*}／國立聯合大學建築學系 教授兼系主任、所長

吳建禾／吳建禾建築師事務所 建築師

鄭泰昇／國立成功大學建築系 教授

在大模型時代，應用人工智慧生成內容（Artificial Intelligence Generated Content, AIGC）賦能創作，即調用在雲端的大型資料庫裡預訓練（Pre-Training）的模型、進行推理（Inference），將成為設計產業必備的技術能力。本文旨在探索 AIGC 應用的合理配置，並以擴散模型（Diffusion model）的應用為核心，探索其對建築設計創作與決策所產生的影響。

大模型時代、AIGC 與邊緣運算：協同發展

隨著技術的演進，大模型時代的崛起正深刻地影響著人工智慧的發展，並與 AIGC 及邊緣運算形成緊密的協同關係。這三者並非獨立存在，而是共同構成了一個更高效、更普及的智慧應用生態系。

AIGC 技術的爆炸性成長，例如：ChatGPT 和 Stable Diffusion 等，正是大模型時代最顯著的成果^[1]。從文獻來看，早期的人工智慧模型受限於運算能力與資料量，其生成內容的精細度和多樣性有限。然而，近年來隨著算力大幅提升及大規模數據集的累積，研究者得以訓練出數十億乃至數千億參數的大型語言模型（LLMs）和生成式模型。這使得 AI 能夠更精準地模仿人類的創作與表達，從而實現了從簡單的規則生成到複雜、具原創性的 AIGC 飛躍。因此，大模型可以被視為推動 AIGC 從概念走向大規模應用的核心驅動力。

儘管大模型展現了驚人的能力，但其龐大的體積和運算需求也帶來了挑戰。傳統上，這類模型主要部署

在雲端，需要使用者透過網路連接進行運算。然而，這可能導致延遲、網路頻寬限制及資料隱私問題。這時，邊緣運算的價值便凸顯出來。

Janakiram^[2]等文獻指出，邊緣運算的核心在於將數據處理推向接近資料源頭的網路邊緣，與雲端運算形成互補。從機器學習的角度來看，這種協同模式（cloud-edge collaboration）完美地應用於大模型與 AIGC 的場景中。其運作模式可歸納為：

- 雲端（Cloud）：負責進行大模型的訓練與測試。由於模型訓練需要極高的運算資源和海量數據，因此在雲端進行集中處理是最有效率的方式。
- 邊緣（Edge）：負責部署與推理。一旦模型訓練完成，輕量化或優化後的模型便可部署到智慧手機、物聯網設備或終端裝置等邊緣設備上。這使得使用者能夠在本地球端即時調用模型進行 AIGC，例如：即時生成圖像或文字，而無需每次都與雲端進行大量數據傳輸。

這種雲、邊協同的模式，不僅大幅降低了延遲，提升了使用者體驗，也為資料隱私提供了更好的保障，同時還減輕了雲端伺服器的負擔（圖 1）。

^{*} 通訊作者，syuanchen@nuu.edu.tw

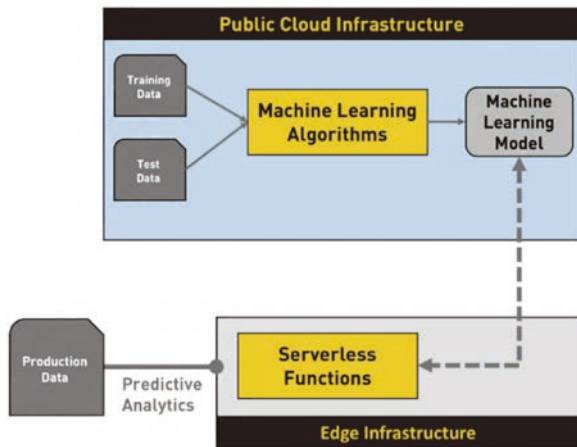


圖 1 在機器學習中，公有雲設施與邊緣運算設施的任務分派^[2]

邊緣推理：擴散模型（Diffusion Models）的核心原理、發展與應用

擴散模型是當前圖像生成領域最主流的模型之一，其獨特的運作機制使其有別於其他深度學習模型。本段將回顧擴散模型的發展歷程、核心原理以及其應用。

擴散模型最早由 Sohl-Dickstein 等人^[3]於 2015 年提出，靈感源於非平衡熱力學中的擴散過程。與生成對抗網絡（GANs）、變分自動編碼器（VAEs）和流模型等其他深度學習模型不同^[4]，擴散模型的訓練過程並非基於對抗學習。其核心原理是透過兩個步驟來學習如何生成圖像^[5]：

- 加噪（Forward Process）：逐步向原始訓練圖像中添加高斯雜訊，直到圖像完全變成隨機雜訊。
- 降噪（Reverse Process）：訓練一個神經網路來學習如何反向地逐步去除雜訊，最終從純雜訊中還原出清晰的圖像。

自此概念提出以來，擴散模型經歷了多次重大技術突破。2021 年，Nvidia^[6]提出基於潛在空間（latent space）的變分自編碼器，大幅提升了模型的訓練效率。同年，Google 引入了基於機率的優化模式，並強

化了模型的變分特性^[7]。隨後，KIM 等人^[8]於 2021 年將對比語言－圖像預訓練（CLIP）技術與擴散模型結合，使得模型能夠根據文字指令生成圖像，為文生圖（text-to-image）應用奠定了基礎。這一切的技術累積，最終在 2022 年迎來了里程碑式的發展「穩定擴散模型（Stable Diffusion）」的發表^[9]，該模型因其高效、高品質的生成能力而迅速普及。

穩定擴散 SD 模型於 2022 年問世，由 StabilityAI、CompVis 與 Runway 聯手開發。該模型基於潛在擴散模型，利用降維運算先將訓練圖像壓縮到低維潛在空間，再進行運算，最後還原成原始尺寸。此技術顯著降低計算資料量與硬體需求，令運算速度大幅提升，突破了標準擴散模型龐大計算量的限制。由此，圖像訓練與生成的實用性與普及度大為增強，為人工智慧在圖像處理領域奠定了堅實基礎^[6,9,10]（圖 2）。

主模型

穩定的擴散 SD 是一個條件生成模型，其主模型^[11]，包括三個主要構件：

對比語言－圖像預訓練文本編碼器（Contrastive Language-Image Pre-Training, CLIP, Text Encoder）：

用於解析提示詞的 CLIP 模型，是 SD 的條件生成器，包括文本編碼和圖像編碼 2 個部分，分別用於提取文本和圖像的特徵。通過搜集大量網路上的圖像和文字資訊再對 CLIP 模型進行訓練，可以實現文本和圖像的對應關係^[8,12]（圖 3）。

潛在擴散模型（Latent Diffusion Model）：

如前述，改良過的擴散模型，以翻轉 C 型的路徑，在潛在空間中進行，其路徑的前向過程加噪擴散（Diffusion），而返向過程則降噪（Denoising）復原。前向（由左到右）和返向過程（由右到左）如圖 4 所示，圖 4 右的條件（conditioning）元件，用來描述模型生成圖像的文本提示^[13]。除此之外，潛在擴散模型圖像生成

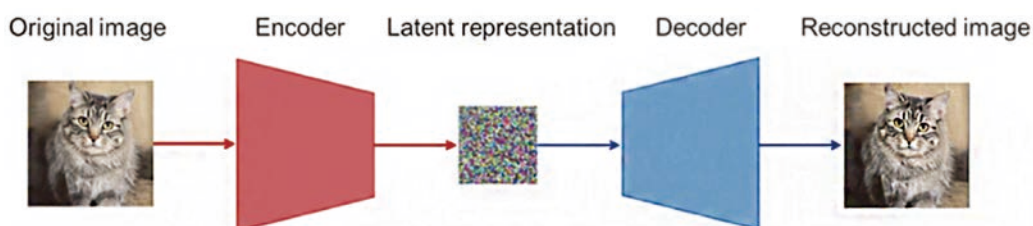


圖 2 潛在擴散模型^[14]

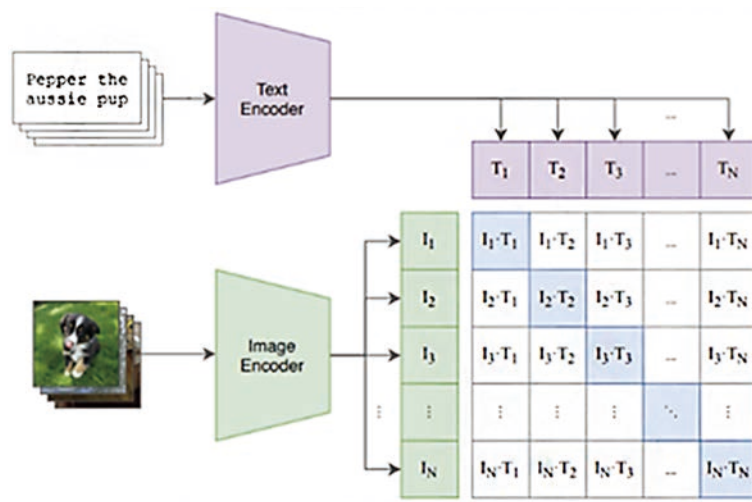


圖 3 CLIP 模型結構包含一個圖片編碼和對應的文字編碼^[15]

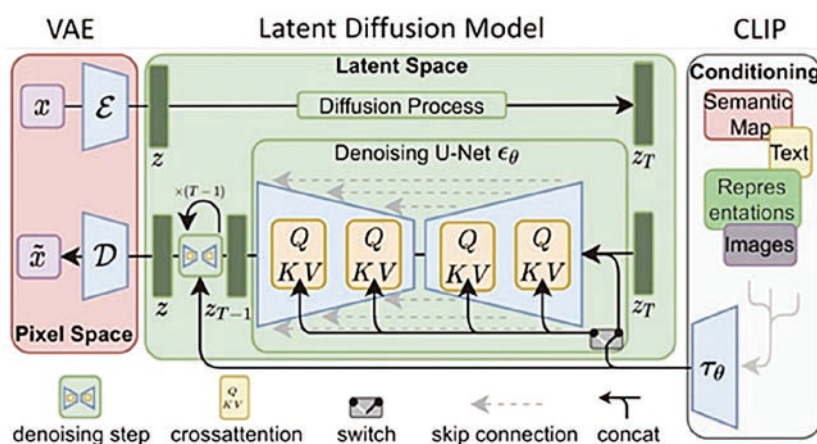


圖 4 穩定擴散模型^[13]

器裡還包含了 (a) U-Net 神經網路以及 (b) 排版與採樣法 (Scheduler and Sampler) 兩個部分：

(a) U-Net 神經網路：

U-Net 是一種卷積神經網路 (CNN)。它的結構特點是有一個「U」形的對稱結構，因此得名 U-Net。這種結構允許網路在多個尺度上學習圖像特徵，同時通過跳躍連接將不同層次的特徵圖結合起來，從而提高分割的準確性^[16]。在 SD 的返向降噪復原的過程中，U-Net 透過先收縮 (contraction)、再舒張 (Expansion) 兩階段過程，將雜訊圖像逐步轉化為清晰的目標圖像。它通過學習從雜訊到圖像的映射，逐步細化圖像的細節，直到生成高品質的圖像^[17] (圖 5)。

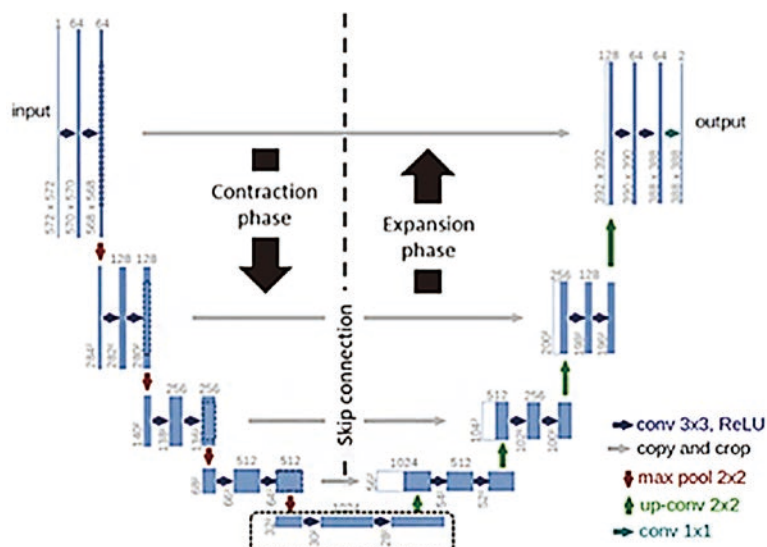


圖 5 U-Net architecture^[17]

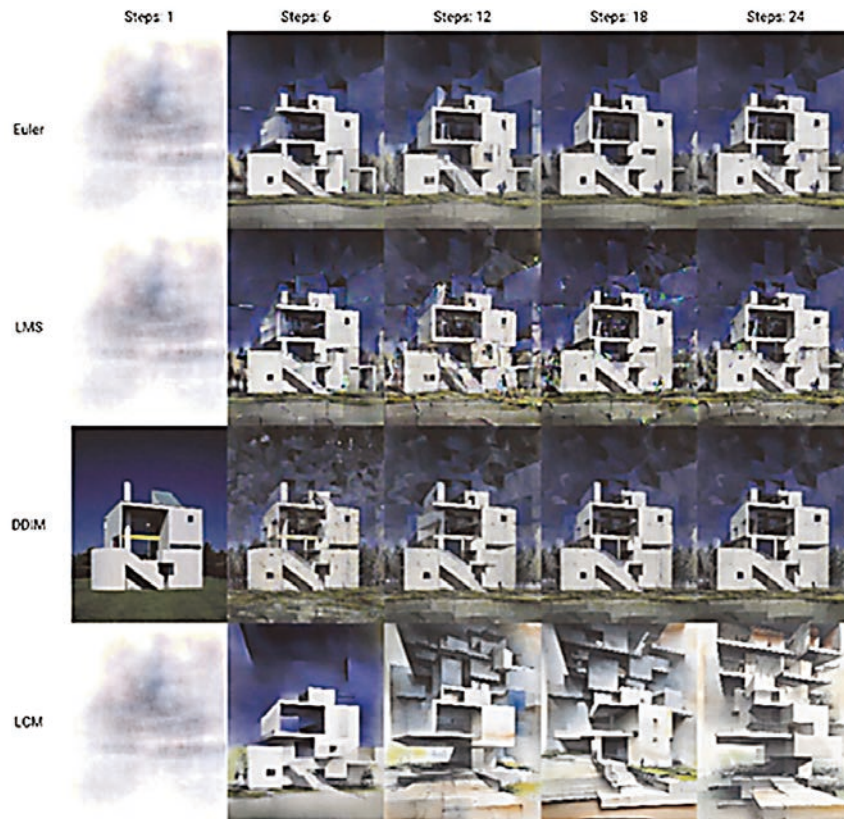


圖 6 不同的採樣法 (Y 軸) 比對不同排程 (X 軸) 的表現

(b) 排程與採樣法 (Scheduler and Sampler) :

在訓練擴散模型過程中，排程 (Scheduler) 是負責調控去噪的程度，決定每一步去除多少噪聲，以確保整個過程高效和精準。然而，採樣法 (sampler)，是負責控制去噪的具體操作的算法。使用者可以根據圖像類型和使用的模型來選擇不同的採樣法 (Sampler)，從而達到更佳の出圖效果。如圖 6 所示，在相同條件下，LCM 較其他採樣法有差異性更大的變化。

變分自編碼器 (Variational Auto Encoder, VAE) :

變分自編碼器 (VAE) 由自編碼器 (AE) 演變而來，結合了 AE 與機率建模生成模型。自編碼器是一種非監督式深度神經網絡，包含編碼器 (Encoder) 和解碼器 (Decoder)，編碼器將圖像資訊降維至潛空間，解碼器則將潛在資料升維還原為原始圖像 (圖 7)。VAE 在編碼器中加入數學運算，將輸入分為平均數和標準差 (經指數函數處理) 兩部分並相加，使其具機率性 (probabilistic) (圖 8)；相較之下，AE 為確定性 (deterministic)。通過潛在變數

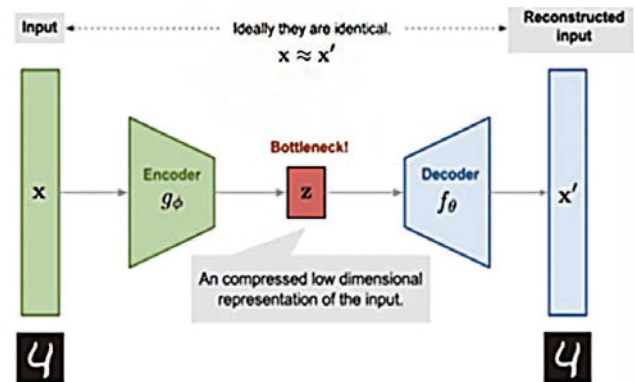


圖 7 自編碼器 [19]

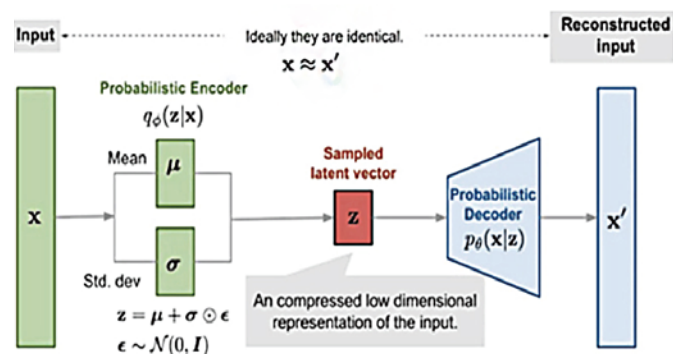


圖 8 變分自編碼器 [19]

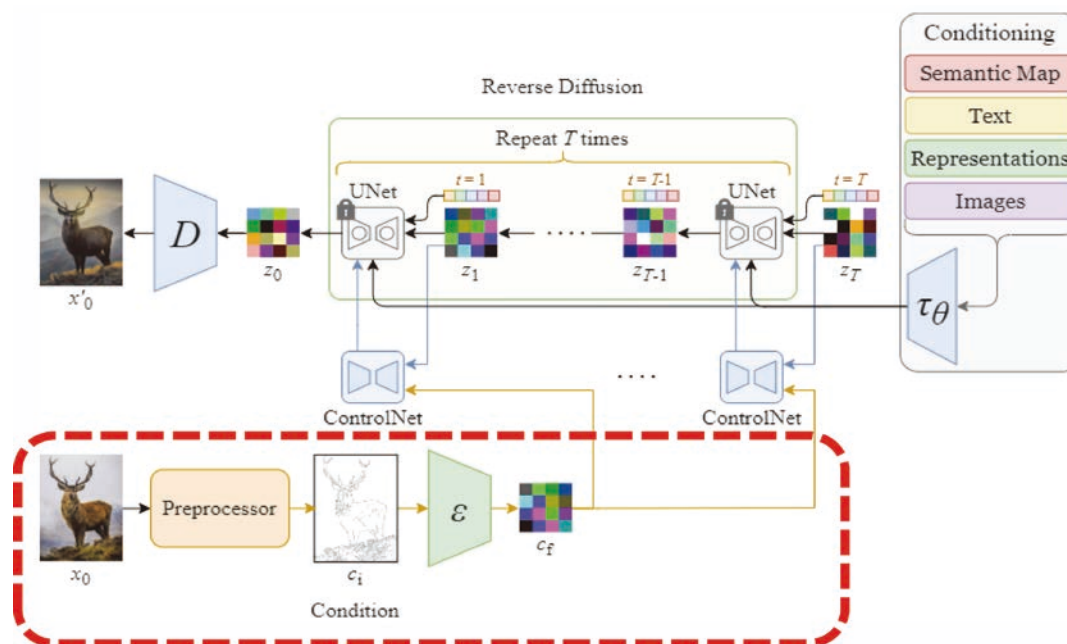


圖 9 控制網路 ControlNet [24]

與隨機性，VAE 能生成多樣化樣本 [18]。

穩定擴散 SD 模型由三個主要構件組成，稱為大模型，亦稱主模型或底模型。SD 必須有主模型才能進行繪圖，檔案格式為「.safetensors」，通常大小超過 2GB。訓練完整主模型成本高昂，非一般設備可負擔。因此，當僅需調整特定風格或主題時，無需重新訓練整個模型，而是透過更簡潔高效的微調模型（Fine-tuned models）來實現特定需求，提升運算效率。

微調模型 (Fine-tuned models)

在電腦視覺和自然語言處理領域，微調模型是指使用預訓練模型，並在特定任務上進行進一步的訓練，以使其適應特定的資料集或問題。通過微調，模型可以適應不同領域的特定資料分佈，從而提高其泛化能力和適應性。在 SD 裡常見的微調模型包括：(1) 文本反轉（Textual Inversion）模型、(2) 變分自動編碼（Variational Auto Encoder, VAE）模型；(3) 低秩調適（Low-Rank Adaptation of Large Language Models, LoRA）模型 [20] 等。這三種微調模型各有特點。文本反轉增強模型對新文本概念的理解，適用於快速適應新詞彙。VAE 強調圖像生成與重建，適合高質量圖像需求。LoRA 透過低秩調適，能在有限資源下高效微調大模型，適用於資源受限但需調整大模型的情境。根據需求選擇適當模型，可在不同應用場景中發揮最佳效果 [21]。

控制網路 (ControlNet)

在 SD 的基礎上，控制網路引入額外的控制模型，

使模型能夠根據特定條件（Condition）輸出圖像 [22]（如上圖 9 所示）。控制網路 ControlNet 模型通常由兩個部分組成：預處理器（Preprocessor）與模型。預處理器的功能是将送入的參考圖進行檢測，轉換成可供模型使用的控制圖像，在控制網路，針對邊緣檢測進行線條約束的類型分別有 Canny、Lineart、SoftEdge、Scribble、MLSD 以及 Segment 等控制網路模型 [23]。

使用者介面

為應用 SD，程式開發者 AUTOMATIC1111 開發了方便操控 SD 的圖形化介面（Graphical User Interface, GUI）命名為 WebUI，是目前流傳最廣、最為友善使用的（圖 10），其它還有強調以節點建構工作流的 ComfyUI（圖 11）等。

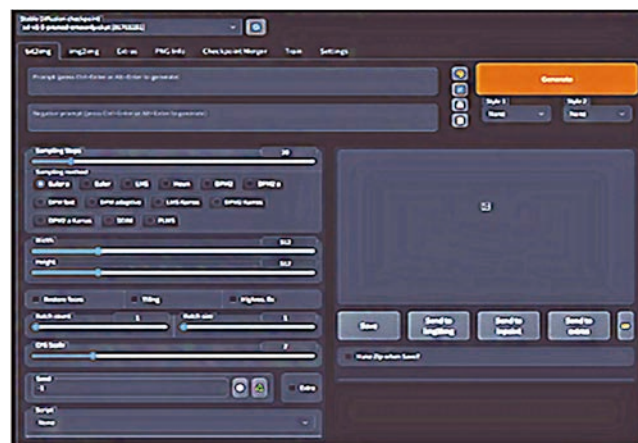


圖 10 WebUI

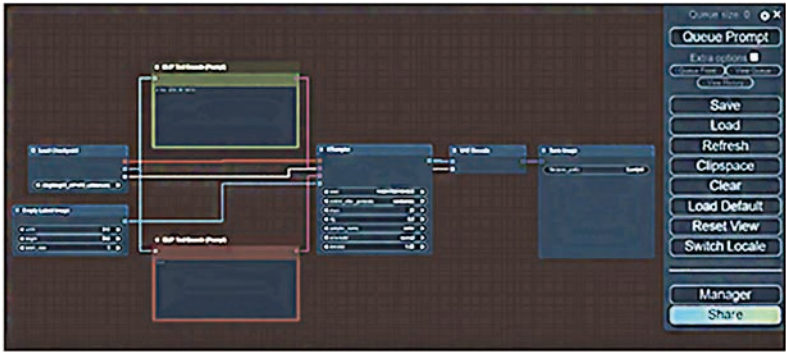


圖 11 ComfyUI

基於 SD：AI 推理的建築設計

SD 具備降維運算的能力為擴散模型的普及化，奠定了實用的基礎；其主模型核心的三大構件：(1) 對比語言 – 圖像預訓練文本編碼器 (CLIP)、(2) 潛在擴散模型 (Latent Diffusion Model)、(3) 變分自編碼器 (VAE)；輔以微調模型與控制網路；以及可選擇的使用者介面 GUI，使得 SD 賦能建築設計上的能力包括：

- 1. 文生圖：理解意念，推理意圖，並發展多樣性。
基於 CLIP 的對比語言 – 圖像能力，以及 VAE 變分自編碼器生成多樣性的設計樣本。
- 2. 圖生圖（圖生文、文生圖）：根據意圖，詮釋意念，展開對話，推衍意圖。

同理基於 CLIP 的對比語言 – 圖像能力，圖生文、文生圖。因此，根據意圖，詮釋意念，展開對話，推衍意圖。

- 3. 建構創意的工作流程。
應用 ComfyUI 建構基於 SD 模型的設計思考流程。有別於使用廣泛的 WebUI，ComfyUI 以基於節點 (node-based) 的設計理念，每個生成圖的步驟都是一個節點，使用者能夠觀察和精確控制 AI 生成圖的工作流程。
- 4. 微調與控制設計意圖與意念。
基於可擴充的微調模型與控制網路，設計得以更精準地控制，修改呈現的風格或者局部修正內容。

- 5. 擴充協作的能力。
SD 包括主模型、微調模型以及控制網路模型。根據實際需求，在使用端、個人終端設備可從雲端擴充下載差異性的預訓練模型，下載方法是通過 Civitai 站 (civitai.com) 和擁抱臉 (huggingface.co) 站來獲取。

- 6. 訓練客製化需求的模型。
SD 提供了可擴充性，使用者可以根據具體需求，選擇合適的微調模型類型、控制網路模型進行訓練。深度學習模型的訓練，在硬體需求與訓練時間有沉重的負荷，使用者可視實際狀況，決定部署於本機或者雲端。

實作演練

接下來本文觀察吳建禾建築師以 AI 推理「前鎮第一公有零售市場新建工程前期規劃案」的過程。以完成專案的設計文件交付 (Design Document) 為任務目標，其歷程包括了：前置設計 (Pre- Design, PD)、初步設計 (Schematic Design, SD)、設計發展 (Design Development, DD)、3D 模型建置 (3D Modeling, 3D)、施工文件 (Construction Documents, CD) 等階段。研究輔以 AI 賦能建築設計推理「設計文件」的檢核矩陣，梳理出穩定擴散在不同服務階段所提供的賦能項目，以及工具支援的不足之處，以提供在下一階段訓練、開發控制工具等客製化需求的參考依據 (表 1)。

表 1 檢核矩陣

	PD	SD	DD	3D	CD
理解意念，推理意圖，並發展多樣性					
根據意圖，詮釋意念，展開對話，推衍意圖					
建構設計的思考流程					
微調與控制設計意圖與意念					
擴充協作的能力					

T

Textual-Inversion

VAE

LoRA

前鎮第一公有零售市場新建工程前期規劃案的階段性發展：

前置設計與資料分析（Pre-Design, PD）

在前置設計與資料分析階段，團隊針對基地條件、功能需求與競圖要求進行了解，並運用 BIM-Revit 建模，建立基本量體模型與周邊環境的數據，進一步結合 AI 生成技術 進行方案推演。

1. BIM 建構初步市場建築量體，整合基地條件、法規與動線，並完成牆、樓板與結構系統的基本規劃與建模（圖 12）。
2. 文生圖快速產出多樣化市場的設計概念，透過導引詞：「Modern / traditional design facade and supermarket building」，導入到 ChatGPT 中，輔助生成具備豐富架構的提示詞 Prompt：

「A supermarket building blending modern and traditional design. The facade features sleek glass, steel, and concrete with warm wood, brick accents, and classic arches. Large windows provide natural light, while a mix of flat and sloped roofs creates balance. The setting includes pedestrian walkways, greenery, and a spacious parking area. Rendered in photorealistic detail with dynamic lighting.」，其產出成果，進而導入在「Rendair pro」中生成不同風格的模擬圖（圖 13）。

3. 圖生文解析 AI 生成圖像，提取風格與設計語意，以優化 BIM 設計方向，並且透過分析出的文字內容，與設計參與者進行討論及細節調整的方向（圖 14）。
4. Revit + AI 簡報設計版面擬定：透過 Revit 圖紙進行排版，分析需求及加入建築設計相關重點說明，針對市場功能需求進行區域大樣 3D 及空間配對需求調整。

初步設計及進階模型建置 （Schematic Design, SD）

初步設計階段主要是將概念轉化為具體的平面布局與立面方案，透過 ChatGPT & Claude & Notebook LM 相互輔助，將規劃設計內容多元輔助資料，並利用 Revit 持續建立進階市場建築模型，搭配運用 AI 生成的圖象，重新回饋調整視覺表現與創意發展，是 BIM + AI 的協同應用：

