



32
Aug. 2026

大地技師

三十周年紀念

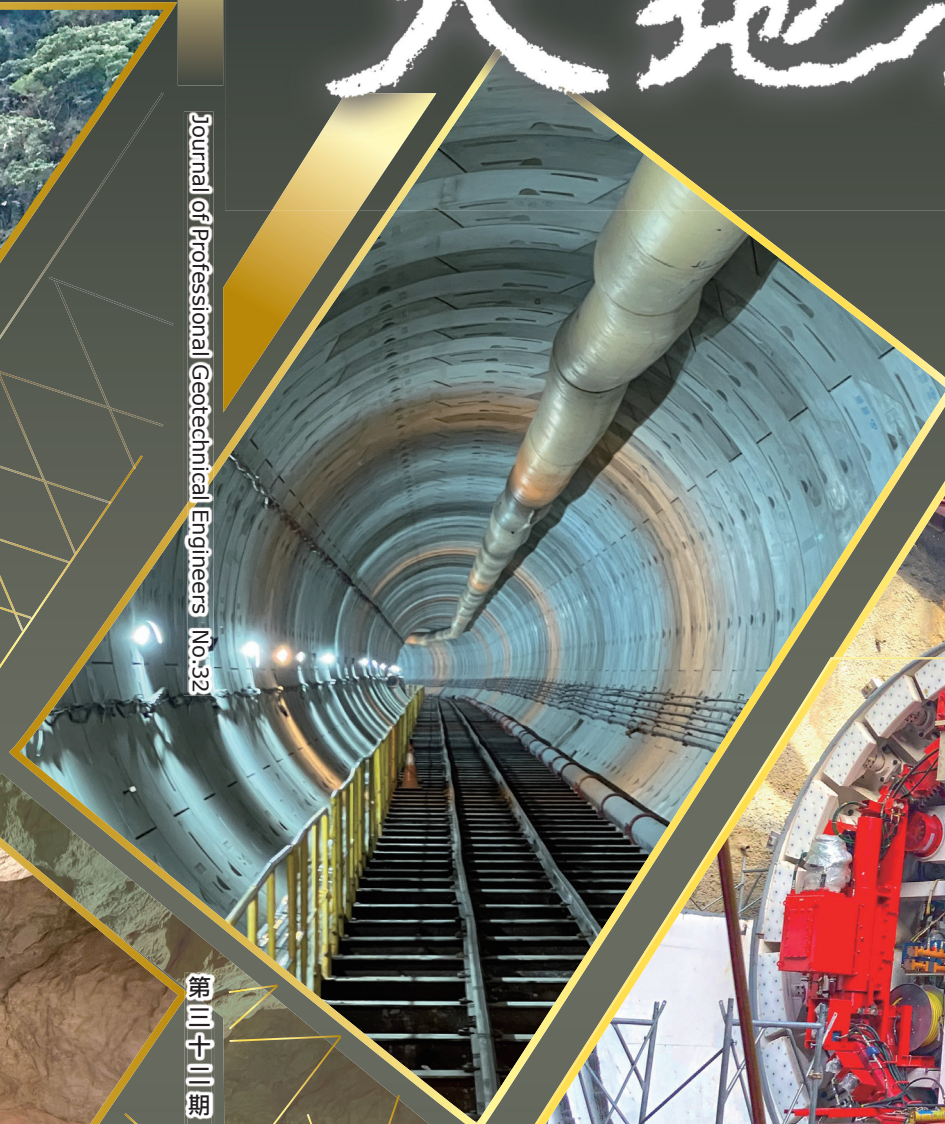
大地技師

Journal of Professional Geotechnical Engineers No.32

第三十二期

二〇二六·八

中華民國大地工程技師公會



中華民國大地工程技師公會

地址：115 台北市南港區成功路一段 32 號 4 樓之 8

電話：02-27820022

傳真：02-27820272

網站：www.pgea.org.tw





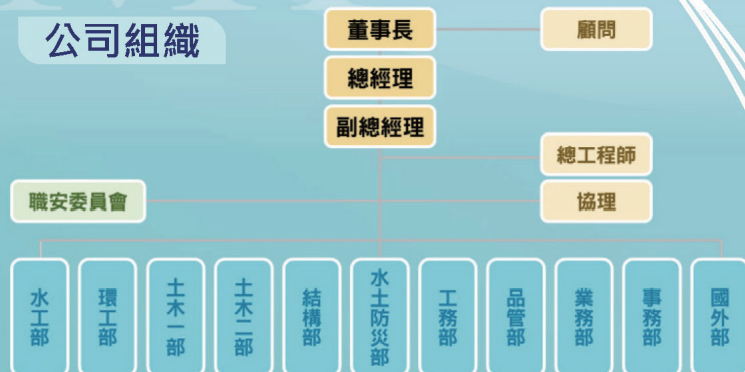
黎明工程顧問股份有限公司
LIMING ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD

服務看的見 品質是關鍵

公司介紹

黎明工程顧問股份有限公司成立於1984年，目前各領域專業成員計510人。41年來秉持專業技術與操守，透過經驗累積與傳承，持續創新突破。我們秉持尊重自然、敬業守分、創新精進及真誠服務的精神，有效地執行各項任務，確保提供客戶滿意及優良品質

公司組織



服務項目

- 水利工程規劃設計
- 水庫安全評估計畫
- 自來水及下水道工程
- 污水及環境影響評估
- 河川污染整治
- 水土保持工程
- 道路及橋樑工程
- 隧道工程
- 景觀工程規劃設計監造
- 水工機械規劃設計監造
- 地質調查及鑽探
- 營建專案管理

為員工加薪

- 黎明工程顧問股份有限公司主張合理薪酬與提高員工素質，照顧年輕員工，鼓勵員工辛勞與獲益成果新冠期間調薪由3%~5%，至115年已連續第10年調薪
- 完善福委會制度
- 退休金
- 友善育兒環境
- 任用身心障礙及提供友善環境
- 育嬰假
- 獎金及津貼給付
- 勞動保障

永續經營理念

- 黎明工程顧問股份有限公司本著ESG理念，已訂定ESG準則，並於2022年1月1日公告實施，以「保護環境、盡社會責任為公司治理目標」
- 黎明工程顧問股份有限公司響應「臺灣淨零轉型」，與國際接軌，推廣淨零綠生活，於112年度起積極打造「綠色辦公環境」，推廣視訊會議、辦公無紙化及出差搭乘大眾運輸

公司榮耀

- 金質獎累計共30座
- 特優5座、優等11座、佳作14座、設計特別貢獻獎2座、監造特別貢獻獎3座

- 金安獎累計共22座
- 特優3座、優等8座、佳作11座



40848 臺中市南屯區大墩十七街137號3樓
3F, No. 137, Dadun 17th St, Nantun Dist, Taichung City 40848, Taiwan
Tel: (886-4) 2320-8051 Fax: (886-4) 2320-8025
<https://www.limi.com.tw/> E-mail: limi@li-mi.com.tw



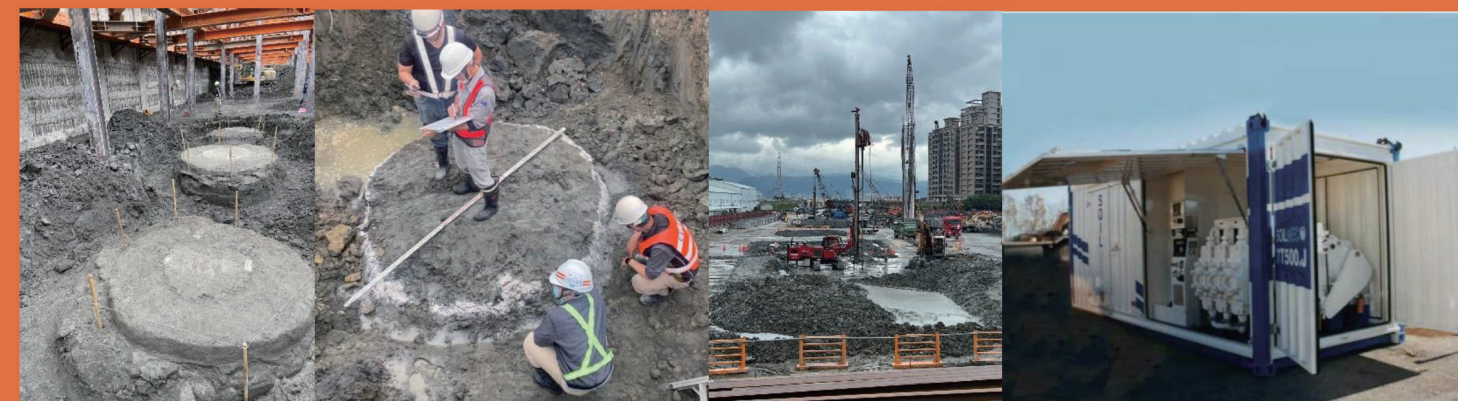
QUALITY / EFFICIENCY / SAFETY

專業

- ◇ 超高壓地盤改良
- ◇ 雙環塞低壓地盤改良
- ◇ 潛盾隧道地盤處理
- ◇ 建物抬升扶正

營業項目

- ◎ 高壓成型樁
- ◎ LW 低壓灌漿
- ◎ D. G. I. 低壓灌注
- ◎ J. M. M. 攪拌樁
- ◎ 水平低壓灌注
- ◎ 微型樁



敦啟營造工程有限公司

TEL: (02) 2215-5719

DUEN CHI CONSTRUCTION ENGINEERING CO., LTD. 網址: www.genchi.com.tw



中華民國99年10月10日創刊

第32期
August 2026

大地技師

「大地技師」四個字乃拓自國畫大師張大千早年墨跡，為右上左下大千體，仿魏碑筆法，蒼勁有力，一氣呵成，字法結構以“大”字頂天立地，磐石永固；“地”字老藤盤繞，身經百戰；“技”字中規中矩，才華洋溢；“師”字行雲流水，永續工程。寓語大地工程未確定性高，師法自然，破格創新，用心經營，開創無限的可能。



《封面說明》

封面照片橫跨臺灣、印尼雅加達與奧地利，從花蓮落石與明隧道、桃園潛盾隧道，到奧地利冰洞、岩坡與落石防護網，呈現不同大地工程與自然的交會。奧地利亦為新奧工法（NATM）的發源地，見證山岳環境與隧道工程發展的深厚連結。地域雖異，人們面對大自然的課題卻有異曲同工之處，也在工程與自然相互調適之間，展現獨特而美妙的風景（照片由張正憲及葉馥瑄技師提供）。

本刊文責由作者自負，版權概屬本會所有，未經本會同意禁止翻印或轉載。

發行人：賴世屏理事長

副理事長：王貽德、吳佳陵、呂彥龍、林衍竹
陳昭維、顏呈仰

理事：江鑑清、李守原、吳維揚、林石源
高振誠、張浼珣、曾孝欽、洪英州
曾展晏、黃筱卿、楊智堯、趙衛君
蔡岱佑、謝曜光

常務監事：施志鴻

監事：沈銘閔、陳江淮、陳廣祥、張正憲
黃宗宸、劉永發

總編輯：高秋振

副總編輯：曾孝欽

本期主編：張正憲、葉馥瑄

助理編輯：施承斌

編輯委員：吳明峰、李佳翰、吳亮均、林衍丞
黃柏仁、鄭會文

（以上均按姓氏筆劃排列）

發行所：社團法人中華民國大地工程技師公會

會址：11570 台北市南港區成功路一段32號4樓之8

電話：(02) 2782-0022

傳真：(02) 2782-0272

本會網址：<http://www.pgea.org.tw>

E-mail：pgea@pgea.org.tw

排版印刷：麥田資訊股份有限公司

地址：100026 台北市仁愛路二段一號四樓一六八室

電話：(02) 2322-1930

傳真：(02) 2392-4260

網址：www.dneinfo.com

E-mail：dneinfo@jw@gmail.com

ISSN 221956300-3



NT\$250

9 772219 563003

大地工程技師公會服務項目：

- 一、協助政府機關進行相關災害搶救及原因鑑定、震災後建築物分級評估、山坡地住宅社區安全檢查工作、水土保持計畫（規劃書）審查、施工計畫審查、雜項工程設計審查、特殊結構審查及安全鑑定。
- 二、鄰高鐵設施之開挖影響審查及安全鑑定。
- 三、提供有關大地工程技術諮詢服務。
- 四、受委託辦理各類建築、土木、水利、道路、隧道、海洋、環境、下水道等工程中有關大地工程（含土壤工程、岩石工程及工程地質）與地質法、水土保持法及其他法令規定得由大地工程科技師辦理之工程研究、評估、審查及鑑定等相關服務。

目 錄

- 3 編者的話 葉馥瑄、張正憲

《賀詞與感言》

- 6 大地技師公會三十周年賀詞 機關首長、各界賢達及歷屆理事長
20 大地技師公會三十周年感言 賴世屏

《地工時事》

- 22 大地工程技師分階段考試之改革歷程 陳江淮、施志鴻、賴世屏

《技術論文》

- 28 近三十年間臺灣土壤液化在學術研究與工程實務上重要發展與未來之展望 柯永彥
38 近三十年間臺灣邊坡工程之技術發展與未來展望 翁孟嘉、林銘郎、林承翰
50 近三十年間臺灣基樁工程在工程實務與學術研究上重要發展與未來展望 張德文、徐明志、施志鴻、邱俊翔、張有恒、周永川、江政恩、曾孝欽、鄭世豪
74 新奧工法的回顧與展望 王泰典
86 臺灣大地工程近三十年之發展與回顧——潛盾隧道之發展與研究趨勢 熊彬成
92 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、朱民虔、張正憲
104 臺灣大地工程監測之維度轉型——從多尺度時空感知邁向數位孿生的即時決策回饋 林俊宏
116 數據與模型——大地工程中偏差－變異權衡的過去、現在與未來 卿建業
《活動花絮》
132 精選 日本四國溫泉之旅 張文仁

編者的話

葉馥瑄

張正憲

國立臺灣科技大學營建工程系助理教授／大地技師 中興工程股份有限公司軌道二部組長／大地技師

「大地三十，凝聚、開拓」是我們賦予這期三十周年特刊的核心靈魂。回顧籌備之初，正憲坦言當初在懵懵懂懂的狀況下，被前輩們灌滿了心靈雞湯，竟也像吃了熊心豹子膽一樣，頓生一股捨我其誰的氣勢，率先接下主編這個艱鉅的任務。正憲當時心底想的無非是：要趁著大家還在三字頭的年紀，為大地工程界做些什麼、留下些什麼。然而正所謂「工欲善其事，必先利其器」，面對這份承先啟後的重任，深知單打獨鬥難以成就完美。於是，在正憲的熱情邀約下，馥瑄也以大地技師與臺科大助理教授的雙重身分加入了陣容。就這樣，我們組成了雙主編團隊，在繁忙的實務工作與學術研究中互相補位、攜手合作。在此，也感謝編輯團隊，無論線上或是線下，一路陪著我們歷經無數次會議的激盪，正是這樣一路的「凝聚」，才得以共同完成這本別具意義的三十周年特刊。

剛接下這個嚴峻任務時，我們心裡想的是在這個極具意義的三十周年特刊，要帶給讀者什麼？或是可以留下什麼特別又有意義的資料，讓技師夥伴與大地工程師們留下深刻的印象？因此在討論後，決定邀請同樣具有大地技師資格、且在學校任職的教授們來進行專題邀稿。惟考量針對「深開挖」內容的文章，皆已於本期刊及其他雜誌中出現多次，故本次只好扼腕地捨棄有關深開挖的內容，也請各位讀者們海涵。

本期特刊緊扣「凝聚、開拓」精神，內容從特定專業議題或技術延伸至廣泛思維：涵蓋土壤液化（柯永彥教授）、邊坡工程（翁孟嘉教授團隊）、基樁工程（張德文教授領銜）、新奧工法（王泰典教授）、潛盾隧道（熊彬成教

授）、自動化及人工智慧（AI）化（葉馥瑄、朱民虔助理教授等）及監測技術（林俊宏助理教授）。隨著視野拓展，卿建業教授針對大地工程「不確定性」本質，剖析數據與模型的權衡以避免過度擬合，直擊材料變異核心。這群兼具實務底蘊與學術視野的作者，帶領我們從產學雙重視角審視大地工程發展。感謝各位於緊湊時限內惠賜大作，期盼藉此回顧三十年淬鍊，持續開拓無限可能。

