

臺灣大地工程近三十年之發展回顧 ——從傳統分析到數值建模自動化、 參數最佳化與人工智慧應用之趨勢 與挑戰

葉馥瑄 國立臺灣科技大學營建工程系 / 助理教授、大地技師

朱民虔 國立屏東科技大學土木工程系 / 助理教授、大地技師

張正憲 中興工程股份有限公司軌道二部 / 組長、大地技師

一、前言

由於大地工程問題通常涉及龐大的空間尺度、複雜的邊界條件，以及土壤與岩石材料本身所具有之高度非線性、異向性與空間變異性，其力學行為往往同時受應力路徑、孔隙水壓、構造特性與地盤條件等多重因素影響，因此常呈現高度耦合且非單一機制主導之特性。在多變因與高度不確定性並存的情境下，傳統經驗公式或解析方法雖具實務便利性，惟通常對幾何條件、材料行為或邊界效應做適度簡化，致使其在複雜工程問題中的預測能力仍有一定限制。

隨著數值分析、統計推論、最佳化方法與資料科學之發展與深化，大地工程分析模式已由早期以經驗法與簡化分析為主之工作模式，逐步演進為結合數值模擬、自動化建模、參數反算、監測回饋與資料驅動（data-driven）預測之整合分析架構。其中，人工智慧（Artificial Intelligent, AI）並非單一數學方法，而是一類建立於演算法、統計學與數值最佳化基礎上的方法體系；其可透過大量案例資料、試驗成果或監測資訊進行

訓練，進而自動擷取輸入參數與工程反映之間的對應關係。若現地資料規模不足，則有必要結合自動化數值模擬、物理模型試驗及現地監測成果，建立可供訓練與驗證之資料庫，以提升後續模型之泛化能力與工程適用性，並朝向後續 AI 應用落地而發展。

以潛盾隧道工程為例，施工過程中之推力、扭矩、單位前進率、轉速、土壓、出土量、刃盤溫度及刀具磨耗等即時數位化資訊在施工過程中已可直接或間接得取，這些資料反映了地盤條件、施工操作與地下結構互制行為之綜合作用。當其背後之完整物理機制尚難完全明確描述時，人工智慧方法可作為特徵擷取與快速預測工具，協助建立施工參數與地盤反應之間的關聯模式；近年的隧道 AI 文獻亦普遍指出，TBM 施工資料具有高頻、連續與大量之特性，是發展即時預測與智慧決策之重要基礎（Baghbani *et al.*, 2022）。

相較之下，落石軌跡預測與邊坡穩定分析之 AI 應用，更受限於底層資料庫之規模、品質

與代表性，而直接影響模型預測之準確度、泛化性與外插能力。基於此，數值模擬自動化、物理模型試驗與現地量測結果之交互驗證，便顯得格外重要。尤其對於落石問題，若能進一步將回彈行為、接觸參數與地形條件透過數值分析與試驗比對建立系統性資料庫，將有助於後續 AI 模型之訓練與預警應用；而對於深開挖擋土設計與潛盾隧道沉陷分析，臺灣亦累積了相當多之監測案例與工程經驗，具備發展資料驅動預測工具之良好基礎。

此外，若欲提升數值分析之可信度，除自動化建模與高效率計算外，尚須選用適當之材料組成模式以描述地盤在不同加載應力路徑下之應力—應變行為。惟組成模式之預測能力，高度依賴其參數是否經過合理校正，因此參數辨識、最佳化反算及模型更新甚為關鍵。此類工作不僅可提升數值分析本身之可靠性，亦可作為未來人工智慧預測工具之前置基礎。

基於上述背景，本文將以數值建模自動化、參數校正及代表性工程應用為主軸，進一步探討人工智慧於大地工程之應用趨勢、技術挑戰及未來發展方向。

二、臺灣大地工程近三十年之發展背景與階段演進

近三十年來，臺灣大地工程的發展，並非單純反映分析工具的更新，而是受到實際工程需求、災害經驗，以及場址條件複雜化持續推動的結果。早期許多問題尚可透過經驗公式、簡化分析與工程判斷處理，但隨著都會地下開發、捷運與潛盾隧道工程增加，加上山區道路、邊坡防護、落石及豪雨崩塌等問題長期存在，工程所面對的條件已愈來愈複雜。這也使得大地工程分析不再只是回答安全與否，而是逐漸轉向如何更合理掌握施工歷程、地盤變形、土壤與結構互制行為，以及後續風險控制等問題。

以深開挖工程為例，該問題不僅有擋土結構本身的強度檢核，更涉及施工各階段中壁體變

位、地表沉陷、支撐受力以及周圍土體應力重新分配等行為。深開挖不只是單純的靜態穩定問題，而是一個施工歷程問題。在 1980 年代至 1990 年代開始，深開挖分析已開始引入有限差分法或有限元素程式，以模擬施工過程中各階段擋土壁及周圍土體之應力與變形（歐晉德等人，1988；歐章煜等人，1992）。此一發展顯示，臺灣在相當早期即已開始重視深開挖施工歷程對壁體變位與地表沉陷之影響；而若要使分析結果具有合理性，施工階段模擬以及土壤組成模式與其參數之適當選用，皆為關鍵。

深開挖鄰損與坍塌事故於近年來仍時常發生，例如臺北大直、新北三重及桃園等案例，均顯示鄰近開挖施工可能導致鄰房傾斜、坍塌或地表局部破壞。此類案例顯示，施工期間之壁體變位與地表沉陷監測已受到高度重視，自動化與半自動化監測技術亦逐步發展並持續精進；然而，深開挖工程之核心仍在分析與設計階段，包括擋土壁貫入深度之決定、支撐系統之配置、土層條件與土壤參數之選定，以及分析模式是否足以合理反映現地行為。換言之，監測雖為風險管控之重要手段，卻無法取代合理設計；若設計階段對地盤行為掌握不足，施工風險仍難以有效控制。這也是為何臺灣大地工程後續逐漸更加重視施工階段分析、監測回饋以及參數合理性的問題。而後續區域性參數、資料庫，供後續反饋分析，藉以消除地層等不確定性愈顯重要（如：宋士豪等人，2023）。