1. 市場內部空間規劃：基於 AI 輔助進行法規與設計規劃前置資料的統整與設計，並透過 AI 設計推理測試不同排列組合（圖 15）。

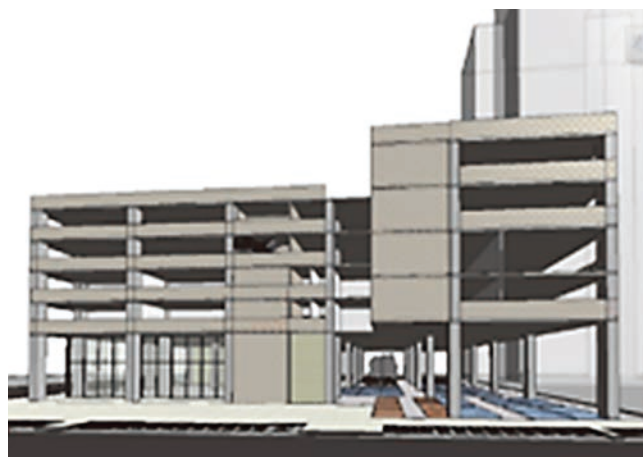


圖 12 BIM 初步建模



圖 13 多元風格模擬圖

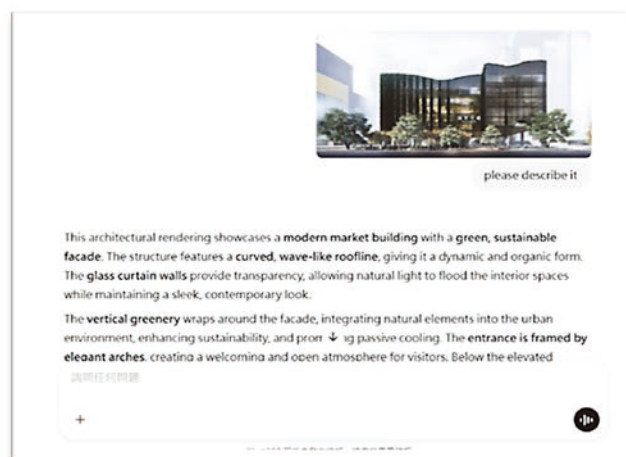


圖 14 圖生文解析，參與者進行溝通討論

2. AI 賦能的建築形式推理：透過 AI 風格轉換（Style Transfer）在經過法規分析與模型整合的進度下，持續生成不同的市場外觀風格。如圖 16 依提示詞 #01 ~ #08 產生的外觀樣貌。

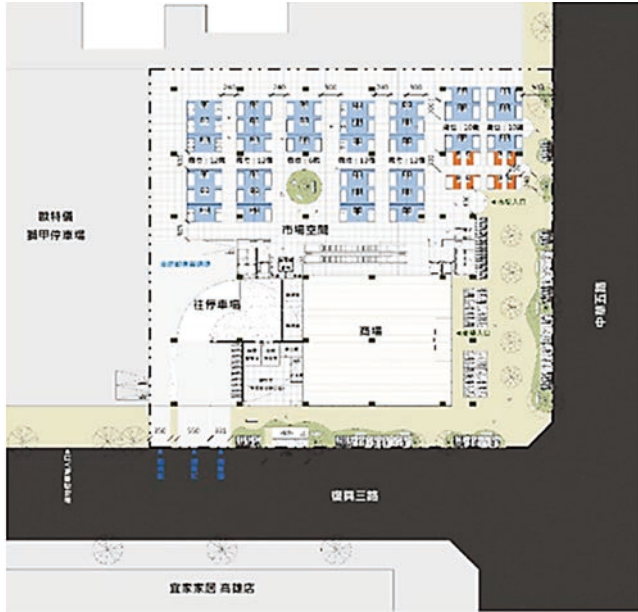


圖 15 BIM-Revit 規劃平面與分析圖說

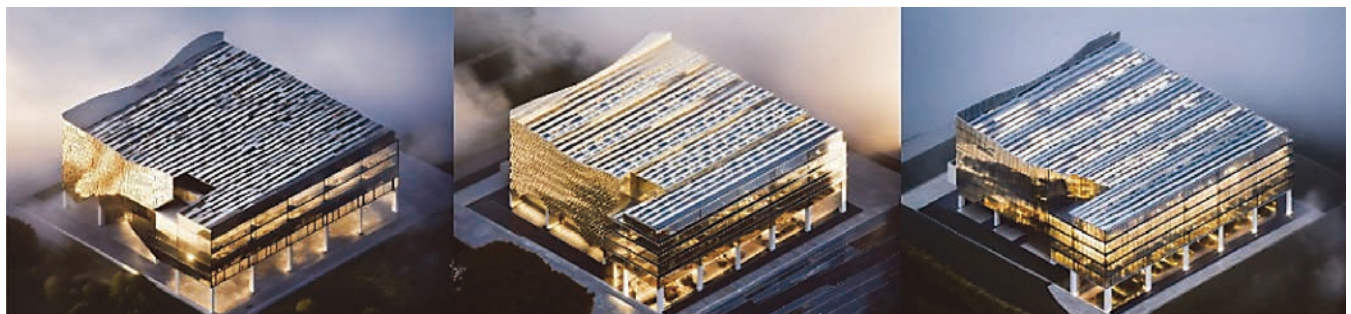
設計發展，多元方案的設計討論 (Design Development, DD)

設計發展進一步深化初步設計方案，並對應預算限制進行調整，確保最終提案兼顧美學與實用性。

1. 材質與光影：依據提示詞進行模型調整，並測試不同表面材質，如金屬構件、木構及混凝土等不同材質，評估其對建築外觀與環境光影的影響（圖 17）。
2. 設計的精緻化：透過 Enscape 進行初步材料表現處理，並交給 Veras AI 進行渲染。

3D 模型建置 (3D Modeling, 3D)

本案一開始就使用 BIM 建構 3D 量體。然而，在 AI 協作，完成多元方案的設計討論後，整合規劃平面，建 BIM 的 3D 模型，以完成後續文件的交付工作。



#01 流動形態－自然律動

#02 編織立面－科技美學

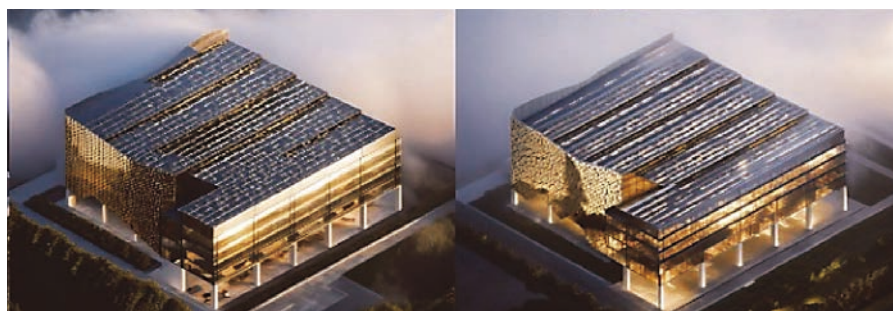
#03 幾何秩序－理性美學



#04 數字肌理－未來象徵

#05 光影層次－動態節奏

#06 生態融合－自然共生



#07 立體光雕－創新結構

#08 晶格紋理－參數設計

圖 16 AI 重新依提示詞產生的外觀樣貌

施工文件（Construction Documents, CD）階段

本階段為求構造與尺寸的準確度，全程以 BIM 建模、出圖。

經過實作觀察驗證，透過設計階段、對照 SD 賦能矩陣檢核，歸納分析如表 2。

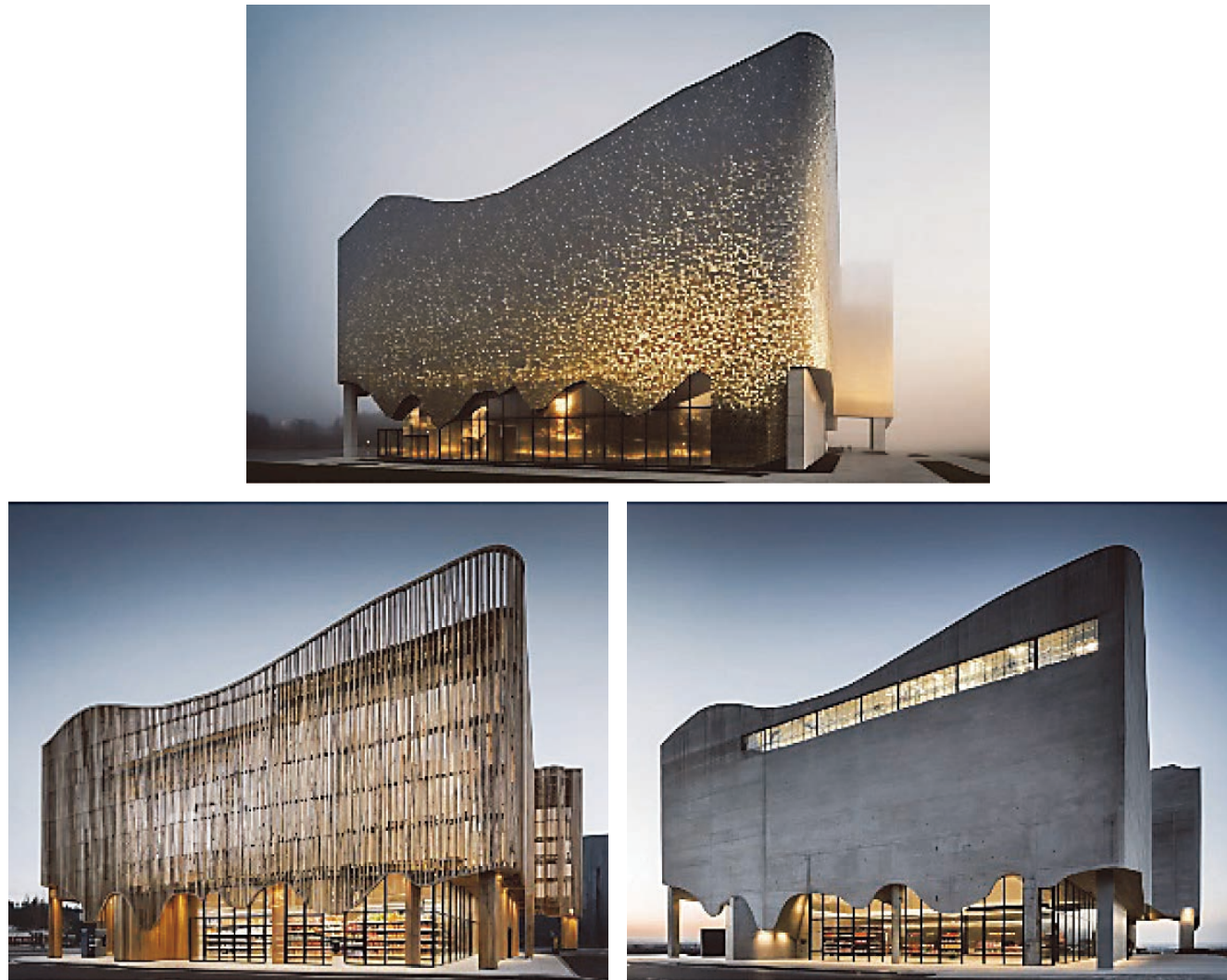


圖 17 調整不同表面材質、評估外觀影響

表 2 透過檢核矩陣的檢討與改進

階段	賦能項目	優勢	不足	改進方向
PD	文生圖生成概念方案	快速提供多樣化靈感	方案細節模糊	訓練 Textual Inversion 模型：描述建築風格、類型和專業術語。例如：綠建築、智慧建築、低碳建築等。
SD	圖生圖（圖生文、文生圖）；控制網路等工具的交互應用	迭代優化設計	多元性、差異性不足；構造尺寸的精準度不足	訓練 LoRA 模型：差異性特徵的建築風格（依建築師、建築史、建築機能、地域性等）；搭配 3D 建模軟體，如 Revit、Sketchup 等
DD	採用微調模型，建議材質與採光方案	縮短專案溝通與決策時間	微調模型的適切性不足	訓練 VAE 模型：局部精緻化各式建築元件、細部大樣、建材與質感。
3D	SD 繪圖作為準確建模的參考	加速建模流程	精密度有限	開發客製化的 ControlNet
CD	結合 ControlNet（Segment 模式）生成結構分割圖；文生文功能，整理技術規格。	輔助文件整理	規範性不足	整合建築規範數據

結論

人工智慧的進展，正逐步改寫建築設計的工作方式。以「穩定擴散模型」(Stable Diffusion)為例，設計師僅需透過簡單的文字描述或影像提示，即能快速獲得各種設計草圖與風格模擬。這不僅大幅縮短了前期構想的時間，也讓更多可能性在短時間內被展現，為設計討論帶來前所未有的效率。

在實務操作中，AI 早已能協助不同階段的建築工作：從概念生成、方案比較，到材質與光影的模擬，甚至協助整理施工文件。它的角色並非取代專業，而是成為設計師的「智慧助理」，讓人力得以集中在更需要判斷與創造力的核心問題。

未來，隨著技術的不斷成熟，AI 將像 CAD 或 BIM 一樣，逐漸成為建築專業的日常工具。它的價值在於同時提升創意的廣度與實務的精度，開啟一個設計更靈活、更高效，並能快速回應需求的時代。對建築而言，AI 的出現不僅是一場工具革新，更是一個拓展想像力邊界的契機。

參考文獻

1. Cao, Y., et al. (2023). A comprehensive survey of AI-generated content (AIGC): A history of generative AI from GAN to ChatGPT. arXiv:2303.04226. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04226>
2. Janakiram, M.S.V. (2017, April 16). How edge computing and serverless deliver scalable machine learning services. Forbes. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2017/04/16/how-edge-computing-and-serverless-deliver-scalable-machine-learning-services/?sh=15625c4a2ebd>
3. Sohl-Dickstein, J., et al. (2015). Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics. In Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning. Retrieved from <https://proceedings.mlr.press/v37/sohl-dickstein15.html>
4. Czxttkl. (2023, November 14). Diffusion models. Retrieved from <https://czxttkl.com/2023/11/14/diffusion-models/>
5. Croitoru, F.-A., Hondru, V., Ionescu, R.T., and Shah, M. (2023). Diffusion models in vision: A survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 45(9), 10850-10869. doi:10.1109/TPAMI.2023.3261988
6. Nvidia. (2021). Score-based generative modeling in latent space. arXiv:2106.05931. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.05931>
7. Google. (2021). Variational diffusion models. arXiv:2107.00630. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2107.00630>
8. Kim, G., et al. (2021). DiffusionCLIP: Text-guided diffusion models for robust image manipulation. arXiv:2110.02711. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.02711>
9. Rombach, R., et al. (2022). High-resolution image synthesis with latent diffusion models. In 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 10674-10685). doi:10.1109/CVPR52688.2022.01042
10. Yang, L. (2024). Diffusion models: A comprehensive survey of methods and applications. ACM Computing Surveys, 56(4), Article 105, 1-39. doi:10.48550/arXiv.2209.00796
11. Kochanowicz, J., et al. (2023, March 29). Diffusion models in practice. Part 1: A primers. Retrieved from <https://deepsense.ai/diffusion-models-in-practice-part-1-the-tools-of-the-trade/>
12. Gan, Y., et al. (2024). InstructCV: Instruction-tuned text-to-image diffusion models as vision generalists. In ICLR 2024. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.00390>
13. Ulhaq, A., et al. (2024). Efficient diffusion models for vision: A survey. IEEE Transactions. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.09292>
14. DZ. (2023, October 8). Variational Autoencoder. Medium. Retrieved from <https://python.plainenglish.io/variational-autoencoder-1eb543f5f055>
15. Openai. (2024, July 23). CLIP. Retrieved from <https://github.com/openai/CLIP>
16. Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, Proceedings, Part III 18 (pp. 234-241). Springer International Publishing.
17. Pun, S.N. (2022). Modality specific U-Net variants for biomedical image segmentation: A survey. Artificial Intelligence Review. doi:10.1007/s10462-022-10152-1
18. Kingma, D.P. and Welling, M. (2013). Auto-encoding variational Bayes. CoRR, abs/1312.6114.
19. Allenu2019. (2021, May 7). Math AI – Variational Autoencoder (VAE). ALU – AI, Language, Universe. Retrieved from <https://alu2019.home.blog/2021/05/07/math-ai-variational-autoencoder-vae-bian-fen-zi-b/>
20. Hu, E.J., et al. (2021). LoRA: Low-rank adaptation of large language models. arXiv:2106.09685. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.09685>
21. 杰克艾米立 (2024) · Stable Diffusion · 台北市：旗標。
22. Zhang, L., Rao, A., and Agrawala, M. (2023). Adding conditional control to text-to-image diffusion models. In IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). doi:10.1109/ICCV51070.2023.00355
23. Steins. (2023, June 6). Stable Diffusion — ControlNet clearly explained. Medium. Retrieved from <https://medium.com/@steinsfu/stable-diffusion-controlnet-clearly-explained-f86092b62c89>
24. Robot 9, 2024, <https://robot9.me/controlnet-diffusers/> 



ROSO 營建機器人 研究：邁向營建 自動化與智慧化的一小步

盛郁庭* / 逢甲大學建築專業學院 副教授

營建產業面臨勞力不足、安全風險高與效率不彰等問題。ROSO 研究團隊以「材料、AI 運算設計、機器人建造」為核心，開發 TACO BIM 系統，將 BIM 模型直接轉換成機器人路徑，推動預鑄與現場施工兩大應用。在預鑄領域，2023 年完成《韻水漫漫》，為台灣首例無模板水泥 3D 列印公共裝置，具備低碳、高效與設計自由的特色。在現場施工方面，團隊研發「黑武士」系列機器人，結合 SLAM 與智慧調度，能適應複雜工地並投入實際施作，提升效率與安全。ROSO 強調跨域合作，結合建築、工程、機械與 AI，並透過產學合作與新創推動，逐步推進營建自動化「智慧工地」的願景。

關鍵詞：營建自動化、TACO BIM、水泥 3D 列印、施工機器人、營建機器人

前言與產業背景

前言與產業背景營建產業長期面臨三大挑戰：人力短缺、施工安全與生產效率不足如表 1。台灣近年人口結構改變，年輕世代投入營建工作的比例逐漸下降，現場勞力需求卻持續增加，導致施工單位仰賴外籍勞工比例偏高。另一方面，工地為高危險工作環境，根據統計，營建業事故率始終位居各行業前段。同時，營建作業工序繁複、工期壓力龐大、專業技能培養期長，導致施工品質與效率難以穩定維持。

在全球趨勢上，歐美與日本等國已逐步導入 BIM、人工智慧（AI）與機器人自動化技術，藉由資訊整合、感測與自動化施工，發展「智慧工地」模式。然而，營建自動化並非單純取代人力，而是將高風險與重複性的任務交由機器執行，讓人力得以專注於規劃、決策與創造性工作。ROSO 研究團隊正是在此背景

下展開，致力於使工地轉型為安全、智慧且具創造力的新環境。

表 1 營建產業三大挑戰

挑戰面向	現況說明	影響
人力短缺	勞動力老化、年輕世代投入不足	工期延長、施工成本上升
施工安全	高空、重物、粉塵等高風險環境	工安事故率居高不下
生產效率	傳統工序仰賴人工，效率難提升	品質不穩定、進度落後風險

ROSO 研究發展脈絡

ROSO 成立於逢甲大學建築專業學院，專注於數位設計與營建機器人的跨領域研究。團隊長期關注機器人建造技術在建築、藝術與營建產業的應用，探索「材料」、「AI 運算設計」與「機器人建造」三者交互作用下的潛力。一方面挑戰機器人工藝在建築應用的極限，另一方面則針對工地實際問題開發專用施工機

* 通訊作者，ytsheng@O365.fcu.edu.tw

器人，致力於提出解決方案。這些努力逐步推動營建機器人於「智慧營建」領域展現新的契機。在國科會科研創業計畫支持下，ROSO 也衍生成立新創公司，將研究成果持續推進到產業應用中。ROSO 試圖將這兩種觀點整合—從實驗到應用，從設計到產業以推動營建機器人在「智慧營建」領域展現新的契機與視野。更進一步地，在國科會「科研創業計畫之萌芽計畫與拔尖計畫」補助下，衍生成立新創公司，持續研發與實際執行業務與產業中。

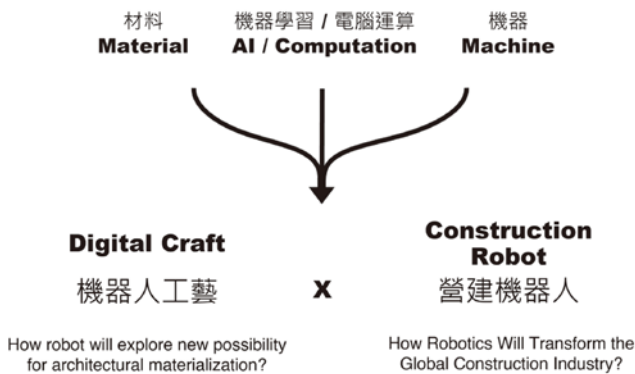


圖 1 ROSO 研究核心方向

智慧營建：TACO BIM 機器人建造系統

工業機械手臂近年已跨足建築、設計與藝術等領域，開啟新應用契機。不同於傳統大量生產 (Mass Production) 的模式，建築與設計領域更強調大量客製化 (Mass Customization)，追求少量、多樣且使用者友善 (User Friendly)。因此，現場需要一個能快速生成機器人運動軌跡與控制流程的系統，以因應多樣化任務。同時，如何簡化複雜的控制語言，降低第一線施工人員的操作門檻，也是推動自動化的關鍵。

ROSO 自主開發的 TACO 機器人控制系統，結合建築資訊模型 (BIM)，讓設計資料可直接轉換為機器人運行路徑，實現一體化的資訊傳遞。此舉不僅提升施工效率，也在「大量製造」與「快速客製」間找到平衡，為產業開啟一條由自動化驅動的新路徑。ROSO 進一步針對「預鑄機器人」與「現場施作機器人」進行實測，驗證技術可行性，並希望藉此重新定義工地師傅的角色，從勞動者轉型為能監測與協作機器人的工程師。

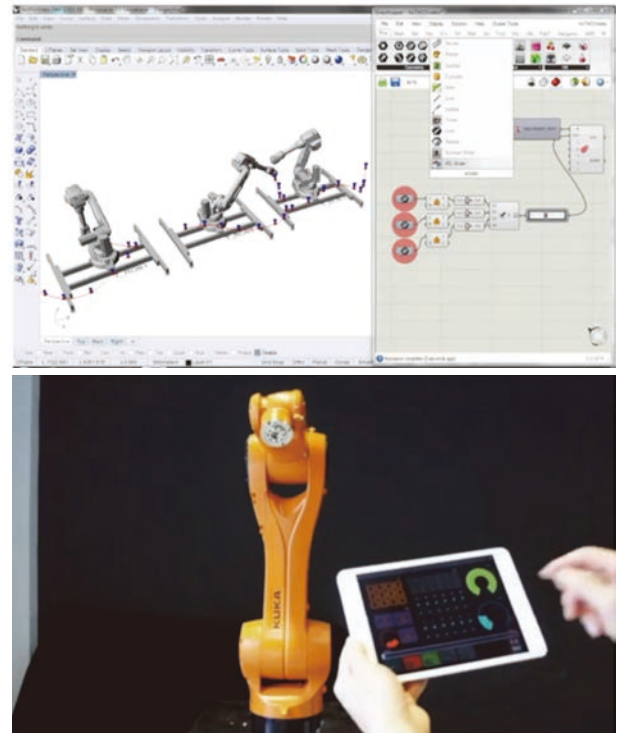


圖 2 (上) 免程式碼機器人控制解決方案；
(下) 遠端面板即時控制機器人



圖 3 智慧工地 TACO BIM 系統圖

營建自動化機器人研發成果

營建機器人預鑄工法於景觀工程－水泥 3D 列印

ROSO 主持人於 2016 年開發出第一代機器人水泥列印系統，其核心概念為「免拆模模具」。透過機械手臂的自由運作，可以直接生成具多樣曲面變化的構造模具，無需傳統拆模程序。此系統的目標在於量產建築單元，但在推動過程中也面臨幾項挑戰，包括：

- 3D 水泥列印材料的準備：如何確保配比穩定、性能符合結構需求。
- 可泵送性與流動順暢度：影響列印過程的穩定性與施工連續性。



圖 4 機器人水泥 3D 列印自由造型模具

- 機器人運作範圍：限制了可製作建築單元的最大尺度。
- 可堆疊性：確保列印單元能有效成型，並滿足結構穩定性與施工效率。

綜合前期的研究經驗，並持續改良後，ROSO 於 2023 年首次將水泥 3D 列印工法應用於台灣大型實際工地。《韻水漫漫》(Flowing Rhymes) 不僅是全台首座無模板水泥 3D 列印公園景觀裝置，同時也是台灣第一件大型水泥 3D 列印街道家具。此作品由 ROSO 與趙建銘建築師共同完成，成為台灣水泥 3D 列印發展的重要里程碑。該作品展示了水泥在無需模板的情況

下，依然能塑造自由曲面。從設計角度來看，水泥 3D 列印意味著更高的創作自由度，能將設計推向新的層次；對使用者而言，則帶來全新的視覺與觸覺體驗，徹底顛覆傳統水泥「生硬」的印象。在施工與結構層面上，每一塊單元皆可於工場預先製作，再透過編號在工地現場快速定位與吊裝完成，大幅縮短工程師的施作時間。更重要的是，水泥 3D 列印的材料利用率接近 100%，幾乎沒有廢料；透過結構分析與支撐路徑優化，亦能有效減少水泥用量，並形成多個空腔以降低結構自重。這些特性不僅提升施工效率，也在「淨零碳排」的時代背景下，展現了永續營建的巨大潛力。

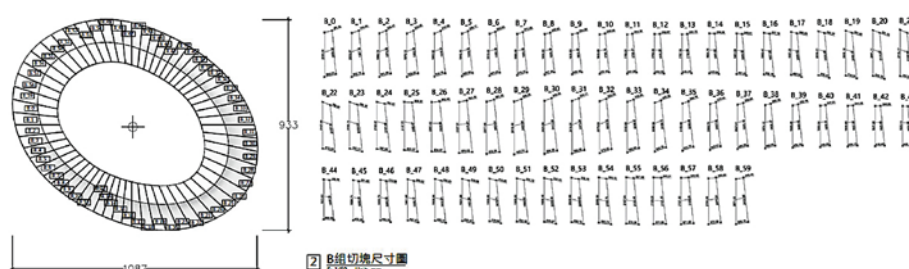


圖 5 (左) 韻水漫漫平面圖；(右) 韻水漫漫單元圖



圖 6 水泥列印大量客製單元



圖 7 機器人執行 3D 水泥列印



圖 8 3D 水泥列印快速乾式組裝



圖 9 韻水慢慢行成三維向度自由之曲面起伏



圖 10 作為免拆模水泥列印預鑄柱子的可能性嘗試

現場施工機器人

ROSO 的工地施作機器人發展，靈感部分來自於自動化倉儲系統的運作邏輯。在倉儲領域中，機器人能透過即時定位、路徑規劃與分工協作，大幅提升效率並降低人力負擔。將這樣的模式借鏡於營建現場，轉化為適應複雜工地條件的施工流程。不同於工廠或倉儲的可控環境，工地充滿不可預測的挑戰，因此我們透過感測器融合、SLAM 定位與智慧調度，讓施工機器人能逐步具備「如同自動倉儲般的協調能力」。這不僅讓施工任務更有秩序與精準度，也能營造一個更安全、更高效的建造環境，使工人能專注於監測與決策，將繁重、危險的工作交由機器人執行。



圖 11 學習倉儲自動化的工地自動化的願景圖

現場施工機器人－黑武士

目前 ROSO 開發的移動式施工機器人「黑武士」已經過多次迭代，並已經實際進入工地承接案件當中，而機器人進入到工地現場當中，需要具備的移動性和空間感知能力與傳統自動化廠的移動底盤機器人並不相同。在營建工地上，需要面對的是惡劣充滿積水粉塵的、動態開放變動的環境、在建築工地中迷失的方向，因此，當進入到工地中的機器人，需要具備適應工地地形的移動系統、空間感知系統、適應工地環境的機械手臂，與聰穎整合各系統的大腦。因此，「黑武士」便是在此架構下，逐步整合多項技術並統合於 TACO BIM 系統軟體中。