回首來時路：制度革新與核心技術的三十年淬鍊

本期刊物首先由理事長特別撰文，為公會三十年的點滴與榮耀留下深刻感言；隨後《地工時事》專欄，則帶領大家回顧「大地工程技師分階段考試」的改革歷程，記錄考選制度如何隨時代演進，為大地工程界注入源源不絕的優秀大地工程技師。

在《技術論文》專題部分，我們有幸邀請到具有大地技師資格的教授們，針對臺灣大地工程的幾大核心領域，進行三十年來的深度梳理：

災難中的學習與超越：土壤液化研究與實務演進

臺灣位處環太平洋地震帶，土壤液化始終是都市安全的核心議題。柯永彥教授在〈近三十年間臺灣土壤液化在學術研究與工程實務上重要發展與未來之展望〉一文中，回顧了從民國 88 年集集地震前至 105 年美濃地震後，國內對土壤液化機制的理解與防範技術的演進。從早期單純引進國外評估法，到建立符合臺灣本土地質特性的液化評估規範與地盤改良工法，乃至於都市更新中既有建築的液化防治，文章深入淺出地展現

了三十年來臺灣在液化領域「從災難中學習、以科技守護安全」的堅毅歷程。

山坡地開發與防災之盾：邊坡工程技術的發展

臺灣山多平地少，地形陡峭且颱風豪雨頻繁，邊坡工程極具挑戰。翁孟嘉教授團隊於〈近三十年間臺灣邊坡工程之技術發展與未來展望〉中，系統性地整理了三十年來邊坡調查、分析方法、工程技術與監測技術等四大面向之重要發展。臺灣邊坡工程已由早期以現地踏勘、經驗判釋與安全係數分析為主之傳統模式，逐步發展為結合遙測、地球物理探測、高解析數值模擬、自動化監測與人工智慧分析等跨領域之整合技術。

支撐地表繁榮的隱形巨人：基樁工程的輝煌三十年

隨著都市高樓化與重大交通建設（如高鐵、捷運）的興起，深基礎與基樁工程的設計與施工技術面臨前所未有的考驗。由張德文教授、徐明志總經理、施志鴻副總、邱俊翔教授、張有恒副董事長等多位專家聯合執筆的〈近三十年間臺灣基樁工程在工程實務與學術研究上重要發展與未來展望〉，以宏闊的篇幅綜整了產學界的豐富經驗與研究成果，詳盡說明基樁施工技術的演進，包含預鑄樁、場鑄樁，乃至海域基樁施工技術的進步與突破，巨細靡遺地呈現了國內基樁工程的發展脈絡。這篇重量級論文不僅是臺灣基樁發展的縮影，更是每位大地技師不可錯過的參考寶典。

翻山越嶺的地下工藝：新奧工法與潛盾隧道技術田

在地下空間開發方面，王泰典教授於〈臺灣新奧工法的回顧與展望〉一文中，闡述了臺灣自

1982 年新奧工法（NATM）後，該技術已廣泛應用於鐵路、公路與水利等隧道工程。憑藉其完整的力學理論與施工彈性，未來 NATM 將與全斷面鑽掘機（TBM）形成複合施工策略，並朝向數位化觀測、數位孿生（Digital Twin）等智慧化回饋設計，以及全生命週期監測與風險管理的方向發展。

另，熊彬成教授則在〈臺灣大地工程近三十年之發展與回顧——潛盾隧道之發展與研究趨勢〉中，從分析、設計、施工、機具設備與材料等多重視角，探討了刀具磨損、數值模擬、GFRP 鏡面運用及鋼纖維環片等關鍵技術。文章剖析了潛盾隧道工程近年來的發展狀況，並前瞻未來建設對潛盾隧道持續增長的龐大需求。

前瞻未來：數位孿生、AI 與智慧監測的跨時代演進

正如古人所云：「欲流之遠者，必浚其泉源。」在我們為大地工程結出累累碩果而驕傲的同時，也必須正視當前科技浪潮帶來的巨變。面對氣候變遷引發的極端氣候，以及人工智慧（AI）、大數據與物聯網（IoT）的快速崛起，傳統大地工程正迎來一場前所未有的「數位與智慧轉型」。為此，本期刊物的第二部分，聚焦於前瞻科技在大地工程中的創新應用：

計算力與 AI 的交響曲：從傳統分析到自動化建模

在科技的浪潮下，我們（葉馥瑄、張正憲）也與朱民虔助理教授攜手，在〈臺灣大地工程近三十年之發展與回顧——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〉一文中回顧過去三十年來，大地工程的分析工具已從手算與經驗公式，逐步邁向結合數值模擬、監測回饋、自動化建模與人工智慧應用之整合架構。文中從深開挖擋土、潛盾隧道及落石防災等三大類議題切入，整理其對數值建模自動化、參數最佳化與 AI 應用趨勢及其技術挑戰之觀察，期能於未來逐步落實於實際工程實務中。

守護工程安全的即時眼界：監測之維度轉型

工程監測向來是大地工程的「眼睛」。林俊宏助理教授在〈臺灣大地工程監測之維度轉型——從多尺度時空感知走向數位孿生的即時決策回饋〉中，提出以監測數據分類與協同設置之觀念，建立「一主、一輔、一驗證」的決策思維，並結合「地工數位孿生」的建構，邁向理解機制、預測風險與輔助決策的維度，期許未來安全管理可從「事後應變」轉變為「事先預測」。

擁抱不確定性：數據與模型的變異權衡

大地工程最核心的本質即是「地質材料的不確定性」。卿建業教授在〈數據與模型——大地工程中偏差－變異權衡的過去、現在與未來〉一文中，探討了大地工程始終運作於若干內在限制條件之下，而這限制並不會隨技術進步而消失：地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性等，構成了大地工程的基本背景條件。而未來大地工程將於大量數據資料中與模型間持續權衡，如何選擇合理的假設數值是未來大地工程分析的必修課題之一。

人文與生活：卸下重擔，熱愛生活的大地人

在本期特刊的尾聲，我們特別於《活動花絮》單元中，收錄了張文仁大地技師所撰寫的〈精選日本四國百選溫泉之旅〉。期望透過他細膩的筆觸與優美的影像，帶領大家暫時走出硬朗的工程世界，漫步於日本四國的歷史古湯與自然景致之中。期盼廣大的技師夥伴們，在吸收了前述豐碩的專業知識後，能藉由這篇遊記放鬆身心；在繁忙的實務工作之餘，細細體會溫泉與大自然的療癒魅力，重新充電，蓄積再出發的能量。

三十而立，再創輝煌

這本《大地技師期刊》第 32 期，不僅是一本期刊，更是中華民國大地工程技師公會成立三十年來，全體會員智慧與汗水的結晶。

在此，我們謹代表編輯小組，向所有為本期特刊傾囊相授、撰寫重量級論文的作者群致以最崇高的敬意。感謝賴世屏理事長及理事會團隊對出版工作的全力支持與指導；感謝審稿委員們專業且嚴謹的把關；更要感謝編輯團隊全體夥伴，在文字校對與排版上的付出。沒有大家共同的「凝聚」，這本別具意義的三十周年紀念專刊便無法順利誕生。

三十而立，凝聚堅實的大地底蘊；承先啟後，開拓智慧與永續的未來。

最後，敬祝各位會員技師與廣大讀者：

身體健康、事業順心、工程平安！

《大地技師期刊》主編
葉馥瑄、張正憲 敬上

大地技師公會



周年賀詞

中華民國大地工程技師公會成立三十周年誌慶

三十薪傳
福澤大地

農業部部長 陳永祥 敬題

中華民國大地工程技師公會成立三十周年誌慶

大地永續
工程創新

農業部農村發展及水土保持署署長 陳偉言 敬題

社團法人中華民國大地工程技師公會成立30周年

中華民國大地工程技師公會三十週年特刊紀念

厚植國土韌性
共創永續環境

環境部部長 彭啟明 敬題

築基大地
永固工程

行政院政務委員兼公共工程委員會主任委員 陳金德 敬題

社團法人中華民國大地工程技師公會
三十周年特刊紀念

三十深耕穩地脈
千秋永固築山河

交通部長 陳世凱 敬賀

中華民國大地工程技師公會編印「大地技師」期刊三十周年特刊敬賀

裕國利民

內政部長 劉世芳 敬題

中華民國大地工程技師公會30周年誌慶

大業深耕基業昌
地工厚植專業彰
三秩同心聲譽揚
十方攜手永流芳

中國土木水利工程學會

理事長 謝尚賢 敬賀

中華民國大地工程技師公會成立三十週年誌慶

厚植大地 穩固山河

中華民國土木技師公會全國聯合會

理事長 施義芳

敬題

中華民國大地工程技師公會成立三十周年誌慶

口碑載道
奠基磐石

經濟部水利署

署長 林元鵬

敬題

敬題

「奠基大地三十載，
築夢工程創未來。」

中華民國大地工程技師公會創會30周年誌慶

交通部公路局 題詞

謹賀社團法人中華民國大地工程技師公會三十週年

三十弘道，匠心永傳；
地工精進，道路長安。

交通部高速公路局 陳文瑞局長

深耕大地 璀璨三十
擘劃新局 續創卓越

中國工程師學會理事長 楊學國 敬賀

三十而立、源遠流長
大業千秋、駿業肇興

台北市基礎工程學會 林桂鈴理事長賀詞

誠信相伴、砥礪前行
共創佳績、再創奇蹟

臺灣區基礎工程學會呂芳熾理事長賀詞

大地技師公會三十周年誌慶

公會三十
邁向永續

陳正興

恭賀 中華民國大地工程技師公會成立三十週年

為百代築基
與大地同行

財團法人地工技術研究發展基金會
董事長 王泰典 敬賀

中華民國大地工程技師公會成立三十周年誌慶

大地水保同心三十載
國土韌性共築新高峰

中華民國水土保持技師公會全國聯合會

理事長 陳智誠 敬賀

以大自然為師，順天應地，
精研大地工程奠社會之基
承三十載匠藝，固本安邦，
守護山河永續立民生之礎

中華民國大地工程學會 翁孟嘉理事長 賀詞

大地技師公會成立三十週年誌慶

順天應地 安居為本 專業導入 國穩基固

陳志南

臺灣科技大學營建工程系名譽教授

中華民國大地工程技師公會成立三十週年賀詞

很高興中華民國大地工程技師公會已成立30年了。在這段期間中，經大地工程技師的努力，台灣大地工程界，在基礎建設的設計與施工以及大地災害的勘察、鑑定、評估與防治等方面的工作與社會服務，皆有重大的貢獻與發展。有關大地工程的規範也經大家的經驗交流與努力，做了許多必要的修訂，使大地工程的設計與施工，更臻完善。目前面臨科技快速進展以及氣候與大地環境多變的挑戰，期許大地工程技師注重在紮實的大地工程基本知識上，配合豐富的實際工程經驗，也就是結合原理與數據，繼續再創出更輝煌的成果。

翁作新 敬賀

專業卓越、大地磐石， 永續願景

歐章煜 教授

大地工程技師公會三十週年贈言

三十年前，臺灣大地工程尚處於制度建立與經驗累積的階段。從邊坡穩定、隧道工程、基礎與深開挖，到坡地防災與地下開挖安全監測等，皆仰賴無數地工前輩於艱困環境中持續耕耘，方能逐步累積技術、建立規範、培育人才。

今日臺灣已具備成熟而完整之大地工程技術體系，而大地工程技師公會長年在專業整合、技術交流、制度推動與社會責任上的投入與貢獻，實功不可沒。

大地工程，是一門「與土地對話」的學問。它不像高聳建築般醒目，卻承載著國土安全、防災韌性與城市發展的重要基礎。真正優秀的大地工程技師，不僅需具備理論、分析與驗證能力，更須理解自然、敬畏環境、尊重地質、氣象與水文條件，並兼顧各專業領域之整合協調。因為我們所面對的，不只是土壤與岩石，更是每一項工程背後所需承擔的公共安全與社會責任。

期許年輕一代大地工程技師，能承繼前輩精神，在新時代中持續精進，讓臺灣大地工程技術朝向更精密、更安全、更智慧，也更具國際視野的下一個世代邁進。

值此三十週年之際，謹祝大地工程技師公會：

深耕大地，守護國土；
安全為基，工程有道；
專業永續，薪火相傳。

敬賀 大地工程技師公會 會務昌隆

褚炳麟 敬賀
2026.6.6

中華民國大地工程技師公會成立30周年 誌慶

深耕地工三十年 護守國土展新篇

台北市大地工程技師公會第一、二屆 理事長
中華民國大地工程技師公會第一屆 理事長
周功台

恭賀中華民國大地技師公會成立三十週年

三十有成傳薪火，永續未來展宏圖

高雄市大地工程技師公會第三屆 理事長
魏銘良敬賀

大地工程技師公會成立30周年感言

今年五月薪傳講座課後，獨處公會頂樓遠眺台北101及城市天際，思索著高樓如何從基礎做起，我與大地工程技師公會從結緣到熟稔，以及會員先進賦予重任，那段與技師、幹部、會務夥伴們一起努力一起奮鬥一起歡笑的日子，那些年我們曾為技師考制奔走、開啟七師交流，亦為公益淨灘、為立言編著，眾多參與者努力與成就歷歷在目給時代留下最佳註解。謹祝

三十有成 永續發展

中華民國大地工程技師公會第四屆 理事長

施志鴻

恭賀 財團法人中華民國大地工程技師公會

成立三十週年誌慶

三十耕耘 傳承專業技術

群英薈萃 造福大地社稷

財團法人地工技術研究發展基金會榮譽董事
三力技術工程顧問股份有限公司 首席資深顧問

胡邵敏 敬賀
民國一十五年五月二十日

中華民國大地工程技師公會創會三十年誌慶

團結力量大，家和萬事興

凝聚團隊共識，和諧為本，
奠定安穩的發展基礎。

傳承奠基石，永續創新業

重視經驗傳承，同時不斷創
新，開創長遠的事業版圖。

國立中央大學應用地質研究所教授
李錫堤 敬賀

中華民國大地工程技師公會 30週年誌慶

三十而立·精益求精

台灣省大地工程技師公會第一、二屆 理事長

郭漢興

過往三十皆是序章 大地技師迎啟新頁

台灣省大地工程技師公會第三屆 理事長

余榮生

大自然循成、住、壞、空，恆常不息；臺灣島地體隆升、山巒風化，地震豪雨更迭襲擾，導致山崩地滑天災頻發；建築基地開挖工程發生崩塌災害事故，亦時有所聞。歷屆理事長暨理監事諸君率大地工程技師，遇災即赴，勘災搶險、致力復建，臨危擔當，功蹟昭然。

適逢公會三十而立，願全體技師同仁彼此砥礪、厚植實務，憑藉精湛專業，持續守護國土安全。敬祝會務昌隆，卓譽長新！

台北市大地工程技師公會第三屆 理事長

楊賢德

八五初設，胼手胝足；
前十艱辛，競競業業。
度過二十，百業認同；
轉眼三十，奮力再前。

台北市大地工程技師公會第四屆 理事長

唐嘉俊

公會三十週年賀詞

大 胸懷開闊
地 根基踏實
技 縝密卓越
師 專業前瞻
公 服務國土
會 群力永續

高雄市大地工程技師公會第一、二屆 理事長

張瑞仁 敬賀

祝大地工程技師公會成立30週年誌慶

承先啟後繼往開來 堅持專業始終如一

台北市大地工程技師公會第五、六屆 理事長
沈銘閔敬賀

祝賀中華民國大地工程技師公會 30 周年慶

深耕大地三十載，安固國土展未來
為國家建設奠定堅實的基石，為社會發展深植永續的根基

祝福公會會務昌隆，各位技師事業順利

高雄市大地工程技師公會第一屆 理事長
范嘉程

回顧過往，公會始終穩健前行，深獲各界肯定。展望未來，開創大地工程更嶄新里程。感謝歷屆理事長與全體技師會員的堅持與付出，站在三十週年的里程碑上，期盼公會引領大地工程界邁向更輝煌的下一個三十年，永續守護國土安全！」。謹祝大地工程技師公會會務昌隆、再創高峰；並祝全體會員身心康泰、業務興隆！

高雄市大地工程技師公會第四屆 理事長
夏國柱 賀

恭賀 大地工程技師公會30週年紀念

昭

公會三十周年，對我而言，
不僅是一個值得祝賀的里程碑，
更是一段深厚情誼的見證。
多年來，公會凝聚了同業的熱忱與使命，
也承載了彼此扶持的情感。
願這份對專業與土地的熱愛，
繼續傳承，歷久而彌堅。