除了深開挖之外，隨著臺灣捷運系統持續推進，潛盾隧道施工已逐步由較單純地層，轉往複合地層與卵礫石層等更具挑戰性的場址條件。這類問題的困難，不只在施工本身，而在於地層變異性高，施工參數與地盤反應之間的關係更為複雜，使地表沉陷預測與鄰近設施保護都更具不確定性。因此，潛盾隧道工程分析也逐漸由過去較依賴經驗沉陷槽推估的方式，轉向更重視施工資訊、現地量測與整體地盤反應的分析架構。這也反映出，當工程條件愈來愈複雜時，分析方法

不能只停留在平均化或簡化概念上，而必須正面面對場址差異與施工過程中的不確定性。

落石與邊坡問題則更凸顯臺灣山區環境下的大地工程特性。臺灣山區地形陡峭、地質條件破碎，又常受豪雨與地震影響，落石事件長期頻繁發生，對道路安全與邊坡防護造成持續壓力。這類問題過去其實已累積相當多研究與工程經驗，但實務上仍然不容易做到有效預警。原因在於，落石事件本身具有高度離散性，現地資料往往不足且不連續，與都會地下工程可持續累積監測資料的條件存在明顯差異。這也顯示，臺灣大地工程面對的問題雖然很多，但不同問題背後的資料條件、分析難度與風險管理需求其實差異很大，而這些差異正是近三十年技術演進方向的重要背景。

若從整體發展來看，臺灣近三十年大地工程技術的演進，大致可分成三個階段。第一階段可稱為傳統經驗分析期。這個階段的工程設計仍以經驗公式、簡化解析方法及安全係數觀念為主，配合鑽探、現地試驗與室內試驗結果進行工程判斷。雖然部分較複雜問題已開始引入較進階的分析觀念，但整體而言，設計流程仍高度依賴工程師經驗，對施工歷程、地盤變形及土壤—結構互制行為的掌握仍相對有限。

第二階段可稱為數值分析與監測普及期。隨著電腦運算能力提升、商用軟體逐漸成熟，以及深開挖、捷運、潛盾隧道、邊坡防災與液化評估等需求增加，數值分析開始更廣泛應用於大地工程問題。這個階段最重要的轉變在於，工程目標已不再只是整體穩定與安全檢核，而是逐步延伸到壁體變位、地表沉陷、鄰近設施保護、施工影響評估與施工歷程控制等議題。同時，現地監測系統的建置與量測資料的累積，也使工程實務逐漸由單純事前設計，轉向設計、施工與監測相互對照的模式。

第三階段則是近年逐漸形成的數位化、自動化與人工智慧萌芽期。這個階段的特色，不只是工具變多，而是工程資料的型態、規模與更新

速度都開始改變。對深開挖與潛盾隧道這類都會地下工程而言，監測資料與施工資訊已逐漸成為理解地盤反應與檢視設計合理性的重要依據；對落石與邊坡問題而言，監測與影像資料、地形資訊與試驗成果的累積，也使後續更進一步的分析與預測開始具備條件。換言之，這一階段所反映的，不只是分析技術的進步，而是大地工程開始朝向資料整合、持續更新與智慧化應用發展。

若回頭檢視這三個階段，可看出臺灣大地工程的發展並不是前一套方法被下一套方法完全取代，而是經驗法、數值分析、監測技術與新興資料方法彼此疊加、逐步整合的過程。傳統工程判斷仍然重要，數值分析提升了對複雜地盤行為的掌握，監測技術補足了施工與現地反應資訊，而近年數位化與智慧化工具則進一步擴大了分析、比對與預測的可能性。也正是在這樣的背景下，後續臺灣大地工程在地盤調查、監測技術、分析設計方法，以及自動化與人工智慧應用上的發展，才有進一步發展的可能。

三、數值建模自動化、參數校正與代表性工程應用

臺灣大地工程的發展，已逐漸由傳統經驗法與單一個案分析，轉向更重視數值模擬、監測回饋、參數校正與資料整合的分析架構。本文因篇幅所限，僅擇深開挖擋土、潛盾隧道及落石分析三類案例作為代表；然大地工程其他議題亦多具有相似特性，故此一發展趨勢並非僅限於上述三類工程問題。

這三類問題的共同點，在於都不能只靠單一經驗參數或簡化公式處理。深開挖問題涉及施工各階段壁體變位、支撐系統受力與地表沉陷；潛盾隧道問題涉及施工工序與地盤反應之間的耦合；落石問題則涉及塊體運動、接觸回彈與地形條件對路徑的影響。雖然問題型態不同，但其本質上都具有施工或運動歷程效應、材料與邊界條件不確定性，以及量測資料或試驗結果必須回饋分析模型的特性。

因此，就這三個工程問題，可發現以由傳統單次之個案分析，逐步走向數值建模自動化、參數反算與模型校正，並進一步形成可供後續快速預測與資料驅動應用之趨勢。以下即分別就深開挖擋土、潛盾隧道與落石分析三個面向簡要說明。

3.1 深開挖擋土：壁體變位、支撐系統與地表沉陷之自動化分析

在深開挖擋土工程中，分析已從傳統安全穩定性檢核轉向施工階段之變形控制，而自動化數值模擬、監測回饋校正與 AI 快速預測模型之結合，正逐漸成為提升設計效率與風險管理能力的重要方向。臺灣工程界已開始讓深開挖設計自動化，並結合施工與監測成果相互連動，建立回饋系統，以解決過去設計階段完成後，施工階段難以回饋的問題，藉此可整合設計分析，BIM 模型自動化建置，自動產出圖說、計算書及數量計算等（吳文隆等人，2018；劉大慶等人，2018；張正憲等人，2023）。