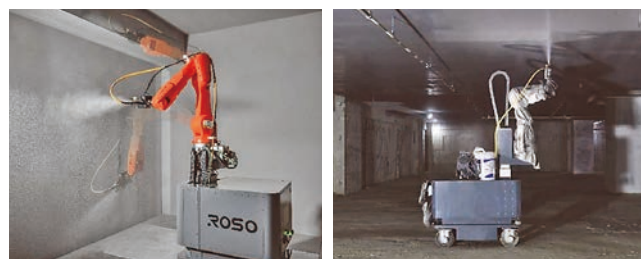


圖 12 ROSO 噴漆機器人

現場施工機器人系統

營建機器人的運作並非單純依靠機械手臂本身，而是建立在一個由設計、控制、感測與介面共同構成的整合系統之上。首先，設計端透過 Rhino 與 Grasshopper 等數位工具進行幾何建模與運動軌跡規劃，這些資料隨後被轉譯並傳輸至伺服器，作為機器人運作的基礎語言。控制器負責將這些軌跡資料轉化為機器人能理解的程式指令，精確驅動機械手臂完成施工動作。與此同時，感測器持續扮演關鍵角色：視覺系統可即時監測環境與物件位置，力回饋模組能測量施工過程中的受力狀態，測量感測器則用以校正定位與精度。這些數據不斷回饋至系統中，確保施工過程能在誤差累積前即時修正，維持穩定與可靠性。另一方面，為了使工地人員能更直觀地操作與監控機器人，系統也搭配了平板等人機介面，讓使用者能快速進行任務調整或即時干預。這樣的架構意味著營建機器人是一個持續循環的協同系統：設計模型驅動施工，感測數據回饋修正，人機介面維持操作彈性。唯有透過這種多層次的整合，機器人才能在充滿變數的工地環境中，實現定位、靈活應變與智慧化建造的目標。

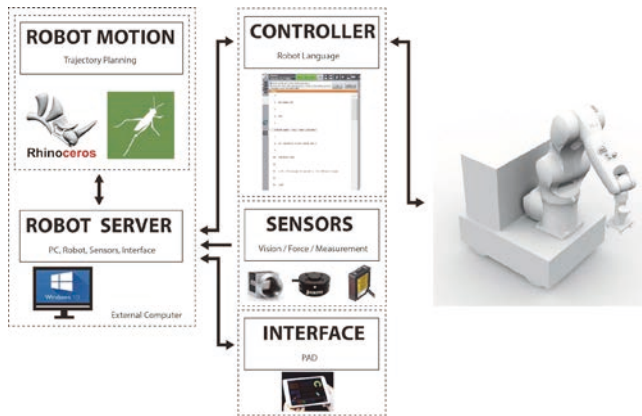


圖 13 現場施工機器人系統圖

現場施工機器人核心定位技術組成

「黑武士」施工機器人的核心功能，在於能夠在任務執行過程中透過視覺與空間感知，形成完整的機器人空間定位系統，讓它理解自身在環境中的位置。為達到這一目標，「黑武士」採用了 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, 即時定位與建圖) 技術，使其能在複雜且不規則的工地環境中導航，並完成施工任務。

1. 感測器輸入

- 搭載 LiDAR 光達掃描環境，獲取高密度的點雲資料。
- 深度相機 捕捉影像與深度，辨識障礙物與施工區域。

2. 地圖生成

- 系統會整合這些感測數據，建立工地的 2D/3D 地圖。
- 因應工地灰塵、雜亂環境，SLAM 系統會進行點雲過濾與配對，優化地圖之穩定性。

3. 定位與路徑規劃

- 在建構的地圖上，黑武士可判斷自身位置，並即時修正累積誤差。
- 在牆面施作中，系統可結合路徑規劃演算法，決定最佳作業路徑，讓黑武士能透過指令到達大致之指定施工位置。

ROSO 現今營建機器人現場施作團隊

再奠定了核心技術基礎後，ROSO 已不再停留於實驗室，而是開始透過實際案件，將機器人帶入工地第一線進行施作。透過真實場域的任務，我們得以不斷驗證、學習與修正，讓技術持續進步。目前 ROSO 已開發出多款施工機器人如圖 15：黑武士 2 mini 號，專

為住宅與小尺度空間設計；檢測工地機器人，負責環境掃描與紀錄；以及 黑武士 2 號，針對地下室與大型廠房能進行高強度作業。這些機器人逐漸從研發走向工地應用，並在不同任務中展現效能。

同時，ROSO 也陸續簽署了與 西門子 (Siemens) 及台中市政府的合作意向書，共同推動營建自動化之施工機器人在更廣範圍的落地應用。而在國內，ROSO 已經開始透過實際承接建設與營造案件，讓機器人真正走進工地第一線，在持續施作的過程中，邊做邊修正，逐步形成一支多樣的機器人施工團隊，持續朝營建自動化的方向前進。



圖 14 (上) 黑武士 1 號於實驗室做定位測試；
(下) 相機跟隨機器人 (eye-in-hand) 工具頭的模式



圖 15 ROSO 營建機器人現場施作團隊
(左：黑武士 2 mini 號；中：檢測工地機器人；右：黑武士 2 號)

一場智慧營建跨域動態合作的實驗場

ROSO 的團隊由建築設計團隊、工程師、機械專家與機器學習研究者所組成，核心精神在於跨領域協作。營建自動化並非單一專業即可完成，而是必須整合設計思維、結構安全、演算法運算與精密控制等多方面的知識與經驗。跨域合作最大的挑戰在於「語言」差異：建築師關注空間與形式，土木與結構工程師強調安全與耐久，數學與電腦科學專家則重視資料運算與模型效能，機械與控制工程師則專注於硬體精度與穩定性。ROSO 的工作日常，就是讓這些不同的專業語言在同一基準下有效對話。

每一項研究成果與實際應用，都是這種跨域磨合的結果。ROSO 採取動態組織的方式，依據專案需求靈活調整團隊組成，讓研究與應用能夠回應建築與營建產業的複雜需求。在這樣的合作模式下，機器人不僅是單純的施工設備，而是跨域整合成果的具體展現。透過實際工地施作與持續修正，ROSO 將跨域協作轉化

為推動營建自動化與智慧化的動力，使每一次的驗證都能成為未來營建模式的新提案。

參考文獻

1. 中華民國土木技師公會全國聯合會，〈衰退的火車頭工業（營建業）應突破困境〉，《技師報》，第 948 期，2015 年 2 月 7 日，pp. 8-1。網址：<http://www.twce.org.tw/modules/freecontent/include.php?fname=twce/paper/948/8-1.htm>
2. 科技產業資訊室。(2018 年 5 月 24 日)。IFR: 工業機器人 2017 年約 34.6 台，年成長 15%。取自 <http://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=14472>
3. About PRETTYGOODLIFE.COM SHOWROOM, <http://glform.com/environments/prettygoodlife-com-showroom/>
4. About Rhinoceros 3D and Grasshopper, https://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_3D
5. 建設機器人相關案例：
Spray-painting robot makes painters redundant(2016): <http://www.constructionmanagemagazine.com/international/spraypainting-robot-mak7es-paint7ers-redund7ant/>
6. Dormehl, L. (2017).SAM is a construction robot that can lay bricks 6 times faster than you can: <https://www.techexplorist.com/meet-sam-construction-robot-works-500-faster-humans/5357/>



艾凡斯頓科技有限公司
EVANSTON TECHNOLOGY LTD.

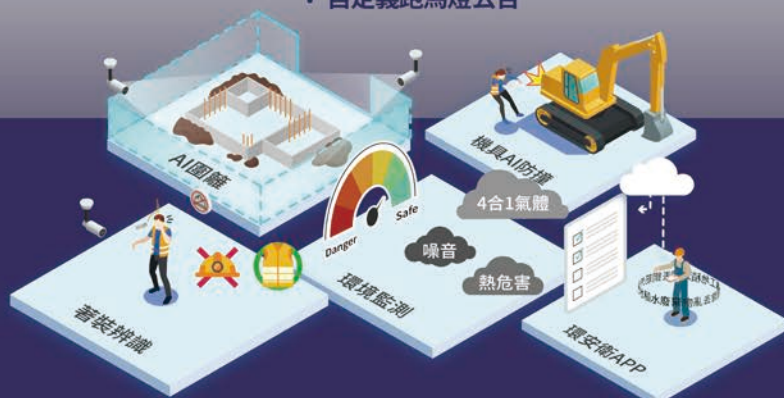
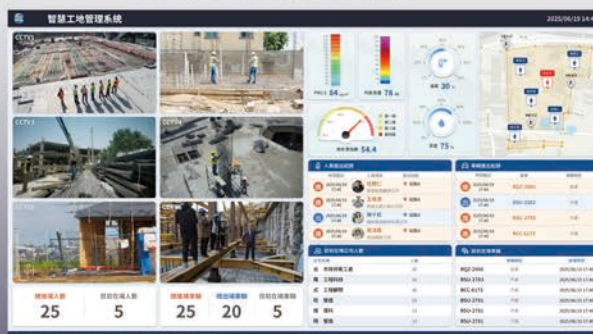


移動式智慧門禁屋

- 以貨櫃模組打造
- 整合智慧門禁 + 人員辨識與數據管理
- 一次吊裝到點，插電即用
- 隨工區轉移皆可靈活部署，確保工地安全高效
- 可加裝警衛亭與降溫設備

整合型工區管理戰情大屏

- 工地 CCTV 影像串接
- 溫度濕度及熱危害換算
- 人車門禁即時數據、統計數據
- 自定義跑馬燈公告



更多 智慧工地 科技降災服務及簡報邀約
歡迎來電洽詢



艾凡斯頓科技有限公司 電話：02-2771-0178
信箱：SALES@EVANSTONAIOT.COM
EVANSTON TECHNOLOGY LTD.
地址：臺北市大安區忠孝東路 4 段 221 號 12 樓



機廠界面管理之智慧化 — 以 AppSheet 整合 RAG 與 LLM 應用研究

陳懿佐／國立高雄科技大學營建工程系 副教授

鍾增煌*／台灣世曦工程顧問股份有限公司高工處 計畫經理

本研究以維修機廠（Maintenance Depot）為例，建置一套基於雲端應用平台 AppSheet 的土建標／核心機電標的界面會議資料系統，以解決大型工程專案中跨界面協作與資訊整合困難的問題。系統透過會議資料模組進行界面協調事項的紀錄，並以檔案儲存模組管理資訊需求單（RFI，Request for Information）及相關文件，使會議紀錄與文件資訊資料得以有效串聯。相較於傳統關聯式資料庫系統，本架構具有建置與維護簡便的優勢，適合快速導入於專案監造或施工管理流程中。

為進一步推動知識管理及決策支援之智慧化，本研究將結構化資料庫輸出為 Key-Value JSON 格式，並整合至大型語言模型（LLM）之檢索增強生成（Retrieval-Augmented Generation, RAG）架構。透過此方法，不僅能進行會議歷程的知識彙整，亦可針對尚待解決之界面問題進行分類與追蹤，提供更精準的決策支援。研究成果顯示，此系統能有效提升專案界面管理效率，並展現低程式碼平台結合生成式人工智慧於營建工程資訊管理之應用潛力。

關鍵詞：界面管理、生成式人工智慧、檢索增強生成、雲端應用平台

前言

大型專案的界面協調會議紀錄承載了大量界面管理資訊，不僅可於執行階段提供即時決策支援，亦是後續設計、採購、施工規劃與監造等階段進行經驗回饋與知識傳承的重要依據。然而，傳統會議紀錄多以非結構化文本保存，未能系統性地轉化為決策支援資訊與可追溯之知識，致使其在治理與傳承上的潛力受限^[1]。在大型專案中，特別是涵蓋土建標與核心機電標的跨界面協作情境，議題數量龐大、界面關係複雜且變動頻繁；若僅依人工彙整與個別工程師的經驗，往往難以有效連結會議紀錄與 RFI（Request for Information）之間的關係，亦不易形成可追溯之管理知識。

既有關於專案管理資訊系統（PMIS）與工程紀錄分析的研究^[1,2]已凸顯資料驅動管理的重要性，然而在

實務操作上，標註、分類與知識抽取多仍仰賴人工完成。近年雖有會議管理與智慧排程工具問世，能一定程度提升資訊整合效率，但普遍缺乏將會議紀錄加以結構化的機制，因此難以為專案管理者提供具行動性且可追溯的洞見^[3,4]。此外，在專案全生命週期（提出、處理過程、決議、結案）RFI 常分散於不同文件與版本之中，缺乏與會議議題、參考文件及附件之間的系統性連結，進一步造成治理知識不易累積與實質應用。

為回應上述缺口，本研究提出一個兼顧「輕量導入」與「知識化運用」的界面會議資料架構。首先，建置基於雲端應用平台 AppSheet 的界面會議資料系統，後端以存放於 Microsoft OneDrive 的 Excel 檔案作為輕量化關聯資料表，並設計會議議題、RFI、處理過程、附件與參考文件等模組；同時，以土建標的工作分解結構（WBS）及核心機電標系統別作為分類標籤，建立跨模組且可追溯的資料關聯性。接下來，透

* 通訊作者，wisely.chung@gmail.com

過撰寫 Python 程式進行資料清理與彙整，將多資料表依其資料結構輸出為 Key-Value JSON 的結構化文本；再整合大型語言模型（LLM）的檢索增強生成（RAG）架構，以達成議題知識彙整、相似案例檢索、未決事項追蹤、合規對映與熱點分析等決策支援功能。

透過資料結構化與標籤化保存會議資訊，並結合 LLM + RAG 技術，將非結構化文本轉化為可追溯且可評量的管理知識。研究貢獻如下：

1. 開發一套以工作分解結構（WBS）為標籤的會議紀錄資料庫，將文本紀錄與核心機電系統別加以連結；
2. 設計一個 WBS-based RAG 決策支援機制，將會議紀錄轉化為高品質、可追溯之管理報告；
3. 透過大型工程專案的實務驗證，展示本架構在資訊轉譯效率、決策品質與治理知識累積上的提升，為營建管理的數位轉型提供兼具實務可行性與學術價值的解決方案。

研究方法

首先建置一個以 AppSheet 雲端應用平台 為基礎之界面會議資料系統，使用者可於開會過程中直接透過行

動裝置操作開會介面，完成議題新增與紀錄輸入。所有資料即時同步至 Microsoft OneDrive 儲存的雲端 Excel 資料表，作為後端的輕量化關聯資料庫。此設計可兼顧現場操作的便利性與資料集中管理的需求，避免傳統以 Word 或 Excel 個別檔案方式紀錄會議內容，造成版本分散與資訊追溯困難的問題，後再將資料轉換至 LLM + RAG 進行人工智慧之決策支援應用，系統流程如圖 1。

系統介面

本研究利用雲端應用平台 AppSheet 建構界面協調會議資料系統，其特色在於以雲端資料表為後端資料庫，並透過低程式碼工具快速生成互動式介面，供專案團隊於會議中即時檢索、更新與追蹤資訊。系統主要界面設計如下：

會議展示頁面（議題檢索與詳細內容）

如圖 2 所示，左側清單呈現所有會議議題（RFI），使用者可快速瀏覽並點選特定議題。右側畫面則顯示該議題的詳細資訊，包含中文與英文之問題描述、契約依據以及回覆內容。此設計使會議參與者能即時掌握每一項界面議題的背景脈絡與決策依據，減少因資訊分散所造成的溝通落差。



圖 1 系統流程圖

RFI Table			-01-0001	
RFI_NO	管制情形	WBS1_ID		
01-0001	CLOSE	0370		
01-0002	CLOSE	0326		
0524	CLOSE	0376		
0525	CLOSE	0326		
3526	CLOSE	0370		
0527	CLOSE	0370		
0528	CLOSE	0370		
0529	CLOSE	0370		
0530	CLOSE	0373		
0537	CLOSE	0373		
01-0003	CLOSE	里程碑		

Subject_E

Dimensions of RH Steel Beams for girder pit track support suggestion

Description_C

依 標契約圖說、 概念設計(詳參考資料)，機坑處軌道支撐型鋼尺寸為250×250，是否已符合 需求？

Description_E

According to the contract drawing and concept design (Refer to the Reference), the dimensions of RH Steel Beams for girder pit track support is 250×250. Does this meet the requirements?

Reply_C

依據合約第7.2冊第3條規定
「承商之設計應以左營機車廠已證實的軌道系統為基礎，並以第14冊圖說為細部設計基礎。所有材料、軌道及道岔組件應與現有系統相同，除非本文件另有說明。」以及第4條的要求「所有材料及軌道/道岔組件應與左營機車廠既有系統相同，或應在合同中另行說明。軌道工程所用材料，經過當保養後，應達到與現有系統相同之使用年限」。
依據 維修部門提供之信息，除 噴塗軌採用 250×250mm規格之H型鋼外，其餘檢修廠檢修軌道均採用300×300mm之H型鋼。

圖 2 會議展示頁面：界面議題清單與詳細內容呈現

會議展示頁面（辦理情形清單）

如圖 3 所示，系統可進一步展開並檢視與 RFI 相關的行動項目（Action Table），並依時間順序顯示各項辦理情形。包含「辦理日期」及「行動描述」等資訊，使決策單位能追蹤辦理進度、責任單位及結案情況。透過此模組，使用者能清楚掌握議題處理歷程，並在會議中確認是否需進一步追蹤或支援。

會議展示頁面（文件超連結）

如圖 4 所示，系統將 RFI 相關之附件（Attachment Table）與引用文件（Ref_DOC Table）透過超連結方式整合於畫面中。使用者可直接點擊連結，開啟原始檔案或版本紀錄，如初始 RFI 文件、回覆信函、設計圖說或契約條文等。此設計確保資訊的一致性與即時性，避免傳統需人工比對與查找的困擾，亦能提高審查及決策效率。

系統透過 AppSheet 的即時展示與互動特性，將議題資訊、處理歷程與文件資料有效串聯，使界面協調會議得以兼顧透明性、可追溯性與高效率，進一步支持專案管理與決策需求。

資料庫架構

為了有效支援工程界面管理過程中的資訊追蹤與決策支援，本研究設計一個關聯式資料庫架構（詳圖 5）。該架構以 RFI（Request for Information）資料表為核心，並透過多個關聯式資料表記錄相關的行動項目、附件、引用文件、狀態、參與單位、核心機電系統別以及工作分解結構（WBS）。此設計能夠確保專案中各項紀錄具備完整性、可追溯性與結構化特徵，進而提升後續檢索增強生成（RAG）的應用價值。資料欄位說明如表 1。

The screenshot displays the 'Interfaces' application interface. On the left, a table titled 'RFI Table' lists various RFI items with columns for 'RFI_NO' and '管制情形' (Control Status). The main panel shows details for RFI '-01-0001', including its 'R_Date' (2025/2/7) and a list of 'Related Action_Tables'. These actions are listed with 'Action_Date' and 'Action_Description', showing a timeline of events from January to March 2025. At the bottom, there is a section for 'Related Status_Tables'.

圖 3 會議展示頁面：界面議題之辦理情形清單

This screenshot shows the same 'Interfaces' application but with a different RFI selected, '-01-0001'. The 'Related Attachment_Tables' section is now visible, listing various file types such as 'RFL_Initial', 'RFL_Reply_Letter(1)', 'RFL_Reply(1)', and 'Others'. A red box highlights the 'RFL_Initial' entry, and a red label '文件超連結' (File Hyperlink) points to it, indicating that clicking this link will lead to the original document. The '管制情形' (Control Status) is also shown as 'CLOSE'.

圖 4 會議展示頁面：界面議題之附件文件超連結

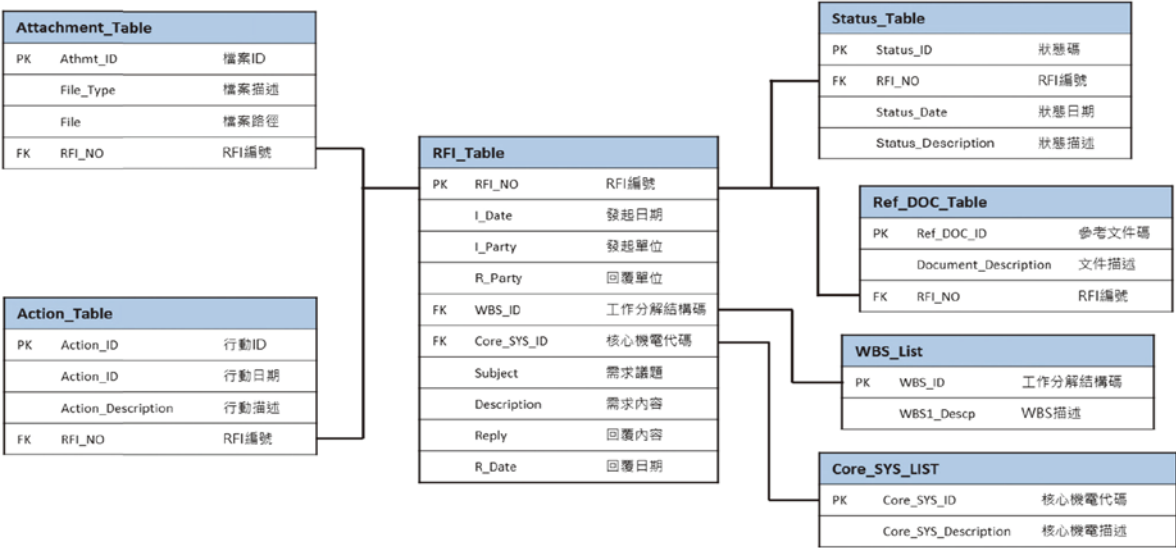


圖 5 資料架構圖

表 1 資料庫欄位說明

資料表名稱	簡要說明	欄位說明
RFI_Table	儲存 RFI 主檔資訊，包含提出單位、受理單位、狀態及關聯系統	- RFI_ID (PK) - Title - Initiator_Party_ID (FK → Party_List.Party_ID) - Receiver_Party_ID (FK → Party_List.Party_ID) - Core_SYS_ID (FK → Core_SYS_LIST.Core_SYS_ID) - WBS_ID (FK → WBS_List.WBS_ID) - Status_ID (FK → Status_Table.Status_ID) - Created_Date - Closed_Date - Summary
Action_Table	紀錄 RFI 對應的行動項目與責任單位	- Action_ID (PK) - RFI_ID (FK → RFI_Table.RFI_ID) - Owner_Party_ID (FK → Party_List.Party_ID) - Due_Date - Status_ID (FK → Status_Table.Status_ID) - Completed_Date - Note
Attachment_Table	儲存 RFI 相關之附件檔案與版本資訊	- Attachment_ID (PK) - RFI_ID (FK → RFI_Table.RFI_ID) - Ref_DOC_ID (FK → Ref_DOC_Table.Ref_DOC_ID) - File_Name - File_Type - File_URL - Version - Uploaded_Date
Ref_DOC_Table	紀錄引用之設計文件或規範條文	- Ref_DOC_ID (PK) - Doc_Type - Clause_No - Version - File_URL
Status_Table	紀錄 RFI 或 Action 狀態	- Status_ID (PK) - Status_Description
Party_List	紀錄專案參與單位與角色	- Party_ID (PK) - Party_Name - Role
Core_SYS_LIST	紀錄核心機電或土建系統別分類	- Core_SYS_ID (PK) - Core_SYS_Name
WBS_List	紀錄工作分解結構	-WBS_ID (PK) - WBS_Name

資料清洗說明

在完成資料蒐集與雲端集中管理後，本研究設計一套 Python 程式流程，用以自動化轉換及結構化會議紀錄資料。此流程會從 Excel 資料表中讀取多個工作表，並依據核心系統（Core）、WBS、RFI 請求項目及其追蹤行動（Action）的層級邏輯，建立一個五層階層式的結構化 JSON 檔案。

在處理過程中，系統會自動偵測不同專案可能存在的欄位名稱差異（如 RFI 主鍵可能標記為 RFI_NO、RFI_ID 或 RFI_Key），並具備容錯機制以確保跨專案資料的一致性。此外，針對 RFI 與狀態紀錄（Status）之間的一對多關係，程式會僅保留「每個 RFI 最新的一筆狀態說明」，確保資料能反映即時進度。若狀態描述未直接存在於狀態表中，則會再透過輔助對照表補齊，避免遺漏資訊。

最後，該流程會整合相關回覆與後續行動紀錄（Action），並依據 Core → 1st WBS → 2nd WBS → RFI → Action 的階層結構輸出成 JSON 檔案。此結構化結果不僅提升資料的檢索性與可追溯性，亦為後續大型語言模型（LLM）及檢索增強生成（RAG）提供高品質的輸入資料。

從結構化 JSON 到 LLM + RAG 的決策支援流程

本研究在完成會議資料之結構化與標籤化後，將輸出的 JSON 檔案作為大型語言模型（LLM）與檢索增強生成（RAG）架構的核心資料來源。JSON 中包含核心系統別（Core System）、工作分解結構（WBS）、RFI 主要資訊、最新狀態以及行動項目等多層級資訊，透過這樣的結構可確保資料之間具備明確的層次與關聯性，完

成的 JSON 檔嵌入 RAG 系統操作介面詳圖 6。

進入 RAG 流程後，系統會依據使用需求（例如：查詢歷程、待辦追蹤、摘要彙整重點或結案界面報告）檢索出最相關的 RFI 內容與附件，並由生成式人工智慧進一步整合，形成具條理且可追溯的報告。這些報告能以摘要、清單、表格或圖表的形式呈現，使管理者快速掌握關鍵議題與決策依據，系統生成內容詳圖 7。

此外，本架構在報告中保留資料來源索引（例如 RFI 編號、相關附件與引用條文），確保分析結果具備可驗證性與透明度。此流程不僅提升了資訊彙整與決策支援的效率，也避免了過度依賴人工經驗的問題，為大型專案的界面管理提供一種結構化、知識化與智慧化的解決方案。

成果說明

透過前述的資料庫架構與 JSON 結構化處理，系統能將會議紀錄、RFI 主檔、行動項目、狀態紀錄與附件文件進行有效整合，並在 LLM 的輔助下生成具條理性與可追溯性的決策支援資訊。（僅部分摘要，機敏內容以“*”呈現）

從界面會議結案之內容依土建結構列出對設計之反饋

WBS: 0370 ***

• OCS

1. RFI: ***-00527

摘要：*** 請求提供 *** 施工圖，以確保界面需求納入土建設計。已確認核心機電標於 2024/5 取得之圖面為最新圖面，未辦理進版。

反饋：設計圖面需保持更新，並應明確標示界面需求，以確保施工過程中的準確性和一致性。



圖 6 RAG 系統嵌入 JSON 檔案



圖 7 RAG 系統生成內容

2. RFI: ***-01-0012

摘要：關於落臂架位置的確認。提供了相關圖說以確認安裝位置，並補充了支撐主吊線及接觸線的拉索支撐點的距離修正資訊。

反饋：在界面位置確認時，提供詳細且準確的圖說非常重要，以支持安裝準確性，並減少施工過程中的不確定性。

3. RFI: ***-01-0013

摘要：FIXING BRACKET 位置確認。提供圖說以確認 B 及 C Line 處的 FIXING BRACKET 是否位於柱中心，並提供其他兩處明確安裝位置。

反饋：施工圖說應提供具體的安裝定位資訊，以確保施工準確性和符合設計要求。

• Signal

1. RFI: ***-00526

摘要：號誌設備與土木工程界面問題。主要涉及 *** 區域內號誌設備及土建單位之間的界面需求，包含嵌入式電纜槽、停車標誌板、轉發器與道旁號誌基礎等介面需求。

反饋：界面需求應明確標示於設計圖說中，並應提前與土建及使用單位進行協調，以避免施工時的衝突和設計更改。

2. RFI: ***-01-0008

摘要：應答器設備需求。經界面會議討論，確認道碴軌道不需要土建標預留結構，並考量基地使用單位不希望在通道內設置應答器

的需求。

反饋：設備需求應提前與使用單位確認，確保符合使用者需求，避免不必要的設計更改和施工調整。

依核心機電系統分類彙整尚未結案的 RFI，及摘要說明辦理情形

OCS

• RFI: ***-00581

1. WBS: 0370 ***- RC 結構工程

摘要：*** 要求調整 *** 檢修坑樓梯以供纜線槽安裝，涉及短柱位置調整及截水溝取消等問題。

辦理情形：已進行多次會議討論短柱偏移及截水溝問題，土建標仍在檢討中，並擬調整設計以預留空間。

• RFI: ***-00582

1. WBS: 0370 ***- OCS 連鎖安全門禁設備

摘要：確認 *** 樓梯及安全門數量，以確保安全門數量不影響 DSSLS 的界面數量。

辦理情形：土建標確認每個檢修平台僅有兩樘安全門，已提供相關設計圖說。

Signal

• RFI: NIS- ***-01-0016

1. WBS: 0326 軌道區工程 - OCS 基礎

摘要：因應新增 GW19，要求核心機電標提供其基礎型式及基礎類別。

辦理情形：尚待核心機電標提供相關資訊。

現在是 2025 年 9 月 13 日，依核心機電系統分類列出超過 2 個月未結案的 RFI

OCS

- RFI: ***-00581

1. WBS: 0370 ***- RC 結構工程

摘要：涉及 *** 檢修坑樓梯及纜線槽安裝的調整需求，自 2025 年 6 月 20 日發起，已超過 2 個月未結案。

TRACK

- RFI: ***-00571

1. WBS: 0370 ***- RC 結構工程

摘要：關於軌道線型與土建圖說間的設計界面，自 2025 年 5 月 16 日發起，已超過 2 個月未結案。

- RFI: ***-00572

1. WBS: 0370 ***- RC 結構工程

摘要：要求調整 *** 軌道終端土建結構，自 2025 年 6 月 9 日發起，已超過 2 個月未結案。

- RFI: ***-00574

1. WBS: 0370 ***- RC 結構工程

摘要：要求澄清土建結構與軌道線形的橫向偏移，自 2025 年 6 月 10 日發起，已超過 2 個月未結案。

結論與建議

結論

本研究針對大型工程專案中土建標與核心機電標的界面協調問題，建置一套結合 AppSheet 雲端應用平台與檢索增強生成（RAG）架構之決策支援系統。透過 AppSheet 為基礎的資料庫設計，將會議紀錄、RFI 文件、行動項目、狀態更新及附件檔案進行結構化整合，並藉由 Python 程式轉換為 Key-Value JSON，再導入大型語言模型（LLM）進行檢索增強生成（RAG），實現跨模組、可追溯的資訊運用。

研究成果顯示，本系統能有效將非結構化文本轉化為具結構化的管理知識，並生成包括 RFI 歷程追蹤、待辦追蹤、設計回饋與 RFI 摘要等多元化決策支援報告。此方法不僅提升了資訊使用效率，亦降低了管理決策對個人經驗的依賴，為專案治理與知識傳承提供具體助益。同時，透過 RAG 架構的應用，有效降低了大型語言模型產生「幻覺」（hallucination）的風險，確保生成內容的準確性與可追溯性。

建議

根據研究成果與實務應用觀察，提出以下後續研究與改進方向：

1. 多元資料來源的擴充

未來可將系統延伸整合專案時程表、施工會議紀錄與契約文本，使決策支援資訊涵蓋更多維度，進一步提升跨界面管理的全面性與深度。

2. 運算架構的在地化

本研究透過本地端電腦建置 RAG 架構，並以 OpenAI API 進行大型語言模型調用，已能避免完整資料上傳雲端的疑慮。未來可進一步嘗試導入開源大型語言模型，於本地端實現全封閉的運算環境，以確保資訊安全與合規性。

3. 跨專案整合

當系統應用於多個專案時，可累積不同專案的界面管理紀錄，形成跨專案的資料庫，進而萃取出更完整且具策略性的界面管理模式。


4. 專用大型語言模型的微調

隨著資料量逐步累積，可嘗試針對界面管理領域進行大型語言模型微調，發展出具備專業工程管理知識的專用模型，以提供更精準的回應與決策支援。

5. 持續驗證與應用推廣

本研究已成功展示依據實際資料生成決策支援資訊的可行性。未來若能透過更多專案案例進行驗證，將可進一步推廣至產業應用，並作為數位轉型的重要基礎工具。

參考文獻

1. Aljassmi, H. and Han, S. (2013). Analysis of causes of construction defects using fault trees and risk importance measures. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(7), 870–880. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000653) United Arab Emirates University.
2. Le, C., Jeong, H.D., Le, T., and Kang, Y. (2020). Evaluating contractors' production performance in highway projects using historical daily work report data. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 04020007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000764](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000764)
3. Waszkiewicz, M. and Gumienny, G. (2021). Benefits of using IT systems in multi-sector projects: a case study of the Polish construction industry. *Procedia Computer Science*, 192, 4269–4278. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.359>.
4. M.E. Khatib, M. AlQurashi, S. AlHashemi, M. AlKetbi and S. AlHarmoodi, "Digital Platforms' Influence on Project Management," 2023 International Conference on Business Analytics for Technology and Security (ICBATS), Dubai, United Arab Emirates, 2023, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/ICBATS57792.2023.10111200>. 