台灣省大地工程技師公會第五、六屆 理事長
中華民國大地工程技師公會第三屆 理事長
陳江淮 敬誌

大地技師公會



周年感言

賴世屏 中華民國大地工程技師公會 / 第五屆理事長

三十而立・凝聚開拓

「三十年，是專業的累積，也是責任的承擔；更是我們邁向下一個里程碑的起點。」

- **凝聚**，代表深耕專業、厚植內部實力。透過經驗傳承與技術交流，凝聚不同世代技師的智慧，提升公信力，守護國土安全。
- **開拓**，象徵跨域發展、引領未來轉型。從 BIM、AI 等數位技術，到風電、地熱等綠能產業，公會希望積極拓展技師的執業空間。

公會歷史回顧

大地工程技師公會自民國 85 年成立台北市公會，同年成立台灣省公會並於 89 年成立高雄市公會，而於 102 年整併三個公會成立中華民國大地工程技師公會。走過三十載，歷經制度奠基、專業推廣、社會參與與國際交流的多重階段。

我於 86 年加入公會也歷經公會從向創會會員借場地辦公到有了自己的會所，從 18 位會員到目前 700 多位會員。當近日回顧「大地技師」廿周年特刊，看到歷屆理事長的感言才更能體會大地公會經營的辛酸。

創會初期，成立之初公會如何從聯誼會到公會，由周功台理事長娓娓道來，才知道前人辛苦。接著各屆理事長肩負著凝聚技師群體、建立專業認同的使命，逐步推動執業範圍合理化，如水保法第六之一條的資格；在公共工程安全上展現專業價值，如參與震災後危險建築物評估。而為了爭取會員執業權，余榮生理事長的「八天七夜」更是讓我們知道公會幹部的辛酸。在歷屆理事長與理監事群策群力，使公會不僅成為技師的專業平台，更是社會公共安全的重要守護者。

從林肯大郡事件後，社會開始重視「大地技師」；九二一地震後會員聚集在余前理事長的辦公室分配工作責任區開始配合政府勘災；國三 3.1k 坍滑後，全線巡勘的專業技師就是我們大地技師。從這些事件不僅考驗大地技師的專業能力，更彰顯公會在社會公共安全上的角色，逐步形塑了公會在社會中的專業形象與公共影響力。

公會近年發展

談談近十年對大地技師影響重大的情事就是考試制度的變革。自 100 年考試院考選部成立專技高考推動委員會，希望以教、考、用合一，改革現行考、用分離制度。歷經 6 年 28 次會議，其目的為連結教育學分、修習課程、考試科目、技師核心職能及執業範圍，考試院於 104 年 7 月 6 日公告大地工程技師二階段考試優先辦理，開啟了專技高考制度改革新時代。其也開啟了大地技師人數降速成長及憂心會員萎縮的濫觴。歷經了舊制落日、新制單獨實施、舊制再施行，最終考量及格人數而於 115 年 3 月 26 日將此一重大變革畫上句點，也停止了十年公會為了考試制度變革的爭執聲音！

因公會已在相關部門建立專業及公正之形象，近年來相關公安災害之鑑定也委託公會辦理，如國一 10.1k 汐止系統交流道坍塌、基泰大直、竹北天坑、三重六張街、台南五妃街……等案件，此外近年各地液化總顧問工作也多由公會承辦。公會除建立專業公正形象亦踏入公部門辦理督察作業，如新竹縣市、苗栗縣之深開挖審查監督與台中市之地質調查報告審查。各地液化總顧問工作多由公會承擔，積極參與公共治理以維公共安全。

另在執業方面亦與中國土木水利工程學會、大地工程學會、岩盤工程暨工程地質學會、地工技術研究發展基金會為提升地盤調查作業標準與效能，本合作意向書五單位同意共同推動「工址地盤調查準則」之修訂作業。亦與低碳數位營建聯盟簽屬備忘錄，一同為低碳環境盡一份心力。

展望未來

三十周年不只是回顧，更是展望。未來，公會將持續：

- **深化專業能量**：推動持續教育與技術創新，提升會員專業競爭力。
- **強化公共參與**：積極與政府、學界、產業互動，成為政策諮詢的重要窗口。
- **爭取新人加入**：爭取執業權，吸引青年投入技師行列，壯大公會基礎。
- **落實永續責任**：面對環境挑戰，推動水土保持、資源循環與永續工程，守護土地與社會。

結語

三十年是一個里程碑，更是一個新的起點。公會將以專業為基石，以團結為力量，以社會責任為使命，邁向下一個三十年。謹以此誌慶，向所有曾經付出心力的理事長、理監事、會員與合作夥伴致上最深的敬意與感謝。🌱

大地工程技師分階段考試之改革歷程

陳江淮 中華民國大地工程技師公會 / 第三屆理事長

施志鴻 中華民國大地工程技師公會 / 第四屆理事長

賴世屏 中華民國大地工程技師公會 / 第五屆理事長

一、臺灣技師分科進程概述

臺灣技師分科，係源起於民國 36 年 10 月 27 日國民政府制定公布技師法，全文共計 34 條，該法所稱技師為 (1) 農業技師；(2) 工業技師及 (3) 礦業技師等三種；其中工業技師分為 (1) 土木科；(2) 水利科；(3) 建築科；(4) 橋樑科；(5) 市政工程科；(6) 衛生工程科；…等二十六種分科，連同農業技師九種分科及礦業技師三種分科，總計共三十八種分科。至民國 60 年 12 月 27 日政府另制定公布建築師法全文 57 條，該法第十六條略以『建築師受委託人之委託，辦理建築物及其實質環境之調查、測量、設計、監造、估價、檢查、鑑定等各項業務，……』；第十九條略以『建築師受委託辦理建築物之設計，……，有關專業工程部分，應由專業工業技師辦理，並連帶負本法所定之懲戒責任。當地無專業工業技師者，不在此限。』，至此明確界定建築師與專業技師的專業責任。

民國 61 年 12 月 15 日再次修正公布技師法全文為 47 條，其中第二條『技師分為農業技師、工業技師、礦業技師及其他技師四種，並依其職業性質分科，由行政院會同考試院定之。』，技師分科由原來的行政權，改由行政及考試兩院共同訂定。66 年 4 月 12 日技師法修正，其中第

二條『技師之分科，由行政院會同考試院定之。』，原為農業技師等四種類別正式刪除。第四條『技師之主管機關：在中央為經濟部；在省（市）為建設廳（局）；在縣（市）為縣（市）政府。』，明定技師主管機關中央為經濟部。第七條『領有技師證書，具有各該科服務年資二年以上者，經向省（市）主管機關申請發給開業執照後，得設立事務所執行業務。…』，闡明技師執業須二年實務歷練之規定係於民國 66 年開始施行。又行政院於 66 年 9 月 19 日以台六十七經字第八四九二號令與考試院 67 年 9 月 18 日以（六七）考台秘一字第 二四一四號令會銜訂定「技師分科類別」及「技師分科類別執業範圍說明」；70 年 3 月 31 日行政院（70）臺經字第 3970 號令、考試院（70）考臺秘議字第 0889 號令會同修正發布技師分科；七十八年五月八日行政院（78）臺經字第 11721 號、考試院（78）考臺秘議字第 1373 號令修正發布名稱及全文 1 點（原名稱：技師分科類別），一、土木工程科；二、水利工程科；三、結構工程科；四、大地工程科；五、測量科；六、環境工程科；…等三十二個技師分科，大地工程技師自此正式成為專門職業及技術人員高等考試技師類科之一 [1]。

民國 89 年 1 月 19 日修正公布技師法第 4、7、9、11、41 ~ 43 條條文，其中第四條『技師之主管機關：在中央為行政院公共工程委員會；在直轄市為直轄市政府；在縣（市）為縣（市）政府。』，技師之主管機關改為行政院公共工程委員會。100 年 6 月 22 日最新修正公布技師法全文 59 條，其中第二條（技師分科之決定）『技師之分科，由行政院會同考試院定之。』，即技師分科仍由行政及考試兩院共同訂定。第七條（執業執照之請領）『領有技師證書，具有各該科服務年資二年以上者，經向中央主管機關申請發給執業執照後，始得執行業務。…』，即技師執業核定由行政院公共工程委員會負責，且技師之考、用仍循分離制度延用至今。

二、技師考試改革的要義

專門職業及技術人員考試法第一條『專門職業及技術人員之執業，依本法以考試定其資格。』；第十一條規定『專門職業及技術人員各種高等考試、普通考試之考試規則，由考選部報請考試院定之。前項考試規則應包括考試等級及各類科之應考資格、應試科目、考試方式、成績計算、及及格方式。考試規則訂定或修正前，應先徵詢相關職業團體意見後，再由考選部會同中央職業主管機關、中央目的事業主管機關議決後，始得變更之。』，也就是從應考、及格及執業等技師之資格，即技師之考、選、用，在專門職業及技術人員考

試法中均已明確規範屬考試院權責。又依技師法第七條『領有技師證書，具有各該科服務年資二年以上者，經向省（市）主管機關申請發給開業執照後，得設立事務所執行業務。…』；技師法第四條『技師之主管機關：在中央為行政院公共工程委員會，…』，即通過專門職業及技術人員高等考試技師考試及格，取得技師資格領有技師證書者，依技師法第七條規範向主管機關申請發給開業執照後方可執業，即技師之任用資格尚須有二年實務經驗且須經技師之主管機關核定方可執業；也就是目前技師之考、選、用之核定權是分離的。

為進一步了解其他國家技師之教、考、用制度及實務運用，行政院公共工程委員會於 101 年 11 月委託中國土木水利工程學會，辦理『技師考試分試制度實務工作歷練機制之規劃』研究 [2]，其中針對美國及日本技師之現行考選方式進行分析，同時參考行政院公共工程委員會 92 年 3 月『美國工程技術服務產業管理暨專業工程師教、考、用制度研習』報告 [3]，綜整台、美、日三個國家現有土木類技師分階考試等相關規定對照，如表 1 所示。由表顯示美國及日本之技師均已採用二階段分試考試，須四年工作經驗後才可參加第二階段考試，應考資格採獨立認證單位認可制，其中以分階段考試且期間須經實務工作歷練之資格認定，是我國現行技師考試制度與美、日兩國考試制度最大之差異，也是目前我國技師考試無法真正達到教、考、用合一之關鍵所在。

表 1 我國與美、日現有土木類技師分階考試等相關規定比較對照表

國別	台灣	美國	日本
考試是否分階段	一階	二階，第一階段考試稱為基本工程知識考試（Fundamentals of Engineering Examination, FE Exam），第二階段考試稱為工程理論與實踐考試（Principles and Practice of Engineering Examination, PE Exam）	第一階段及格者取得技術士補資格，才可參加第二階段考試
實務經歷	通過考試後二年經驗	具四年工作經驗後才可參加第二階段考試	四年實習驗，才可參加第二試
應考資格	專科以上學校本系科或相當系科修習 7 科 20 學分以上者	由工程及技術教育認證委員會（ABET）之 EAC 認證 4 年制大學工程學程所畢業之學士，各州註冊委員會均直接接受其學歷，許多州更允許 EAC / ABET 認證學程之學生於其大三或大四時就可以參加 FE 考試	JABEE 認可之大學工程學歷
考試方式	筆試（申論題）	FE 考試（八小時），上午四小時考大學前二年之共同科目（如數、理、化學、共通通識），只有一套題目，含一百二十題選擇題，一題一分；下午四小時則考大學後二年之專業科目；PE 土木工程，上午四小時考普遍性理論與實務知識，下午四小時就該分科中分為數個專業題組，由考生就該類科中其最專精的專業部份選擇一個題組作答	第一階段測驗題 第二階段申論題及口試

除分階考試及實務工作歷練之要項外，在工程國際化接軌部份，由於工程技術服務，須結合不同領域之專業技師、建築師等，我國現行工程技術服務業，大致分為技師事務所、建築師事務所、技術顧問機構等三種不同領域及執業型式。隨著國際間合作平台日趨緊密，工程國際化也已快速擴大及成長 [4]。我國從簽署政府採購協定（GPA）後，依規定除了可以向 GPA 之各會員國擴大參與其工程、財物及勞務市場外，同樣的也要將國內之工程、財物及勞務市場向 GPA 之會員國開放，國內工程界及政府也注意到了工程師國際化的重要性，因此極積推行台灣工程師國際化的腳步。目前國際上工程專業技術服務之平台，大致可分成歐洲國際工程協會聯盟（FEANI），國際工程師互動論壇（Engineer Mobility Forum, EMF），及亞太工程師（APEC Engineer）等三大系統；而三大系統中以 EMF 之跨國性系統涵蓋全球，而亞太工程師及歐洲國際工程協會聯盟則偏屬區域性之系統。行政院公共工程委員會曾針對台灣工程師國際化作過研究報告，指出因為台灣位在亞太地區，且為亞太經濟合作會議正式會員，加上亞太工程師制度具有彈性與國際化等因素，推動台灣加入亞太工程師協調委員會，是國內專業技師爭取國際資格最合適有利 [4]。而在兩個國家間，彼此要互相推動認許工程師資格，有二項資格考核是須要經過認證的，第一項是工程教育學歷認證，第二項是專業技師之工程師資格認證。目前推動台灣工程師國際化的認證工作由中華台北亞太工程師暨國際工程師監督委員會在負責；工程教育學歷認證的工作則由中華工程教育學會（IEET）負責。凡是經由中華工程教育學會認證通過之系所，就可被國際上承認我國之工程教育學歷，接著經由亞太工程師監督委員會，展開國與國之間的雙邊談判與協商，彼此同意承認專業工程師相互認許後，才能算達成跨國執業程序 [4]，因此技師考試制度之改革，也針對專業工程師（即技師）國際接軌進行合併考量。

三、技師考試改革歷程

基於前述之教、考、用合一、國際接軌等考量，考選部於民國 98 年 7 月 24 日邀請考試委員、行政院公共工程委員會及相關部會、全國各大專院校及全國各相關技師公會等代表，召開『改進專門職業及技術人員技師考試制度學者專家座談會』，會中達成共識要點摘要如下：

- 1. 由考選部成立『技師考試制度改進推動小組』賡續研議技師考試採二階段考試、技師考試方式多元化及是否增刪其他類科技師等議題。
- 2. 由考選部與中華工程教育學會聯繫研究，經該學會認證通過之工程及科技教育之大學相關系所，得應技師相關類科考試可行性等問題。
- 3. 目前需求稀少之技師改為間年舉辦考試，由考選部邀集相關機關研商後，據以研修專門職業及技術人員高等考試技師考試規則。
- 4. 請行政院公共工程委員會及目的事業主管機關研修技師法及相關職業管理法規，落實各專業技師之簽證制度。

在該次會議之後，考選部於同年 10 月 22 日成立技師考試改進推動委員會，並選擇已具簽證制度、執業比例較高、執業人數超過 100 人且其公會組織亦較具規模者，包括測量技師與土木、結構、大地、水利、環境、電機、水土保持、冷凍空調工程技師等 9 科別，分組進行技師考試各項議題之改進，其中土木工程、結構工程及大地工程三個類科，同列為第 1 分組共同討論各項議題。自此全國技師考試制度改革進入新的里程，並延續至 102 年歷經多年多次分組及委員會議，針對現行『專門職業及技術人員高等考試技師考試』，確立辦理二階段考試新制，包括應考資格、應試科目及實務工作經驗等相關規定均已完成修訂及研議，並於 102 年 4 月 8 日考選部「技師考試改進推動委員會第 1 分組大地工程技師工作小組第 5 次會議」，確定由大地工程科技師類