以近年臺灣實務發展而言，已有研究開始嘗試將既有工地之施工經驗與監測成果回饋至後續設計分析階段。例如，張正憲等人（2024）指出，目前臺灣業界在深開挖一維分析上，仍多以 TORSO 或 RIDO 等程式為主；分析所需之凝聚力 c 與摩擦角 ϕ 值，原則上多依地質調查報告建議值選用，而地盤反力係數 K_h 則常作為描述土壤與擋土結構互制行為的重要參數。該研究透過與現地監測成果進行回饋分析，將實際壁體變形分階段歷程作為目標值，配合較細緻之土層分層方式，反覆調整 K_h 值，並以最大變形深度與最大變形量控制於實測結果正負 10% 範圍內為參數最佳化目標，經自動迭代分析後求得與現地壁體變形較為相符之地盤反力係數。此類作法顯示，業界已開始將大地監測系統與回饋分析相互整合，使未來鄰近場址之設計分析可採用較貼近現地反應之參數，進而提升支撐系統配置與設計之合理性。

然而，此類方法目前多仍建立在較簡化之分析架構下，其校正對象往往僅限於單一地盤反力係數 K_h 。而實際深開挖施工過程常涉及分區開挖、支撐分階段施作、加解壓與載重重新分配等效應，問題本質上往往具有二維甚至三維特性；此外，土壤與擋土結構之互制行為本身即屬高度非線性之彈塑性問題，部分案例中尚可能需考慮時間效應或潛變行為。若僅透過單一 K_h 值之調整，即欲完整代表深開挖過程中複雜之土壤—結構互制反應，仍有其限制。

從國內實務發展來看，一維分析並非全然無法回應三向度問題，而是可透過適當方式將三向度效應納入簡化分析架構中（黃文崧等人，2016）。已有研究指出，對於扶壁、地中壁與擋土連續壁所形成之三向度構造，雖理論上應以三維數值程式模擬其變形行為，但在工程實務上，亦可於二維平面應變架構下採用等值彈簧等方式近似模擬三向度效應，以作為壁體變形量評估之參考（徐明志等人，2016）。另一方面，國內 TORSO 與 PLAXIS 等工具亦已逐步透過捷運深開挖案例建立交叉比對基礎；當開挖範圍、施工順序或基地條件使三向度效應明顯時，仍須進一步採用二維或三維分析加以檢核（詹佩臻及陳均維，2022）。

再者，若參數最佳化僅以壁體最大變形深度與最大變形量作為控制目標，是否已足以反映整體開挖行為，亦值得進一步討論。地表沉陷量、開挖面隆起量，甚至支撐受力歷程等指標，均可能影響參數反算結果。從此角度來看，未來可考慮進一步引入多目標最佳化與 Pareto front 之概念，並結合粒子群演算法等方法進行演算，使不同監測指標間之權衡關係得以納入分析（Jiang *et al.*, 2018; 王慶賢，2024）。

因此，若要進一步提升深開挖分析之預測能力與自動化程度，未來發展不應僅停留於單一參數之回饋修正，而應進一步思考：是否有必要引入更高階之土壤組成律模式，以更合理描述土

體受到不同應力路徑下之勁度、強度與體積變化；是否能更細分土層，並模擬多階段開挖與支撐施作工序；以及是否能結合現地監測資料、自動化參數反算與最佳化分析流程，建立更完整之模型更新機制。若分析目標已不僅是配合某一監測結果回推出一組可用的 K_s 值，而是希望模型能真正反映深開挖過程中土壤與支撐系統之互制行為，則問題本質上已超出單一參數修正的範疇，而必須回到組成律模式選擇、多參數校正與施工階段模擬合理性等更核心的分析議題。從此角度來看，深開挖問題之自動化分析，應逐步朝向「以監測資料為基礎、以多階段施工歷程之合理擬合為核心、並能持續更新模型設定與組成律參數」之分析架構發展。此一發展不僅有助於未來設計更貼近現地實際行為，亦可作為後續 AI 快速預測模型與工程資料庫建立的重要基礎。

3.2 潛盾隧道：地表沉陷、施工參數反算

在潛盾隧道設計與施工中，為了克服既有地面、地下結構物與管線限制，工程上常需採取急曲線掘進。為兼顧線形控制與施工安全，除選擇適當潛盾機型外，亦須依現地條件採取有效之輔助措施，如異型環片規格配置、超挖刀、背填灌漿等（周允文等人，2009）。對於行經土壤與岩層複合地層、近接既有結構物，且同時涉及急曲線掘進之潛盾工程，於分析設計階段採用三維模型進行評估，應有其必要性。然而，實際施工過程中仍可能遭遇地質條件變異、岩盤堅硬程度超乎預期等情況（蔡英聖等人，2014）。因此，如何在分析、設計、施工監測與現地回饋之間建立有效連結，以因應各項施工風險，仍為潛盾工程之重要挑戰。

潛盾隧道施工引致地表沉陷，已由早期以 Peck 型經驗公式或半經驗沉陷槽為主之推估方式，逐步發展為結合數值模擬、監測回饋與資料反算之分析模式（Peck, 1969; Standing *et al.*, 2008）。其原因在於，都會區地下空間開發增加後，潛盾隧道所面對的問題已不再只是單一隧道

於理想地層條件下之沉陷預估，而是逐漸轉向雙隧道、近接地下結構物、急曲線轉彎、複合地層與鄰近設施保護等更為複雜之工程情境。對於此類問題，若仍僅依賴簡化經驗公式，往往已難以充分掌握實際施工過程中的地盤反應與沉陷分布特徵。若以雙隧道為例，既有研究指出，雙隧道沉陷槽之形態、偏移與交互影響，已非單一對稱高斯曲線所能完整描述；若預測僅以疊加原理處理，常難以充分反映先後行隧道之交互作用與重疊區行為，其適用性可能受到限制（Islam and Iskander, 2021）。因此，二維與三維數值分析逐步成為更具代表性之分析架構（Addenbrooke and Potts, 2001；Kasper and Meschke, 2006）。