智慧型代理人 於 公共工程採購 風險預警 之應用

陳致霖*／國立屏東科技大學土木工程系 助理教授

薛文蔚／核桃運算股份有限公司 總經理

公共工程採購制度長期存在資訊分散、評估標準主觀及查核資源有限等挑戰，使得標案評選過程易淪為低價競標，忽略工程品質與治理效益，本研究嘗試導入大型語言模型（Large Language Models, LLM）驅動之智慧型代理人（AI Agent），建構公共工程採購風險預警平台，以期提升決策客觀性與查核效能，研究架構以 Llama3-TAIDE 模型作為智慧核心，並結合 Reflection、Tool Use、Planning 與 Multi-Agent 四大設計模式，支持自我反思迭代、多工具整合、任務規劃分解與跨代理協作，系統功能涵蓋短期與長期記憶維護、自然語言跨資料源檢索（採購紀錄、財報、職災資料等）、風險成本估算、查核排程與沉浸式數據探索介面，透過此平台預期可降低決策主觀性、提升公共工程品質與透明度，並促進工程管理朝向智慧化、數據驅動與永續治理之方向發展。

前言

傳統的公共工程採購制度中，工程類型多樣豐富，對於開標單位來說，每一次開標都對應著無數家的投標廠商，然而政府的查核資源相對有限，加上廠商資訊大多散落在不同平台當中，整合起來相對困難，通常會花費大量的時間與精力；此外另一個困境在於，政府單位評估相對主觀，導致選案缺乏一致性的標準，因此多數評選仍以報價為主要依據，缺乏對廠商財務穩定性、歷史履約表現、職災紀錄等面向的量化分析。對於投標廠商而言，則主要面臨政府資料龐大且零散的問題，即便可以在平台上查到與標案相關的公開數據，但資訊分散在不同平台，對於中小型廠商而言，缺乏全面資訊與歷史分析工具，使得投標策略往往淪落至「價格戰」以低價競標的惡性循環當中。這樣的結構性問題，使得開標單位在決策上，常陷於「資訊可得但無法用好」的困

境，也讓投標市場長期停留在價格戰導向，忽略了工程品質與長期治理效益，如何在標案前快速掌握多方數據資訊成為雙方迫切的課題。

在公共工程管理中，工程品質查核是確保施工品質、落實契約規範的重要措施，主管機關透過查核程序，以客觀方式評定工程品質，進而督促監造單位與承包商強化品質管理，查核結果不僅可作為工程單位內部考評的依據，亦能提供廠商改善施工品質與遴選優良廠商的重要參考，目前工程查核作業中在實務應用中，因工程類型多樣、查核資源有限，以及資料評估的主觀性，導致選案缺乏一致性標準，藉由蒐集政府採購數據資料，結合人工智慧與大數據分析技術，可發展出一套客觀化的智慧選案決策模式，透過分析歷年查核結果、工程類型、標案金額、施工進度與異常事件等資料指標建構預測模型，以輔助主管機關於有限資源下進行查核案件之優先排序與選案判斷。因此旨在建立一套以資料驅動為基礎的智慧查核選案決策系統，提升查核效能、

* 通訊作者，waynechen@mail.npust.edu.tw

降低人為主觀判斷，並協助政策制定者在查核資源配置上作出更合理與有效的決策，最終達到提升公共工程品質與施工透明度的目標。

大型語言模型驅動智慧代理進展

隨著大型語言模型（LLM）的最新進展，基於 LLM 的人工智慧代理憑藉其強大的介面（能夠理解人類和機器語言）取得了突破性的進步，研究表明智慧代理人可以有效地建立虛擬模型、處理數據，並在數位孿生模型中與使用者無縫互動，打破以往需翻閱冗長報表才能取得資訊的瓶頸^[1-5]，此亦為工程領域發展之重點趨勢^[6-8]。

有關智慧型代理人（AI Agent）《The 2025 AI Agent Ecosystem v2》（來源：Jeremiah Owyang, Blitzscaling Ventures, 2024 年 9 月）報告趨勢指出可分為四大層級（如圖 1 所示），資料層是所有 AI Agent 運作的基礎，透過私有資料庫（如企業內部監測數據、個人隱私資訊）與公開資料源（政府開放資料、第三方 API）相結合，並依靠統一 API 介面確保存取效率與合規性，為上層算法提供豐富且可信的訓練與推理素材。管理層則肩負維繫整體生態安全與穩定運行的重任，透過 KYA（Know Your Agent）驗證、分級憑證、AgentOps 監控、網路仲裁及自我修復機制，確保每一位代理在各自邊界內行動，並能在發生異常時迅速回滾或隔離風險；應用層進一步將這些代理技術落地轉化為可視化、可互動的解決方案，既有無程式碼平台讓業務人員輕鬆配置多通道客服或數據分析 Agent，也有專業 SDK 與開源框架支持研發者打造客製化智能機器人，並且未來將透過動態生成機制自動產生新應用、快速迭代；最外層的生態系市場則由亞馬遜、谷歌、微軟等巨頭與眾多新創共同競爭與協作，為各式場景提供「即插即用」或「按需訂閱」的

代理服務，推動企業與個人用戶進入 AI 原生時代。四層相輔相成，不僅形成完整的技術到商業化閉環，也將使 AI Agent 成為未來互聯網、行動應用及企業軟體的核心動力，引領跨產業跨域的智慧化轉型浪潮。

整體架構與功能

在架構開發上本研究以財團法人國家實驗研究院開發「Llama3-TAIDE 模型」作為 LLM 智慧核心，TAIDE 能提供 70 億參數之大型語言模型，並融入臺灣特有的語言、價值觀、風俗習慣等元素，使生成式 AI 引擎能夠更好地理解 and 回應在地使用者的需求，具備可信任的生成式 AI 引擎基礎模型，並應用於不同領域，以滿足使用者多元化的需求。此模型支持複雜任務的自主決策與執行，前端開發則採用 Google 的 Angular 框架，構建跨平台且用戶友善的介面，確保良好的互動體驗，後端方面使用 Python 3.10+ 負責邏輯處理、強化學習演算法與模型整合；Node.js 18+ 則負責實作 API 開道，並與 Angular 前端框架進行串接，為提升系統的可擴展性與穩定性，採用 Docker 進行容器化，並以 Kubernetes 實現彈性部署與資源管理，確保智慧代理服務能穩定高效運行，滿足政府採購預警平台之需求。

本研究整體系統分為多個關鍵模組，如圖 2 所示。在 Memory 模組中，系統同時維護短期記憶與長期記憶，將用戶交互資訊、採購與財報資料、職災紀錄及歷史查核決策持久保存，為後續推理提供豐富上下文；Planning 模組負責接收當前狀態，利用子目標分解（Subgoal Decomposition）與思考鏈（Chain of Thoughts）策略，結合自我批評（Self-critics）與反思（Reflection）機制，持續優化維護行動計劃；在 Tools 模組中，系統整合了 OpenRAG 技術，使使用者可透過自然語言即時查詢，跨越多個資料來源（如採購紀錄、財務報表與職災資料

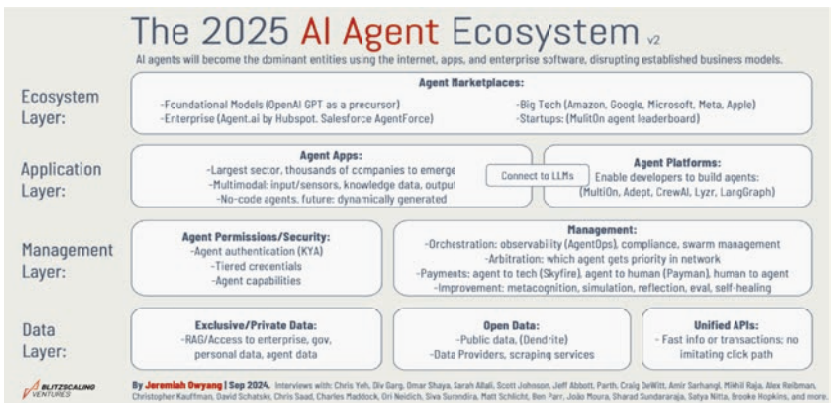


圖 1 The 2025 AI Agent Ecosystem 發展框架^[9]

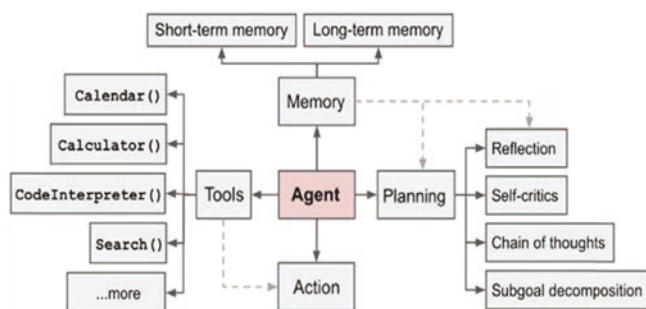


圖 2 本研究 AI Agent 開發框架

自動獲得整合答案，顯著降低對傳統 SQL 查詢與原始數據處理的依賴，並提升查詢效率與可用性。同時，Agent 亦能調用多種工具，包括 Calendar () 進行查核排程、Calculator () 做成本與風險估算、CodeInterpreter () 進行動態程式運算，以及 Search () 以擴充資料檢索能力；最後，Action 層將規劃結果轉化為具體的 API 請求或使用者指令，並通過前端儀表板或表單直觀呈現分析結果。此架構透過前端畫面 Angular 與 OpenAI API 的緊密整合，不僅保障跨平台操作流暢，也具備高度擴展性、自動化且可追溯的智慧 Agent 解決方案。

在 Agent AI 及其關鍵設計模式中，理解每種模式如何賦能大型語言模型 (LLM)，使其具備更高自主性與效能至關重要。本研究透過大型語言模型 (LLM) 之四大智慧代理設計模式 Reflection Pattern、Tool Use Pattern、Planning Pattern 以及 Multi-Agent Pattern 四種先進的政府採購風險 AI Agent，各功能流程敘述下：

1. Reflection Pattern (反思模式) – 在本系統中反思模式是核心驅動機制，AI Agent 能根據最新採購紀錄、財報數據與職災資料，不斷進行自我評估與迭代修正，避免錯誤推論的累積，透過反思與再生成過程，系統能持續優化風險辨識模型與決策結果，並於沉浸式視覺化介面中即時更新，讓查核人員直觀理解數據背後的推理邏輯。此模式亦能促進模型的持續學習，使系統隨著時間演進自我完善，強化長期運作的穩定性與適應性。
2. Tool Use Pattern (工具使用模式) – AI Agent 能靈活調用多元工具與數據來源，並透過 OpenRAG 技術，使查核人員僅需輸入自然語言，即可自動檢索並整合跨資料源資訊（如採購星球、財報星球、職災星球）。同時 Agent 亦可調用 Calculator () 進行風險成本估算、Calendar () 規劃查核排程，以及 CodeInterpreter () 執行動態分析，多工具整合大幅降低對傳統 SQL 與原始資料處理的依賴，提升使用者體驗與查詢效率。

3. Planning Pattern (規劃模式) – AI Agent 能將複雜的採購查核或風險辨識流程拆解為多個子任務，並依據查詢回饋與最新資料動態調整行動計畫。舉例而言，當查核人員查詢「該廠商是否具備高風險特徵」時，系統會自動分解為子目標：(1) 搜尋歷年得標紀錄、(2) 分析財務異常、(3) 比對職災紀錄，最後在視覺化介面中合併呈現結果，提升查核透明度與決策精準度。
4. Multi-Agent Pattern (多代理人模式) – 系統中配置多個專業代理人分工協作，例如「採購紀錄代理人」、「財報分析代理人」、「職災風險代理人」等。這些代理人彼此共享資訊並協同決策，模擬跨部門查核團隊的合作模式。最終結果將在沉浸式數據探索介面中進行關聯視覺化，幫助使用者快速掌握全貌，並支援不同查核場景下的即時決策需求。

應用場景與情境

公共工程涉及龐大的資金投入與高度社會關注，任何施工品質不良、廠商違規或財務風險，都可能導致工程延宕、追加預算，甚至影響公共安全。然而，過去查核人員在審查過程中，往往需要手動蒐集不同來源的數據，如政府採購紀錄、廠商財報、職災通報等。這些資料分散於不同系統，格式不一，且查詢門檻高，導致查核效率低落、風險難以及時發現。基於此，本研究透過 AI-Ready 開放資料生態系與 OpenRAG 技術，打造沉浸式數據探索與智慧型代理人輔助平台，如圖 3 所示。查核人員僅需以自然語言輸入問題，系統即可即時整合採購星球、財報星球與職災星球等資料，並在 AI Agent 的協助下，快速完成風險辨識與決策支援，應用情境說明如下：

1. 查核人員進行標案資格審查 – 當政府單位要核准某廠商承攬大型公共工程時，查核人員可透過自然語言輸入：「請檢查該廠商近五年的得標紀錄與是否曾有職災通報。」AI Agent 會自動調用採購星球資料庫，列出該廠商的歷年標案紀錄；再串接財報星球，檢測是否存在資金缺口或債務異常；最後比對職災星球，檢視是否有多次重大職業災害。結果將即時呈現，協助查核人員快速判斷該廠商是否具備承攬資格。
2. 異常預警與主動通知 – AI Agent 不僅被動回應查詢，還能主動監測資料異動。例如，若某承包商的財報出現異常虧損或債務暴增，AI Agent 會自動推播警訊給相關查核人員，並附上數據佐證，提醒其注意潛在風險，避免不良廠商進入公共工程市場。



- 工程執行期間的風險追蹤 – 在公共工程施工過程中，風險並非只存在於標案審查階段，而是會隨著工程進度持續變動。因此本研究設計的 AI Agent 能在工程執行期間，持續監控承攬廠商是否涉及新的違規案件或職業災害。例如，若工地在施工過程中發生重大安全事故，AI Agent 可即時串接職業安全衛生署（職安署）的公開資料，並將最新的事務通報、違規裁罰或罰鍰紀錄，整合至系統平台中，這些資訊會自動更新至廠商風險評級，使查核人員與監管單位能第一時間掌握風險狀況此外，AI Agent 也能透過週期性資料比對與不定時更新機制，自動追蹤相關資訊。例如：查核人員可進一步透過自然語言詢問：「該廠商近一年是否有重複發生相同類型的職災？」系統即可即時回覆並給出具體數據依據。
- 查核人員沉浸式探索情境 – 傳統查核多為靜態報表比對，本研究的沉浸式數據探索介面，讓查核人員能以互動方式瀏覽不同維度的資訊。例如，他們可以在 3D 知識圖譜中點擊某廠商節點，即時展開其關聯的得標紀錄、財報異常、職災事件。AI Agent 則像「智慧助理」般解釋數據意涵，並回答「該廠商是否與其他違規廠商存在合作關係？」等進階問題，提升探索的直覺性與深度。

結論

本研究針對公共工程採購過程中資訊分散、評估主觀與查核資源不足等問題，提出以大型語言模型（LLM）驅動之智慧型代理人應用架構，建構公共工程採購風險預警平台，應用層面上該平台能協助主管機關於標案資格審查、異常預警通知、施工期間風險追蹤及

跨部門查核決策等場景中，快速掌握廠商風險全貌，並合理分配有限查核資源。此舉不僅能提升查核效能與決策透明度，也有助於改善低價競標導向的結構性問題，進一步強化公共工程品質與社會信任，本研究驗證了智慧型代理人在公共工程採購風險管理中的可行性與價值，為未來推動數據驅動之智慧治理模式奠定基礎。

參考文獻

- Choi, S. and Yoon, S. (2024). GPT-based data-driven urban building energy modeling(GPT-UBEM): Concept, methodology, and case studies. *Energy and Buildings*, 325, 115042. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115042>
- Huang, Y., Zhang, J., Chen, X., Lam, A. H. F., and Chen, B. M. (2024). From Simulation to Prediction: Enhancing Digital Twins with Advanced Generative AI Technologies. 2024 IEEE 18th International Conference on Control & Automation (ICCA), 490-495. <https://doi.org/10.1109/ICCA62789.2024.10591881>
- Hwang, J. and Yoon, S.(2025). AI agent-based indoor environmental informatics: Concept, methodology, and case study. *Building and Environment*, 277, 112879. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112879>
- Sun, Y., Zhang, Q., Bao, J., Lu, Y., and Liu, S. (2024). Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.015>
- Yoon, S., Song, J., and Li, J.(2025). Ontology-enabled AI agent-driven intelligent digital twins for building operations and maintenance. *Journal of Building Engineering*, 108, 112802. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112802>
- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O., and Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103299>
- Hosseini, S. and Seilani, H. (2025). The role of agentic AI in shaping a smart future: A systematic review. *Array*, 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100399>
- Siemon, D., Strohmman, T., and Michalke, S. (2022). Creative Potential Through Artificial Intelligence: Recommendations for Improving Corporate and Entrepreneurial Innovation Activities. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/163914>
- 國科會土木水利學門
- Owyang J. (2025, September 20). 2025: AI Agent Ecosystem. Jeremiah Owyang | Tech+Business. <https://jowyang.beehiiv.com/p/2025-ai-agent-ecosystem>



智慧化 人本環境 舒適度監測 與 視覺化平台

林佳穎／國立高雄科技大學工程資訊整合與模擬研究中心 BIM開發工程師

吳翌禎*／國立高雄科技大學土木工程系 教授

過去的室內環境監測平台多聚焦於即時監測與資料彙整，雖有部分研究結合控制功能，但對「人因互動」與舒適度調整的連續反饋設計仍較為缺乏。因此，本研究提出一套結合環境監測、設備控制與人因條件分析的監測平台，針對熱舒適度、視覺舒適度與空氣品質三項指標，設計循環互動的調節流程。系統透過感測器即時蒐集環境數據，並加入深度學習模型分析人數與衣著資訊，進行 PMV/PPD 熱舒適度計算、照度與色溫調整，以及 CO₂ 熱區判斷與換氣建議。實驗結果顯示，平台可即時呈現環境狀態，並根據人因進行動態調整，有助提升空間舒適度並減少不必要能源消耗。

關鍵詞：熱舒適度、視覺舒適度、室內空氣品質、PMV/PPD、以人為本

前言

現代教育空間的室內環境品質同時受到熱舒適度（Thermal Comfort）與室內空氣品質（Indoor Air Quality, IAQ）的影響最為明顯，且與建築能耗有密切的關聯。而通風系統為調節這兩項因素的主要設備，可透過引入新鮮空氣排除污染物（如二氧化碳、揮發性有機化合物），同時調整室內溫濕度，以達到健康且舒適的環境。然而，為維持良好的室內環境，暖通空調系統（HVAC）往往需耗費大量能源，約占非工業建築總能耗的 60 ~ 70% [1]。因此，現代智慧建築管理需兼顧室內環境品質與能源使用效率，達成最佳化的運作模式。此外，視覺舒適度（Visual Comfort）與聲學舒適度（Acoustic Comfort）亦影響使用者體驗。然而，視覺環境調節如照度與色溫，與能源消耗關聯性較高，且現有智慧照明系統已能穩定運作並整合感測資料進行即時控制，因此本研究優先將視覺舒適度納入系統設計。相較之下，聲學舒適雖亦重要，但其與

能源控制的直接關聯較低，故暫未納入本次系統建構範圍，未來可另行探討。

在熱舒適度的評估方法上，國際常見的指標為平均熱舒適度預估指標（Predicted Mean Vote, PMV）與預測不滿意百分比（Predicted Percentage Dissatisfied, PPD），兩者依據 ISO 7730 及 ASHRAE 55 等國際標準廣泛應用於空調環境。然而，傳統的 PMV/PPD 模型多使用一般化數值（如固定代謝率與衣著絕熱值）進行計算，未充分反映實際個體差異 [2]。

在空氣品質方面，二氧化碳（CO₂）濃度為評估室內通風效能及健康風險的主要指標。當通風不足，CO₂ 濃度容易上升，導致頭痛、疲勞、注意力不集中等症狀，並影響學習效率及認知能力。適當的空氣交換率（Air Exchange Rate, ACH）對維持良好的室內空氣品質相當重要 [3]。

在視覺舒適度方面，照度（Illuminance）與色溫（Correlated Color Temperature, CCT）為主要考量的指標，普遍應用於室內光環境品質評估，適當的照度能提升使用者的視覺舒適度與滿意度，而介於 3,300K 至

* 通訊作者，kwu@nkust.edu.tw

5,300K 的中性至高色溫範圍，有助於提高視覺清晰度與專注程度，此外，照度與色溫兩者之間存在交互作用，需同步調整，避免單獨設定導致視覺疲勞或不適^[4]。因此，現代照明設計需考量這兩項參數，以提供合適且實用的光環境。然而，在上述舒適度監測指標之外，使用者行為與人因參數的考量亦不容忽視。因此，未來智慧建築的舒適度監測應導入人因參數，並與環境控制策略緊密耦合，以貼合實際使用情境，提升系統可用性與調節成效。

系統設計與實作

本研究之系統架構如圖 1 所示。IoT 感測器與相機負責量測環境與空間使用者的相關訊息（例如溫、濕度、CO₂、占用狀態與衣著量），並將資料送入的監測平台。平台依據即時資料與使用者需求，分別驅動三個獨立的舒適度運算模組：熱舒適度（PMV/PPD 熱圖）、空氣品質（CO₂ 熱圖）與視覺舒適度（智慧燈光控制）。各模組各自完成運算後，結果回饋至平台，由平台產生相應的控制或介面回應，以實現「感測－運算－回饋」的封閉式控制流程。此架構能確保空間內的舒適度條件維持在適當範圍，並提升環境調控的效率。



圖 1 系統架構圖

互動情境與場域配置

本研究以一間面積 45.62 平方公尺之教室作為實驗場域，進行室內舒適度互動系統之部署與測試。場域中配置 4 個溫濕度感測器與 4 組智慧燈具，分別負責即時環境資料蒐集與燈光控制回饋，並支援使用者與系統之互動操作。感測器佈點設計參考《2010 年臺北市工商業節能減碳自治條例》中針對 600 平方公尺以下室內空間之建議取樣密度，採用四點均勻配置方式，以提升空間覆蓋率與資料代表性。智慧燈具則依照場域使用需求（如上課、休息、演講等）規劃為可分組控制，並對應不同照度與色溫需求進行動態調節。

此外，實驗場域已建構完整建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM），以提供實體空間與視覺化人因互動平台之對應基礎。BIM 模型搭配即時感測資料，可於平台中呈現空間配置、設備佈署與感測位置，作為後續互動操作與熱圖視覺化的依據。如圖 2 所示，包含空間 BIM 模型、感測器配置與智慧燈具配置情形。

人因互動流程

本研究建構一套以人因互動為導向之平台，透過「感測－運算－回饋」流程，整合使用者回饋與系統控制，提升室內舒適度管理的回應性與操作可見性。整體互動流程可歸納為三項核心功能：

- 覺察（Perception）：系統於三維介面即時呈現各舒適度之熱圖，同步顯示座位占用情形，協助掌握人一環境互動狀態。
- 調節（Action）：使用者可透過介面進行場景模式切換（如上課、休息、演講）或進一步執行微調操作，如設定照度強度、色溫範圍。此設計保留使用者自主性，讓系統能因應不同活動需求靈活調整環境條件。

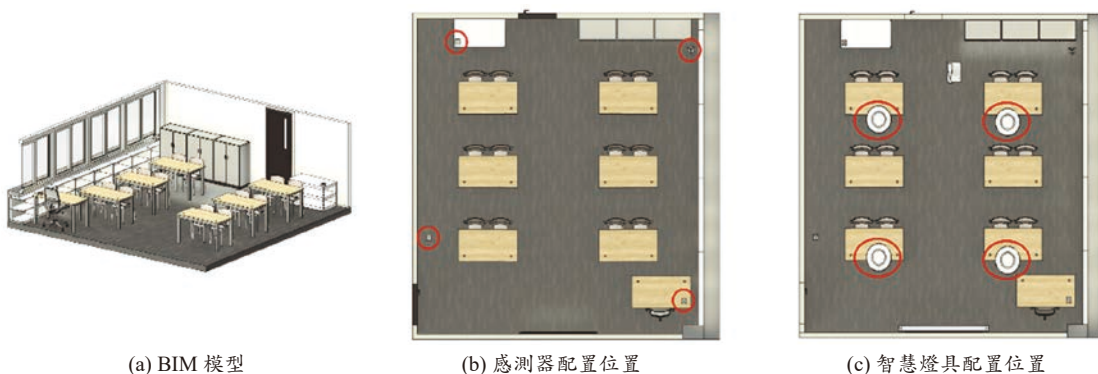


圖 2 BIM 模型和空間配置圖

- 回饋 (Feedback)：介面於使用者調節後，即時更新相關熱圖與感測數據，反映預期之環境變化；並針對特定情境（如 CO₂ 濃度過高）提供具體建議，例如透過燈光閃爍提醒使用者啟動交換機。

此互動流程兼顧系統自動控制與使用者主動調整兩者功能，實踐「Human-in-the-Loop」的設計理念，並提升使用者對環境變化的感知能力與參與感，為智慧空間中舒適度管理提供更具彈性與回應性的解決方案。

環境感測

本系統透過 IoT 感測裝置與影像辨識技術，進行室內空間中環境條件與使用者狀態之即時感知，作為後續舒適度模組運算與互動決策的基礎。其整體感測架構如圖 3 所示，分為三個層級：