科先行辦理分階段考試新制，並擬訂於一定期間內採行雙軌制，即新制與現制併行。有關技師考試改進推動委員會分組及委員會例次會議時程、名稱及內容摘要綜整如表 2 所示。

表 2 技師考試改進推動委員會分組及委員會例次會議時程、名稱及內容摘要總表

項次	年 / 月 / 日	會議名稱	摘要
1	98/07/24	召開改進專技人員技師考試制度學者專家座談會	技師考試改採分試，爰選執業人數超過 100 人且其公會組織亦較具規模者，土木工程、結構工程、大地工程、水利工程、測量、環境工程、電機工程、水土保持、冷凍空調工程技師等 9 類科優先研議改採分試考試。
2	98/10/22	召開考選部技師考試改進推動委員會第一次會議	土木工程、結構工程、大地工程為第一分組，推派陳希舜校長為分組召集人。
3	98/11/09	召開分組召集人會議	初步研商技師考試改進推動工作計畫，研議技師考試各分組議題。
4	98/12/07	考選部技師考試改進推動委員會第 1 分組（土木、結構、大地工程組）第 1 次會議	1. 土木、結構及大地工程技師之核心職能、內涵及預計實施時程。 2. 討論改採分試考試之內容及規劃。
5	99/05/12	考選部技師考試改進推動委員會第 1 分組第 2 次會議	進入第一試及第二試制度討論。
6	99/06/24	考選部技師考試改進推動委員會第 1 分組第 3 次會議	1. 討論各分組初步擬定之執業範圍修正、核心職能及最低專業領域修習課程標準草案。 2. 分階段考試應考資格及實務工作經驗訓練辦法草案。 3. 由各公會、學會代表擔任本分組副召集人，負責研議核心職能及應考資格改採修習專業領域學分草案後，再提分組會議討論。
7	99/09/27	第 1 分組大地工程小組第 1 次會議	討論執業範圍、核心職能草案、專業領域最低修課標準。
8	99/12/02	第 1 分組大地工程小組第 2 次會議	討論技師分階段考試大地工程技師之實務工作經驗養成標準及應試科目草案。
9	100/03/24	第 1 分組大地工程小組協商	由陳希舜校長召集副召集人商討執業範圍、核心職能、修習領域。
10	100/04/25	第 1 分組第 4 次會議	自民國 101 年起至 104 年止實施雙軌制，原有應考資格仍可報考 104 年 12 月前之技師考試。
11	100/06/22	第 1 分組大地工程小組第 3 次會議	技師分試考試大地工程技師類科考試制度規劃草案。
12	100/07/26	專門職業及技術人員高等考試技師考試分試考試規劃草案	正式行文行政院各部會、各大專院校、學會、公會諮詢意見。
13	100/09/21	第 1 分組大地工程小組第 4 次會議	就前揭各項建議事項進行討論。
14	100/11/29	改進推動委員會聯席會議	討論專門職業及技術人員考試技師考試分試考試制度之規劃。
15	101	考選部及工程會	考選部改革委員會已就各類科技師職業範圍、核心職能、專業領域、應修課課、分階段考試、綱要、實務工作歷練類別、指導技師資格年限等確認。開始建構技師考試分試制度實務工作歷練機制。
16	102/04/08	第 1 分組大地工程小組第 5 次會議	確定由大地工程科技師考試先行辦理分階段考試新制，並擬訂採行雙軌制。
17	102/04/26	工程會（5/9 函）	由大地工程技師公會及大地工程學會共同辦理技師考試分階段考試實務歷練機制工作規劃。
18	102/05/30	實務經歷登記手冊編製小組第一次會議	針對第一試錄取率為 20%，過於偏低，下次會議邀請考選部規劃司派員出席，以使實務經歷認定登記手冊編製更臻完整。
19	102/06/24	實務經歷認定登記手冊編製小組第二次會議	修訂完成之『專門職業及技術人員高等考試大地工程技師類科實務經歷登記手冊草案』。
20	102/09/30	第 1 分組大地工程小組第 6 次會議	1. 專門職業及技術人員高等考試技師考試大地工程類科之實務歷練機制規劃案。 2. 專門職業及技術人員高等考試技師考試大地工程類科第一階段考試及格標準，擬採全程到考人數之 30% 為及格，有一科成績零分或總成績未滿 50 分者，不予及格，第一階段考試及格資格並可保留 6 年。 3. 分階段考試規則修正草案於小組第 7 次會議討論。
21	102/12/19	第 1 分組大地工程小組第 7 次會議	1. 第一階段考試及格標準，採全程到考人數之 30% 為及格。應考科目有一科缺考或總成績未滿 50 分者，不予及格，第一階段考試及格資格可永久保留。 2. 有關實務經驗審查費用標準由考選部另邀集工程會、學會及公會代表開會研議。 3. 通過專門職業及技術人員高等考試大地工程技師考試分階段考試規則草案。
22	103/01/21	考選部及工程會聯席會	確立審查標準程序。

民國 102 年 9 月 16 日考試院頒布專門職業及技術人員高等考試技師考試規則，第二條『專門職業及技術人員高等考試技師考試（以下簡稱本考試），分下列各類科：一、土木工程技師；二、水利工程技師；三、結構工程技師；四、大地工程技師；五、測量技師；六、環境工程技師；七、都市計畫技師；八、機械工程技師；九、冷凍空調工程技師；十、造船工程技師；十一、電機工程技師；十二、電子工程技師；十三、資訊技師；十四、航空工程技師；十五、化學工程技師；十六、工業工程技師；十七、工業安全技師；十八、工礦衛生技師；十九、紡織工程技師；二十、食品技師；二一、冶金工程技師；二二、農藝技師；二三、園藝技師；二四、林業技師；二五、畜牧技師；二六、漁撈技師；二七、水產養殖技師；二八、水土保持技師；二九、採礦工程技師；三十、應用地質技師；三一、礦業安全技師；三二、交通工程技師。前項大地工程技師考試辦理至中華民國一百零九年十二月三十一日止』，爰此，正式確立了國內專業技師考試制度將進入一新紀元。以上所述，亦即是大地工程技師分階段考試推動發展之源起及歷程概況。

四、影響及後續

考試院於 104 年 7 月 6 日訂定發布「專門職業及技術人員高等考試大地工程技師考試分階段考試規則」並自 105 年起辦理大地工程技師考試分階段考試；而依「專門職業及技術人員高等考試技師考試規則」第 12 條大地工程技師考試辦理至 109 年止。即為因應大地工程技師類科採行分階段考試新制，實施配套規劃過渡期間，於 105 年至 109 年新制與原有一階段技師考試採雙軌併行方式，110 年起大地工程技師類科正式實施單軌分階段考試。自民國 105 年起雙軌併行，至 110 年共計 278 人通過第一試，20 人通過第二試。110 年起正式實施單軌分階段考試，第一次單軌分階段考試僅錄取 6 人，引起各界譁然（表 3）。由於大地工程技師類科報考人數銳減，嚴重影響大地工程類科學程，究其原因有：

1. 大地技師二階段考試制度中有關執業範圍、核心職能、專業領域與修習課程標準等四項，尚有執業範圍修訂未完成，嚴重影響大地工程技師類科執業權及未來年輕技師執業意願與發展。

2. 第一試及第二試之題綱及考試內容未依原規劃型式辦理，未符合原二階段考試倫才辯識原意，嚴重影響第一試及第二試報告人意願。
3. 僅大地工程技師單一類科推行，土木及結構類科未配合推動，原規劃大地、土木及結構類科同時並行之制度改革目的及成效均已偏失，年輕學子以較容易考試類科為優先選擇。

舉辦單軌分階段考試以來，因第二階段考試報考人數不多而產生及格人數過少之現象，衝擊大地工程產業人力及專業發展，110 與 111 年度均僅錄取 6 名。在大地工程技師公會幹部、大地工程學會幹部、學界老師們奔走，多次與考試院、工程會等多方研商，擬先恢復雙軌併行以充裕產業所需人力。112 年 6 月考試院會修正「專門職業及技術人員高等考試技師考試規則」第 2 條及「專門職業及技術人員高等考試大地工程技師考試分階段考試規則」第 7 條，恢復大地工程技師不分階段考試與分階段考試採雙軌制併行三年，以及簡化新制實務歷練審查制度，舒緩產業人力供需失衡問題。惟此次考制修改應視為暫時措施，期學界與產業界能再深思凝聚共識。

於雙軌制併行三年期限將至，大地公會與大地學會於 114 年 4 月拜訪考選部提出希望能將雙軌制併行時限予以延長，以利學子入學後尚可確認未來考試方式。故於 114 年 6 月大地工程技師公會與大地工程學會分別行文考選部，均建議調整大地工程技師考試制度為「與其他營建類科技師相同之考試制度」；而工程會則建議朝「大地工程技師考試雙軌制常態化」方向。同年 9 月 15 日大地工程公、學會並同出席考選部之研商「專門職業及技術人員高等考試大地工程技師考試制度」會議，該會議具體希望朝恢復舊制方向進行。115 年 3 月 12 日公、學會共三人參與考選部「專門職業及

技術人員高等考試技師考試規則第 2 條修正草案審查會」於該審查會共有三方案，分別為單獨實施分階段考試、單獨實施舊制及雙軌併行，該會議公、學會及工程會皆希望至少恢復舊制若能雙軌併行更佳。於審查會結束後即預告修正為舊制單獨實施。115 年 3 月 26 日考試院院會通過「專門職業及技術人員高等考試技師考試規則」第 2 條修正，將大地工程技師不分階段考試之落日規定予以刪除，未來將每年辦理；亦通過「專門職業及技術人員高等考試大地工程技師考試分階段考試規則」第 3 條修正，使分階段考試能逐步落日，其中第一階段考試舉辦至 115 年 9 月 30 日止，第二階段考試則辦理至 122 年 3 月 31 日止。至此，大地工程技師考試回復至辦理與其他營建類科技師相同之不分階段考試，並限期停辦分階段考試。技師分階段考試此一政策雖已全面考量，但也要後續相關配套配合才能成功，在相關配套未能配合的狀況。至此，自 98 年起推動之技師分階段考試改革，即走入歷史未能達成其改變。

參考文獻

1. 大地工程技師分階段考試之歷程與展望（考選部，2014），國家菁英期刊第 10 卷第 2 期。
2. 技師考試分試制度實務工作歷練機制之規劃研究（中國土木水利工程學會，2012）。
3. 美國工程技術服務產業管理暨專業工程師教、考、用制度研習報告（行政院公共工程委員會，2003）。
4. 拜訪中華台北亞太工程師暨國際工程師監督委員會主任委員莫若楫博士－談台灣工程師國際化之環顧與展望（大地技師期刊第二期，2011）。
5. 115 年 3 月 12 日「專門職業及技術人員高等考試技師考試規則第 2 條修正草案審查會」會議資料。

表 3 大地工程技師雙軌併行及 114 年新制之報考、到考、及格人數統計 [5]

年別	大地工程技師				大地工程技師（一）				大地工程技師（二）			
	報考	到考	及格	及格率 %	報考	到考	及格	及格率 %	報考	到考	及格	及格率 %
105	280	170	28	16.47	200	129	31	24.03	7	4	2	50.00
106	278	163	27	16.56	217	141	43	30.50	11	9	5	55.56
107	272	160	26	16.25	224	143	48	33.57	7	3	2	66.67
108	264	151	21	13.91	210	140	47	33.57	6	3	2	66.67
109	257	150	24	16.00	279	166	51	30.72	8	5	3	60.00
110	僅實施單軌分階段考試				307	175	58	33.14	15	11	6	54.55
111					326	176	59	33.52	222	12	6	50.00
112	138	71	12	16.90	299	172	57	33.14	24	18	10	55.56
113	186	104	19	18.27	209	119	40	33.61	21	15	8	53.33
114	184	100	16	16.00	188	122	69	61.61	22	14	8	57.14

近三十年間臺灣土壤液化在學術研究與工程實務上重要發展與未來之展望

柯永彥 國立成功大學土木工程學系 / 教授、大地技師

一、前言

自民國 85 年臺北市大地工程技師公會成立以來，開啟了大地工程技師專業團體自治之新局，迄今已然三十載；此後陸續成立了臺灣省及高雄市公會，並於民國 102 年合併三個地方公會成立全國性公會，凝聚資源貢獻於社會。大地工程是國土防災的基石，透過對地質與地盤的深入剖析，為各類建設構築禦災防線。在諸多與大地相關之災害中，以地震帶來之影響最為廣泛與劇烈，「土壤液化」更是大地地震工程的核心課題，在強震作用下，飽和疏鬆砂質土壤因孔隙水壓驟升而失去強度，如同液體一般，進而引發地盤變形、結構傾斜／沉陷與管線斷裂／接頭拉出等災情。因此，深入研究土壤液化機制，並開發實務可行之液化防減災技術，實為提升都市抗災韌性與維護人民生命財產的決定性關鍵。在大地技師公會三十周年之際，在大地技師期刊之邀請下特撰此文，針對臺灣必須面對之土壤液化課題，回顧近三十年間在學術研究與工程實務上之重要發展（相關大事紀詳見表 1），並立足當下，展望未來，提出液化防災精進之願景。

表 1 近三十年臺灣土壤液化大事紀

年份	大事紀
85 年	臺北市及臺灣省大地工程技師公會成立
86 年	《建築物耐震設計規範及解說》納入 JRA（1990）液化潛能評估法
87 年	國家地震工程研究中心啟用
88 年	發生集集地震並造成全臺嚴重災情，包括中部地區之土壤液化
88 年	國家地震工程研究中心大型二維剪力試驗箱完工
89 年	高雄市大地技師公會成立
89 年	液化現象與防治、液化潛能評估與潛勢圖等研究開始蓬勃發展
90 年	首版《建築物基礎構造設計規範》發布，內容包含液化評估專章
94 年	《建築物耐震設計規範及解說》納入 JRA（1996）液化潛能評估法
97 年	中央大學地工離心機增設振動台
102 年	中華民國大地技師公會成立
105 年	發生美濃地震，造成臺南地區多處土壤液化
105 年	「安家固園計畫－土壤液化潛勢區防治改善示範計畫」啟動
109 年	「土壤液化調查與風險評估計畫」啟動
111 年	「土壤液化圖資創新應用與防治技術發展計畫」啟動
112 年	《建築物基礎構造設計規範》納入本土化 HBF 液化潛能評估法
113 年	《建築物耐震設計規範及解說》納入本土化 HBF 液化潛能評估法

此外，撰寫過程承蒙審查委員提供諸多寶貴建議，協助提升內容完整性，特此申謝；惟後學才疏學淺，若仍有疏漏之處，尚祈各位讀者見諒。

二、80 年代至 88 年集集地震前—土壤液化相關研究之茁壯與液化潛能評估在臺灣之落地

自 1964 年之美國阿拉斯加地震與日本新潟地震均引致大規模土壤液化災害後，開啟了土壤液化相關研究之濫觴，在美國如首創液化潛能評估簡易經驗法（即所謂 Seed 法，Seed & Idriss, 1971）之 Seed 教授與 Idriss 教授，在日本如 JRA 法與 AIJ 法等兩個重要液化潛能評估法（詳見後文）之催生者 Iwasaki 博士與 Tokimatsu 教授，其成果對工程實務有卓著貢獻。在受到國外液化研究成果滋養後，臺灣在民國 60 年代開始出現土壤液化相關的學術發表，到 80 年代已有穩定產量，此時投入之學者包括（但不限於）臺灣大學吳偉特教授、臺灣科技大學陳堯中教授、成功大學陳景文教授、臺灣海洋大學簡連貴教授等，研究方法多為室內土壤動態試驗與基於現地鑽探資料之案例研究。

此外，國科會為推動震災防治科技之研究發展，於民國 79 年起籌建國家地震工程研究中心（以下簡稱為國震中心），並於民國 87 年底啟用，其特色為配備有振動臺與反力牆等大型實驗設施之地震模擬實驗室，自此兼採理論與試驗方法，投入地震工程相關基本與應用研究（www.ncree.niar.org.tw）。國震中心自籌設之初，便積極投入土壤液化相關研究，包括當時現地試驗組組長李咸亨教授所主持之全國液化潛能圖研究整合計畫（李咸亨，1997），為國內液化潛能分布圖資相關研究之先驅；當時基本研究組組長陳正興教授則率先投入機率式液化危害度評估相關研究（陳正興與黃富國，1997；黃俊鴻等，1999），相對於僅能獲得抗液化安全係數之定值式液化潛能評估，將可應用於液化損害風險之量化，提升地工設計之合理性。

另一方面，自 20 世紀初幾場強烈地震起（如 1906 年梅山地震），臺灣開始留下土壤液化影像紀錄（scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/liquefaction/list）。但一直到民國 80 年代，液化潛能評估才被視為工程設

計之必要項目。其中一個重要里程碑，為臺灣高鐵基本設計階段，交通部高速鐵路工程籌備處委託國家地震工程研究中心研擬「高鐵耐震設計準則」（國震中心，1992），納入日本《道路橋示方書》平成二年版所建議之液化潛能評估簡易經驗法（日本道路協會，1990），即所謂之 JRA（1990）法；另為探討各種土壤液化評估方法之合理性，委託中興工程顧問社進行「土壤液化潛能評估方法研究」（中興工程顧問社，1993）。