以臺北捷運為例，隨著各階段捷運路網陸續完成，後續路線之設計與施工常須面對與既有設施或營運中車站交會之情境。隨著一維、二維與三維分析工具之功能日益增強，如何使分析結果具備合理性與可信度，便需仰賴既有案例、監測資料與工程經驗之回饋，並透過交叉檢核加以驗證。當一維或二維分析已不足以處理問題時，則有必要進一步採用三維分析，甚至搭配不同數值工具，如 PLAXIS、MIDAS GTS 等進行比較；而深開挖與潛盾隧道之設計參數，亦可透過過去捷運線施工之現地監測資料進行回饋分析，作為後續捷運路網設計之參考（賴建名等人，2010；李榮瑞等人，2015）。

另一方面，國內對於機場捷運通過卵礫石層之潛盾隧道施工，相關實務經驗仍相對有限（邱志榮等人，2018）。當潛盾施工面對高變異性之卵礫石地層時，施工前之地質調查、潛盾機型選擇、施工控制與自動化監測判讀，均為影響後續施工管理與風險管控之關鍵。此類地盤之挑戰未必主要在於沉陷量預估，而更多反映於施工過程中之地下水處理、掘進速率控制，以及切刀盤配置與地層適應性等問題。

若要使數值分析結果更貼近現地實況，現地監測資料、地質調查與室內試驗結果之品質與

代表性便十分重要。既有資料已指出，現場監測、現地地質調查與室內試驗結果可能受到人為操作與環境干擾，並直接影響數值分析結果之驗證；因此，建立合理之資料篩選、監測比對與反算校正機制，已成為潛盾沉陷分析中不可忽視之一環（Shreyas and Dey, 2019）。無論是潛盾穿越營運中捷運車站下方，或近接建物施工之工程情境，均需透過分析評估、施工規劃與量測資料之相互對照，才能將分析成果真正落實於後續施工風險管控（賴建名等人，2010；李榮瑞等人，2015）。

在分析設計流程上，潛盾沉陷問題已逐步形成由二維分析建立基礎流程、再透過三維模擬處理複雜幾何與施工條件，並同步進行組成律模式參數反算與校正之技術路徑。尤其當問題涉及複合地層、軟弱黏土或顯著時間效應時，傳統線彈性模式往往難以準確反映體積損失、長期沉陷與土壤非線性變形，而高階組成律模式與其參數最佳化的重要性便隨之提高。

若從更長期的應用角度來看，潛盾隧道可視為結合數值模擬、自動化建模、參數反算、監測回饋與資料驅動預測之代表性工程問題。近年研究指出，soft computing 與機器學習方法已逐步應用於地表沉陷、隧道收斂及 TBM 表現之預測，顯示潛盾隧道問題後續確實有機會朝向智慧化分析與快速預警方向發展。然而，這類方法能否真正落實於工程實務，其關鍵仍在於模型訓練所仰賴資料之質與量。若缺乏足夠且具代表性之監測、施工或試驗資料，即使模型形式再複雜，亦難以有效掌握潛盾施工過程中土壤與結構互制行為（Shreyas and Dey, 2019）。因此，未來發展除演算法本身外，更應重視高品質資料之累積、篩選與整合，作為後續 AI 模型訓練、代理模型（Surrogate model）建立與工程預警應用之基礎；其重點亦將由單純提升預測精度，進一步轉向資料庫建置、特徵篩選、超參數最佳化等（Song *et al.*, 2024）。

3.3 落石分析：現地調查、彈跳模擬、資料庫建構與預警展望

落石為臺灣山區道路防災與維護管理之重要課題。相較於深開挖與潛盾隧道可於施工階段持續取得監測資料，落石問題之困難在於其發生位置、觸發時間、運動路徑與最終危害範圍往往具有高度不確定性，且實際行為又深受地形、坡面材料、塊體形狀、降雨、地震與撞擊接觸行為共同控制。Ritchie（1963）可視為早期落石防護設計與危害評估的重要基礎，而後續研究逐步由傳統二維與經驗式之工程導向分析思維，發展至結合現地試驗、理論或數值分析與經驗判釋之方法研究，以 Piteau and Clayton（1976）、Wu（1984）、Pfeiffer and Bowen（1989）、Azzoni *et al.*,（1995）以及 Guzzetti *et al.*,（2002）代表集塊質量法、機率式軌跡分析、數學模型與三維模擬等技術方法，其目的多在於掌握落石之軌跡、速度、衝擊能量與彈跳特性，以作為防護設施設計與風險判斷之依據。Dorren（2003）亦將落石模型概分為 empirical、process-based 與 GIS-based 三類，顯示其發展已由單一坡面之簡化分析，走向空間分布式之整合架構。

從實際應用於工程實務與規劃設計來看，國內外工程仍多以集塊質量法（lumped mass method）為主，並以法向與切向回彈係數描述落石撞擊過程中的能量耗散。此一分析脈絡可追溯至 Piteau and Clayton 於 1976 年提出之 Computer Rockfall Model，其後並逐步發展出 CRSP、RocFall 及 STONE 等工具。Guzzetti *et al.*,（2002）透過 STONE，已將落石分析由傳統二維剖面進一步推展至三維地形架構，可處理空間分布之潛在落石源區、摩擦係數與回彈參數；然而，該方法為將塊體視為集中質點，未考慮塊體之實際形狀、尺寸與完整動力行為（fully dynamic behavior），且在落石運動四種主要狀態中，僅處理自由落下（free falling）、彈跳（bouncing）與滾動（rolling），並未考慮滑動