- 首先在感知層 (Perception Layer)，本研究採用具 Wi-Fi 傳輸功能之 ESP32 模組，搭配溫濕度與 CO₂ 感測器，進行每 5 秒一次的連續量測。感測資料於端點即自動加註時間戳記與節點代碼，並封裝為 JSON 格式。
- 於網路層 (Network Layer)，各節點資料經由 Wi-Fi 傳送至 Web API 伺服器，並透過 HTTP POST 方式上傳。伺服器端負責執行資料驗證與格式轉換後，將資訊儲存於後端時序資料庫中。
- 於應用層 (Application Layer)，系統採用 TimescaleDB 作為感測資料之儲存架構，支援高頻率資料的查詢與運算。前端平台由 Unity 所建構，結合 BIM 空間資訊，透過 REST API 定期擷取最新感測資料，以更新儀表板數值並繪製空間熱圖，達成即時之環境可視化回饋。

除了環境量測外，本研究亦導入影像辨識技術，以強化系統對人員狀態之理解，進一步提升互動能力與舒適度推估精度。於熱舒適度上，系統應用 U-Net 結合 ResNet50 架構進行即時影像分割，估算使用者衣著覆蓋率，轉換為相對應之衣著熱阻值 (Clo 值)，作為 PMV/PPD 模型之參數之一。於空氣品質上，則採用

YOLOv8 模型進行即時人數與活動狀態辨識，藉以擷取空間人數與 CO₂ 濃度上升趨勢，並評估是否需介入換氣調節以維持空氣品質。

本系統所整合之多元感測來源與即時辨識機制，能有效支援後續三項舒適度模組之運算與控制，並強化整體平台對於人一環境互動關係之即時掌握與互動能力。

舒適度運算模組

本系統針對教育場域，設計三項環境控制循環機制，分別為熱舒適循環、空氣品質循環與視覺舒適循環。此三循環以感測器與影像辨識資料為基礎，結合時序資料庫與環境監測平台之運算結果，進行實體空間的空調、通風與照明控制。透過回饋式架構，使虛實環境可即時互動，達成動態舒適度管理。以下將分別說明各循環之判斷邏輯與控制機制設計。

熱舒適度評估模組

本研究採用 PMV 與 PPD 兩項指標評估室內熱舒適度。PMV 模型由 Fanger (1970) 所提出^[5]，其計算式如式 (1) 所示，綜合考量空氣溫度、輻射溫度、風速、相對濕度、服裝熱阻與代謝率等因素，以量化人體對熱環境的主觀感受；PPD 指標則依據 PMV 值推算出預期感到不舒適的使用者比例。

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0.303e^{-0.0036M} + 0.028) \times \{ M - 3.05 \times 10^{-3} \\ & \times (5733 - 6.99M - p_a) - 0.42 \times (M - 58.15) \\ & - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) - 0.0014 \times M \\ & \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 \\ & - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \} \quad (1) \end{aligned}$$

為提升即時性與個別化的評估能力，系統整合 YOLOv8 進行即時人數偵測，並透過 UNet 搭配 ResNet50 模型辨識服裝類型，進一步估算個體服裝熱阻。所有參數均由感測器與影像辨識模組即時更新後匯入環境監測平台中運算，並以熱區圖形式呈現於使用者介面，協助判斷空間熱環境是否符合使用需求。

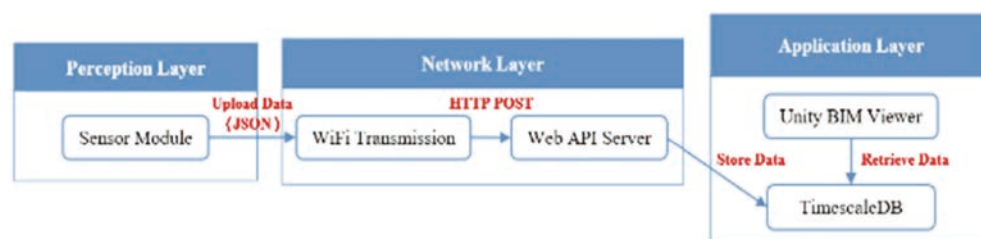


圖 3 IoT 環境感測架構圖

本研究所提出的熱舒適度循環監測架構，如圖 4 所示，係透過定期且自動化的監測循環，評估並呈現室內空間的熱環境舒適性。系統以 5 分鐘為單位，透過 IoT 感測器即時收集溫度、濕度及 CO₂ 等環境數據，並即時進行熱舒適度分析與判斷，流程架構如下：

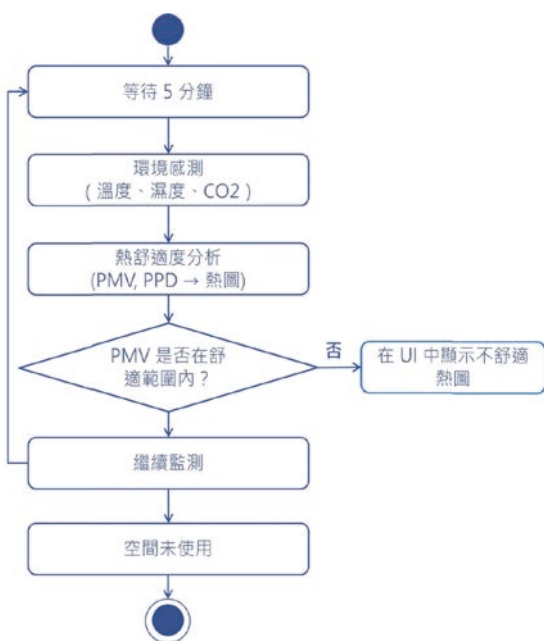


圖 4 熱舒適度判斷流程圖

首先，系統每隔 5 分鐘進行環境數據的擷取，包括室內的溫度、濕度及二氧化碳 (CO₂) 濃度等參數。接著，系統透過 PMV 與 PPD 模型，進行熱舒適度的計算分析，將結果以視覺化熱圖的方式展示於使用者介面 (UI) 中。

接著系統將自動判斷目前的 PMV 數值是否落在定義的舒適範圍內 (-0.5 到 0.5 之間)，若超出範圍，系統將於 UI 中即時且直觀的顯示不舒適區域之熱圖，協助管理者迅速辨識需調整之空間，並提供視覺依據以供後續空調或通風調整操作；若當前 PMV 值在舒適範圍內，則系統繼續下一輪監測，直到空間不使用且系統關閉此監測循環才會停止。透過此監測與回饋流程示例如圖 5 所示，管理者能有效且即時地掌控室內熱環境品質，並依據具體視覺化資訊主動調控，以提高使用者對空間舒適度的滿意程度。

空氣品質評估模組

首先本研究以 Faubel 等人^[6]提出的室內 CO₂ 品質平衡模式評估換氣建議，如式 (2) 所示^[6]。

$$C(t) = \left(C_{out} + \frac{S}{q} \right) - \left(C_{out} + \frac{S}{q} - C_0 \right) e^{-K1(t-t_0)} \quad (2)$$

	id integer	temperature real	humidity real	co2 real	windSpeed real	detectiondatetime timestamp without time zone
1	2	30.6	74.4	557	0	2025-06-29 12:41:01.702205
2	1	29.6	68.2	1089	0	2025-06-29 12:40:38.519429
3	3	32.4	62.6	874	0	2025-06-29 12:40:35.238809
4	4	30.3	75.9	362	0	2025-06-29 12:38:53.914862
5	2	30.5	74.5	549	0	2025-06-29 12:36:01.15528
6	1	29.9	60.3	1099	0	2025-06-29 12:35:30.176609
7	3	32.5	62.7	900	0	2025-06-29 12:35:34.918209
8	4	30.1	76	363	0	2025-06-29 12:33:53.655116
9	2	30.6	74.4	550	0	2025-06-29 12:31:00.601718
10	1	29.5	68.4	1112	0	2025-06-29 12:30:37.839509
11	3	32.2	62.8	896	0	2025-06-29 12:30:34.56371
12	4	29.6	76.1	362	0	2025-06-29 12:28:53.785546
13	2	30.7	74.2	562	0	2025-06-29 12:26:00.097704
14	1	29.4	68.5	1122	0	2025-06-29 12:25:37.602807
15	3	32.3	63.2	875	0	2025-06-29 12:25:34.224203
16	4	30.4	76.3	365	0	2025-06-29 12:23:52.925521
17	2	30.6	74.4	543	0	2025-06-29 12:20:59.504561

(a) 即時監測資料



(b) PMV Heatmap

圖 5 熱舒適循環示例

式中的參數如下：

- 戶外 CO₂ (C_{out}) 與初始室內 CO₂ (C₀) 皆由 DS-CO₂-20 感測器量測。
- 即時人數 (N) 透過影像辨識取得。
- S 為室內 CO₂ 生成率 (ppm · m³/h)，取決於即時人數 N 與單人排放量；本研究以 40 mL/min (0.000667 m³/s) 作為平均值，故 S = N × 0.000667 × 106 / V。
- V 為室內體積 118.62 m³。

空氣品質的部分也採用循環式監測架構，如圖 6 所示，每隔 5 分鐘透過 IoT 感測器即時偵測室內二氧化碳 (CO₂) 濃度，並依據數據自動進行後續調控判斷。其監控流程首先進行濃度數據擷取與分析，接續判斷當前 CO₂ 濃度是否達到或超過預設的警戒閾值 (1,000 ppm)，再根據判斷結果採取相應措施。

當 CO₂ 濃度達到或超過 1,000 ppm 時，系統將透過環境監測平台中的 CO₂ 熱圖結果，即時辨識濃度較高的區域，並啟動該處智慧燈具進行三次閃爍，提供現場使用者與管理者明確的視覺提示。同時，UI 將同步顯示空氣交換建議，並提供操作提示按鈕，供管理人

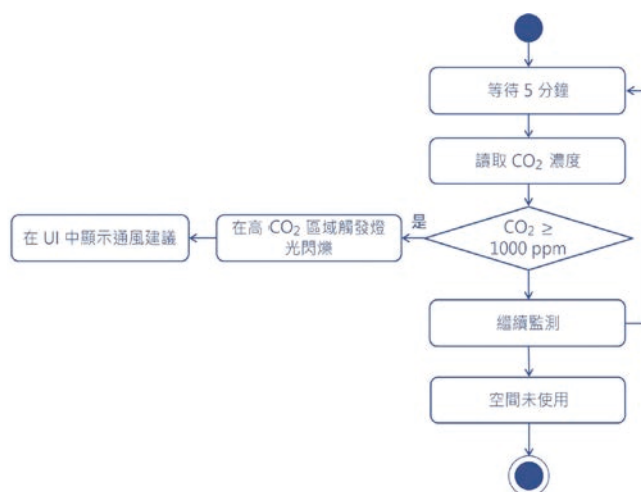


圖 6 空氣品質判斷流程圖

員評估是否執行換氣調節。若點擊提示，系統將自動標示並高亮顯示對應換氣設備的位置，協助使用者迅速完成操作，使室內空氣品質回復至合適範圍。若監測結果未超過 1,000 ppm 閾值，系統則維持現有監測狀態，不觸發額外動作，並持續以每 5 分鐘為週期執行下一次監測，直到系統關閉此監測循環才會停止，其應用情境如圖 7 所示，以確保即時掌控室內空氣品質變化，進而達到主動維護空間空氣品質的目的。

視覺舒適度評估模組

本研究建構一套視覺舒適度控制系統，目的在協助使用者根據實際需求與活動場景，即時調整照明環境，以確保視覺舒適性維持於適宜範圍內。

首先，從文獻中發現照度及色溫為視覺舒適的主要因素，然而從歐盟的 EN 12464-1 標準中發現此標準針對教育場域的情境、照度與色溫都有明確的建議值，因此本研究在視覺舒適的評估中參考此標準^[7]，建立三種針對教育空間常見之照明情境，分別為「上課模式」、「休息模式」及「演講模式」，並針對這些情境事先定義適合的色溫與照度建議範圍，三種模式的設定值如表 1 所示。

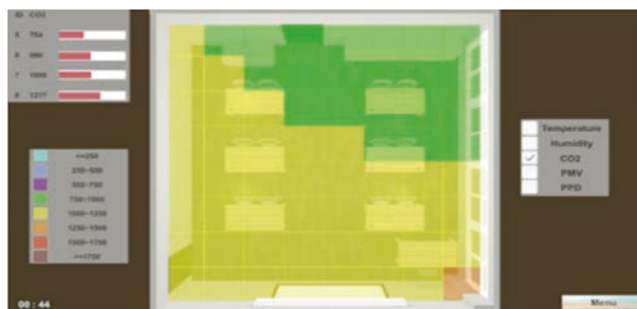
表 1 照明情境模式設定

場景	照度 (lx)	色溫 (K)
上課模式	300 ~ 500	3300 ~ 5300
休息模式	100 ~ 300	3300 以下
演講模式	300 ~ 500	3300 ~ 5300

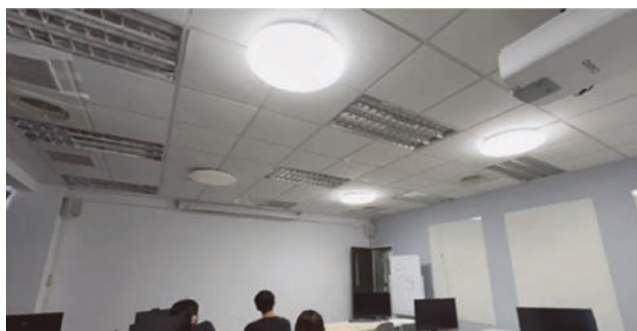
接著，使用者可透過系統提供的，在事先界定好的範圍內自由調整燈光設定（色溫與照度），以符合實際使用需求或個人舒適偏好。

	id	temperature	humidity	co2	windSpeed	detectiondate
	integer	real	real	real	real	timestamp without time zone
1	1	20.61	64.44	240	2.55	2024-11-19 11:40:17.58541
2	2	20.52	74.7	240	0	2024-11-19 11:42:04.899294
3	4	23.7	70.5	648	0	2024-11-19 11:43:26.121975
4	3	20.07	68.67	240	0	2024-11-19 11:44:34.671459
5	1	22.8	71.5	328	0	2024-11-19 11:45:17.837541
6	2	22.9	83	451	0	2024-11-19 11:47:05.426405
7	4	23.7	70.5	604	0	2024-11-19 11:48:27.109996
8	3	22.3	76.4	887	0	2024-11-19 11:49:35.105308
9	1	23.3	72	696	0	2024-11-19 11:50:18.086542
10	2	23.8	83.3	501	0	2024-11-19 11:52:05.963333
11	4	24.4	70.6	511	0	2024-11-19 11:53:27.447131
12	3	23.7	76.7	1009	0	2024-11-19 11:54:35.446661
13	1	22.6	73.2	620	0	2024-11-19 11:55:18.325538
14	2	23.6	84.3	498	0	2024-11-19 11:57:06.626187
15	4	24.4	70.7	529	0	2024-11-19 11:58:27.993754

(a) 即時監測資料



(b) CO₂ Heatmap



(c) 真實空間照明閃爍提示

圖 7 空氣品質循環示例

系統接收到使用者調整後的設定值，將立即進行檢查判斷，確認是否仍符合 EN 12464-1 標準內所建議的舒適範圍：

- 若調整後的設定值位於舒適範圍內，系統將立即透過智慧燈具執行調整，提供使用者即時回饋的視覺舒適環境。
- 若設定值超出標準建議範圍，則系統將維持前次的照明設定，並提供介面提醒，提示使用者重新調整參數，直到達到符合標準的範圍為止。

透過此即時回饋與互動控制架構，如圖 8 所示，平台在滿足照明標準的同時，也納入使用者參與與個別化調整機制，使視覺環境能隨空間需求與情境彈性調整，提升整體照明使用的效率與舒適感，其應用情境如圖 9 所示。



圖 8 視覺舒適度判斷流程圖

結論

本研究整合 IoT 感測器網路與深度學習影像辨識，提出一套自動化循環監測系統，應用於室內環境舒適度的監測與調控。系統設計涵蓋熱舒適度、空氣品質與視覺舒適度三個面向，透過即時資料擷取與視覺化處理，使環境變化清楚呈現、便於判斷。在熱舒適度部分，應用 PMV/PPD 模型結合熱區圖分析，提供空間調整依據；空氣品質方面，系統結合感測與運算結果，自動提示換氣建議，並透過燈號與介面引導實體操作；視覺舒適度控制則依不同情境快速切換燈光設定，並支援人工介入調整，以符合照明需求與相關標準。整體系統具備即時感知、分析與互動控制能力，可有效協助室內環境管理，並兼顧舒適度與能源使用效率。

參考文獻

1. Jia, L.R., Han, J., Chen, X., Li, Q.Y., Lee, C.C., and Fung, Y. H., "Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: a comprehensive review," *Buildings*, 11(12), 591 (2021).
2. Parmaksiz, K., Yesilnacar, M. I., and Karabulut, A. I., "Assessing thermal comfort and indoor air quality in an educational facility of a semi-arid climate zone," *Atmosphere*, 16(1), 29 (2024).
3. Nyembwe, J.P.K.B., Takizala, J.F.M., Kalonji Muangala, S., Kayembe Nyembwe, O., Ogundiran, J.O., and Gameiro da Silva, M., "Assessment of indoor air quality in primary school classrooms: a case study



(a) 視覺舒適度 UI



(b) 系統模擬照明



(c) 真實空間照明

圖 9 視覺舒適度循環示例

in Mbuji Mayi and Lubumbashi, Democratic Republic of Congo," *Buildings*, 15, 730 (2025).

4. Budhiyanto, A., and Chiou, Y.S., "Visual comfort and energy savings in classrooms using surveillance camera-derived HDR images for lighting and daylighting control system," *Journal of Building Engineering*, 86, 108841 (2024).
5. Fanger, P. O., *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen (1970).
6. Faubel, C., Martinez-Molina, A., and Suk, J.Y., "Calculation of CO₂ generation and required fresh air rates in a high-intensity physical athletic facility," *Journal of Building Engineering*, 82, 108289 (2024).
7. CEN, "EN 12464-1: Lighting of work places – Part 1: Indoor work places," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2002).



xModel Designer：AI 驅動的 三維建模及設計解決方案

劉其昌* / 萃思科技股份有限公司 營運長

BIM (Building Information Modeling) 逐漸成為業界標準，其價值不僅在於三維建模，更在於能夠將設計、施工與維運所需的各類資訊整合在同一平台。然而，即便如此，設計與建模的過程依然高度依賴人工操作。以大型廠房、廠辦、商辦等場域為例，消防、空調、配電及弱電等系統必須在有限的建築空間內協調配置。設計人員往往需要投入大量時間於模型建立、碰撞檢測與規範校核工作。這些任務雖然重要，但耗費大量人力，並且容易因疏漏導致錯誤。隨著建築物的規模與複雜性增加，傳統的 BIM 工作流程逐漸暴露出效率與成本上的瓶頸。

BIM 的核心價值在於整合設計、施工與維運資訊於單一數位模型中，然而，即使 BIM 已普及於大型工程專案，三維建模與設計過程仍高度依賴人工操作，而在人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 與自動化演算法快速發展的背景下，建築產業應當開始思考，能否將繁瑣的建模任務交由電腦自動完成，讓設計師將精力專注於更高層次的設計決策^[1,2]。本文主要以萃思科技所研發的「AI3D」技術為切入點，探討人工智慧如何推動三維建模與設計自動化，並以 xModel Designer 自動生成消防滅火系統 3D 方案為例，說明此技術如何在消防系統設計中展現價值，並對未來發展方向提出觀察。

探索 AI3D 技術

BIM 的主要貢獻在於讓不同專業領域能透過共享三維模型進行協作，但在實務上，BIM 模型往往是由 2D 平面設計圖轉換而來，此一轉換過程需要大量人力操作，包含物件放置、尺寸調整、規範檢核與碰撞修正。雖然 BIM 軟體 (如 Autodesk Revit) 提供了部分自動化功能，但仍不足以滿足工程專案的時效需求。

然而，AI 毫無疑問地能夠有系統性地解決上述相關痛點，更能夠在系統工程設計優化、設計或施工衝突與風險預測，以及自動生成 3D 設計方案 (模型) 中展現極高的效益和潛力^[3]；其中更擴大了機器學習在 BIM 的應用空間，包括構件分類、自動屬性生成與施工進度預測等^[4]。此外，更可進一步地將深度學習與 BIM 結合，推動和發展出生成式設計與能耗預測等至關重要的技術與

實務應用^[5]。這些需求與近年來的研究趨勢，都在在揭示了 AI3D 的發展可望成為 BIM 智慧化的重要方向。

AI3D 可以理解為「人工智慧輔助的三維自動化建模與設計」，其目標在於讓 AI 模型能根據輸入資料與規範，主動生成符合要求的三維模型。這不僅是工具操作的自動化，更是一種智慧化的推理與決策過程，其核心技術如下說明：

規則導向設計 (Rule-based Design)

將建築與工程規範 (如消防噴頭的覆蓋半徑、管徑計算公式、設備間距要求) 轉化為電腦可執行的演算法。這使得電腦在生成設計時，能自動遵循法規及標準，減少人工檢核需求。

參數化建模

利用參數來驅動模型的幾何生成。例如，當建築面積或樓層高度變更時，系統能自動調整噴頭數量、管線長度與迴路配置，而不需重新繪製。

* 通訊作者，chichang@mindlogic.com.tw

圖形辨識與電腦視覺

當輸入資料仍是 CAD 形式的 2D 平面圖時，電腦必須能辨識管線路徑及尺寸、設備位置、座標資訊，才能將其轉化為 3D 資訊。

機器學習與最佳化

藉由蒐集大量過往案例，電腦能學習最常見的配置模式，並透過演算法優化佈局，以達到降低管線長度或降低壓損的效果。

xModel Designer

萃思科技主要專注於 AI 與 3D 自動化設計及建模解決方案的研發。xModel Designer 為第一個結合 AI3D 及 BIM 技術的 3D 機電設計解決方案，目前以台灣市場最常使用的 BIM 建模軟體 Autodesk Revit 為主要的三維模型作業環境，確保設計人員不需切換工具，減少學習與轉換成本。使用者在安裝 xModel Designer 之後，便能夠在 Autodesk 的 AutoCAD 及 Revit 開始使用相關的功能。

特色模組

xRule 知識經驗資料庫

xRule 是一個知識與經驗的資料庫，如圖 1 所示，透過使用者介面可以將工程規範、設計準則與專案經驗轉化為可執行的規則。其內容可包含：消防噴頭佈局的法規條件、管徑計算公式、不同國家的建築安全標準，以及實務專案中常見的最佳實踐。xRule 能在自動化建模與設計過程中提供即時檢核，確保生成的模型不僅符合幾何需求，也滿足法規與工程邏輯。

xObject 元件庫

xObject 是一個高度參數化的元件庫，如圖 2 所示，其包含各類消防與機電設備（如噴頭、閥件、設備、管件、風管與電纜架等）元件。這些元件均以 BIM 物件形式存在，並具備參數化設定能力，能根據 xRule 中的規範自動調整大小、形狀或屬性，並確保能夠充分被演算法控制、使用。透過 xObject，系統能快速拼裝出完整的系統模型，並確保不同元件間的一致性與相容性，並有利於產製出完整且精確的 BOM 表，協助估料與計價等作業。

多目標最佳化演算法

在實際設計中，往往需要同時考量多個目標，例如：縮短管線長度、降低材料成本、提升覆蓋效率、避免碰撞衝突。xModel Designer 引入多目標最佳化演算法（Multi-objective Optimization Algorithm），能在不同設計目標間進行平衡與取捨。透過迭代運算，系統可生成多組可行解，並提供使用者比較與選擇，提升設計決策品質與搜尋速度^[6]，進而提升極度專業、繁瑣的設計工作的效能與經濟性。

特色功能

2D 轉 3D 自動化建模

傳統設計流程多以 CAD 2D 圖紙為主，轉換為三維模型需要大量人工操作。xModel Designer 的 2D 轉 3D 自動化建模功能，透過圖形辨識與規則導向演算法，能將平面設計快速轉換為可用的 BIM 模型。系統能辨識平面中常見的消防、管路與設備符號，並根據設定規範生成對應的三維物件。此功能顯著降低人工重建模型的工時，並提升資料準確度。



圖 1 xRule 知識經驗資料庫使用者介面

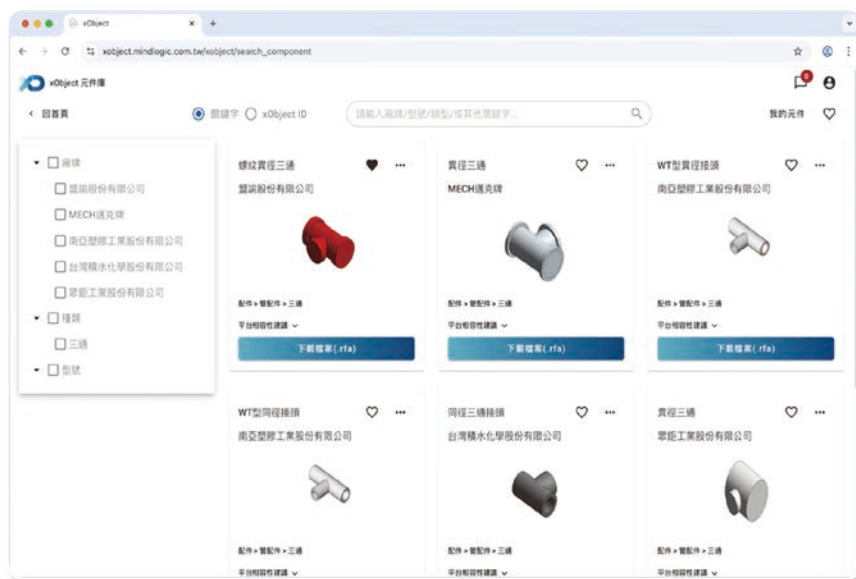


圖 2 xObject 元件庫使用者介面

3D 自動化設計及建模

除了從 2D 圖面轉換外，xModel Designer 也能在 3D 環境中直接進行自動化設計。使用者可引用相關法規或設計規範（如噴頭覆蓋半徑、管徑範圍、佈局間距），使系統自動完成管線路徑生成、噴頭配置以及覆蓋率檢核。這不僅是「建模」的自動化，更包含「設計決策」的自動化，讓使用者能在短時間內完成符合規範的三維系統設計。

消防系統應用案例：2D 轉 3D 自動化建模

消防系統設計對精度與規範的依賴特別高，透過 xModel Designer 的先期使用者，包含 BIM 建模服務、工程顧問公司及系統工程公司等專業使用者，將 xModel Designer 的消防系統解決方案的導入至不同的

實務場域中，包含地下停車場、廠辦及商場等空間，場域大小自數千至數萬米平方不等，皆能夠透過萃取 2D 平面圖元參數快速生成其撒水滅火系統 3D 模型。

以下為利用 xModel Designer 消防解決方案中 2D 轉 3D 功能，自動生成撒水滅火系統 3D 模型的示範說明：

步驟 1：在 AutoCAD 中匯出平面參數

在符合「可受辨識的繪圖原則」下，利用 xModel Designer 的 CAD 辨識功能，辨識並產製 CAD 平面參數檔，其中包含撒水幹管、支管及撒水頭，如圖 3 所示。

步驟 2：在 Revit 中以 xModel Designer 進行 3D 模型生成設定

將自 AutoCAD 所匯出的平面參數檔，匯入至 Revit，並簡單設定系統類型、管線類型、垂直管參

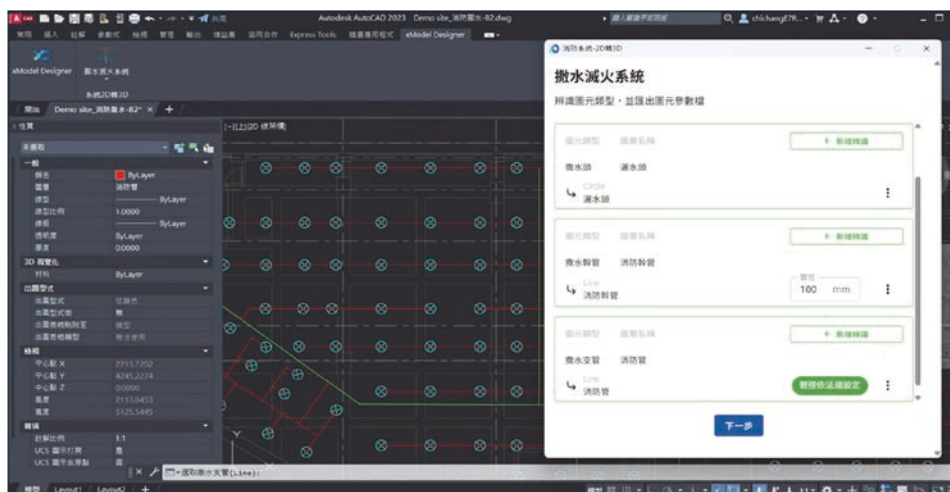


圖 3 在 AutoCAD 中匯出平面參數

數、預設元件等自動建模所需要的必要參數，即能快速自動完成 3D 建模作業，如圖 4 所示。

步驟 3：自動生成並獲取 3D 模型

此示範案例共計 214 顆撒水頭、34 個撒水群組，在 10 分鐘以內完成所有操作、設定和模型生成，成果如圖 5 所示及圖 6 展示局部場景。此外，所有管線及重要設備的佈局完全還原 CAD 圖的設計，讓設計者與建模者能夠更專注於原設計的檢討，而非建模作業上的錯誤。