接下來，民國 84 年版《公路橋梁耐震設計規範》（交通部，1995）也納入液化潛能評估章節，其內容亦參考自 JRA（1990）法。民國 86 年版《建築物耐震設計規範及解說》（內政部，1997）鑒於 1995 年日本阪神大地震的嚴重液化災情，也從善如流，在第七章「其他耐震相關規定」中納入 JRA（1990）液化潛能評估法。

值得注意的是，液化潛能評估簡易經驗法雖然可採用標準貫入試驗（standard penetration test, SPT）打擊數（N 值）、圓錐貫入試驗（cone penetration test, CPT）錐尖阻抗（ q_c ）、剪力波速（ V_s ）等可反映土壤強度之參數，但考慮到 SPT 為最常搭配地質鑽探進行之現地試驗，故各國設計規範概以基於 SPT-N 之評估法為主。另外，黃俊鴻與陳正興（1998）延續中興工程顧問社（1993）成果之專文提到，SPT-N 簡易經驗法中，以 Tokimatsu & Yoshimi（1983）之液化潛能評估法（即所謂之 T&Y 法）較合理，其亦為日本《建築基礎構造設計指針》（日本建築學會，1988）液化潛能評估法（即所謂 AIJ 法）之基礎。但可能因臺灣對液化潛能評估之要求係始自交通建設，故源自日本《道路橋示方書》之方法便成為當時之主流。

在 1989 年加州 Loma Prieta 地震災害後，加州議會隔年便通過「震害潛勢圖法案」（Seismic Hazards Mapping Act, SHMA）之立法，其內容除了強地動外，也包括了土壤液化與地裂或地陷等項目（李咸亨，2024）。受此啟發，臺灣也在民國 80 年開始發展液化潛能圖，將不同地區的液化潛

能高低分布用視覺化的方式呈現，初代臺北市土壤液化潛勢圖便於此時提出（李咸亨與李忠訓，1994），其為當時臺北市 1600 孔鑽探資料所建立大地工程資料庫系統（李咸亨，1991）之衍生產出，展現出地工數位資料庫之實務應用價值。

三、88 年集集地震後至 105 年美濃地震前—由震災教訓驅動之本土液化研究與規範演進

民國 88 年 9 月 21 日凌晨 1:47 發生集集地震，其為臺灣近百年內陸震源規模最大者（芮氏規模 7.3），造成 2,415 人罹難、上萬人受傷、超過 10 萬戶房屋半倒或全毀之慘重災情（tcm.b.culture.tw），為臺灣烙下無法抹滅的記憶。此次強震也造成近百年範圍最廣、影響最大、且紀錄最完整之土壤液化災情，在員林、霧峰、南投市、臺中港、彰濱工業區等地，發生液化所引致之噴砂、地盤沉陷或側潰等變形現象，帶來鋪面受損、建築及碼頭結構沉陷或傾斜等災情。

集集地震後，國科會責成國震中心成立「九二一大地震勘災及重建委員會」，進行震災全面性調查，調查重點包括地質、大地工程（包括邊坡、土壤液化等）、建築物、橋梁道路…等，相關調查成果也成為後續臺灣地震工程研究開枝散葉之養分。在地工部分，土壤液化為調查重點之一，相關災情調查成果催生了許多本土之土壤液化特性、液化潛能評估、與液化潛能分布圖之相關研究。

例如，翁作新等（2002）針對南投市貓羅溪岸液化土樣之細料特性及其對液化強度之影響，陳景文等（2010）針對臺灣西部沖積層常見之低塑性粉土抗液化特性與動態性質，均採用動態三軸試驗來進行探討。林美聆等（2000）利用員林地區之震後勘災與鑽探資料，對國外常用液化潛能評估法（包括 Seed 法、JRA 法、T&Y 法等）之應用效果進行檢核。李德河與古志生（2001）針對集集地震液化地區收集 CPT 資料並歸納其特性，做為 CPT- q_c 液化潛能評估法之本土化基礎。黃俊鴻與楊志文（2003）亦利用集集地震案例探

討各種液化潛能評估法之本土適用性，黃俊鴻等（2005）進而據以發展本土化之雙曲線（Hyperbolic Function, HBF）液化評估法，採雙曲線擬合臨界液化強度曲線（如圖 1），其特色為公式簡單且參數具明顯物理意義，並經國內外液化案例驗證其不確定性較低（黃俊鴻等，2013）。

值得一提的是，臺灣液化潛勢圖相關研究在國震中心與國內多位學者之積極投入下，北、中、南各地之相關成果都在集集地震後的數年間產出，如李崇正與熊大綱（2001）、褚炳霖等（2002）、陳景文與王志榮（2003），惟相關成果此時仍以研究報告之型式存在。經濟部中央地質調查所（112 年與礦務局合併為地質調查與礦業管理中心，以下簡稱為地礦中心）也從民國 99

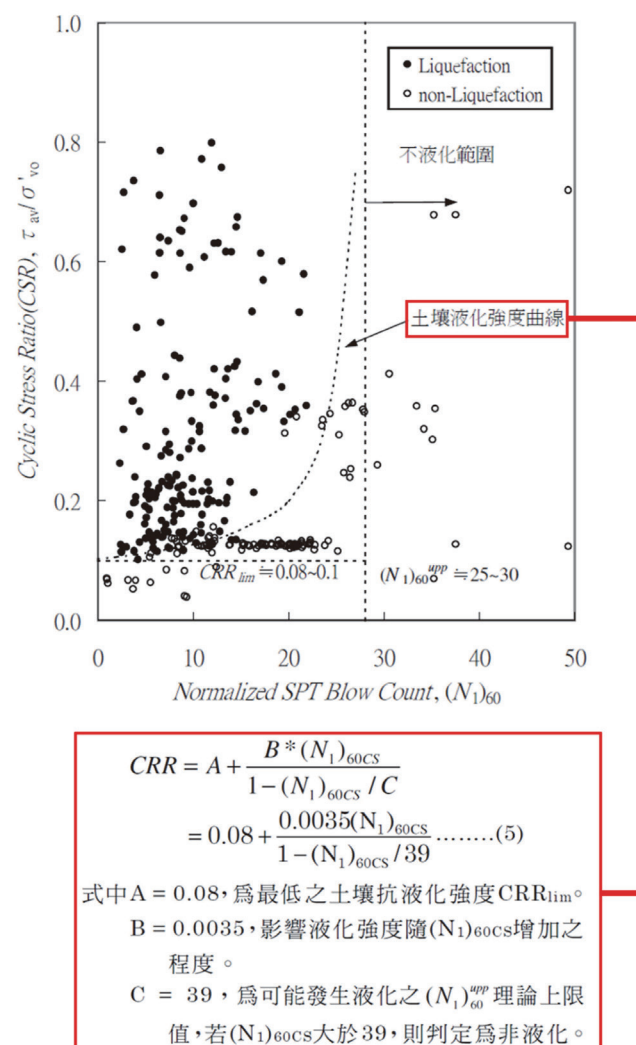


圖 1 本土化雙曲線土壤液化強度曲線（改繪自黃俊鴻等，2005）

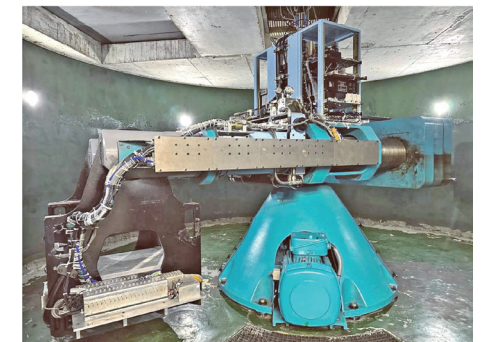
年起推動都市防災地質圖測勘發展計畫（邱禎龍等，2023），惟此時尚未將產出圖資釋出到公開平臺供大眾查閱。另一方面，機率式液化危害度評估也在集集震災經驗之基礎上持續發展，如黃富國（2008）綜合了世界各國與集集地震之液化與非液化場址鑽孔資料，針對基於 SPT-N 之液化潛能評估法建立液化機率與抗液化安全係數之關係，有助於液化損害程度之量化。

在這段期間，國內地工試驗技術也有長足之進展，讓液化試驗研究方法由過去以室內土壤元素試驗為主，轉而開始強化對物理模型試驗與現地試驗之應用，而展現出多元格局。集集地震促進了國內大型地工實驗設施建置，包括國震中心在臺灣大學翁作新教授之引領下研發製作了大型二維剪力試驗箱（如圖 2(a)），採用多層可獨立運動之框架构成柔性邊界以減少地盤模型邊界效應，在搭配振動臺後便能模擬水平地層之受震運動，並可有效重現土壤液化現象（Ueng *et al.*, 2006），成為進行液化地盤受震反應與液化土層內基礎性能之有力研究工具。由中央大學李崇正教授所建置、民國 83 年啟用之地工離心機，其透過人工重力場模擬真實覆土應力而重現現地土壤行為，也在民國 97 年增設振動臺（如圖 2(b)），因而具備執行液化相關研究之能力，後續並加入 2013 年啟動之 Liquefaction Experiment and Analysis Projects (LEAP) 國際合作計畫（Hung *et al.*, 2022），提升臺灣大地地震工程研究之國際能見度。在現地液化試驗方面，成功大學張文忠教授以重型震盪震源車（如圖 2(c)）有效激發現地土層之剪應變與超額孔隙水壓耦合反應（謝明志等，2007），並應用於垂直排水樁之抗液化效益量化（張文忠，2010）。

在工程實務方面，內政部建築研究所（2000）基於前文所述集集震災調查中與建築物災害相關之結論，並參考 1994 年美國 Northridge 地震與 1995 年日本阪神大地震的經驗，對《建築物耐震設計規範》進行檢討與修正，重點包括近斷層效應、震區微分區、場址效應、建築



(a) 國震中心大型二維剪力試驗箱與振動臺（國震中心陳家漢博士提供）



(b) 中央大學地工離心機與振動臺（中央大學洪汶宜教授提供）



(c) 中油重型震盪震源車（謝明志等，2007）

圖 2 土壤液化相關物理模型試驗與現地試驗設備

物功能性要求、新技術、新材料與補強之影響等。在土壤液化方面，由於《道路橋示方書》平成八年版（日本道路協會，1996）已根據阪神大地震液化災害經驗修訂液化潛能評估法，故本次修訂便納入之，即所謂 JRA（1996）法或新日本道路橋（NJRA）法，用以替代 JRA（1990）法，並納入了《道路橋示方書》平成八年版針對可能液化之砂土層建議之土壤參數折減係數，以確保基礎耐震設計合理性。前述修訂成果即 94 年版《建築物耐震設計規範》（內政部，2005）。

此外，首版《建築物基礎構造設計規範》在民國 90 年發布（內政部，2001），由於訂定過程中遭逢集集地震，其撰有專章（第十章）說明液化評估之相關要求，並較 86 年版與 94 年版《建築物耐震設計規範》涵蓋更多液化潛能評估法，包括基於 SPT-N 之 1985 年版 Seed 法（Seed *et al.*, 1985）版、JRA（1996）法、T&Y 法以及 CPT- q_c 法（Shibata & Teparaksa, 1988），對液化損害評估與液化地層基礎耐震設計（包括土質參數折減）也有更詳盡的交代，如液化潛能分布圖常用之液化潛能指數 P_L （Iwasaki *et al.*, 1982）已被納入，且除了《道路橋示方書》（日本道路協會，1996）建議之土壤參數折減係數外，《建築基礎構造設計指針》（日本建築學會，1988）較保守之建議也被採納。

大地技師先進們在集集地震後，亦針對土壤液化災情積極投入調查、評估、檢討與防治相關工作，並將相關成果撰文與各界分享，如蘇鼎鈞等人（2000）及蘇鼎鈞與王劍虹（2000），對國內土壤液化相關工程實務發展深具貢獻。

四、民國 105 年美濃地震後迄今一液化潛勢圖資公開、規範升級與永續導向之液化防治研究

民國 105 年 2 月 6 日凌晨 3:57 發生芮氏規模 6.6 之美濃地震，造成 117 人罹難，逾 500 人受傷，為集集地震後傷亡最嚴重的震災；其中，臺南永康之維冠金龍大樓因結構設計缺失、擅改及施工不確實而倒塌（www.pcc.gov.tw/content/list?eid=6231），導致 115 人罹難，為歷年來單一建築物倒塌罹難人數最多者。此外，臺南市中西區、北區、安南區、新市區、新化區等地，均觀察到土壤液化與噴砂，造成多處建築物沉陷與傾斜等災情；當中以位於嘉南大圳及鹽水溪間沖積沙洲之安南區溪頂里一帶有最多受災戶，並以早期魚塢水塘回填範圍內之惠安街最嚴重（葉家志等，2023），獨棟街屋最大沉陷量達 90 cm、最大傾斜量達 7 度（Tsai *et al.*, 2018）。

美濃地震對工程實務甚至是對社會帶來之最大效應，為液化潛勢圖資之公開。雖然美濃地震之液化災情不如集集地震廣泛與嚴重，但此時資訊傳播速度、廣度與深度均遠遠超過集集地震，且有相當比例之土壤液化發生在住宅區，對人民生活有直接深刻之影響，故使大眾對土壤液化之危害有深切之體認，並引起社會對土壤液化之關注。為因應各界之期盼，行政院經跨部會研商後指示地礦中心盡速公布國內土壤液化潛勢區；地礦中心根據其所發展都市防災地質圖之累積成果，於 105 年 3 月中公開全國初級土壤液化潛勢資訊。另外，為賦予相關圖資公告之法源，內政部於 105 年 4 月公布修正《災害防救法》第 2 條，明定震災包含土壤液化；後續更在 106 年 1 月修訂《風災震災火災爆炸火山災害潛勢資料公開辦法》第 4 條，將土壤液化潛勢分布圖納入震災潛勢資料公開項目，公開之主管機關則為地礦中心（邱禎龍等，2023）。

前述初級液化潛勢圖所依據之鑽探資料有限，為提升產出圖資之精度與品質，行政院乃結合補助老舊建物耐震評估補強之需求，於 105 年 4 月 29 日核定「安家固園計畫」，針對 105 年度土壤液化改善措施編列 20 億元，由內政部營建署（現改制為國土署）補助各地方政府補充高精度地質調查與製作中級土壤液化潛勢圖（即各縣市政府執行之「土壤液化潛勢區防治改善示範計畫」）。惟安家固園計畫之耐震評估補強部分。經執行 2 年後發現成效未如預期，故營建署於 107 年改以「建築物耐震重建輔導試辦計畫」取代安家固園計畫，而土壤液化改善措施則回歸經濟部持續辦理（www.moi.gov.tw/News_Content.aspx?n=8&s=14686）。後續便由地礦中心對土壤液化之後續資料調查、公布、運用及防治措施提出全盤規劃並負責統籌執行，包括委託縣市政府辦理之 109 年～113 年「土壤液化調查與風險評估」及 111 年～116 年之「土壤液化圖資創新應用與防治技術發展」等計畫，執行至今已累積超過一萬孔鑽孔，據以建立土壤液化潛勢查詢系統（www.liquid.net.tw）讓大眾應用（如

圖 3），並持續強化相關成果之加值與防災應用，包括液化防治工法發展、液化潛能評估技術精進等（邱禎龍等，2023）。

值得一提的是，地礦中心液化潛勢圖的發展基礎，可追溯自民國 81 年啟動之「都會區地下地質與工程環境調查研究」成果（邱禎龍等，2023），後續並搭配自民國 87 年起逐步開發建置之工程地質探勘資料庫（geotech.gsmma.gov.tw/Imocagis/），達到地質鑽探資料之數位化、全面整合與高效管理，有助於將前述計畫所獲得海量資料之應用效益極大化，除可供國土規劃與重大公共建設參考，也彰顯地質/地工數位資料庫對地質與地工災害防治之重要性。

此階段在液化防治實務之另一重要進展，為相關規範之再升級。90 年版《建築物基礎構造設計規範》與 94 年版《建築物耐震設計規範》關於液化評估與抗液化設計之涵蓋廣度並不一致，導致實務上較偏好採用後者唯一納入之 JRA（1996）法及其所對應之土壤參數折減係數。然而，如前文所述，黃俊鴻與陳正興（1998）認為 T&Y 法較 JRA（1996）法合理，主要是後者在高 SPT-N 值時常偏於保守；此外，JRA 折減係數所參考之試驗結果與論點不夠完整。然而，林美聆等（2000）指出 T&Y 法應用在集集地震員林案例時，高估了細料含量對抗液化強度之貢獻。