(sliding)。因此，後續發展仍有必要朝向納入滑動機制、改良滾動行為描述等方向精進。除此之外，模擬結果仍高度依賴數值地形模型 (digital terrain model, DTM) 解析度、落石源區辨識，以及回彈與摩擦參數之合理設定，顯示即使三維分析工具已逐步成熟，落石模擬之主要限制仍在於輸入資料品質、參數校正與物理模型簡化。顧承宇等人 (2008) 與顧承宇 (2013) 亦指出，真實地形條件之掌握是落石分析之核心；高精度 DTM、三維雷射掃描與後續數值分析之整合，可明顯提升落石源區判釋、軌跡模擬與危害範圍評估之合理性。

臺灣邊坡地形條件複雜、地質破碎，且常伴隨植被覆蓋、強降雨與震後鬆動等環境特徵，使落石之撞擊、彈跳與滾動行為更具變異性。再者，國內全尺度落石試驗場地之取得與建置仍具相當困難，使實際防護網設計規範多仍仰賴國外標準與經驗值，未必能充分反映臺灣本土場址特性條件 (site-specific conditions)。Agliardi and Crosta (2003) 指出，三維地形與數值高程模型 (digital elevation model, DEM) 之解析度，會影響模擬所得之速度、高度、範圍與側向離散 (lateral dispersion)；當地形解析度不足時，三維分析結果將逐漸趨近於二維模型之簡化結果。另一方面，若落石分析工具仍主要建立在集塊質量法與回彈係數概念之上，雖然其優點在於計算效率較高，適合規劃與設計階段之應用，但對塊體形狀、塊體間碰撞、複雜接觸力學以及防護結構互制行為之描述，仍有一定限制。傳統回彈係數雖具有工程實務上的便利性，但其合理取值仍須回到實際落石事件、衝擊角度、摩擦條件與現地軌跡資料加以校正，顯示此類參數並非單純固定之材料常數，而與場址條件及衝擊幾何密切相關 (Wyllie, 2014)。因此，臺灣落石問題不能僅直接沿用國外參數與分析結果，而應透過本土地形資料、現地參數量測、試驗驗證與數值分析交互比對，建立符合臺灣場址特性條件之分析架構。

在資料取得與風險管理方面，國內研究已

逐步由單一落石軌跡分析，轉向結合危害分級與道路風險評估之整合架構。張道光等人 (2011) 提出，落石邊坡可依危害度分級、自動化監測規劃等實現預警，並強調災損紀錄、致災因子與監測資料庫建置之重要性。莊明仁等人 (2014) 指出，國內在風景區與道路場域之落石風險評估與防護行動判斷基準仍具挑戰。邱雅筑等人 (2024) 以道路鄰近上邊坡之脆弱度、道路曝露度及落石危害度等因子出發，建立道路落石風險圖。以上顯示國內落石評估已有將道路管理決策直接連結到風險導向架構。

除此之外，隨著感測器、影像量測、UAV/LiDAR 與數值分析軟體工具之提升，未來可望透過現地監測、試驗資料、影像辨識與高階數值模擬之整合，進行參數反算、模型校正與資料擴增，進一步建立可快速預測落石路徑、速度、能量與影響範圍之資料驅動模型。鍾志忠等人 (2022) 透過合成孔徑雷達干涉 (InSAR)、GPS、以及整合光學、熱影像之即時影像量測，結合 AI 影像判釋等多元尺度技術共同組成之預警架構。GeoPORT 系統則更進一步將地質災害速報、多元尺度地質調查與全尺度三維數值模擬整合為一套調查與研判流程 (邱家吉等人, 2022)。張睿明等人 (2024) 更嘗試透過微地動訊號擷取與分類，並導入 AI 模型輔助落石訊號辨識與預警系統運作。以上研究，顯示感測器量測、即時訊號處理與資料驅動方法之整合，已逐步成為落石預警技術發展的重要方向。另一方面，丘達昌與林義評 (2021) 亦指出，落石監測告警系統之規劃設計應優先採用可執行動態監控之模組，並朝低功耗 IoT 與邊緣運算 (Edge Computing) 架構發展，以提升現地即時處理與資料回傳能力，作為後續大數據分析與決策支援之基礎。

Raibaut *et al.* (2025) 三維落石模擬之關鍵已不僅在於重現代表性軌跡，而在於如何透過真實落石事件之停留點分布，客觀評估模型之預測能力 (predictive capability)。其研究進一步導入參數反算與最佳化校正，結果顯示，經校正後平

均預測誤差可降低逾 25%。從此角度來看，最佳化與 AI 可望進一步整合原本分散之資料來源與分析流程。未來落石分析亦不宜僅停留於單一模擬工具或單次事件反算，而應朝向「現地監測與感測技術精進、高精度地形建模、室內與現地試驗資料累積、真實事件反算、參數校正、資料庫建構、最佳化與 AI / data-driven 模型訓練，以及即時預警」之整合架構發展，逐步走向可持續更新之智慧化分析與預警體系。

四、人工智慧於土木地工界應用發展

人工智慧發展最早可以追溯到 1940 年代文章 A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity，透過生物神經元的數學模型實現來邏輯運算，隨著時間推移也逐步應用於土木工程，根據 Ebid (2021) 的梳理第一篇文章 (Sriram, 1984) 應用人工智慧於土木工程之文章：“Bibliography on Knowledge-Based Expert Systems in Engineering”，此為早期討論專家系統 (Expert System) 在工程問題求解中的應用。在臺灣地工領域中，人工智慧技術之應用可追溯至 1990 年代初期。例如，熊雲鵬與林亦郎 (1992) 將專家系統應用於深開挖支撐之安全監測評估。而專家系統主要是將工程專家的經驗與判斷整理成一套可供電腦使用的知識與判斷邏輯，透過二元選項使電腦在專業問題上能夠模擬專家的決策過程。然而實際工程問題中許多工程決策並非以二元選項就可以回答，程度差異的不同也相當重要，因此進而發展出模糊系統允許以不同程度來描述某一狀態，使工程中常見的模糊判斷 (或經驗) 得以透過數值方式表示，蔣偉寧等人 (1993) 進一步將模糊邏輯引入地震危害與決策分析中，以處理工程中不確定且具語意特性的資訊。以上兩種方法其知識與規則仍需依賴專家事先建立與調整。隨著科技文明進展、資料量的增加，研究人員開始思考：是否能讓電腦不完全依靠專家規則，而是能夠從既有資料中自動學習其中的關