消防系統應用案例：3D 自動化設計及建模

此外，對於需要快速獲取消防系統設計方案，用以作為初始設計或是設計檢討的使用者來說，也可以

透過 3D 設計（包含建模）功能，基於引入的相關法規或規範，在確保合規性及施工性的前提下，快速完成消防系統的 3D 設計。

以下為利用 xModel Designer 消防解決方案中 3D 設計功能，自動生成撒水滅火系統 3D 模型的示範說明：

步驟 1：在 Revit 中以 xModel Designer 進行 3D 模型生成設定

其中，本示範案例在設定參數的過程中，所引用之「適用的法規資料」內容為中華民國內政部「各類場所消防安全設備設置標準」（113 年 4 月 24 日修正版本）當中與設計參數相關的法規，如圖 7 與圖 8 所示。

編輯灑水系統設定

匯入平面參數 > 一般設定 > 進階參數 > 預設元件

Grouping file: grouping.csv

Sprinkler file: sprinkler.csv

MainPipe file: mainPipe.csv

Fire Pipe file: firePipe.csv

(1) 匯入 CAD 平面參數檔

編輯灑水系統設定

匯入平面參數 > 一般設定 > 進階參數 > 預設元件

名稱: 撒水-2轉3D

系統類型: 灑水管

管線類型: 碳鋼管 Iron, Cast - EN 877

(2) 選擇 Revit 樣板中的系統及管線類型

編輯灑水系統設定

匯入平面參數 > 一般設定 > 進階參數 > 預設元件

適用法規資料 (xRule) 重新選擇

各類場所消防安全設備設置標準 > 第三編-消防安全設計 詳細

選用設計規範 (xRule)

選擇

☐ 選擇對應管管高程 ☒ 手動輸入高程

手動輸入高程: 2300 mm

灑水頭延伸方向: 向上

灑水頭自灑水管向上延伸距離: 10 cm

(3) 設定垂直管線相關及其他細部參數

編輯灑水系統設定

匯入平面參數 > 一般設定 > 進階參數 > 預設元件

管線類型: 碳鋼管

管線材質: Iron, Cast - EN 877

彎頭

ALL A_272_MECH邁克牌_90度螺旋彎頭 選擇

三通

ALL A_205_盟論股份有限公司_螺旋異徑三通 選擇

四通

ALL A_289_其他_深溝式十字接頭 選擇

轉接頭/大小頭

ALL A_278_MECH邁克牌_大小頭 選擇

(4) 確認或變更預設管配件

圖 4 在 Revit 中以 xModel Designer 進行 3D 模型生成設定

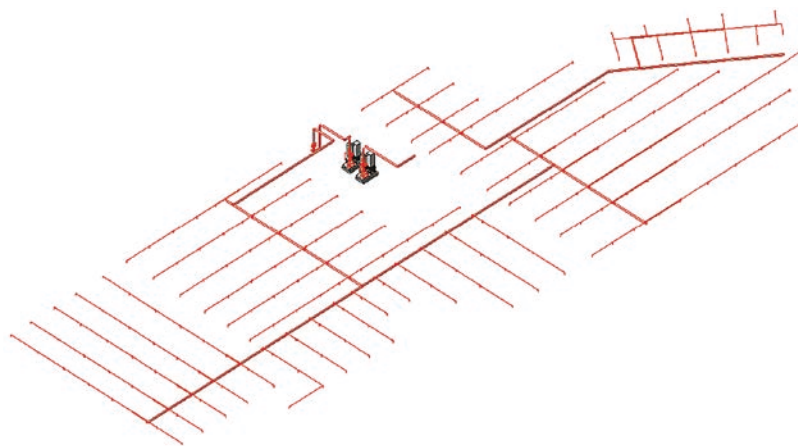


圖 5 xModel Designer 2D 轉 3D 示範案例撤水系統自動建模成果

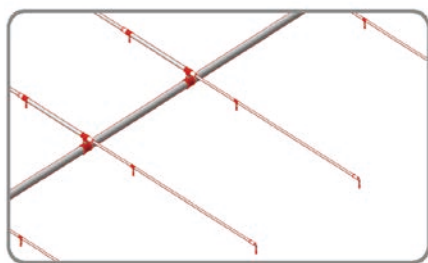
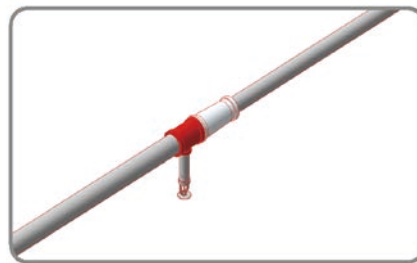
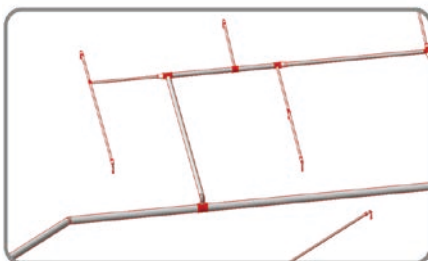
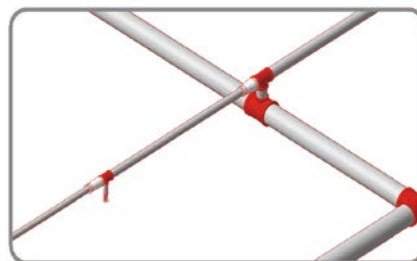
生成結果局部場景 A：
撤水頭、支管與彎頭、四通等管配件生成結果局部場景 B：
支管、撤水頭與三通、轉接頭等管配件生成結果局部場景 C：
(斜)支管、撤水頭、與(斜)彎頭、三通等管配件生成結果局部場景 D：
撤水頭、支管與三通、四通等管配件

圖 6 xModel Designer 2D 轉 3D 示範案例撤水系統自動建模成果（局部場景）

步驟 2：自動生成並獲取 3D 模型

此消防撤水系統 3D 設計示範案例共計約 580 顆撤水頭、72 個撤水群組，一樣可以在 10 分鐘以內完成所有操作、設定和 3D 設計模型的生成，成果如圖 9 所示。使用者亦可將建築模型與消防系統生成模型整合檢討，結果及局部細節如圖 10 及圖 11 所示。以 3D 模型取代 2D 圖說，精細地呈現消防系統的設計方案，有助於高效的系統整合、設計檢討、衝突排解與精確的用料統計。

結論

AI3D 將改變設計師與建模工程師的角色定位。設計師將從「繪圖者」與「建模者」轉為「決策者」，主

要負責制定規範與判斷系統整合。顧問公司與承包商的商業模式亦可能因自動化而轉型，將更多的人力價值集中於系統設計與自動化作業模式的規劃與創新。

除了較為標準化的消防系統之外，xModel Designer 仍在 AI3D 的核心技術架構上持續發展，未來將可支援風管（Duct）、電纜架（Cable tray）與相關設備元件的自動生成，並進一步導入至不同系統的實務場域進行驗證，而後推出空調系統或其他專業的製程系統適用之「2D 轉 3D」與「3D 設計」解決方案，使其更具備跨領域擴展潛力。

xModel Designer 作為 AI3D 的實踐案例，展現了人工智慧如何有效解決機電管線系統設計中的效率與品質問

(1) 選擇 Revit 樣板中的系統與管線類型，以及撤水頭排列樣式

(2) 設定高程相關參數，如撤水管及撤水頭高程

(3) 選擇生成區域（須是先備妥建築模型）

(4) 確認所使用的預設管配件、附件及撤水頭元件

圖 7 在 Revit 中以 xModel Designer 進行消防撤水系統 3D 設計的參數設定

圖 8 xModel Designer 3D 設計過程中所引入的消防法規內容

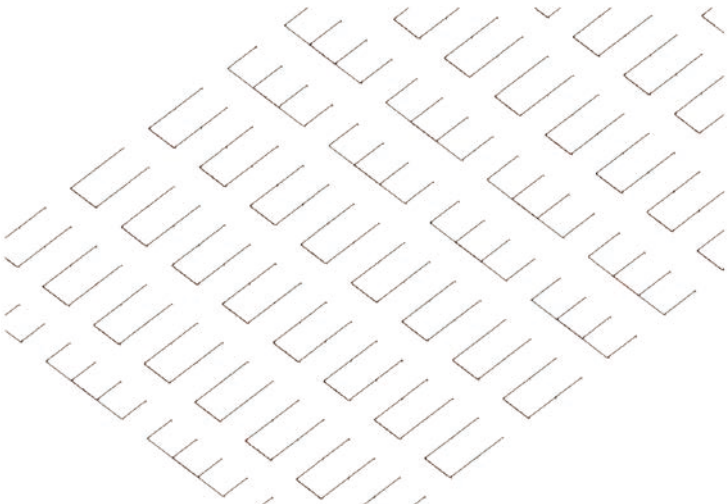


圖 9 以 xModel Designer 生成消防撤水系統 3D 設計方案成果

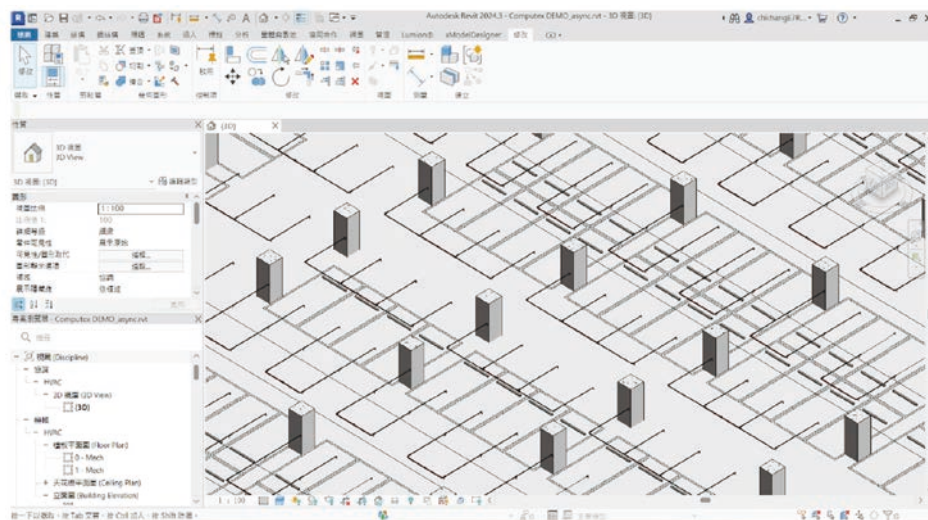


圖 10 以 xModel Designer 生成消防撤水系統 3D 設計方案成果（與建築模型套疊）

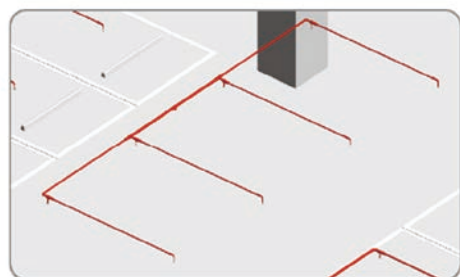
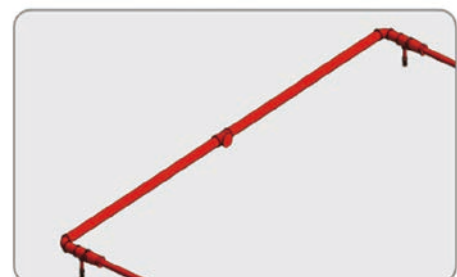
生成結果局部場景 A：
撤水頭、支管、大小頭、三通等元件生成結果局部場景 B：
支管、撤水頭與大小頭等元件生成結果局部場景 C：
依照選定的撤水頭佈局方式與合規的撤水防護半徑計算所生成的撤水群組生成結果局部場景 D：
預留三通接口，以利後續連接至撤水幹管

圖 11 以 xModel Designer 生成消防撤水系統 3D 設計方案成果（局部場景）

題。在消防系統的應用案例中，其建模工時縮減與建模錯誤率降低的成果，證明了其自動化的潛力。我們期待隨著技術進一步成熟，AI3D 有望成為 BIM 生態的重要組成，進而推動整個建築產業邁向更為務實的自動化及智慧化。

參考文獻

1. Li, H., Zhang, Y., Cao, Y., Zhao, J., and Zhao, Z. (2025). Applications of artificial intelligence in the AEC industry: a review and future outlook. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24(3), 1672-1688.
2. Zabin, A., González, V.A., Zou, Y., and Amor, R. (2022). Applications of machine learning to BIM: A systematic literature review. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101474.
3. Yang, L. (2025). A Comprehensive Review of BIM and Deep Learning Integration in Innovative Practices for Architectural Digital Transformation. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*, 3(3), 23-31.
4. He, Z., Wang, Y.H., and Zhang, J. (2025). Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI. *Information Fusion*, 114, 102654.
5. Emaminejad, N., & Akhavan, R. (2022). Trustworthy AI and robotics: Implications for the AEC industry. *Automation in Construction*, 139, 104298.
6. Zhang, F., Chan, A. P., Darko, A., Chen, Z., and Li, D. (2022). Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. *Automation in Construction*, 139, 104289.



淡江大橋 及其連絡道 新建工程 施工階段 減碳成效

陳奕伸* / 中興工程顧問股份有限公司環境工程部 工程師

全球氣候變遷衝擊日益加劇，各國紛紛推動淨零排放與全生命週期碳管理策略，其中工程建設部門因碳排放占比高，成為政策介入與技術創新的重點領域。我國自 2008 年起即推動公共工程減碳政策，並透過碳足跡盤查及公共工程節能減碳檢核表制度，逐步累積本土經驗。淡江大橋及其連絡道路新建工程（第 3 標）為跨越淡水河口之指標性跨河橋梁，工程自規劃階段即融入低碳理念，並於施工階段全面導入碳足跡盤查與減碳措施，成為國內大型公共工程碳管理的重要案例。

本文依據 ISO 14067 與國內產品類別規則，針對工區工程材料、施工機具、運輸及廢棄物處理等項目進行盤查，涵蓋 108 年 2 月至 114 年 6 月之階段性數據。結果顯示，工程累積碳排放量為 230,373.48 tCO₂e，其中工程材料為主要來源（90.64%），並以混凝土（33%）、鋼構（27%）及鋼筋（26%）占比最高，而非工區累積碳排放量約為 2,250.53 tCO₂e，與工區碳排放量相比相對較少。

另外為降低碳排放，本工程採取多項減碳措施，包含：混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥、基樁螺旋箍筋工法、土石方回填再利用、工區使用場電取代發電機、優先採用鄰近供應商、雙層環形鋼箱梁取代傳統支撐系統，以及管理單位無紙化管理。統計開工迄今總減碳效益約為 82,350.88 tCO₂e。

以上結果顯示大型基礎建設在施工階段導入低碳材料、工法及能源管理的可行性，不僅具體量化減碳效益，也可作為未來推動公共工程全生命週期碳管理的參考模式。此案例經驗對於國內道路與基礎建設在規劃、設計與施工階段落實減碳策略以及接軌國際永續發展趨勢，具有重要示範意義。

關鍵詞：淡江大橋、碳足跡盤查、公共工程、節能減碳、施工階段

前言

全球氣候變遷所帶來的衝擊日益明顯，極端氣候事件頻率與強度不斷上升，對經濟、社會與生態系統造成深遠影響。為減緩全球暖化趨勢，各國紛紛制定中長期減碳路徑與淨零排放目標，並將減碳策略納入能源、交通、工業與基礎建設等核心領域。工程建設部門因涉及大量能源消耗與材料使用，碳排放占比高，已成為各國政策介入與技術創新的重點領域。近年來，國際碳管理重心逐漸由組織營運階段的直接與

間接能源使用，擴展至涵蓋全生命週期的碳管理，將原料生產、製造加工、運輸、施工、營運、維護及拆除等各階段納入盤查與減量範疇，以確保減碳成效能系統性落實。

我國在公共工程減碳政策的推動上，早於 2008 年即由行政院核定《永續公共工程一節能減碳政策白皮書》，明定公共工程需全面導入節能減碳觀念，並於 2011 年 5 月修正為《永續公共工程一節能減碳政策白皮書（修正本）》^[1]，在原版本的基礎上，延續了生態工程理念，並結合更先進的節能減碳趨勢與要求，擴大全生命週期考量，以推動符合永續理念的工法與材料，最

* 通訊作者，yishen@mail.sinotech-eng.com

終目標是使國家重大建設兼顧經濟發展、環境友善及代際公平。交通部於 2010 年公布《節能減碳規劃設計參考原則》^[2]，要求在工程規劃與設計階段即考量低碳工法、材料選擇與能源效率；公共工程委員會則自 2013 年起推動「公共工程碳排放量估算試辦作業」^[3]，涵蓋道路、防洪、水資源、下水道、建築及水土保持等六大類別工程，並逐步累積本土化碳排放係數與案例經驗，正式開啟我國推動公共工程碳管理之篇章。

在此政策體系中，公共工程節能減碳檢核表^[4]是貫穿規劃、設計、施工與維護管理各階段的重要工具。檢核表以生命週期為軸，針對不同階段設計相應的節能減碳指標，例如設計階段檢視結構與材料配置是否能降低用量並採用低碳或再生材料；施工階段檢核施工機具能源效率、工法低碳性、運輸動線與土方減量；維護管理階段則關注營運能源效率與維護策略。透過檢核表的系統化評估，不僅能量化減碳成效，也能作為政策檢討與優良工程評選的依據。

淡江大橋及其連絡道路新建工程（第 3 標）為國內具有指標性的跨河橋梁工程，橫跨淡水河口，連結新北市八里區與淡水區，主橋採單塔不對稱斜張橋設計，全長約 2.035 公里。工程除了承擔紓解淡水河兩岸與大台北地區交通壅塞的重要功能，也具備景觀與地標價值。在規劃與設計階段即融入多項綠色內涵，包含材料低碳化、工法優化與土方近運回填再利用等策略，並將施工階段的碳足跡盤查與查證納入專案管理核心，以確保減碳措施能落實執行並被量化呈現。

本工程施工階段的碳足跡盤查依據 ISO 14067 與國內產品類別規則（Product Category Rule, PCR）執行，盤查範疇涵蓋主要建材（如混凝土、鋼筋、鋼構、斜拉鋼索等）、施工機具及運輸活動；透過現地訪查、活動數據蒐集與排放係數率定計算工程整體碳排放，並為減碳作為之量化提供依據。本工程減碳措施包含混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥、基樁圍束區採用螺旋箍筋工法、現地土石方回填再利用、施工工區採場電取代燃油發電機、優先採用鄰近供應商、以雙層環形鋼箱梁取代傳統開挖支撐系統，以及管理單位無紙化管理等。前述措施兼具設計與施工管理面向，不僅能有效降低施工階段的碳排放，也可作為未來大型基礎建設推動全生命週期碳管理之實證參考。

本文以淡江大橋及其連絡道新建工程為案例，分為三部分進行深入探討：首先介紹施工階段碳足跡盤查作業，包含盤查範疇、組織架構、方法及碳排放熱點分析；其次說明施工階段減碳作為，分析各項措施的實施背景與效益；最後整合盤查結果與減碳成效，評估其對施工階段碳排放降低的實際貢獻。藉由本案例分析，期望能提供國內橋梁及其他基礎建設在規劃、設計與施工階段落實減碳管理的參考模式，並與國際低碳工程發展趨勢接軌。

施工階段碳足跡盤查作業

為透過碳足跡盤查，有效掌握施工階段之碳排放，並作為後續精準管理與持續改善的目的，以下針對淡江大橋工程碳足跡盤查執行方向及內容，進行詳細說明。

盤查範疇

淡江大橋及其聯絡道路新建工程（第 3 標）總長度為 2.035 公里，工程自 108 年 2 月 23 日正式開工。該工程完工後，可銜接西部濱海公路之台 2 線、台 15 線、台 61 線西濱快速公路，以及台 64 線八里－新店快速公路，將有效改善淡水與八里間之交通動線。相較原既有繞行關渡大橋之路徑，預期可縮減約 15 公里之行車距離。淡江大橋及其聯絡道路新建工程（第 3 標）工程範圍如圖 1 所示，本文將依主橋段、八里側聯絡道及淡水側聯絡道三部分進行分述與分析。

主橋段工程：本段橫跨淡水河道中央，全段均為水上作業施工方式，總長約 920 公尺，南端銜接八里側、北端銜接淡水側。橋梁型式為單塔不對稱斜張橋，最大跨距 450 公尺，橋面配置雙主線、2 機車道、2 自行車道（含人行道），中央並預留有輕軌匝道的預留車道。

八里側工程：本段工程總長約 780 公尺，部份作業區段位置與濕地及軍事營區重疊。主要內容為混凝土箱型梁高架橋結構，車道佈設方式與主橋段工程相同，僅在匝道及局部路堤為路工。

淡水側工程：本段工程總長約 335 公尺，車道佈設方式與主橋段工程相同。主要內容大部份為匝環道橋梁工程，僅在匝道及局部路堤為路工。由於本地區的作業空間、高度問題與匝道變化特殊性，均以場撐工法為作業主軸^[5]。

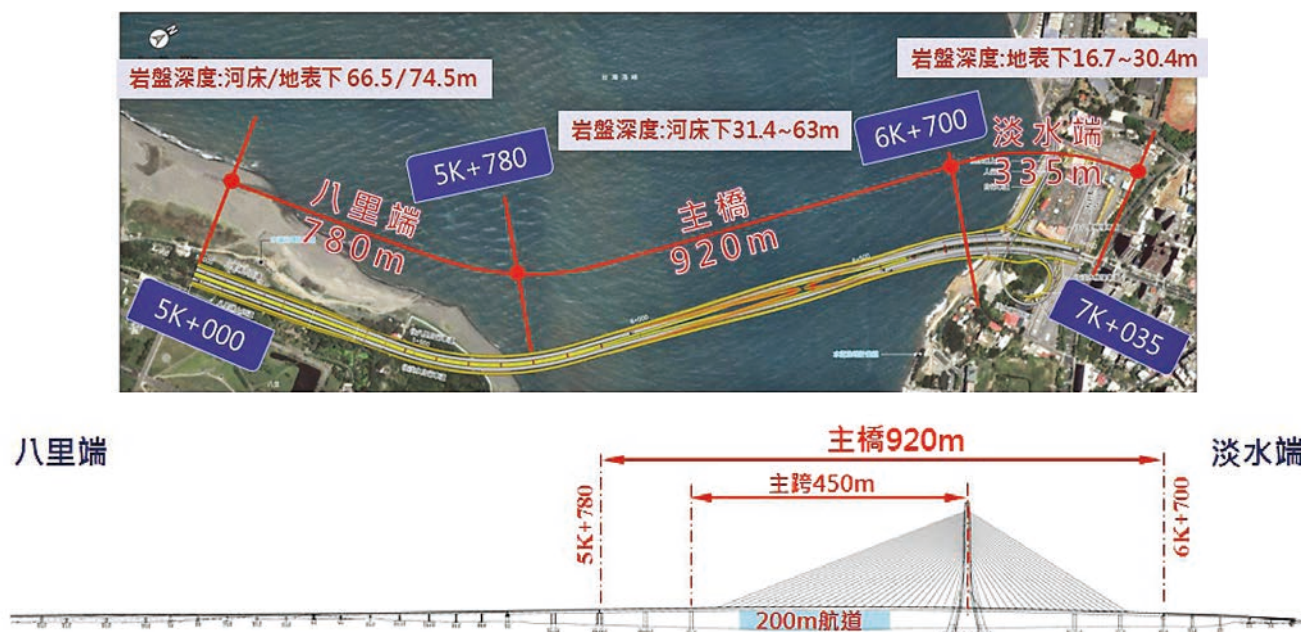


圖 1 淡江大橋及其絡道新建工程（第3標）工程範圍

淡江大橋工程施工期間碳足跡盤查範疇如圖 2 所示，盤查執行範疇包含工區及非工區區域，對於工區盤查需包含工程材料使用、運輸、能資源使用、碳匯變化及廢棄物處理項目，而非工區則包含施工管理單位（機關、監造及承包商）人員出工、逸散設備、能資源使用以及交通油耗等資訊。

碳足跡盤查方法及對象

淡江大橋工程碳足跡盤查引用國際碳足跡標準（ISO 14067）^[6]之標準，並參採歐盟營建產品類別規則（EN 15804）^[7]執行碳足跡計算及碳盤查工作。碳足跡之量化以排放係數法進行，即「排碳量＝活動數據×

排放係數」，活動數據之蒐集以工程施作之現場資料為主，排放係數則盤查輔導團隊進行蒐集及率定，而後進行碳足跡之量化。

根據淡江大橋工程施作內容進行主要碳排放源鑑別，從 108 年 2 月 23 日至 114 年 6 月 30 日，鑑別出各工程項目主要排放源。各工項主要工程材料之碳排放源包含鋼筋、混凝土、鋼材、盤式支承、隔減震支承、預力鋼腱、預力旋楞套管、斜拉鋼索預力鋼絞線、預力端錨、鋼管、鋼箱、剪力釘、強力螺栓、格柵板、PVC 管、水泥、砂、無收縮水泥、洩水孔、防蝕塗料、HDPE 套管、阻尼器套管、鋼承板及各項氣體材料等。



圖 2 工程施工期間碳足跡盤查範疇

機具、運具與設備碳排放源則包含起重機、挖土機、拖板車、震動樁機、破碎機、發電機、空壓機、攪拌機、灌漿機、抽水機、堆高機、鏟裝機、壓路機、捲揚機、砂輪機、吊卡車、泵送車、貨車、傾卸車、水車、高空作業車、平台船、高壓清洗機及塔吊設備等。

盤查執行對象包含施工及協力廠商、材料供應商及管理單位，詳如圖 3 所示，施工廠商需配合盤查輔導團隊進行網路填報作業，將工程相關之活動資料進行上傳及填報，而盤查輔導團隊藉由收集之活動資料進行比對，量化排碳量、建立本土係數並進行工程特性分析；供應商需配合盤查輔導團隊提供碳盤查相關活動資料，以計算材料產品碳足跡；管理單位亦須配合提供相關活動資料，以量化管理單位排碳量。由於

淡江大橋工程活動項目較為繁雜，因此以資料庫系統進行活動資料蒐集，以提升資料蒐集效率及保存相關佐證單據，碳盤查填報系統資料流示意圖如圖 4 所示。

為掌握供應商/協力商盤查資料填報之完整及正確性，盤查輔導團隊每月皆安排工區現場盤查輔導，除了掌握工程施作進度、供應商與協力廠商之運入/運出材料、機具及運具填報之完整性外，亦將現場發現材料之相關碳盤查資料蒐集進行蒐集。

本工程排放係數選用包含實際盤查產出產品碳足跡係數、環境部公告或供應商提供產品碳足跡係數、結合國內公告係數或係數資料庫計算產出之生命週期係數、國內外生命週期資料庫，以及國內外文獻刊載之排放係數。



圖 3 工程碳足跡盤查執行對象

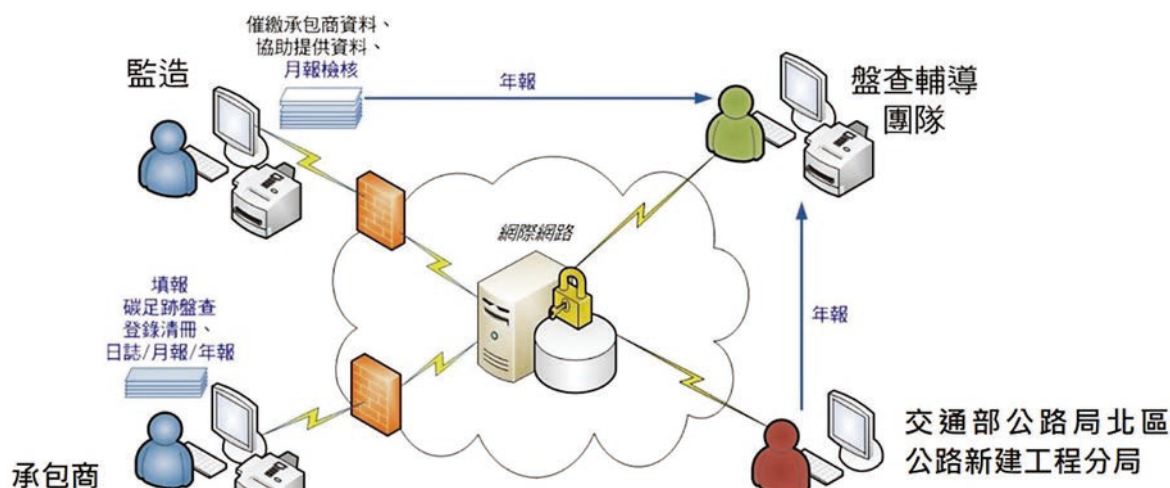


圖 4 碳盤查填報系統資料流示意圖

階段性碳排放量熱點

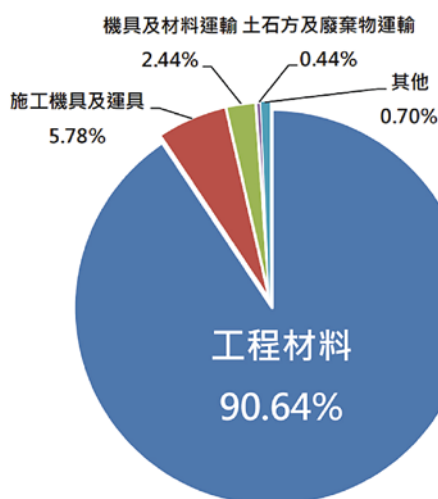
淡江大橋工程從 108 年 2 月 23 日開工迄 114 年 6 月 30 日，進行基樁、樁帽、鋼管樁圍堰、圍堰止水灌漿、橋台、擋土牆、墩柱、主橋塔、上構（含護欄）、鋼構、鋼構組裝場、排水、鋼構節塊船運及吊裝、斜拉鋼索、施工便橋及便道等工程，另外，亦進行覆工板、願景館、安衛設施、環保設施、圍籬、點井、監測、接地系統、避雷系統、防蝕塗裝、河道墩柱防撞設施、上下設備、集水井、主橋塔模板假組立場地及其他雜項等工程項目。