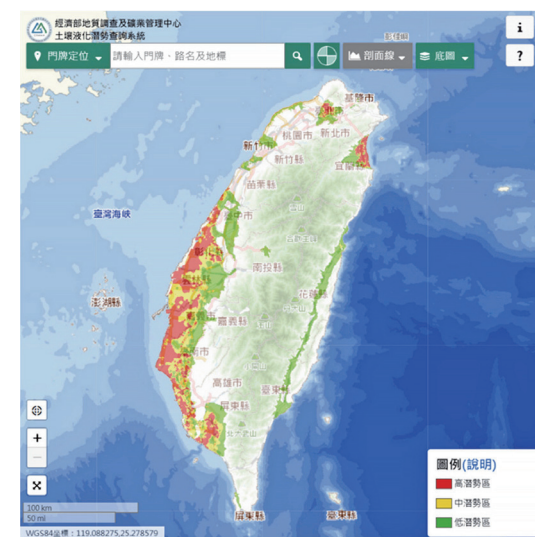


圖 3 土壤液化潛勢查詢系統畫面（www.liquid.net.tw）

為避免不同規範間之歧異，112 年版《建築物基礎構造設計規範》與 113 年版《建築物耐震設計規範》將液化相關章節之內容予以一致化。在液化潛能評估方法方面，不再獨尊一種方法，兩者均納入四種方法，其中，為充分考慮臺灣在地土壤特性，納入本土化之 HBF 法（黃俊鴻等，2005；黃俊鴻等，2012），另包括基於 Seed 法再修正之 NCEER 法（Youd *et al.*, 2001），基於 T&Y 法之 AIJ 法 2001 年版（日本建築學會，2001），並仍保留臺灣工程界過去常用之 JRA（1996）法。至於液化土層土壤參數折減係數，考慮到許多研究顯示土壤於液化後之殘存勁度與強度甚低，故捨棄日本道路協會之建議，僅保留較保守之日本建築學會建議，惟此一調整對液化地層基礎耐震設計有明顯影響，將造成工程成本增加，未來值得持續關注與討論。此外，《建築物基礎構造設計規範》針對液化損害評估之建議，除了 90 年版已有之相對厚度與液化潛能指數 P_L 之外，112 年版更納入液化後地盤沉陷量之估算法與相對應之損害程度分級準則，可做為建築物維生管線抗液化設計與排水功能檢核之參考。

另一方面，90 年版《建築物基礎構造設計規範》第三章「地基調查」要求五層以上或供公眾使用之建築物於基地有土壤液化之虞時，應針對基地地層之液化潛能辦理調查並進行評估，以確保基礎耐震設計之安全，但 112 年版則不再排除低矮建築物，全面一體適用；至於「有液化之虞」之定義，目前各縣市建管單位主要參考地礦中心液化潛勢圖來決定，該圖資之實務應用價值可見一斑。

在學術研究方面，美濃地震之土壤液化災情，尤其多起低矮建築物因液化而沉陷之情況，推動了液化評估與防治之相關研究。中興大學蔡祁欽教授團隊將有效應力地盤反應分析應用於液化潛能評估，直接以超額孔隙水壓激發程度精準判斷液化之發生，並能探討波形特性（如近斷層脈衝）之影響（Tsai and Li, 2024）。中興大學鄒瑞卿副教授團隊與中興工程顧問社合作，因應本土特性研發了機率式液化危害度分析

模組 -HAZ45PL，其可有效量化液化風險，有助於合理評估補強方案、救災計畫與保險費率等（Chou *et al.*, 2021）。臺灣科技大學盧之偉教授團隊針對低矮建物液化震陷量評估提出解析模式（Lu *et al.*, 2025），其可搭配液化潛勢圖資應用於災害風險之預估。

針對液化防治相關研究，適逢政府於民國 110 年宣示 2050 淨零轉型之目標，擬達到淨零碳排放與能源轉型，故此階段液化防治工法多基於永續考量來發展。國震中心盧志杰研究員等以中央大學地工離心機進行物理模型振動臺試驗，探討無須添加材料之地下水位降低工法對淺基礎建築物之效益（Lu *et al.*, 2023）；對環境友善之土壤改良材料亦為近年探討重點，如臺灣大學葛宇甯教授團隊以三軸試驗探討微生物誘導碳酸鈣沉澱（Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP）於砂土改良之效果，顯示所形成之碳酸鈣膠結能有效提升砂土剪力強度（Jhuo *et al.*, 2025）。

為因應能源轉型需求，我國自民國 106 年開始起積極建置離岸風電設施（www.moeaea.gov.tw），然因大部分風場位於中部外海軟弱沖積海床，土壤液化為風機結構設計須面對之問題，也成為近 10 年液化研究課題之一。例如，成功大學土木系與國震中心於民國 108 年合作進行套筒式基礎（jacket foundation）離岸風機支撐結構模型振動臺試驗（如圖 4），探討重點包括液化土壤與基樁互制行為特性（Ko and Li, 2020），及土壤液化與調諧質量阻尼器（tuned mass damper, TMD）對風機上構受震反應之影響（Lin *et al.*, 2021）；中央大學洪汶宜教授團隊則是利用如圖 5 所示配置之離心模型試驗，探討離岸風機單樁式基礎（monopile）在土壤液化時之側向承載性能（Hung *et al.*, 2025）。

美濃地震中，土壤液化伴隨之地盤沉陷造成地下管線接頭鬆脫之災情（黃富國與王淑娟，2016）；更早之前的 2010～2011 年紐西蘭基督城地震序列與 2011 年東日本大震災，均發生大規模土壤液化，因而導致大量地下管線破壞。管線設施為民生經濟所必需，為提升國家防災韌性，亦

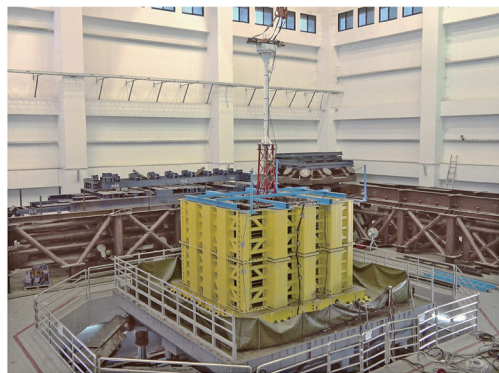


圖 4 成大土木 - 國震中心離岸風機結構模型振動臺試驗（筆者提供）

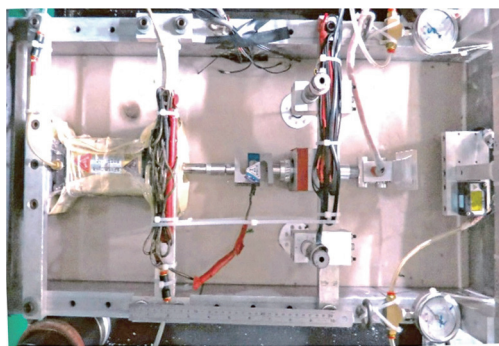


圖 5 液化時單樁式基礎模型側向承載性能離心模型試驗（中央大學洪汶宜教授提供）

有許多學者投入相關研究，如筆者之研究團隊針對土壤液化造成之地下管線上浮，以及建築物液化震陷對用戶端管線之影響，分別進行實尺寸物理模型振動臺與強制位移試驗（Ko *et al.*, 2023a, 2023b）；臺灣科技大學葉馥瑄助理教授則發展了液化土層地下管狀結構上浮位移之解析評估法，並透過振動臺試驗驗證之（Yeh *et al.*, 2026）。

此階段土壤液化試驗研究之特色，除了傳統常用之室內土壤元素試驗外，物理模型試驗仍佔了相當之比重，與國震中心與中央大學地工離心機有密切關係。其中，國震中心之臺南實驗室於 2017 年開始營運，其配備有較臺北本部尺寸更大（8 m × 8 m vs 5 m × 5 m）、性能更佳之地震模擬振動臺，並配合建置了更大型之二維剪力試驗箱（圖 4）。前述成大土木與國震中心合作之風機結構模型試驗，以及筆者主持之管線上浮試驗，便是利用上述設施所完成，證明了大型實驗設施對土木工程與災害防治研究之重要性。

大地技師先進們在美濃地震後亦未缺席，於震後相隔不到兩週，大地工程技師公會便於 105 年 2 月 17 日與地工技術研究發展基金會及大地工程學會共同舉辦「0206 高雄美濃地震即時論壇」，邀請各領域專家分享地質、結構與土壤液化勘災見聞，並將論壇紀實內容發表於民國 99 年創刊之《大地技師期刊》（陳江淮與高秋振，2016）。此後，《大地技師期刊》又陸續刊載土壤液化相關知識分享，如詹松儒（2016），更於集集地震即將屆滿 25 周年之際（民國 112 年）出版第 27 期「土壤液化專輯」（周坤賢與鄭斯元，2023）由多位產官學界之先進分享歷史災害經驗、相關因應作為與技術發展現況，如前文引述的葉家志等（2023）及邱禎龍等（2023），均為本期之內容。大地工程技師公會更在 113 年出版《土壤液化之地質調查與工程改善對策說明書》（周坤賢等，2024），探討土壤液化的發生機制、災害、調查、評估、修復與防治等面向，提供各界參考，使液化防災議題持續獲得重視與發展。

五、未來展望

站在大地工程技師公會成立三十年的歷史節點，回顧過去是為了展望未來。面對在臺灣的吾輩所無可避免之土壤液化課題，個人淺見認為應由「被動防禦」走向「智慧調適」，並可透過以下三大核心達成：

1. 數位轉型：國土地盤大數據之建構與應用
延續地礦中心所收集彙整之大量地質調查資料，建構國土地盤數位孿生（digital twin），以供產官學界運用於地工實務、國土利用、防災研究，並能與其他資料系統串聯（如水利署的動態地下水觀測網），搭配人工智慧進行加值應用，例如：進行動態之液化潛勢評估，以達成致災風險之浮動分級與即時管控。
2. 韌性與綠色防災：推動「風險調適」與「永續導向」之液化災害防治

液化防治不應僅限於單一基地的工程改良，液化潛勢圖資公開後的下一步，應直接與都

市計畫、國土功能分區與防災政策進行深度結合。例如，在高液化潛勢區推動區域性地盤改良、建構抗液化基礎設施或降低開發密度，打造能夠「承受液化、快速復原」的韌性城市。此外，為了國家人民永續發展，任何工程手段均應以低碳排與環境保護為依歸。

3. 專業共榮：深化產官學協力與全民防災意識

持續發揮大地工程師的專業價值，在智慧防災的大趨勢下，大地工程師（這裡採用廣義的定義，包含產業界、政府相關單位與學術研究機構之地工從業人員）應共同扮演「國土醫生」的角色，並加強彼此間合作（就像醫院需要內科、外科、與病理科醫師），推動液化防治相關工程措施執行、管理策略擬定、理論與技術研發等工作，並用通俗語言將複雜的地工資訊轉譯給一般民眾，全面提升國家整體的防災韌性。

六、後記

筆者自民國 90 年秋進入臺大土木碩士班大地組就讀以來，投身於大地工程的時間二十餘載，尚未及公會三十年之筆路藍縷，承接此撰文任務，深感惶恐。所幸歷來已有許多前輩大師們在此課題上指引明燈並提出真知灼見，方使後學得以站在巨人的肩膀之上，勉力完成此篇回顧與展望。在大地工程領域裡，不論是學術研究的探討者，抑或是工程實務的踐行者，皆共享「工程師」這個神聖榮耀且責任艱鉅的身分，為了眾人的歲月靜好而負重前行。謹以本文，向所有與大地並肩的大地工程師們致上最崇高的敬意！

參考文獻

1. Chou, J. C., Hsieh, P. S., Lin, P. S., Yen, Y. T., & Lin, Y. H. (2021). Introduction and application of a simple probabilistic liquefaction hazard analysis program: HAZ45PL Module. *Shock and Vibration*, 2021(1), 6687631. DOI: 10.1155/2021/ 6687631.
2. Hung, W. Y., Sitepu, F., Wang, Y. H., & Lee, Y. L. (2025). Centrifuge modeling of laterally loaded monopile during different liquefaction phases. *International Journal of Civil Engineering*, 23(2), 229-241.