係與規律？這樣的想法促使後續研究逐漸轉向資料驅動的方法，並進一步推動了類神經網路 (Artificial Neural Networks) 與機器學習技術在工程問題中的發展。其中類神經網路是相當廣泛應用且成功的技術，此技術模擬人類大腦神經元處理訊息的方式，透過一層一層神經元連接與訊息資訊放大逐步使重要的資訊慢慢地浮現，而在這樣的結構下類神經網路通常會具有所謂輸入層 (輸入資訊)、隱藏層 (傳遞資訊且逐步過濾不重要資訊並放大重要資訊)、輸出層 (輸出結果) 等等部分，這樣的方式需要大量已知且高品質資料才有機會能夠得到相對準確的預測結果。類神經網路於地質與地工領域之應用可追溯至早期研究，例如發表於 Computers and Geosciences 的 “Open-ended mineralogical/textural rock classification” (Carr and Hibbard, 1991)。在臺灣地工領域中，相關應用針對地層岩性辨識之研究 (林人仰, 1999)，並發表於《石油鑽探工程》。

五、人工智慧於臺灣地工界應用發展

臺灣地工領域中人工智慧技術之發展，可由 1990 年代初期之知識驅動方法逐步演進至資料驅動方法。早期研究以專家系統與模糊邏輯為主，例如熊雲鵬與林亦郎 (1992) 將專家系統應用於深開挖支撐之安全監測評估，而蔣偉寧等人 (1993) 則將模糊邏輯應用於地震危害與決策分析，以處理工程中不確定且具語意特性的資訊。

隨著計算能力與資料量的提升，類神經網路 (Artificial Neural Networks, ANN) 於 1990 年代中後期逐漸被引入臺灣地工領域，並成為分析工具。以深開挖工程為例，冀樹勇等人 (2002) 蒐集過往深開挖之案例，利用誤差倒傳遞類深神經網路模式進行資料庫學習，並結合施工期間壁體監測變形資料作為輸入資訊，以預測後續施工階段可能產生之壁體變位；該預測結果亦可進一步配合理論計算與經驗方法，檢討壁體受力與地盤沉陷行為。

根據葉怡成（2002）對 1991 年至 2001 年間國內期刊與博碩士論文之整理，類神經網路已被廣泛應用於多項地工問題，包括地層岩性辨識、土壤液化潛能評估、邊坡穩定分析、地盤沉陷預測以及地工參數反算等，顯示資料驅動方法已逐步取代傳統規則式方法，成為處理複雜地工問題之重要工具。此一發展亦反映當時臺灣地工學界對人工智慧技術之高度關注，多位學者相繼投入相關研究，例如左天雄、倪勝火、李德河、楊朝平、陳俶季、廖志中、單信瑜、陳珍誠與葉怡成等人，促進了類神經網路於不同地工問題之應用與發展。此一發展歷程反映地工分析方法由早期依賴專家知識與經驗判斷，逐漸轉向透過資料學習隱含關係之趨勢，亦為後續機器學習與深度學習技術於地工領域應用奠定基礎。

近年人工智慧於地工問題之應用，亦已由單純分類與預測，逐步延伸至設計最佳化、反算分析與模型更新等層面；相關綜述已將其應用歸納為分析（analyzing）、設計（designing）、預測（predicting）與分類（classification）等主要類型（Kashani *et al.*, 2021）。除此之外，物理數據驅動多目標最佳化方法（Physics-data driven multi-objective optimization）（Zhang *et al.*, 2025（或物理輔助資料驅動（Physics-Assisted Data-Driven, PADD）（*e.g.*, Abdi *et al.*, 2026）之預測架構，可從純數值模擬向物理與數據合成的方式，來降低了工程預測的不確定性。

六、淺談資料驅動方法於地工應用之技術挑戰

回顧臺灣近三十年發展，數值建模自動化與 AI 技術雖在時間上並行演進，但兩者之間的系統性整合仍相當有限，前者多由工程實務需求驅動，後者多由學術研究推動；如何建立兩者之間的資料與流程橋接，應為未來發展之重要課題。此一現象並非臺灣獨有；Sheil *et al.*, (2026) 亦將 AI 與傳統地工模型及經驗法之間的系統性連結不足，列為當前 AI 於地工領域推廣的核心挑戰之一。目