經統計，工區排碳量自開工迄 114 年 6 月 30 日，初估約 230,373.48 tCO₂e，如表 1 及圖 5，以工程材料為最主要排放來源，約占 90.64%，機具及運具能耗次之，約占 5.78%，機材運輸、土石方及廢棄物運輸占比合計為 2.88%，其餘約僅占 0.70%。其中工程材料又以混凝土占比最高，占比約為 33%，鋼構及鋼筋占比次之，占比約為 27% 及 26%，其他材料如剪力釘、強力

表 1 開工迄 114 年 6 月 30 日排碳量初估

項目	排碳量 (tCO ₂ e)	排碳占比 (%)
工程材料	208,813.51	90.64%
施工機具及運具 (含能資源)	13,326.41	5.78%
機材運輸	5,623.05	2.44%
土石方及廢棄物運輸	1,006.49	0.44%
其他	1,604.00	0.70%
總計	230,373.48	100.00%

資料採計區間：108.2.23 ~ 114.6.30



資料採計區間：108.2.23 ~ 114.6.30

圖 5 開工迄 114 年 6 月 30 日排碳量初估占比

螺栓、格柵板、鋁材、氣體、噴砂、陶瓷背襯及碳精棒等材料僅佔 14%。非工區排碳量初估約 2,250.53 tCO₂e。

施工階段節能減碳措施及效益

依據階段性碳排放量熱點顯示，碳排放量主要以工程材料占比最高，其次為施工機運具及機具材料運輸。透過回顧過往相關工程減碳文獻及案例，以及依據現場施作情形評估可行性，本工程施工期間採行節能減碳主要以工程材料、能資源及運輸方面進行規劃，工區減碳措施包含混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥、基樁圍束區採用螺旋箍筋工法、現地土方回填再利用、場區電力取代燃油發電機、優先採用鄰近之供應商，以及主橋塔採用 2 層環形鋼箱梁開挖支撐系統，施工管理單位則主要以無紙化推行為主要措施，以下各別解析節能減碳措施及效益。

混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥

本工程依據混凝土原物料投入資訊，彙整各類型混凝土中水泥、飛灰及爐石粉替代水泥比例，推估飛灰爐石粉替代水泥之減碳效益，水泥及爐石粉皆採用晉瑜觀音廠之碳足跡係數^[5] (0.906 及 0.104 kgCO₂e/kg)，飛灰則採用英國乾、濕燃煤碳足跡係數^[5] (0.004 kgCO₂e/kg)。統計開工迄 114 年 6 月底之各類型混凝土使用量，表 2 結果顯示各個類型混凝土其水泥之排碳量，以及飛灰爐石粉替代部分水泥之排碳量，本工程混凝土總減碳量總計約 77,104.58 tCO₂e，減碳效益受混凝土用量及飛灰爐石粉替代水泥比例影響，如基樁施作需使用大量 350 水中混凝土其替代率達 70%，相較於其他類型混凝土，現階段其減碳效益最為顯著。

基樁圍束區採用螺旋箍筋工法

本工程基樁圍束區箍筋係採用螺旋箍筋之工法進行綁紮（圖 6），相較於一般基樁之閉合彎鉤形式，可減少基樁鋼筋之使用量，惟螺旋箍筋每 15 m 需進行搭接焊接作業，減碳量計算上需另扣除焊接排碳量。竹節鋼筋係數採用供應商碳足跡查證聲明書資訊^[5] (0.89 kgCO₂e/kg)，焊材係數以^[5] (7.80 kgCO₂e/kg) 進行計算。本工程採用樁徑 1.5、2.0 及 2.5 m 基樁（總計 796 支）進行施作，不同規格基樁對於螺旋箍筋工法皆具減碳效益，表 3 結果顯示螺旋箍筋工法減碳量總計約 485.29 tCO₂e，減碳率約為 20.5%。

表 2 各類型混凝土排碳量及減碳效益彙整

混凝土類型	總用量 (m ³)	水泥排碳量 (kgCO ₂ e)	水泥 / 飛灰 / 爐石粉排碳量 (kgCO ₂ e)	減碳量 (kgCO ₂ e)	減碳率 (%)	替代率 (%)
80 kgf/cm ² (IP 型水泥)	3,231.00	614.73	213.46	401.27	65.3%	70%
140 kgf/cm ² (IP 型水泥)	818.50	192.06	66.69	125.37	65.3%	70%
175 kgf/cm ² (IP 型水泥)	269.50	69.10	23.99	45.11	65.3%	70%
210 kgf/cm ² (IP 型水泥)	8,544.00	2,492.56	865.52	1,627.04	65.3%	70%
280 kgf/cm ² (IP 型水泥)	3,205.00	1,088.90	378.11	710.79	65.3%	70%
280 kgf/cm ² (I 型水泥)	3,224.00	978.54	575.73	402.81	41.2%	45%
350 kgf/cm ² (IP 型水泥)	7,288.50	2,687.58	933.24	1,754.34	65.3%	70%
350 SCC kgf/cm ² (IP 型水泥)	35,823.50	13,631.56	4,733.43	8,898.13	65.3%	70%
350 水中 kgf/cm ² (IP 型水泥)	133,836.00	54,686.19	18,989.27	35,696.93	65.3%	70%
350 巨積 kgf/cm ² (IP 型水泥)	17,869.50	6,249.25	2,169.99	4,079.26	65.3%	70%
420 kgf/cm ² (II 型水泥)	4.00	1.51	0.53	0.99	65.3%	70%
420 SCC kgf/cm ² (IP 型水泥)	14,380.00	5,784.56	2,008.63	3,775.92	65.3%	70%
420 早強 kgf/cm ² (IP 型水泥)	35,996.00	16,501.86	5,730.12	10,771.75	65.3%	70%
490 kgf/cm ² (IP 型水泥)	6,549.00	2,527.63	849.80	1,677.83	66.4%	70%
490 SCC kgf/cm ² (IP2 型水泥)	3,217.50	1,268.05	329.50	938.55	74.0%	79%
560 kgf/cm ² (IP 型水泥)	197.00	80.32	27.89	52.43	65.3%	70%
560 SCC kgf/cm ² (IP2 型水泥)	19,584.00	8,303.77	2,157.70	6,146.07	74.0%	79%
總計	294,037.00	117,158.17	40,053.59	77,104.58	65.8%	—

註：1. IP 型水泥及 IP2 型水泥指波特蘭水泥與飛灰爐石粉混合的水泥，兩者成分相似但皆具有抵抗硫酸鹽侵蝕特性，適用於如水庫、港灣及碼頭等特定環境，IP2 型水泥成分上有較多限制，且水合反應亦較為緩慢，但具有較高抗侵蝕能力，因此 IP2 型水泥用於對結構強度及抗侵蝕要求較高之區域（如本工程主橋段橋墩及主橋塔）。
2. 替代率 = (飛灰 + 爐石粉) 重量 / (水泥 + 飛灰 + 爐石粉) 重量。
3. 減碳量 = 水泥之排碳量 - 水泥 / 飛灰 / 爐石粉之排碳量。
4. 減碳率 = 1 - 水泥 / 飛灰 / 爐石粉之排碳量 / 水泥之排碳量。

表 3 基樁圍束區箍筋工法排碳量及減碳效益彙整

閉合彎鉤		螺旋箍筋				減碳量 (tCO ₂ e)	減碳率 (%)
鋼筋用量 (T)	鋼筋排碳量 (tCO ₂ e)	鋼筋用量 (T)	焊材用量 (T)	鋼筋排碳量 (tCO ₂ e)	焊材排碳量 (tCO ₂ e)		
2,664.74	2,371.62	2,086.35	3.7788	1,856.85	29.47	485.29	20.5%

註：1. 減碳量 = 閉合彎鉤鋼筋之排碳量 - 螺旋箍筋鋼筋及焊材之排碳量。
2. 減碳率 = 1 - 螺旋箍筋鋼筋及焊材之排碳量 / 閉合彎鉤鋼筋之排碳量。



圖 6 基樁圍束區箍筋採螺旋箍筋工法

·現地土石方回填再利用

本工程將施作期間部分土石方作為工區回填使用，回填工區之土石方可減少運送至土資場之運輸量，減少運輸排碳量。依據工區土車油耗調查結果，土車運輸係數^[5]約 0.2677 kgCO₂e/tkm，統計開工迄 114 年 6 月底工區土石方回填量，總計土石方回填再利用減碳量約 466.64 tCO₂e。

·工區採用場電取代燃油發電機

本工程工區現場施作用電以場電為主要來源，將工區總用電量分別以場電及發電機方式計算其各別排碳量，兩者差異作為場電減碳效益，但對發電機而言，活動量計量方式主要為用油量及（或）操作時數，僅可推估發電機單位用油量（用油量 / 小時），需

另依據發電機規格資料之單位功率，以及配合柴油碳足跡係數，計算發電機單位排碳量 ($\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$)。

依據東元柴油引擎發電機之單位油耗 0.27 L/kWh ($30\text{-}250\text{KW}$) 及 0.29 L/kWh (350KW)，以及環境部公告 2021 年之固定源柴油係數^[8] $3.29 \text{ kgCO}_2\text{e/L}$ ，各別計算發電機單位發電量之排碳量 0.8883 及 $0.9514 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ ；場電排放係數則採用環境部公告電力碳足跡係數^[8] 之 $0.606 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ ，表 4 為比較發電機及場電單位排碳量之結果，截至開工至 114 年 6 月底工區總用電量約 $3,622,817 \text{ kWh}$ ，將總用電量分別以發電機及場電方式計算排碳量，結果顯示工區場電減碳效益約介於 $1,022.72 \text{ tCO}_2\text{e} \sim 1,251.32 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。

優先採用鄰近之供應商

本工程分別於淡水端及八里端工區進行施作，對施作而言選擇工區鄰近之供應商，有助於減少工區間往返距離，有效降低運輸造成之排碳量，且減少時間及運輸成本，預拌混凝土作為本工程大宗材料運入工

區頻繁，因此假設淡水端工區以鄰近八里端工區預拌混凝土廠作為供應來源如表 5 所示，運送距離將增加 37.5 公里，相較選擇鄰近淡水端工區預拌混凝土廠作為供應來源，單位體積減碳量約 $18.87 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，統計開工迄 114 年 6 月底運至淡水端工區混凝土數量，選擇鄰近預拌混凝土廠減碳量總計約 $3,021.73 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。

雙層環形鋼箱梁取代傳統開挖支撐系統

本工程 P130 主橋塔基礎開挖施作，對於基礎安全支撐設計，原規劃採用 7 層井字型雙排 H 型鋼支撐系統（圖 7），考量整體作業繁瑣、工期不易掌握，以及安全性風險高情況下，經評估後改採用 2 層環型鋼箱梁支撐系統，工序上單純且可大幅減少中間柱及接合部位數量（圖 7 及圖 8），有效降低鋼料使用量，依據施工規劃統計兩工法各別鋼料使用量，因鋼料於完工後以回收方式處置，對於鋼料使用量計算上以 5% 作為鋼料損耗之數量，損耗量差異作為 2 層環型鋼箱梁支撐減碳效益，總計減碳量約 $20.53 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。

表 4 工區場電減碳效益及減碳率彙整

發電機類型	單位排碳量 ($\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$)	與場電單位排碳量差異 ($\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$)	減碳量 (tCO_2e)
發電機 ($30\text{-}250\text{KW}$)	0.8883	0.2823	1,022.72
發電機 (350KW)	0.9514	0.3454	1,251.32

註：減碳量 = 總電量 * 與場電單位排碳量差異。

表 5 採用鄰近供應商運輸減碳效益彙整

供應商差異	運送數量 (m^3)	最大運距 (km)	運具	運輸係數	排碳量 (tCO_2e)
優先採用鄰近供應商	160,102	13.90	混凝土預拌車	0.5033	1,120.05
未優先採用鄰近供應商	160,102	51.40	混凝土預拌車	0.5033	4,141.78

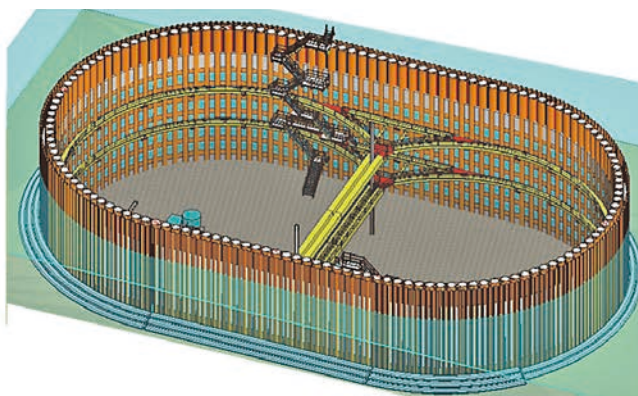
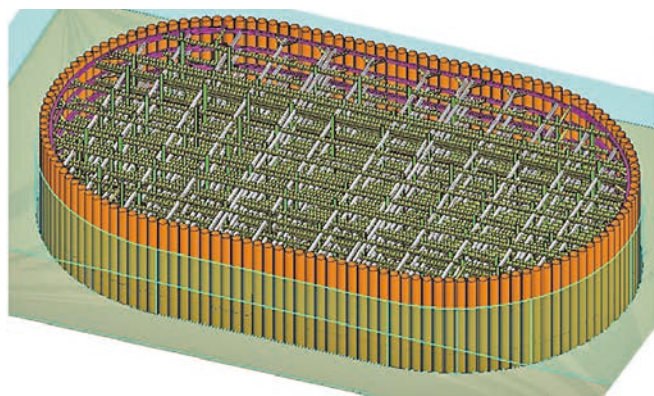


圖 7 7 層井字型雙排 H 型鋼（左），2 層環型鋼箱梁（右）

管理單位無紙化管理

本工程為提升工程管理效率，建置監造資訊管理系統，透過管理系統可有效掌握工程進度，以及建立各管理單位間之聯繫，尤其對於工務及公文管理上，各文件線上傳遞有助於管理單位無紙化推動，統計開工迄 114 年 6 月底管理單位收發文件總計共 34,609 件，假設每份文件需花費 1 ~ 3 張紙張情況下，紙張總使用量介於 34,609 ~ 103,827 張，紙張係數採用環境部公告 A4 紙張係數^[8] 3.8 kgCO₂e/ 包（500 張 1 包），總計無紙化減碳量約介於 0.26 ~ 0.79 tCO₂e。

盤查結果與減碳成效

彙整本工程節能減碳措施及效益如表 6 所示，針對工程材料、能資源及運輸面向進行減碳效益評估，

本工程工區截至 114 年 6 月底總排碳量約 230,373.48 tCO₂e，非工區總排碳量約 2,250.53 tCO₂e，預估總減碳量可達約 82,350.88 tCO₂e，且以混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥材料之減碳效益最為顯著，其次為選擇工區鄰近之混凝土廠，其對於混凝土運輸排放量減碳效益也有顯著影響，因本工程仍持續施作中，工程排放量及節能減碳效益將持續隨工程進度更新，本文呈現結果僅作為階段性之結果。

結論

本文以淡江大橋及其連絡道新建工程（第 3 標）為案例，深入探討其施工階段的減碳成效，旨在為我國大型基礎建設推動全生命週期碳管理提供實證參考，並與國際低碳工程發展趨勢接軌。本工程於規劃與設

表 6 施工階段減碳項目及減碳效益彙整

項目	減碳量 (tCO ₂ e)	減碳量占比 (%)
混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥	77,104.58	93.63%
基樁圍東區採用螺旋箍筋工法	485.29	0.59%
現地土石方回填再利用	466.64	0.57%
工區採用場電取代燃油發電機	1,251.32	1.52%
優先採用鄰近供應商	3,021.73	3.67%
雙層環形鋼箱梁取代傳統開挖支撐系統	20.53	0.02%
無紙化管理	0.79	< 0.01%
總計	82,350.88	100.00%



圖 8 2 層環型鋼箱梁現場施作情形

計階段即融入多項綠色內涵，並將施工階段的碳足跡盤查與查證納入專案管理核心。

截至 114 年 6 月底，本工程工區及非工區施工階段的碳排放量為 232,624.01 tCO₂e。其中，工程材料為最大的排放來源，佔比高達 90.64%；其次為施工機具及運具能耗，佔 5.78%；機材運輸、土石方及廢棄物運輸合計佔 2.88%，其餘僅佔 0.70%。在工程材料中，混凝土佔比最高（33%），鋼構次之（27%），鋼筋則佔 26%。

為有效降低碳排放，本工程實施了多項減碳措施，並取得了顯著成效：

1. 混凝土採用飛灰及爐石粉替代水泥：透過替代水泥比例的優化，總計減碳量約達 77,104.58 tCO₂e，平均減碳率約為 65.8%。其中，基樁施作所採用的 350 水中混凝土減碳量最為顯著。
2. 基樁圍束區採用螺旋箍筋工法：相較於傳統閉合彎鉤形式，此工法減少了基樁鋼筋的使用量，總計減碳量約 485.29 tCO₂e，減碳率約為 20.5%。
3. 現地土石方回填再利用：將部分土石方用於工區回填，減少了運輸至土資場的排放量，總計減碳量約 466.64 tCO₂e。
4. 工區採用場電取代燃油發電機：透過使用場區電力作為主要電源，有效降低了發電機燃料消耗，工區場電減碳效益約介於 1,022.72 ~ 1,251.32 tCO₂e。
5. 優先採用鄰近供應商：針對預拌混凝土此類大宗材料，選擇鄰近供應商可顯著減少運輸距離與碳排放量，單位體積減碳量約 18.87 kgCO₂e/m³，總計減碳量約 3,021.73 tCO₂e。
6. 雙層環形鋼箱梁取代傳統開挖支撐系統：主橋塔基礎開挖採用此設計，大幅減少了鋼料使用量，總計減碳量約 20.53 tCO₂e。
7. 管理單位無紙化管理：透過監造資訊管理系統，大幅減少了文件紙張使用量，總計減碳量約介於 0.26 ~ 0.79 tCO₂e。

綜合盤查結果與減碳成效，本文案例不僅展示了大型基礎建設在施工階段落實減碳策略的可能，更提供具體措施與量化效益。這些兼具設計與施工管理面向的減碳作為，可作為未來推動全生命週期碳管理的實證參考。藉由淡江大橋工程的成功經驗，期望能引導國內道路及其他類基礎建設在規劃、設計與施工階

段，更加系統性地導入低碳工法、材料選擇與能源效率概念，進一步提升公共工程的永續發展。

參考文獻

1. 行政院公共工程委員會（2011），永續公共工程—節能減碳政策白皮書。
2. 行政院交通部（2010），節能減碳規劃設計參考原則。
3. 公共工程碳排放量估算試辦作業專區，取自：<https://www.pcc.gov.tw/content/index?eid=1380&type=C&lang=1>
4. 公共工程節能減碳檢核注意事項（2022），取自：<https://lawweb.pcc.gov.tw/NewsContent.aspx?id=10425>
5. 行政院交通部公路局北區公路新建工程分局（2025），淡江大橋及其連絡道路新建工程（第 3 標）監造（含碳足跡盤查輔導及查證）委託服務工作 -114 年度年中進度報告書。
6. ISO 14067: 2018, Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification.
7. BRE Global Ltd (2018) Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804. Available: https://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN514-BRE-EN-15804-PCR.pdf
8. 環境部產品碳足跡資訊網，取自：<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/WebSites/CoefficientDB.aspx>



交廣工程顧問有限公司

誠信 | 創新 | 品質 | 服務 | 永續發展



案例實績

- 桃園捷運綠線GC03現況鑑定
- 高雄捷運黃線YC03、YC02建物調查
- 中壢污水下水道系統興建工程現況鑑定
- 臺大醫學院附設醫院西址院舍等12棟既有建築物耐震能力詳評
- 衛福部桃園醫院本院宿舍大樓結構補強工程委託設計
- 國防部空軍司令部馬公機場停機坪整建工程設計、監造
- 台灣自來水公司苗栗三義潛盾工程現況鑑定

服務項目

- | | |
|----------------|---------------|
| 01. 公共工程規劃設計 | 03. 房屋安檢鑑定 |
| 02. 私有建物耐震弱層補強 | 04. 自來水及下水道工程 |

台北總公司

- ☎ 02-2709-0716
- 🌐 www.jgce.com.tw
- 📍 台北市大安區忠孝東路三段52號2樓

桃園分公司

- ☎ 03-357-2323
- 🌐 www.jgce.com.tw
- 📍 桃園市桃園區莊二街24號7樓



馬太鞍溪橋的破壞機制 與 AI 復建方案 選擇及加權評分

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

緣起

2025 年馬太鞍溪堰塞湖潰堤，馬太鞍溪橋之橋面及橋基遭洪水沖走，全面破壞。但媒體都把重心引言放在光復鄉的淹水，卻對於馬太鞍溪橋的破壞甚少討論。本文嘗試探討這座橋的破壞機制，與如何重建而避免重重蹈覆轍。為集思廣益，避免偏見，本文特別利用 AI 最先進的 ChatGPT 5.1 探討復健方案的各項優劣點，作為工程主辦單位復建的參考。

洪流中橋的破壞模式

在莫拉克風災時，有高達數十座的橋梁遭到破壞。但破壞模式並不是傳統的重力式破壞，而是橋梁受到側向土石流和漂流木的衝擊（圖 1）。另一種破壞模式是土石及漂流木塞在橋下，加上浮力，引起橋面板被頂起而斷裂（圖 2）。換句話說，橋面板承受的垂直力不是向下，而是向上，跟一般教科書描述的不同。加上橫向的土石流衝擊力遠遠大於原設計，導致橋墩破壞，更引發上面的橋梁翻覆。

這次才完工 6 年的馬太鞍溪橋（圖 3）的破壞也不例外，甚至於連上游端的橋墩都被沖走（圖 4）。因此今後在山區的跨河橋設計一定要記取教訓，需要考慮可能發生堰塞湖所造成的洪水量，高程拉高，河中間落墩減少，而不是僅以 100 年或 200 年洪峰流量的設計就足夠。

全球氣候變遷，水文的歷史已經不可靠了，加上神出鬼沒的隱形堰塞湖，天威難測，設計寧可保守一些。



圖 1 莫拉克颱風使台 28 線旗尾橋遭含巨石及流木之大量水體衝擊而斷裂



圖 2 莫拉克颱風因河床含大量巨石使台 20 線建山一號橋損毀

一次災變的損失，包括人民傷亡、財產損失和社會動員的成本，絕非橋梁和堤防的工程造價所能相比。



圖3 原有的馬太鞍溪橋，採用預力箱型梁（Prestressed Box Girder）



圖4 馬太鞍溪橋梁遭堰塞湖潰堤造成的洪水及土石流衝擊破壞

莫拉克風災的經驗—新發大橋

在莫拉克風災時，筆者正擔任中興工程顧問公司的總經理，風災後我們組了三個團隊，義務勘災逾月，針對橋梁、邊坡和水利設施進行全省災害的調查與復建工程建議，還出版了一本報告，供各級政府參考。

當時的中興工程顧問社張家祝董事長也任中鋼董事長。位於高雄縣六龜鄉，跨越荖濃溪、聯絡新發村與荖濃村的新發大橋被土石流沖毀，中鋼乃慷慨捐獻了一座新橋—新發大橋，由中興工程顧問公司設計。

當時我們的設計方案是提高橋梁高程 19 公尺，以避免重蹈遭到土石流衝擊的覆轍。為了表現中鋼的特色，在橋梁結構方面採用了鋼結構的桁架橋（Truss

Bridge）。造型上巧用中鋼的「中」字，再加上「鋼」結構，乃突顯了中鋼的精神（圖5和圖6）。

為了避免被土石流衝擊受損，採用直徑 7 m 的圓柱橋墩，並加鋼板包覆。柱高 45 m，並以井式基礎開挖，直徑 10 m，嵌入岩盤 22 m 深（圖7）。

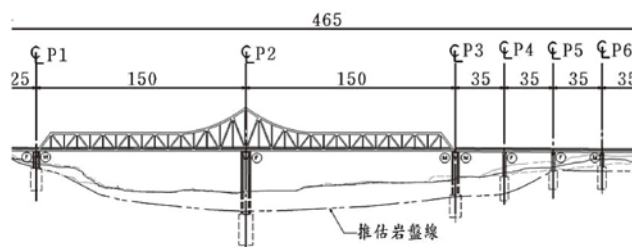


圖5 新發大橋由中鋼捐贈，以「中」字型的「鋼」結構桁架橋，表達中鋼的意象（中興工程顧問公司設計）



圖6 新發大橋之規劃及設計考量（中興工程顧問公司設計）

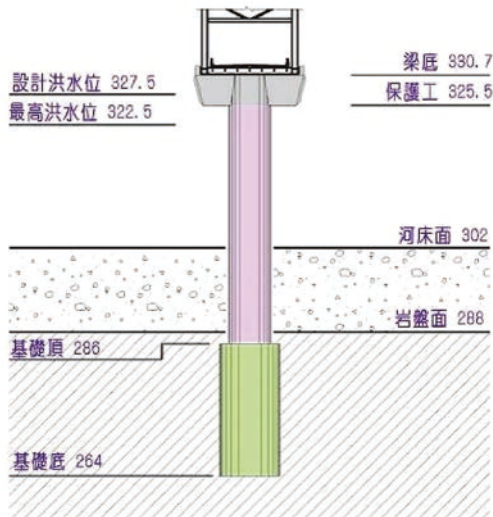


圖 7 新發大橋的橋墩與井基（中興工程顧問公司設計）

馬太鞍溪橋的可能重建方案

馬太鞍溪橋的破壞模式與新發大橋相似，都是土石流和漂流木衝撞並塞在橋下，造成橋面版頂起和上浮破壞。因此復建工程最重要的是要把橋面版拉高，至少能讓類似這次堰塞湖的激流能夠順利通過，而不至於對橋墩、橋面發生卡橋的不利影響。

在重建方案中，依一般工程規劃，可考慮下面幾個方案：

- (1) 按照原橋重建，以預力箱型樑（Prestressed Box Girder）為主，加高橋梁高程，橋梁的墩柱數與原橋相同或相近。
- (2) 採用斜張（Cable-Stayed）橋，中間只落一墩（圖 8）。

- (3) 採用桁架（Truss）橋，中間落一或二墩（圖 9）。
- (4) 採用吊橋（或稱懸索橋，Suspension Bridge），中間不落墩（圖 10）。
- (5) 採用河底潛盾（Shield）隧道（圖 11）。
- (6) 採用河底明挖覆蓋（Cut and Cover）隧道（圖 12）。

為周全的評估，避免個人成見，筆者請教了 AI 大神：ChatGPT 5.0 對於 6 個方案進行評估，並打分數決定優先順序。

馬太鞍溪橋重建方案的評估與選擇（以安全為優先）—與 ChatGPT 5 的對話

作者向 ChatGPT 5 說明並提出問題

台灣最近馬太鞍溪堰塞湖潰堤，發生大洪水，衝擊橋梁，使原有橋梁斷裂並飄走。在重建復原方案（河寬近四百公尺，左右各雙線，另加機車道）中，可能有下面幾個方案。

- 第一、按照原橋重建，以箱型梁橋（Box Girder Bridge）為主，加高橋梁高程至少 10 m。
- 第二、改為斜張橋（Cable-Stayed Bridge），中間只落一墩。
- 第三、採用桁架橋（Truss Bridge），中間落一或二墩。
- 第四、採用懸索吊橋（Suspension Bridge），在河中完全不落墩。
- 第五、採用河底潛盾（Shield）隧道，從兩側以隧道方式完全避開河流的衝擊。
- 第六、採用明挖覆蓋隧道（Cut and Cover Tunnel），利用乾季或防水工法施工。