3. Hung, W. Y., Huang, J. X., Hu, L. M., & Nguyen, T. A. (2022). LEAP-UCD-2017 and additional tests at NCU. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 156, 107206.
4. Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. (1982). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. In *Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton*, 925-939.
5. Jhuo, Y. S., Wong, H. E., Tung, H. H., & Ge, L. (2025). Effectiveness of microbial induced carbonate precipitation treatment strategies for sand. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104132.
6. Ko, Y. Y., & Li, Y. T. (2020). Response of a scale-model pile group for a jacket foundation of an offshore wind turbine in liquefiable ground during shaking table tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(15), 1682-1701.
7. Ko, Y. Y., Tsai, T. Y., & Jheng, K. Y. (2023a). Full-scale shaking table tests on soil liquefaction-induced uplift of buried pipelines for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(5), 1486-1510.
8. Ko, Y. Y., Wang, H. W., & Jheng, K. Y. (2023b). An experimental study of the impact of liquefaction-induced displacement on buried pipelines for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(12), 3679-3701.
9. Lin, G. L., Lu, L. Y., Lei, K. T., Liu, K. Y., Ko, Y. Y., & Ju, S. H. (2021). Experimental study on seismic vibration control of an offshore wind turbine with TMD considering soil liquefaction effect. *Marine Structures*, 77, 102961.
10. Lu, C. C., Chen, K. Y., Hu, L. M., & Hung, W. Y. (2023). Anti-liquefaction mechanisms in buildings with shallow foundations with a focus on lowering the ground water table. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 175, 108275.
11. Lu, C. W., Lin, Y. F., Lee, W. L., & Doan, M. T. (2025). Analytical estimation of liquefaction-induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 194, 109301.
12. Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273.
13. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., & Chung, R. M. (1985). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425-1445.
14. Shibata, T., & Teparaksa, W. (1988). Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests. *Soils and Foundations*, 28(2), 49-60.
15. Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and foundations*, 23(4), 56-74.
16. Tsai, C. C., Hsu, S. Y., Wang, K. L., Yang, H. C., Chang, W. K., Chen, C. H., & Hwang, Y. W. (2018). Geotechnical reconnaissance of the 2016 ML6. 6 Meinong earthquake in Taiwan. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(9), 1710-1736.
17. Tsai, C. C., & Li, P. C. (2024). Quantifying near-fault motion effects on soil liquefaction through effective stress site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 183, 108779.
18. Ueng, T. S., Wang, M. H., Chen, M. H., Chen, C. H., & Peng, L. H. (2006). A large biaxial shear box for shaking table test on saturated sand. *Geotechnical Testing Journal*, 29(1), 1-8.
19. Yeh, F. H., Hsu, C. Y., Ge, L., & Chian, S. C. (2026). An analytical model for liquefaction-induced underground buried structure uplift with experimental validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 175, 107749.
20. Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313.
21. 中興工程顧問社 (1993), 「土壤液化潛能評估方法研究期末報告第一冊 (分析評估報告)」, 交通部高速鐵路工程籌備處研究報告。
22. 內政部 (1997), 《建築物耐震設計規範及解說》。
23. 內政部 (2001), 《建築物基礎構造設計規範》。
24. 內政部 (2005), 《建築物耐震設計規範及解說》。
25. 內政部 (2023), 《建築物基礎構造設計規範》。
26. 內政部 (2024), 《建築物耐震設計規範及解說》。
27. 內政部建築研究所、中華民國地震工程學會、國家地震工程研究中心、臺大地震工程研究中心 (2000), 「建築物耐震規範及解說之修訂研究」, 內政部建築研究所專題研究計畫成果報告, MOIS-892040。
28. 日本建築學會 (1988), 《建築基礎構造設計指針》。
29. 日本建築學會 (2001), 《建築基礎構造設計指針》。
30. 日本道路協會 (1990), 《道路橋示方書・同解說, V 耐震設計編》。
31. 日本道路協會 (1996), 《道路橋示方書・同解說, V 耐震設計編》。
32. 交通部 (1995), 《公路橋梁耐震設計規範》。
33. 李咸亨 (1991), 「臺北市區大地工程資料建檔 (一)」, 內政部建築研究所籌備處。
34. 李咸亨 (1997), 「全國液化潛能圖研究整合計畫 (II) —嘉義、苗栗、花蓮地區」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-97-010。
35. 李咸亨 (2024), 「微觀學術研究也能宏觀防災護國」, 地工技術, 第 180 期, 第 3-5 頁。
36. 李咸亨、李忠訓 (1994), 「臺北盆地液化潛能圖之研究」, 研究報告 GT94003, 國立臺灣工業技術學院營建工程技術系。
37. 李崇正、熊大綱 (2001), 「臺北盆地土壤液化潛能圖之製作研究 (II)」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-01-007。
38. 李德河、古志生 (2001), 「液化區 CPT 資料之探討」, 土木水利工程學刊, 第 13 卷, 第 4 期, 第 779-791 頁。
39. 周坤賢、徐明志、郭寶生、曾孝欽、鄭清江、鄭斯元、盧志杰 (2024), 「土壤液化之地質調查與工程改善對策說明書」, 楊智堯編輯, 社團法人中華民國大地工程技師公會。
40. 林美聆、翁作新、陳銘鴻、王明輝、黃筱卿 (2000), 「九二一集集大地震後續短期研究—由員林地區液化調查資料進行本土化液化評估方法之初步研究」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-00-063。
41. 邱禎龍、蘇泰維、王聖宗、董英宏、楊智堯 (2023), 「地礦中心土壤液化潛勢調查成果」, 大地技師期刊, 第 27 期, 第 88-95 頁。
42. 翁作新、陳界文、孫家雯 (2002), 「液化土壤之細料特性及其對液化強度之影響」, 國科會專題研究計畫成果報告。
43. 國家地震工程研究中心 (1992), 「臺灣地區高速鐵路地震及耐震設計準則計畫」, 交通部高速鐵路工程籌備處研究報告。
44. 張文忠 (2010), 「現地土壤液化模型試驗之發展與應用」, 地工技術, 第 125 期, 第 65-74 頁。
45. 陳正興、黃富國 (1997), 「雲林離島工業區水力回填土液化危害度評估與微地動量測及分析」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-97-013。
46. 陳江淮、高邱振 (2016), 「0206 高雄美濃地震即時論壇」, 大地技師期刊, 第 12 期, 第 52-67 頁。
47. 陳景文、王志榮 (2003), 「西南部地區液化潛能評估」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-03-005。
48. 陳景文、倪勝火、張文忠、蕭吉良、陳俊吉、張浼珣、曾韋禎 (2010), 「臺灣低塑性粉土質砂工程性質與設計對策研究」, 國科會專題研究計畫成果報告。
49. 黃俊鴻、陳正興 (1998), 「土壤液化評估規範之回顧與前瞻」, 地工技術, 第 70 期, 第 23-44 頁。
50. 黃俊鴻、陳正興、林昭鵬 (1999), 「土壤液化機率分析法之研究」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-99-043。
51. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢 (2012), 「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」, 地工技術, 第 133 期, 第 77-86 頁。
52. 黃俊鴻、楊志文 (2003), 「以集集地震案例探討現有 SPT-N 液化評估方法之適用性」, 地工技術, 第 98 期, 第 79-90 頁。
53. 黃俊鴻、楊志文、陳正興 (2005), 「本土化液化評估方法之建議—雙曲線液化強度曲線」, 地工技術, 第 103 期, 第 53-64 頁。
54. 黃富國、王淑娟 (2016), 「0206 美濃地震土壤液化震害探討」, 技師報, 第 1006 期, 臺灣省土木技師公會。
55. 葉家志、楊智堯、周坤賢、盧詩丁、邱禎龍、蘇泰維 (2023), 「歷史土壤液化災害調查」, 大地技師期刊, 第 27 期, 第 70-77 頁。
56. 詹松儒 (2016), 「解剖土壤液化」, 大地技師期刊, 第 13 期, 第 72-81 頁。
57. 褚炳麟、徐松圻、林成川、李明翰 (2002), 「全國液化圖之製作及評估方法之研究—臺中市和南投縣」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-02-006。
58. 謝明志、陳志芳、林炳森、張文忠、黃安斌 (2007), 「現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究 (3/3)」, 交通部運輸研究所。
59. 蘇鼎鈞、王劍虹 (2000), 「員林地區集集大地震土壤液化評估案例探討」, 地工技術, 第 81 期, 第 57-68 頁。
60. 蘇鼎鈞、姜凱文、林向榮、王復國、段紹緯 (2000), 「員林鎮土壤液化現狀調查成果及初步研判」, 地工技術, 第 77 期, 第 29-38 頁。

近三十年間臺灣邊坡工程之技術發展與未來展望

翁孟嘉 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

林銘郎 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授

林承翰 國立陽明交通大學防災與水環境研究中心 / 助理研究員

一、前言

臺灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，地質構造複雜，地形陡峻，山坡地面積約占全島三分之二以上，加上地震活動頻繁、颱風豪雨集中及河川侵蝕旺盛，使邊坡災害長期成為臺灣最重要且最具代表性之天然災害之一。近三十年間，隨著高速公路、快速道路、水庫、隧道、坡地社區及高山觀光產業快速發展，山區土地利用與工程開發日益增加，邊坡穩定問題已不再僅屬單一工程議題，而是直接關係國土保育、交通維生、防災治理與公共安全之重要課題。多起重大天然災害事件亦深刻影響臺灣邊坡工程之研究方向與工程技術發展。例如 1999 年九二一集集地震造成大量山崩與順向坡滑動災害，使岩體不連續面分析、地震邊坡穩定與深層滑動機制受到高度重視；2001 年桃芝颱風、2004 年敏督利颱風及 2009 年莫拉克颱風，極端降雨則引發大量崩塌、土石流與堰塞湖災害，其中小林村大規模深層崩塌事件，更成為臺灣大型山崩研究與深層崩塌防災政策之重要轉捩點。此外，國道三號順向坡崩塌、梨山地滑、廬山地滑及蘇花公路落石災害等案例，也促使國內邊坡工程逐漸由傳統災後治理模式，轉向災前預防、風險管理與韌性防災之發展方向。

在上述背景下，臺灣邊坡工程於學術研究與工程實務上均有顯著進展。過去三十年間，邊坡工程已由早期以地質調查、經驗式設計與安全係數分析為主，逐步發展為結合遙感探測、地球物理探測、高解析數值模擬、自動化監測與人工智慧分析之跨領域整合架構。尤其近年 LiDAR、UAV、GIS、InSAR、大數據、高效能運算與 AI 技術快速進步，使邊坡研究逐漸由傳統靜態穩定分析，發展為動態災害模擬、智慧監測與數位孿生（Digital Twin）之分析架構。過去作者與青山工程顧問股份有限公司同仁曾於「地工 40 紀念專刊」共同撰寫「大地工程技術發展—邊坡工程」一文（陳昭維等，2023），針對臺灣邊坡工程之發展歷程進行整理與回顧。本文以該文為基礎，摘要整理數十年來臺灣邊坡工程在「邊坡調查技術」、「邊坡力學分析方法」、「邊坡工程技術」及「邊坡監測技術」等四大面向之重要發展，並進一步探討邊坡工程在智慧化、高精度分析與韌性防災等方向之未來發展與展望。須說明的是，上述面向係依技術之主要應用目的區分，如「調查」著重於掌握特定時間點之地質條件與破壞機制，以建立地質模式；「監測」則著重於掌握邊坡狀態隨時間之變化。實務上有多項技術（如 LiDAR、UAV 測量、地球物理探測

等）同時兼具調查與監測功能，本文依其於各發展階段之主要應用情境分別敘述，並在相關章節中說明其雙重角色。

二、邊坡調查技術

臺灣邊坡調查技術之發展，與山區工程建設需求、重大天然災害事件以及遙測與資訊科技進步密切相關。1970 至 1990 年代期間，臺灣邊坡調查主要以工程地質調查為核心，包括地表地質踏勘、航空照片判釋、地形測量與地質鑽探等方法。當時國家重大建設快速推動，包括中山高速公路、北中南三條橫貫公路、水庫與山區道路等大型工程，使邊坡穩定問題逐漸受到重視。工程地質人員需透過現地踏勘，調查岩層分布、地質構造、不連續面位態與地下水條件，再配合地質鑽探建立地質剖面，以作為邊坡力學分析與工程設計之依據。此時期調查工作高度依賴地質人員之現地經驗與專業判釋能力，雖已建立臺灣山區工程之基本地質資料，但受限於山區交通不便、植生茂密與調查範圍有限等因素，對大型深層滑動與地下構造之掌握仍有相當限制。

1990 年代後，隨著地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）的普及化，使邊坡調查開始由單點式與局部性分析，逐步轉向數位化分析與空間關係架構，而數值地形模型（DTM）、遙測影像與 GIS 之整合，也開始應用於崩塌之地形地貌判釋（潘國樑，1984；林真在、林四川，1997）。此外，地球物理探測技術亦逐漸導入邊坡工程調查，例如折射震測、地電阻探測、反射震測與透地雷達等方法，可協助推估地下岩層分布、破碎帶位置與地下水條件，雖然地球物理資料存在反演非唯一性的問題，但配合鑽探與現地調查交互驗證，仍可有效提升地下地質模式之完整性（楊潔豪，1989；董倫道與楊潔豪，1998）。

1999 年九二一集集地震後，大量山區崩塌與順向坡災害發生，基於 GIS 建立能夠快速篩選出環境地質敏感度較高區域之山崩潛感分析方法

也應運而生（黃南輝等，2002），此外，孔內探測技術亦逐漸成熟，翁孟嘉等（2006）應用孔內音波與造影技術於地質弱面調查，使地下破碎帶與滑動面調查能力大幅提升。另一方面，梨山地滑、五彎仔地滑與廬山地滑等大型地滑案例顯示，地下水位變化與地下構造往往為控制深層滑動之主要因素，因此地下水補注區、滲流路徑與地下水壓分布之調查，逐漸成為大型邊坡調查之重要核心（黃鎮臺與王文能，1997；交通部公路總區第五區養護工程處，2006）。此後井內攝影、孔內超音波掃描、地下水流向分析與深層地質調查技術逐漸成熟，更可精確掌握地下構造與地下水系統，林志平等（2020）與宋家宇等（2022）均指出，近地表地球物理方法與地電阻探測已逐漸成為崩場地地下水與地下構造調查之重要工具。

2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌與堰塞湖災害後，臺灣邊坡調查技術產生重大轉變。災後政府開始大規模推動全臺光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）測繪與潛在大規模崩塌區調查工作，LiDAR 技術可穿透植生取得裸露地形資訊，從而建立高解析數值高程模型（DEM），並據以有效辨識傳統航空照片難以觀察之微地形特徵，大幅提升大型崩塌與深層滑動區之辨識能力（侯進雄等，2014；謝有忠等，2016）。配合地形開闊度圖、陰影地形圖與紅色地形圖等加值分析方法，邊坡調查逐漸由傳統地質圖繪製，轉向精進工程地質圖與地表三維工程地質圖（邱家宏與李彪，2020）。

有別於傳統定翼機航空測量，UAV（Unmanned Aerial Vehicle）空拍測量與 SfM（Structure from Motion）技術的快速發展，使建立視覺化的邊坡模型更加便利與安全，且因 UAV 具有高機動性、低成本與高解析度等優勢，已從輔助工具躍升為大比例尺下空間資訊獲取的主流，尤其透過無人機搭載 LiDAR 設備或地面型 LiDAR，更可快速獲取高密度點雲資料，相較於 DTM 屬於二維半數值地形模型（即

每一個座標點僅對應單一的高程值)，點雲資料是由空間中無數個點所組成，每一個點都包含明確的三維坐標，據此配合點雲分析技術，得以實現包括立面地形圖建置、岩體裂隙網絡萃取與落石源區調查等，過去針對高陡岩坡難以獲得的特徵資料（黃韋凱等，2019；楊濟豪等，2020）。

除了影像與地形資料，近年雷達差分干涉（InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar）技術亦逐漸應用於大型邊坡與地滑區的變形分析。InSAR 係透過比對不同時間點的衛星雷達回波相位差，計算毫米級地表變形位移，特別適合應用於大範圍山區變形分析，且具有全天候觀測優勢（林俊廷與王國隆，2019）。值得注意的是，隨著感測與資訊技術之進步，遙測技術與地球物理已由傳統單次性調查，逐漸發展為長期化、時序化之應用，使調查與監測之界線日趨模糊。許多傳統上屬於調查性質之技術，透過重複量測或長期布設，即可同時扮演監測角色：例如多期 LiDAR 與 UAV 測量可進行地形變遷偵測；InSAR 藉由 PS-InSAR 與 SBAS 等時間序列分析方法，可同時提供大範圍變形與長期活動性調查；地電阻探測經固定電極陣列定置化布設後（定置式地電阻監測，time-lapse ERT），可連續量測地層電阻率之時空變化，長期追蹤降雨入滲、地下水位變動與滑動帶含水狀態變化；分散式光纖感測（DAS）技術可將光纖纜線轉化為高密度之地下光纖地震計陣列，兼具淺層速度構造調查與微震、振動長期觀測功能（黃安斌等，2016）；微機電（MEMS）感測技術則使低成本、高密度之加速度與傾斜量測逐漸普及（陳志芳等，2016）。此外，在震波調查方面，除傳統折射與反射震測外，表面波震測與被動式震測等震波剖面調查方法，亦逐漸廣泛應用於滑動面深度、風化層厚度與地下構造之推估。

整體而言，近數十年間調查技術之進步，使臺灣邊坡調查技術已由早期以現地踏勘與地質鑽探為主之傳統模式，逐步發展為結合遙測、點雲分析、地球物理探測與高解析三維建模之整合

型調查架構（林銘郎等，2004；陳樹群、王鑫，2012），而「調查監測一體化」之發展，使邊坡空間特性調查與時間演化監測逐漸整合為單一資訊架構，亦為後續數位孿生與智慧防災系統之重要基礎。當前人工智慧與影像辨識技術之快速發展，也預期將逐漸融入邊坡調查作業，例如利用深度學習（Deep Learning）與語意分割技術，自動辨識岩體裂隙、崩塌地形、落石源區與地形變遷區域，大幅降低人工判釋時間，此外，基於 AI 的影像分析技術亦逐漸應用於崩塌地形分類、裂縫辨識與山崩潛勢分析，使邊坡調查逐漸由人工經驗判釋，邁向智慧化與自動化分析架構。

三、邊坡力學分析方法

臺灣邊坡力學分析方法之發展，與國內電腦運算與數值分析技術進步密切相關。1970 至 1980 年代期間，臺灣邊坡工程主要以極限平衡法（Limit Equilibrium Method, LEM）來分析邊坡穩定性。極限平衡法係預先假設一滑動面，將滑動土體視為剛體，並常以切片法進行分析，透過滿足力與（或）力矩之靜力平衡條件，以沿滑動面「可發揮之抗剪強度」與「維持平衡所需之剪應力」之比值定義邊坡安全係數，搜尋臨界滑動面求得最低安全係數。此法隱含安全係數沿滑動面為定值之假設，且不考慮材料應力－應變行為。由於切片間作用力屬靜不定問題，當時常用方法包括 Bishop 法、Janbu 法與 Spencer 法等，即分別採用不同之條間力假設使問題可解，各法滿足之平衡條件與計算結果亦略有差異，極限平衡法雖無法提供邊坡變形資訊，惟因其理論簡單、計算效率高且參數需求較少，因此長期廣泛應用於邊坡、擋土牆、坡地開發與水土保持工程分析，相關分析理念亦逐漸被導入國內工程實務。黃景川（1993）曾探討加勁邊坡穩定分析；黃景川等（1999）則進一步進行不對稱邊坡之三維破壞分析，顯示臺灣邊坡分析已由二維分析發展至三維穩定分析架構。另一方面，針對臺灣山

區眾多高陡岩坡之穩定分析，主要以立體投影法（Stereographic Projection）分析岩體不連續面與可能破壞模式，例如平面滑動、楔形滑動與傾倒破壞等。賴典章（1984）曾探討立體投影圖於岩坡工程之應用；張文城與翁作新（1986）則進一步進行楔形岩塊邊坡穩定之電腦分析，奠定臺灣岩坡穩定分析之重要基礎。