前 AI 技術有相當多應用於地工相關議題例子，包含：土壤性質與分類、岩石性質判斷、邊坡穩定、液化、深基礎、土壤夯實、隧道、落石等。就功能定位而言，機器學習方法（如隨機森林、支持向量機）常被用於沉陷或變位預測；深度學習中的卷積神經網路（Convolutional Neural Network，CNN）則擅長於影像與訊號判讀；最佳化方法（如粒子群演算法）多用於參數反算；生成式 AI 則較適合文獻整理與知識管理。然而雖然目前資料驅動的 AI 技術已經越來越廣泛的被應用，但 AI 技術應用於地工實務尚有幾個待克服的問題，首先地工的工程規模龐大、耗時長且複雜度高，所以通常資料規模與完整度相對其他工程小且低，而工程環境變化因素太多，具體來說鑽探、試驗、監測與施工紀錄等資料格式常不一致，導入 AI 前需進行資料標準化、缺漏值處理、品質篩核與案例標籤化等治理程序，方能確保訓練資料之可靠性，導致模型結果可能僅限在特定的條件下具備準確性，再來工程進行過程中對於所有可量化數據蒐集並無建立 SOP 導致資料集（或數據）的可靠性也相當有限，種種因素甚至導致 AI 模型結果有時會缺乏明確的物理意義，並難以保證或預測其在不同工程案例中的適用性，故 AI 模型除應說明預測精度外，亦應明確標示適用地層、工程型態、資料涵蓋範圍及外推限制，並透過交叉驗證（cross-validation）或獨立測試集進行模型驗證，以避免誤用於不適合之工程條件。未來如果希望 AI 技術在地工相關領域上更廣泛解決上述這些因素限制，在目前尚不考慮執行困難度情況下，可以針對研究議題建立數據資料庫共同平台，提供管道將各單位工程議題詳細已量化數據分享至該平台，透過該平台內部專業且嚴謹篩選審查機制，針對數據進行整理後，將數據公開在平台上取用，地工相關議題才有機會能有提供一個更具全面性的實務應用可能。

七、結語

臺灣大地工程近三十年已由經驗法與簡化

分析，逐步走向結合數值模擬、監測回饋、自動化建模、參數校正與人工智慧應用之整合架構。筆者群藉此與大地技師公會交流之機會，從深開挖、潛盾隧道與落石預警等議題切入，整理對數值建模自動化、參數最佳化與 AI 應用趨勢及其技術挑戰之觀察；從業界至學界雖以不同的觀點出發，但又以同樣朝向大量資料庫輔助設計之方向前進，不僅表示業界與學界目標一致，亦代表未來產學界必有高度合作之必要性，相信大家一定非常期待大地工程未來三十年產學共榮的榮景。

本文所舉雖僅為部分案例，但已可看出資料整合、模型更新、參數校正與智慧化分析架構，應可延伸應用於其他大地工程問題。圖 1 即為本文之總整架構圖，筆者以深開挖擋土、潛盾隧道及落石防災三類代表性議題為例，統整本文所欲說明之核心脈絡。未來若能針對各項地工議題建立臺灣本土工程案例資料庫、推動監測資料格式標準化、建立 AI 模型驗證機制，並發展工程師可理解、可追蹤、可審查之 AI 輔助工具，將更有助於推動數值建模自動化、參數最佳化與智慧化預警逐步落實於工程實務。

參考文獻

1. Abdi, A. S., Ou, C. Y., & Ching, J. (2026). Physics-Assisted Data-Driven Methods for Predicting the Performance of Deep Excavation in Soft Clays. *International Journal of Geomechanics*, 26(7), 04026127.
2. Addenbrooke, T. I., & Potts, D. M. (2001). Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. *International Journal of Geomechanics*, 1(2), 249–271.
3. Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455-471.
4. Azzoni, A., La Barbera, G., & Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(7), 709–724.
5. Baghbani, A., Choudhury, T., Costa, S., and Reiner, J. (2022). Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Earth-Science Reviews*, 228, 103991.
6. Carr, J. R. and Hibbard, M. J. (1991). Open-ended mineralogical/textural rock classification. *Computers & Geosciences*, 17(10), 1409–1463.
7. Dorren, L. K. (2003). A review of rockfall