圖 8 斜張橋（台中科湳橋，義力營造公司提供）



圖 9 桁架橋（新發大橋，中興工程顧問公司提供）



圖 10 跨越大漢溪的中庄吊橋（恆康工程顧問公司設計）



圖 11 潛盾隧道：捷運萬大中和線
（來源：臺北市府捷運工程局）



圖 12 三義火焰山下的明挖覆蓋隧道，與土石流以垂直避難方式自下穿過。旁為加勁土堤以抵抗土石流（堅尼士工程顧問公司設計）

筆者提問

AI 大神，您可否對這六種方案做出評估與建議。評估權重包括長期安全及耐久性（50%）、經費（20%）、工期（15%）、環境景觀（10%）及減碳（5%）等。評分以 1 分為最差，5 分為最佳，乘以權重後，以總分呈現優先順序。

GPT 回答

好的！以下依您指定的權重：長期安全與耐久性 50%、經費 20%、工期 15%、環境景觀 10%、減碳 5% 來做比較。

對六種方案在「河寬約 400 m、左右各雙線+機車道」的需求下，給出 1~5 分評分（5 = 最佳），並計算加權總分與優先順序。

加權評分表

方案	安全 / 耐久 (50%)	經費 (20%)	工期 (15%)	環境景觀 (10%)	減碳 (5%)	加權總分
懸索吊橋（河中零墩）	5	2	2	5	4	3.90
斜張橋（中間只落一墩）	4	3	3	5	4	3.75
河底潛盾（Shield）隧道	5	1	1	4	4	3.45
箱型樑（中間落多墩）	3	4	5	2	3	3.40
桁架橋（中間落 1~2 墩）	3	3	4	3	3	3.15
明挖覆蓋（Cut & Cover）隧道	4	2	2	3	3	3.15

優先順序（由高到低）：

① 懸索吊橋（3.90）> ② 斜張橋（3.75）> ③ 河底潛盾隧道（3.45）④ 箱型樑（3.40）> ⑤ = ⑥ 桁架橋 = 明挖覆蓋（3.15）

關鍵解讀（結合 400 m 跨距與多車道需求）

- A. 懸索吊橋（首選）：河中零墩能根本避開堰塞湖潰堤後的洪峰、漂流木與淘刷衝擊；400 m 主跨可行且景觀佳。代價是造價與工期較高、錨碇地質需嚴格把關、主纜防蝕與健康監測須納入全壽期策略。
- B. 斜張橋（次選、均衡解）：以單一中墩或大跨方案，可把中墩退至非主沖刷帶，兼顧安全與景觀；對於雙向雙線＋機車道的寬橋面，斜張在結構效率與施工資源上較可控。維護重點在纜系防腐與更換週期。
- C. 河底潛盾隧道（極致安全）：營運期幾乎不受洪水影響，但前期地質不確定性大（透水層、湧水壓、軟弱夾層），工期長、機電運維成本高；若極端環境保護或景觀限制嚴格，可作長期方案。
- D. 箱型樑（最快恢復通行）：技術成熟，但河中落墩仍是脆弱點，需強化防沖刷、導流與防撞鼻。
- E. 桁架橋：模組化施工快、成本中等，但同樣受中墩風險限制。
- F. 明挖覆蓋：乾季或圍堰施工對河道擾動較大，施工風險與工期壓力相對高；完工後耐久性可，但不如潛盾在環境影響上友善。

建議的決策路線

- 1. 若目標是長期韌性與生態景觀：優先懸索吊橋；地質／錨碇若受限，改採斜張橋（大跨＋中墩離開主沖刷帶）。
- 2. 若目標是最快恢復交通：可採箱型樑（或桁架）。
- 3. 若有嚴格的生態／視覺走廊要求且資源允許：評估潛盾隧道的全壽期成本與風險共擔條款（地質超限條款、湧水回灌與減壓設計）。

筆者詰問一

明挖覆蓋隧道工法施工簡易，在河床乾季時施工其實對於河流的影響不大，工期可以縮短（由兩側同時施工）。是不是重新考慮一下，它的分數應該提高呢？

GPT 回答

好問題！在「乾季施工＋兩側同步＋完善導流與圍堰／排水設計」的前提下，明挖覆蓋（Cut and Cover, C&C）確實可把工期與環境衝擊壓低。基於您提出的施工策略，我把它的分數做「情境化調整」如下：

重新評分假設（明挖覆蓋）

前提：

- * 乾季分期導流（保持最小生態基流）、短期圍堰、分隔施工面。
- * 兩岸對打、箱涵／底板預製化與標準化工序。
- 權重：安全 50%、經費 20%、工期 15%、環境 10%、減碳 5%

明挖覆蓋（調整後）

$$= 4 \times 0.50 + 3 \times 0.20 + 4 \times 0.15 + 4 \times 0.10 + 3 \times 0.05 = 2.00 + 0.60 + 0.60 + 0.40 + 0.15 = 3.75$$

對照：

原先為 3.15。在您提出的「乾季＋兩側同步」最佳化工法下，上升到 3.75。

筆者詰問二

明挖覆蓋隧道工法，它的成本為何會比橋梁貴呢？

GPT 回答

非常好的問題。明挖覆蓋隧道的成本在理論上可以低於深層潛盾隧道，但若與一般橋梁相比，仍常被評估為較高，原因主要在於施工條件、臨時防水工程與開挖恢復的附加費用。以下分項說明：

主要成本構成比較

成本項目	橋梁工程（如箱型樑／斜張橋）	明挖覆蓋隧道
結構主體材料	混凝土梁、橋墩、橋面鋪裝；材料使用量中等	大量鋼筋混凝土箱體（頂板、底板、側牆厚度通常 1.0～2.0 m），材料量約為橋梁的 2～3 倍
基礎工程	樁基或基礎墩座（局部）	全斷面基礎開挖＋底板防滲層＋抗浮錨筋系統
臨時工程	支撐、模板、吊裝設備	圍堰、導流、排水、支撐擋土、降水井、臨時鋼支撐（施工期成本顯著）
施工環境控制	空中施工，對地表影響小	需封河導流、開挖與回填，土方與抽水成本高
恢復工程	橋面與接道整修	河床回填、覆土、護坡、植生、生態復舊等，附加工程費高
機電設備	無（橋梁照明而已）	通風、排水、照明、監控、消防等設施（若為公路隧道）
維修周期	定期檢修橋面	隧道需防水層檢查與抽水維護，O&M 較高

成本差異的典型數值範圍（參考國際及台灣案例）

工法	典型單位造價（2024 年新台幣 / 公里・雙線）	備註
箱型梁橋	約 8 ~ 12 億元 /km	常見於河橋、公路橋
桁架橋	約 10 ~ 15 億元 /km	鋼構件成本略高
斜張橋	約 15 ~ 25 億元 /km	主塔與纜索成本顯著
懸索吊橋	約 25 ~ 35 億元 /km	主纜與錨碇成本極高
潛盾隧道	約 35 ~ 50 億元 /km	深層、盾構機+機電系統成本最高
明挖覆蓋隧道	約 18 ~ 30 億元 /km	須視開挖深度、導流、防水設計而異

所以「明挖覆蓋」比一般橋梁高、但仍低於潛盾。主要原因是：

- 1. 材料量大（厚箱型結構 + 防水層）
- 2. 臨時導流與圍堰工程昂貴
- 3. 回填與生態復舊成本高
- 4. 若做為公路隧道，還需配置照明、排煙、通風、防火系統

何時成本可「下降」？

若滿足以下條件，明挖覆蓋的成本可接近橋梁甚至略低：

- * 施工地點河床寬但淺、土層穩定（可短期導流）。
- * 採「預製箱涵分段推進」或「半寬施工」方式。
- * 河道回填後可作共構空間（如行人／自行車道、排洪涵洞），提高多功能效益。
- * 簡化機電系統（非長隧道者）。

結論整理

比較項目	橋梁	明挖覆蓋隧道
材料與工法成本	低	高（結構厚、臨時工多）
維護成本	低	中
安全與防洪	中	高
河道穩定	可能遭受衝撞	河道寬淺、可分期導流
總體造價趨勢 *	8 ~ 15 億 /km	18 ~ 30 億 /km

筆者詰問三

由於馬太鞍溪平常基流水非常少，大部分時間都是乾旱的，所以事實上大概不需要圍堰即可施工，所以它的成本是不是應該再降低一些才對？

GPT 回答

有道理！如果馬太鞍溪平常多為乾河床、基流水很小，且能在乾季操作，以分期導流或淺溝導水替代大型圍堰，那麼明挖覆蓋（C&C）的臨時工程費與工期風險確實會顯著下降。基於這個「乾季、免大型圍堰」

前提，我把 C&C 的評分再上調，並給出「樂觀（乾河床）」與「保守（仍有突發洪峰備援）」兩種情境。

情境化調整：明挖覆蓋（Cut & Cover）

假設 A：樂觀（乾河床、免大型圍堰）

- * 安全 / 耐久：4
（完工後安全高；施工期仍需突洪應變）
- * 經費：4
（臨時導流簡化、土方與抽排水成本下降）
- * 工期：4
（兩側對打 + 預製化，乾季窗口內完成主要工序）
- * 環境景觀：4
（短期擾動，但復舊後地表可綠化 / 共構）
- * 減碳：3（混凝土量大；可用替代膠結料改善）

加權總分（權重：安 50%、費 20%、期 15%、環 10%、碳 5%）

$$= 4 \times 0.50 + 4 \times 0.20 + 4 \times 0.15 + 4 \times 0.10 + 3 \times 0.05$$
$$= 2.00 + 0.80 + 0.60 + 0.40 + 0.15 = 3.95$$

在此情境下，明挖覆蓋躍升為第一名（略高於懸索 3.90）。

假設 B：保守（仍設計突發洪峰備援、臨時護岸／導流規模較大）

- * 安全 / 耐久：4
- * 經費：3
- * 工期：3
- * 環境景觀：3
- * 減碳：3

加權總分

$$= 4 \times 0.50 + 3 \times 0.20 + 3 \times 0.15 + 3 \times 0.10 + 3 \times 0.05$$
$$= 2.00 + 0.60 + 0.45 + 0.30 + 0.15 = 3.50$$

修正後總結各方案評分

方案	總分
明挖覆蓋隧道（樂觀狀況：乾河床、免大型圍堰）	3.95
懸索吊橋（河中零墩）	3.90
斜張橋（單中墩 / 大跨	3.75
明挖覆蓋隧道（保守狀況：突發洪峰備援、臨時護岸 / 導流規模較大）	3.50
河底潛盾隧道	3.45
箱型樑（加高重建）	3.40
桁架橋（1~2 中墩）	3.15

把關與落地建議（讓「乾河床優勢」確實變現）

- 1. 水文窗口與預警：建立乾季作業時段 + 颱風／強降雨早期預警，明確停工撤場 SOP 與臨時導流啟閉標準。
- 2. 簡化導流而非零導流：採淺槽導水／箱涵臨時分洪，兼顧基地排水路徑，避免短時對流雨致淹坑。
- 3. 抗浮與滲控：底板抗浮設計（錨筋／加重）、周邊止水與回灌井，避免地下水浮力與側向滲流破壞。
- 4. 預製化 + 兩側對打：箱涵 / 側牆 / 頂板預製拼裝，把高風險工序壓縮在最短窗口。
- 5. 復舊與生態：回填後河床型態 / 糙率復原、魚道與生物通道、護床固床工整合；地表可做綠覆或慢行空間共構。
- 6. 碳與材料：高爐石 / 粉煤灰、再生骨材、鋼筋替代率；以標準化模數減少材料浪費與運輸里程。

馬太鞍溪橋重建方案的評估與選擇（以工期為優先）— 與 ChatGPT 5 的再度對話

筆者再次詰問

AI 大神：之前我給你的評估標準需要改變一下。由於主管單位要求限時完工，因此評估的標準改為：工期 40%、安全及耐久性 30%、經費 20%、環境景觀 10%。請重新評估下列各方案：(1) 箱型鋼梁；(2) 斜張橋；(3) 吊橋；(4) 桁架橋；(5) 潛盾河底隧道；(6) 明挖覆蓋隧道。請重新評估各種工法的優劣，以及依新的權重得出你的評分。

GPT 回答

我用 1 ~ 5 分評分（5 = 最好，1 = 最差），再乘上權重算出「加權總分」，供你比較。注意：下面分數是工程判斷的相對比較，不是精算結果，只是幫你看各方案在新權重下大致的強弱順序。

各方案優缺點與評分

(1) 箱型鋼梁橋（鋼箱梁 + 河中落墩）

- 優點：
- 結構型式成熟，設計、施工經驗多。
 - 可預鑄／預組裝，現場架設速度快，工期表現非常好。
 - 和斜張橋、吊橋相比，造價較低。
 - 維修技術成熟，鋼箱梁可內部檢修。
- 缺點：
- 在土石流河川中，「河中落墩是最大弱點」：
 - 容易積石、積木造成堵塞
 - 高流速時沖刷基礎
 - 橋下淨高一旦估計不足，遇到堰塞湖潰決，可能打到梁底。
 - 長期維護需不斷檢查防護鋼板、防撞構造與基礎掏空。

- 評分（1 ~ 5）：
- 安全耐久（S）：2（有合理設計仍可使用，但風險相對高）
 - 經費（C）：4（比特殊大跨橋／隧道便宜）
 - 工期（T）：5（最符合「限期完工」的常規方案）
 - 環境景觀（E）：3（對水流有阻礙，景觀一般）

加權總分：
 $0.3 \times 2 + 0.2 \times 4 + 0.4 \times 5 + 0.1 \times 3 = 0.6 + 0.8 + 2.0 + 0.3 = 3.7$ 分

(2) 斜張橋（不在主流中落墩）

- 優點：
- 可一跨過河（或極少在河道中設墩），基本上避開土石流直接衝擊與堵塞問題。
 - 不影響主流道的過水斷面，水理行為較有利。
 - 結構剛度較大，對於地震與不等沉陷的控制較好。
 - 景觀佳，可成為地標。
- 缺點：
- 設計複雜，需要有經驗的設計與施工團隊。
 - 造價高於一般鋼箱梁／桁架橋。

- 工期較長：塔柱施作、纜索安裝、精度控制都耗時。
- 施工設備與技術要求高。

評分（1~5）：

- 安全耐久（S）：5（就「土石流與堰塞湖」這種外在威脅而言是很有利的型式）
- 經費（C）：2（明顯較貴）
- 工期（T）：2（不利於「限期完工」）
- 環境景觀（E）：4（視覺效果佳，又不阻水）

加權總分：

$$0.3 \times 5 + 0.2 \times 2 + 0.4 \times 2 + 0.1 \times 4 = 1.5 + 0.4 + 0.8 + 0.4 = 3.1 \text{ 分}$$

(3) 吊橋（懸索橋型式，跨越全河）

優點：

- 和斜張橋一樣，可以完全不在主流中落墩。
- 對地形順應度高，可跨越很寬的河谷。
- 景觀極佳。

缺點：

- 結構體系更複雜，主纜、吊桿、錨碇等都需高技術。
- 造價通常更高。
- 工期也更長，施工順序繁瑣。
- 長期維護（防腐蝕、纜索檢測）工作量大。

評分（1~5）：

- 安全耐久（S）：4（避免河中落墩是優點，但耐久性高度依賴防腐維護）
- 經費（C）：1
- 工期（T）：1
- 環境景觀（E）：4

加權總分：

$$0.3 \times 4 + 0.2 \times 1 + 0.4 \times 1 + 0.1 \times 4 = 1.2 + 0.2 + 0.4 + 0.4 = 2.2 \text{ 分}$$

(4) 桁架橋（鋼桁架，通常仍需河中落墩）

優點：

- 可做較大的跨距，有機會減少橋墩數量。
- 結構自重相對輕，有利於減少基礎負擔。
- 可工廠預製、現場組裝，工期也算快。
- 造價和鋼箱梁相近，有時稍具經濟性。

缺點：

- 若仍在主流中設墩，基本問題和鋼箱梁一樣：堵塞、衝擊、沖刷。
- 桁架外露構件多，腐蝕與維護細節較多。
- 視覺較「雜」，有些人覺得景觀較差。

評分（1~5）：

- 安全耐久（S）：2（主流仍是落墩的風險）
- 經費（C）：4
- 工期（T）：4（略慢於鋼箱梁，但仍屬快速）
- 環境景觀（E）：2

加權總分：

$$0.3 \times 2 + 0.2 \times 4 + 0.4 \times 4 + 0.1 \times 2 = 0.6 + 0.8 + 1.6 + 0.2 = 3.2 \text{ 分}$$

(5) 潛盾河底隧道（Shield / TBM）

優點：

- 完全在地下，不受土石流與堰塞湖潰決的直接衝擊。
- 地表景觀影響小，對河道行水影響幾乎為零。
- 不需在河中施作任何構造物。

缺點：

- 地質與地下水條件若不佳，施工風險很高。
- 造價最高之一。
- 施工工期長，且前期調查、設計、設備動員時間也長。
- 一旦滲漏、水壓控制出問題，維修困難。

評分（1~5）：

- 安全耐久（S）：4（若設計施工得當很安全，但怕地質不確定與滲漏問題）
- 經費（C）：1
- 工期（T）：1
- 環境景觀（E）：4

加權總分：

$$0.3 \times 4 + 0.2 \times 1 + 0.4 \times 1 + 0.1 \times 4 = 1.2 + 0.2 + 0.4 + 0.4 = 2.2 \text{ 分}$$

(6) 明挖覆蓋隧道（Cut-and-cover）

你之前也提到：馬太鞍溪平常基流水很少，多為乾床，可能「不需圍堰即可施工」，成本應該可以比一般想像再低一點。在這前提下來看：

優點：

- 若河床在乾季大部分是乾的，施工動線單純，確實可減少臨時導流與圍堰成本。
- 完工後，地表可以覆土、恢復成「類天然河床／綠地」，景觀上可以整理得不錯。
- 不需要在主流區做高橋墩，避開大部分土石流撞擊問題。
- 工程技術相對潛盾簡單，造價比潛盾低。

缺點：

- 結構頂板與側牆仍位於河床或近河床位置，若未來大沖刷或河床下切，會有外露與破壞風險。
- 施工期間仍需：挖除河床大範圍土石
- 管理上游來水，避免施工期間的中小洪水。
- 工期比一般橋梁長，尤其是開挖、支撐、覆蓋各階段。

評分（1~5）：

- 安全耐久（S）：3（避開土石流正面衝擊，但須做好抗沖刷與防水設計）
- 經費（C）：3（比橋梁貴，但遠低於潛盾）
- 工期（T）：3（介於橋梁與潛盾之間）
- 環境景觀（E）：3（完工後可整理得不錯，但施工期間破壞較大）

加權總分：

$$0.3 \times 3 + 0.2 \times 3 + 0.4 \times 3 + 0.1 \times 3 = 0.9 + 0.6 + 1.2 + 0.3 = 3.0 \text{ 分}$$

「新權重」下的大致排序與解讀

方案	加權總分
鋼箱梁橋（落墩）	3.7
桁架橋（落墩）	3.2
斜張橋（不落墩）	3.1
明挖覆蓋隧道	3.0
吊橋	2.2
潛盾河底隧道	2.2

如何解讀？

在你給的「工期 40% + 經費 20%」的前提下，最快又便宜的「鋼箱梁／桁架橋」自然分數最高。

這反映「限期完工」的政策壓力，而不是說它在土石流環境中本質上最安全。

若我們只看「安全耐久」這一項，排序會完全不同：

斜張橋、吊橋、潛盾、明挖覆蓋隧道，都比「河中落墩」型式更有優勢。

只是它們因為「工期長／造價高」，在你給的權重下被拉低了總分。

這也點出一個關鍵：

目前的權重代表的是「行政上想要快」的偏好，但馬太鞍溪這種「堰塞湖＋高頻土石流」的特性，其實理論上應該讓安全權重更高，或至少對「河中落墩」施加額外的扣分。

給你的策略建議（工程面＋價值工程的思考）

如果要在「工期壓力」與「高風險環境」之間找平衡，我會建議你可以考慮：

在橋型選擇表上，清楚註明：鋼箱梁／桁架橋之所以分數較高，是因為「工期權重高」；但同時在說明文字裡強調：「土石流與堰塞湖風險下，本質上仍比較偏好不在主流中設墩的方案」。

若行政單位堅持採用落墩橋型（例如鋼箱梁），可以要求設計顧問：

- (A) 進一步提高安全設計基準（例如比一般橋梁更嚴苛的設計洪水／土石流條件）；
- (B) 增設：上游導流堤或導流墩，減少巨石、漂木直接撞擊橋墩；
- (C) 犧牲式防撞構造，讓被撞壞的是「可更換構件」而不是主墩或主梁；
- (D) 更深、更保守的基礎與護底設計。
- (E) 同時保留明挖覆蓋隧道作為備選方案，作為「若未來再有更大規模土石流或觀測證實風險更高時」的升級方案或長期方案。

筆者總結

各位有耐性的讀者，看到這裏，相信你會認同我的結論：

- (1) 充分利用 AI 的優點，層層詰問它，可能會有意料之外的答案。當給予不同的權重，他的評分也會截然不同。
- (2) 馬太鞍溪橋的最佳重建方案，可能不是一座橋！多年前鐵路局也採用明挖覆蓋隧道穿越馬太鞍溪，在這次洪流中完全沒有受到任何影響。因此若時間許可（不受政治的影響），且預算足夠，筆者淺見與 ChatGPT5 相同，明挖覆蓋隧道不失為最佳方案。但若工期限制，必須採用傳統的橋梁工法，就必須把防止土石撞及橋墩列為優先設計的考量。
- (3) ChatGPT 再發展下去，部份工程師就要失業了！只有善用 AI 的人才能在職場上繼續發光發熱。

參考資料

1. 中興工程顧問公司，新發大橋設計簡報
2. 周南山（2025），馬太鞍溪橋如何破壞？如何復健？（風傳媒）

自 98 年 ~ 113 年
連續 15 年榮獲內政部
績優自由職業團體

甲等團體

中華民國

本會依營造業法第三十一條第五項條文規定於民國95.3.29日成立

全國營造業工地主任公會



優良工地主任2026選拔12月受理報名



對象

◆受聘營造業擔任**工地主任**職務者。(請詳閱本會選拔作業要點)



獎勵

- ◆優良工地主任之表揚，以本會名義頒發獎狀一幅及特優獎金新臺幣**壹拾伍萬元**整、優等獎金新臺幣**捌萬元**整。
- ◆初評委員會建議表揚之名單，複評未獲同意者，頒發新臺幣**陸仟元**以茲鼓勵。
- ◆本會另致贈推薦參選優良工地主任之機關、廠商或團體**感謝狀**一幅。



申請
方式

- ◆依本會選拔作業要點，由營繕工程主辦機關、單位、僱主(營造業廠商)及相關**團體推薦或個人自薦**，於規定時間內填寫申請書並檢附相關資料，提出申請。
- ◆申請時間**自114年12月1日起至115年1月31日止**。
- ◆詳細資料請至本會網站 <https://www.tcca-roc.org> 下載。

教育訓練課程

01

工地主任32小時
四年回訓課程

02

產業人才投資方案課程

訓練
政策

回饋本會會員，以最優惠的價格提供經驗交流平台與終身學習之管道，以回饋社會及提昇專業職能、行為職能與管理職能。

多角化經營教學策略，開發營繕工程施工管理等專業課程，經營上更具競爭力。



本會會 址：台北市中山區長安東路一段25號10樓 / 電話：02-25817369

桃園服務處：桃園市中壢區環北路400號15樓之5 / 電話：03-4275570

台中服務處：台中市北區中清路一段100號B棟11樓之1 / 電話：04-22026259

台南服務處：台南市安平區永華路二段248號12樓之1 / 電話：06-2957269

高雄服務處：高雄市新興區民生一路206號9樓之1 / 電話：07-2296269





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



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



EARTHPOWER
臺中市北區東福11路553號1樓



卓越 | 誠信 | 安全 | 技術 | 品質



社團法人中國土木工程學會

建築物耐震之理論與實務研討會

台灣位處地震帶，如何增強建築物耐震能力是土木結構專業人士關心的課題。臺大地震工程研究中心自 1990 年成立以來，不斷精進為工程界服務，技術及實務經驗俱豐，值得分享。此外，本研討會將發表陳永祥教授新書《結構動力學》，介紹四大亮點：提摩仙可梁之理論與應用、超高速軌道之動力特性、台北 101 大樓之減震技術、及台灣設計地震反應譜與應用。本研討會理論與實務並重，精彩可期。

主辦單位：臺灣大學工學院地震工程研究中心、社團法人中國土木工程學會

協辦單位：臺灣省土木技師公會、台北市結構工程工業技師公會、台北市土木技師公會

中華民國結構工程學會、中華民國地震工程學會

日期：114 年 12 月 11 日 (星期四) 下午 13:30-17:00 (13:00 開始報到)

地點：台大應力所國際會議廳 (台北市大安區羅斯福路四段 1 號，辛亥路側門語言中心旁)

費用：免費

名額：180 人

報名方式：一律網路報名 <https://forms.gle/AMjHzqwVzE2PVLwN8>

報名期限：114 年 12 月 5 日 (星期五) 或額滿為止



報名連結

◎ 本活動提供技師 40 積分、公務人員學習時數 4 小時及參訓證明等服務。

◎ 本學會保留決定是否受理報名/調整課程/調整講師/調整上課場地等之權利。

議程表：

時間	演講主題	主講人	主持人
13:00-13:30	報 到		
13:30-13:40	開幕致詞	中國土木水利工程學會 高宗正 常務監事 臺大地震工程研究中心 黃尹男 主任 臺灣省土木技師公會 莊均緯 理事長	
13:40-14:25	RC 建築物地震災害之調查、原因與補強技術	黃世建 國立臺灣大學特聘教授	周中哲 國立臺灣大學特聘教授
14:25-15:10	鋼結構建築物耐(抗)震構件之種類、構造、原理及應用	蔡克銓 國立臺灣大學講座教授	
15:10-15:55	台灣建築物隔震技術之發展與展望	張國鎮 國立臺灣大學名譽教授	
15:55-16:15	中 場 休 息 (茶 敘)		
16:15-17:00	《結構動力學》新書發表、動機、責任與傳承；內容、特色與應用 (四大亮點)	陳永祥 國立臺灣大學名譽教授	陳正宗 國立海洋大學特聘講座教授
17:00	簽退、領取參訓證明		



社團法人中國土木水利工程學會



114 年年會系列活動：工程參訪、年會大會 暨 土木水利工程論壇

AI 驅動創新整合 開啟工程永續篇章

共同主辦：中興工程顧問股份有限公司、社團法人中國土木水利工程學會

114 年 11 月 20 日 (四) 工程參訪

集合地點：【臺北車站東三門出口】

時間	工程參訪行程	
8:30-11:30	萬大線土城金城機廠 參觀及導覽 (含車程)	8:10~8:30 臺北車站東三門出口集合
11:30-12:30	午餐	
12:30-16:30	台北捷運北投機廠 參觀及導覽 (含車程)	16:30 抵達臺北火車站

114 年 11 月 21 日 (五) 年會大會 暨 土木水利工程論壇

地點：【格萊天漾大飯店】

時間	議程		
9:00-9:30	相見歡 (註冊、報到與領取資料) 【13F 格萊廳】		
9:30-12:00	114 年年會大會 【13F 格萊廳】 <ol style="list-style-type: none"> 開幕式：介紹貴賓 主席 開幕致詞：高宗正理事長 邀請貴賓 大會致詞：經濟部 賴建信常務次長 「莫若楫總裁紀念講座」：國立成功大學 陳景文教授 演講：工程師的品格 頒發「土木水利 工程獎章」：評獎委員會報告、得獎人致詞 頒發「會士證書」 頒發「中技社土木水利學術獎」：頒獎人致詞、得獎人致詞 (財團法人中技社捐贈) 頒發「工程特殊貢獻獎」：頒獎人致詞、得獎人致詞 (曾元一先生捐贈) 頒發「論文獎」 頒發「獎學金」 頒發「AI 應用獎」 (莫若礪先生捐贈) 工程永續與環境美學委員會報告「114 年工程永續與環境美學獎」、頒獎 資訊委員會報告「2025 工程數位創新應用獎」、頒獎 青年委員會報告「2025 全國大專院校學生工程創意競賽」、頒獎 年會籌備報告 114 年會務報告 第二十七屆理事長交接典禮 唱大禹歌、禮成 		
12:00-13:00	午餐 (餐盒) 【14F 萬大廳】		
13:00-15:00 (120 min)	論壇一 AI 轉動新未來： 工程實務挑戰與創新應用	論壇二 114 年工程永續美學獎 【美學與景觀類】 優勝發表	論壇三 2025 工程數位創新應用獎 成果發表
	【15F 天悅廳】	【15F 天嵐廳】	【12F 青山綠意廳】
15:00-15:30	茶敘	茶敘	茶敘
15:30-17:30 (120 min)	論壇四 AI 賦能水務治理	論壇五 114 年工程永續美學獎 【環境與生態類】 優勝發表	論壇六 2025 全國大專院校 學生工程創意競賽 優勝發表
	【15F 天悅廳】	【15F 天嵐廳】	【12F 青山綠意廳】
18:00-20:30	大會晚宴 【14F 艋舺廳】		