圖 1 本文總整架構圖

- mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87.
8. Ebid, A. M. (2021). 35 years of (AI) in geotechnical engineering: state of the art. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 637–690.
 9. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1079–1093.
 10. Islam, M. S. and Iskander, M. (2021). Twin tunnelling induced ground settlements: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 110, 103614.
 11. Jiang, Q., Sun, Y., Yi, B., Li, T., and Xiong, F. (2018). Inverse analysis for geomaterial parameter identification using Pareto multiobjective optimization. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(14), 1698–1718.
 12. Kashani, A. R., Chiong, R., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2021). Particle Swarm Optimization Variants for Solving Geotechnical Problems: Review and Comparative Analysis: AR Kashani et al. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1871–1927.
 13. Kasper, T., & Meschke, G. (2006). On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and underground space technology*, 21(2), 160–171.
 14. Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. In: *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico.
 15. Pfeiffer, T. J., & Bowen, T. D. (1989). Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26(1), 135–146.
 16. Piteau, D., Clayton, R. (1976). Computer rockfall model. In: *Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness no.90 in ISMES Publication*, 123–125. Bergamo, Italy.
 17. Raibaut, F., Ivanez, O., Douthe, C., & Barry, B. (2025). Rockfalls trajectography: 3D models predictive capability assessment and coefficients calibration using optimization-based processes. *Engineering Geology*, 348, 107937.
 18. Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 13–28.
 19. Sheil, B., Anagnostopoulos, C., Buckley, R., Ciantia, M. O., Febrianto, E., Fu, J., ... & Zhang, P. (2026). Artificial intelligence transformations in geotechnics: progress, challenges and future enablers. *Computers and Geotechnics*, 189, 107604.
 20. Shreyas, S. K., & Dey, A. (2019). Application of soft computing techniques in tunnelling and underground excavations: state of the art and future prospects. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1), 46.
 21. Song, M., Yang, M., Yao, G., Chen, W., and Lyu, Z. (2024). Artificial intelligence driven tunneling-induced surface settlement prediction. *Automation in Construction*, 168, 105819.
 22. Sriram, D. (1984). *A Bibliography on Knowledge-Based Expert Systems in Engineering* (Technical report). Carnegie Mellon University, Design Research Center.
 23. Standing, J. R. & Potts, D. M. (2008). Contributions to Géotechnique 1948–2008: Tunnelling. *Géotechnique*, 58(5), 391–398.
 24. Wu, S. S. (1984). Rockfall evaluation by computer simulation. *Transportation Research Record*, 1031, 1–5.
 25. Wyllie, D. C. (2014). Calibration of rock fall modeling parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 170–180.
 26. Zhang, L., Li, Y., Wang, L., Wang, J., & Luo, H. (2025). Physics-data driven multi-objective optimization for parallel control of TBM attitude. *Advanced Engineering Informatics*, 65, 103101.
 27. 王慶賢 (2024)。透過超啟發式最佳化方法校正土壤組成模式參數於深開挖分析之應用。國立臺灣科技大學營建工程系碩士論文 (英文)。
 28. 丘達昌、林義評 (2021)。新型態柔性落石防護網系統之發展與應用。大地技師大地期刊，22，64–72。
 29. 吳文隆、周永川、陳聰海、邱志榮、陳嫻雯 (2018)。新世代地工擋土開挖工程 3D 設計之 AI 化挑戰。中華技術，120，48–57。
 30. 宋士豪、張榮峰、周忠仁、程道信 (2023)。混合地層開挖擋土設計案例。地工技術，175，23–30。
 31. 李榮瑞、黃啟修、黃文俊、蘇福來、崔澎生、陳耀維 (2015)。潛盾穿越營運中捷運車站下方分析評估與施工規劃安全管控。地工技術，145，85–96。
 32. 周允文、甘瑞典、許文仁 (2009)。潛盾大口徑 5M 隧道急曲線段 (R=80m) 施工案例探討。中華技術，81，236–244。
 33. 林人仰 (1999)。類神經網路在地層岩性辨識的應用。石油鑽探工程，40，104–120。
 34. 邱志榮、陳正勳、陳聰海、山本祐司 (2018)。卵礫石層潛盾隧道之設計與施工回饋。地工技術，155，55–66。
 35. 邱家吉、翁孟嘉、柳鈞元、趙韋安、林銘郎、林承翰、楊哲銘、黃韋凱、李璟芳、徐文杰 (2022)。道路邊坡災害資訊整合、模擬暨研判系統—GeoPORT。臺北市土木技師公會技師期刊，96，34–43。
 36. 邱雅筑、王泰典、劉曉樺、陳玟伶、潘紹勇、陳俊堯、嚴文彬 (2024)。因應氣候變遷道路防災管理創新落石風險圖。地工技術，181，65–74。
 37. 徐明志、黃心泉、張登貴、詹絢存、俞清瀚 (2016)。二維分析程式在深開挖工程應用之探討—以 PLAXIS 程式為例。地工技術，149，35–46。
 38. 張正憲、陳耀基、葉錦德、張睿庭、曾紀緯、賴建名 (2024)。透過數值模擬方法校正地工設計參數—以台北某捷運深開挖為例。地工技術，182，53–58。
 39. 張正憲、黃靖惠、劉執敏、陳又誠、曾紀緯、賴建名 (2023)。深開挖設計自動化與施工回饋智慧化之挑戰。地工技術，175，15–22。
 40. 張道光、蘇人輝、李維峰、連惠邦、葉昭憲、林秉賢、王昭雯 (2011)。山區道路坡地災害防治技術整合研究 (4/4)，交通部運輸研究所研究報告，報告編號：MOTC-IOT-99-H1DB010，2011 年 4 月。
 41. 張睿明、趙韋安、黃韋凱、陳俊堯、吳世傑、劉書維 (2024)。基於微地動訊號分析技術之公路落石預警系統運作。地工技術，181，75–82。
 42. 莊明仁、張歆儀、鄧敏政 (2014)。風景區落石災害管理與對策之探討。臺灣災害管理研討會，259–269，新北，臺灣，2014 年 11 月。
 43. 黃文崧、吳立華、謝旭昇、葛宇甯、張智博 (2016)。都會區開挖案例壁體變位量之控制及預估。地工技術，147，73–80。
 44. 葉怡成 (2002)。類神經網路在大地工程之應用：1991–2001。地工技術，91，75–82。
 45. 詹佩臻、陳均維 (2022)。研討會—TORS3 程式使用精進研習。地工技術，172，117–124。
 46. 熊雲鵬、林亦郎 (1992)。專家系統應用於深開挖支撐之安全監測評估。中國土木水利工程學刊，4(3)，243–248。
 47. 劉大慶、王永誠、趙宜峯、洪銘澤、陳韋廷 (2018)。土木工程設計自動化—以擋土工程設計為例。中華技術，120，58–65。
 48. 歐晉德、石強、謝旭昇 (1988)。深開挖擋土連續壁設計模式。地工技術，21，10–17。
 49. 歐章煜、謝百鈞、丘達昌 (1992)。開挖引致之地表沉陷與建築物之容許沉陷量。地工技術，40，9–24。
 50. 蔡英聖、張勝旺、江承家 (2014)。土層及岩層複合地層之潛盾隧道設計及施工。技師期刊，66，42–49。
 51. 蔣偉寧、蔡朝榮、侯俊旭 (1993)。地震危害與決策分析中的模糊訊息處理。中國土木水利工程學刊，5(1)，29–36。
 52. 冀樹勇、陳錦清、詹君治 (2002)。類神經網路於深開挖壁體變形預測之應用。地工技術，91，55–64。
 53. 賴建名、黃繼鋒、黃啟修、蘇福來、胡庭豪、陳俊宏 (2010)。營運中捷運車站旁深開挖與下方潛盾穿越影響分析及評估。地工技術，123，87–98。
 54. 鐘志忠、郭治平、F. N. Bahti、林俊成、陳柏齊、邱鈺智、曾得璋 (2022)。多元尺度監測技術於岩石邊坡預警應用。地工技術，173，79–88。
 55. 顧承宇 (2013)。應用高精度數值地形模型於三維落石問題分析。中華水土保持學報，44(1)，1–10。
 56. 顧承宇、高憲彰、冀樹勇、陳建忠、李怡先 (2008)。山坡地社區 石防災技術與應用。中華民國建築學會建築學報技術專刊，66，47–60。