1990 年代後，隨著電腦運算能力快速提升，連續體分析如有限元素法（Finite Element Method, FEM）與有限差分法（Finite Difference Method, FDM）逐漸普及，使邊坡穩定分析由傳統剛體平衡概念，進入應力－應變分析架構。連續體分析可模擬邊坡由彈性進入塑性之變形歷程，並透過強度折減法求取安全係數，因此逐漸應用於山區邊坡與地下工程分析。此時期地下水與滲流分析亦快速發展。由於臺灣屬高降雨環境，降雨入滲與地下水位上升往往為邊坡失穩之主要誘因，因此不飽和土壤理論與滲流分析逐漸受到重視。拱祥生等（2003）曾探討不飽和土壤基質吸力量測及其於邊坡穩定分析之應用；鄭清江等（2009）則分析莫拉克降雨引致之高屏地區邊坡淺層崩塌與穩定性數值分析案例，使邊坡分析逐漸由單純安全係數計算，進一步考量降雨入滲與地下水變化對邊坡穩定之影響。另一方面，1999 年九二一集集地震後，大量山區崩塌案例顯示，地震作用不僅會降低岩體強度，也可能造成岩層鬆動、不連續面張裂與地下水路徑改變，因此，動態分析與地震邊坡研究快速發展，包括 Newmark 位移分析、動態有限元素分析與地震加速度反應分析等方法逐漸應用於工程實務。林美聆等（2009）曾探討集集地震邊坡滑動門檻條件；洪靜等（2019）則利用有限元素分析法模擬地震引致山崩之動態穩定問題。

2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌後，臺灣邊坡分析逐漸由傳統「邊坡是否失穩」之穩定性問題，進一步發展為探討「崩塌後如何運移、堆積與致災」之動態演繹問題。傳統連續體分析方法已難以充分描述崩塌後之破裂、

碰撞與堆積行為。因此，非連續體分析如離散元素法（DEM, Discrete Element Method）、非連續變形分析法（DDA, Discontinuous Deformation Analysis），以及基於連續體分析之無網格模擬技術如物質點法（MPM, Material Point Method）等大變形分析方法逐漸受到重視。唐昭榮等（2009）曾利用 PFC3D 模擬草嶺與小林村邊坡式山崩；吳建宏等（2011）則探討 DDA 於地震地滑模擬之應用案例；楊國鑫等（2020）則利用物質點法分析貓空邊坡崩塌過程與運動機制，顯示臺灣山崩研究開始重視崩塌啟動機制、致災範圍分析與二次災害風險評估等問題。相對於土壤邊坡，岩坡既有的不連續面使其分析上尤須考慮岩體的異向性與異質性，且岩坡中的地下水滲流亦是經由岩體內部節理網絡系統流動，翁孟嘉等（2021）提出板岩葉理之非線性破壞準則，並應用於板岩邊坡之重力變形與滑移分析，林承翰等（2022）則採水－力（HM）耦合之非連續體分析來探討地下水變化對節理岩坡失穩與後續堆積之影響，顯示邊坡分析已逐步納入非線性、異向性、多物理耦合等複雜地工材料行為。

另一方面，山崩潛勢分析與區域風險分析亦快速發展。透過 GIS、統計分析與類神經網路等方法，可建立山崩潛勢圖與降雨促崩模式，提供國土規劃、防災管理與道路預警系統之應用基礎，更可在小比例尺下分析廣域邊坡穩定性（李錫堤與黃健政，2005）。李錫堤與費立沅（2011）曾探討山崩災害分析與廣域製圖；譚志豪等（2011）則進行集水區降雨促崩潛勢分析；莊承穎等（2024）應用 16 年的事件型崩塌目錄劃定不安定土砂集水區及建立不安定土砂潛勢分級。近年機器學習方法亦逐漸應用於山崩潛勢分析與崩塌機率評估，陳進發等（2020）即建立蘇花公路因雨致災崩塌機率模式，並應用於防災管理。

整體而言，近數十年間分析方法之進步，臺灣邊坡力學分析已由早期以經驗法則與安全係數分析為主，逐步發展為結合地下水滲流、地震

作用、複雜岩體行為之進階數值分析架構。惟須說明的是，數值分析方法本質上為近似解；其將連續體離散化為有限單元、差分網格或非連續體元素，並以特定之組成律（constitutive model）理想化材料行為，數值分析結果受網格尺寸、邊界條件、組合律選擇、初始應力狀態與收斂準則等因素影響，而非解析之精確解，其可靠度須透過驗證與率定加以確認。此外，數值分析所需之輸入參數（如變形模數、剪力強度參數、剪脹角、滲透係數、初始應力比及岩體不連續面之勁度與強度等）遠較極限平衡法為多，實務上其取得常受限於室內與現地試驗之代表性、取樣擾動以及地層空間變異性等問題。因此，分析時須配合完整之地質調查與試驗規劃，並輔以監測資料之回饋分析與參數敏感度分析，方能確保分析結果之合理性與工程適用性。

四、邊坡工程技術

1970 年代，隨著十大建設與交通建設快速推動，包括中山高速公路、北迴鐵路、中橫公路與水庫工程等大型公共工程相繼展開，臺灣邊坡工程開始大量應用於交通建設與山區開發。此時期之邊坡工程多屬新建工程，以提供道路邊坡與路基穩定為主要目的。常見工法包括格梁植生護坡、分階擋土牆、擋土排樁與地錨工法等，而一般山區道路則常採用堡坎磚擋土牆或乾砌卵石擋土牆等傳統工法。此階段工程設計理念以結構抗力為主，透過擋土與坡面保護降低崩塌與侵蝕問題，奠定臺灣早期山區邊坡工程之基礎（廖瑞堂，2001）。

1980 年代後，隨著坡地社區、高山道路及山區開發案例快速增加，邊坡工程規模與複雜度亦逐漸提升，預力地錨、高強度岩栓與加勁土工法開始大量應用於高邊坡與深開挖工程。其中，地錨工法因具有可提供高抗滑力、施工彈性高及適用範圍廣等優點，逐漸成為臺灣邊坡穩定工程之重要技術。廖瑞堂等（2002）曾針對臺灣地錨工法之發展沿革與適用性進行探討，指出地錨技

術之進步與山區交通建設及大型邊坡治理需求具有密切關聯。後續廖瑞堂與楊品錚（2020）亦進一步整理臺灣地錨發展歷史與工程應用經驗，顯示地錨技術已成為臺灣邊坡工程最具代表性之工法之一。

1990 年代後，臺灣邊坡工程逐漸由「局部穩定」概念，轉向「整體邊坡治理」架構。梨山地滑、五彎仔地滑與廬山地滑等大型深層滑動案例顯示，地下水位上升與地下水壓增加往往為大型滑動之主要誘因，因此地下排水工法逐漸成為深層滑動治理之核心。大口徑集水井、水平排水井、排水廊道與地下排水系統快速發展，並逐漸建立「地下排水為主、擋土為輔」之治理理念。黃鎮臺與王文能（1997）針對梨山地滑工程地質調查與整治規劃進行案例探討，指出地下水控制對大型地滑治理具有關鍵影響。此外，林錫宏與紀宗吉（1997）亦針對廬山北坡大規模岩體滑動變形機制進行分析，說明深層滑動與地質構造之密切關聯。另一方面，林肯大郡災變事件亦使都會區坡地開發之工程地質與邊坡穩定問題受到社會高度重視（孫思優等，1998）。

1999 年九二一集集地震後，大量山區邊坡產生崩塌與順向坡滑動，使岩坡工程與地震邊坡穩定問題受到高度重視。大量崩塌案例顯示，地震作用不僅造成岩體鬆動與不連續面張裂，也可能誘發大規模順向坡滑動與落石災害。洪如江等（2000）針對草嶺順向坡滑動案例進行詳細探討，指出地質構造與地震作用對大型山崩形成之重要性。國道高速公路局北區工程處（2011）亦整理國道三號 3k+100 順向坡崩塌事故之救災與復原經驗，顯示高邊坡風險管理與災害應變已逐漸成為邊坡工程重要工作。另一方面，東部路廊蘇花公路因受地形地質脆弱及極端氣候影響，大小落石與坍方頻傳，成為交通痛點，近年落石防護工程逐漸由傳統剛性防護設施，轉以柔性防護系統為主（丘達昌與林義評，2021），例如高能量吸收型落石防護網、柔性鋼索系統與落石攔阻柵，可有效吸收落石衝擊能量並降低防護設施破

壞風險。然而對於無法改線且面臨大規模落石與坍方風險的山區交通路段，落石棚洞、明隧道與防護廊道等大型防護設施仍是降低災損的主要工程手段，而在 2024 年花蓮地震所引發的大量同震山崩的經驗也說明，上述大型遮擋構造物同時也可作為災害發生當下的緊急避災空間（王國隆等，2024）。

另一方面，2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌與堰塞湖災害後，臺灣邊坡工程理念產生重大轉變。由於極端氣候條件下，大規模崩塌可能超越傳統工程治理能力。王國隆等（2019）曾探討板岩地滑治理之挑戰，以廬山北坡為例說明大型深層滑動治理之複雜性。廖瑞堂等（2019）則以阿里山公路五彎仔崩場地為例，指出深層滑動雖為坡地重大災害，但透過長期監測、地下排水與整體治理策略，仍可有效控制與管理。此外，近年來生態工法與環境永續概念受到重視，早期大量混凝土護坡與大規模開挖工法，雖可快速穩定邊坡，但往往造成景觀衝擊與生態破壞，因此植生工程、生態護坡與自然邊坡復育等概念逐漸導入邊坡工程，希望在維持穩定之同時，也兼顧生態環境與景觀需求。

整體而言，現代臺灣邊坡工程已由「避免崩塌」之概念，逐漸轉向「風險管理」與「韌性防災」架構，並重視土地利用管理與避災策略，傳統以建造工程為主的邊坡工程，也開始配合邊坡監測技術來建立邊坡分級管理（如陳進發，2018）與預警性封路制度（如張睿明等，2024）。隨著 GIS、三維地形建模技術與 BIM 的成熟，也逐漸應用於大型邊坡工程規劃與施工管理，以提升工程整合與維護效率。

五、邊坡監測技術

承前章所述，多項調查技術經重複量測或長期布設後亦具監測功能，本章敘述時將一併涵蓋此類技術於監測面向之應用發展。1970 至 1980 年代期間，臺灣邊坡監測主要以人工觀測

為主，包括傾斜觀測管、地表位移樁、伸縮計、水位井與裂縫觀測等方法。此時期監測工作多應用於已發生滑動或具有明顯變形之邊坡，主要目的在於確認滑動面深度、地下水位變化與邊坡活動性，以作為穩定分析與整治設計之依據。由於監測設備與通訊技術尚未成熟，因此大多採定期人工量測方式進行，監測頻率較低，且難以即時反映邊坡變化情形。1980 至 1990 年代後，隨著大型地滑區治理需求增加，自動化監測技術逐漸開始導入邊坡工程。廖瑞堂等（2005）亦曾探討崩場地地下水調查方法，指出地下水變化監測對邊坡穩定分析具有重要影響。因此，部分大型山區邊坡與水庫集水區開始設置自動化水位計、傾度計與降雨站，以長期監測地下水與降雨反應。此外，資料記錄器與有線傳輸系統逐漸普及，使部分監測資料可進行半自動化蒐集與分析。然而，此時期監測系統仍多以單點量測為主，監測項目與空間範圍相對有限。

2009 年莫拉克颱風後，邊坡監測技術進入快速發展階段，尤其為因應傳統人工巡查已難以應對快速變化且大量的山區災害，政府單位開始於大型地滑區、潛在危險聚落與高風險道路邊坡建置長期監測系統，監測內容包括地表位移、地中變位、地下水位與降雨量等，以掌握邊坡活動性與地下水變化情形。加上 2000 年代後，隨著感測器、自動化設備與通訊技術快速進步，臺灣邊坡監測逐漸朝向即時化與網路化方向發展，此時期大量自動化監測站設置於高風險山區，監測資料可透過無線通訊即時回傳至監測中心，隨著大量監測資料的累積，並逐漸建立監測資料即時傳輸與警戒值管理制度，建立地滑區監測與預警架構（經濟部中央地質調查所，2021），使監測技術逐漸由單純工程量測，轉向災害預警與防災管理用途。另一方面，針對邊坡地下滑動面活動性監測，鐘志忠等（2008）曾探討孔內聲波及光學造影儀於地質調查與地下變形判釋之應用，使地下變位與滑動面調查能力進一步提升；時域反射探測法（TDR, Time Domain Reflectometry）技

術亦逐漸應用於地中變位監測，可有效掌握地下滑動面變形情形（林志平等，2020）。邊坡地表活動性監測方面，如第二章所述，UAV 空拍監測與 LiDAR 點雲分析已逐漸應用於崩塌後地形重建、落石源區監測與四維（4D）地形變遷分析。侯進雄等（2014）與謝有忠等（2016）均指出，高解析光達地形資料可有效提升崩塌地形變遷分析與監測能力；GNSS（Global Navigation Satellite System）技術亦逐漸取代早期 GPS 系統，可提供邊坡特定位置上更高精度與更穩定之長期變形監測能力；InSAR 透過 PS-InSAR 與 SBAS 等時間序列分析技術，更可掌握邊坡地表大範圍之長期活動性與地表位移速率，有望成為大型地滑區與山區長期變形監測之重要工具。

近十年間，通訊技術與感測技術快速進步，使臺灣邊坡監測逐漸由單點監測，發展為整合型智慧監測架構。LoRa、NB-IoT、4G 與 5G 等無線通訊技術，使大量感測器資料可近即時回傳至雲端平台，提升調查、監測資料整合與分析效率（魏殷哲等，2022）。定置式地電阻監測（time-lapse ERT）與地下光纖地震計（DAS）等地物技術，亦已逐漸納入大型地滑監測系統之常設項目，其中光纖感測技術具有長距離、高耐久與抗干擾等優點，可量測應變、溫度與振動變化，因此適合應用於大型邊坡與高風險地區長期監測；其他如微機電（MEMS）感測技術則使低成本、高密度之加速度與傾斜量測逐漸普及，柱狀陣列位移計（SAA）可自動量測孔內連續變形剖面；此外，微地震監測與音射技術也被應用於岩體破裂與崩塌前兆分析，以提早掌握岩體破壞行為與潛在崩塌活動（經濟部中央地質調查所，2021）。

整體而言，過去數十年間，臺灣邊坡監測技術已由早期以人工量測與局部觀測為主之傳統模式，逐步發展為結合自動化感測與無線通訊之整合型監測架構，而監測資料之應用也逐漸由單純量測與資料蒐集，轉向災害預警與風險管理。

施乃慈等（2021）即利用多種科技技術進行南橫公路邊坡變異分析與評估，顯示智慧監測與多源資料整合已逐漸成為邊坡監測重要方向。近年來，人工智慧與影像辨識技術等自動化技術亦開始導入邊坡監測工作，包含例利用深度學習分析長期監測資料，可自動辨識異常變形與潛在崩塌前兆；AI 影像辨識則可應用於裂縫監測、落石偵測與崩塌事件判識。此外，大數據分析與雲端平台之整合，在未來也預期能基於大量監測資料進行長期統計分析與風險評估。

六、未來發展與展望

6.1 邊坡調查技術

未來邊坡調查技術將朝向「高解析化」、「智慧化」與「多源整合化」方向發展。由於深層滑動與大型崩塌具有高度空間異質性與不確定性，傳統單一調查方法已難以完整掌握邊坡地下構造與活動特性。因此，衛星遙測與 InSAR 技術之進步，將更有效率地獲取大範圍山區的地形地貌；定置式地電阻監測（time-lapse ERT）、震波剖面調查（含表面波震測）、地電阻層析、微震探測、透地雷達與分散式光纖感測（DAS）、MEMS 感測與柱狀陣列位移計（SAA）等地物探勘技術，亦將更加廣泛應用於地下破碎帶、剪裂帶與地下水系統之調查。

未來將更加重視 LiDAR、UAV、點雲資料、遙測影像、地球物理探測與地下鑽探之整合應用，用以建立高解析度之三維工程地質模型，且配合無線通訊與自動化技術的成熟，調查資料有望自三維（即空間上 X、Y、Z 座標位置）提升至四維（加入時間尺度），形成反映邊坡「即時」變形行為的大型資料集，加速邊坡調查成果與力學分析、工程整治和監測預警的整合應用。

另一方面，人工智慧與自動化影像判釋技術之快速發展，也將逐漸改變未來邊坡調查模式。透過深度學習（Deep Learning）與語意分割技術，可自動辨識崩塌地形、岩體裂隙、落石源

區與地形變遷區域，大幅降低人工判釋時間。未來 AI 技術亦可能進一步結合無人機與即時影像分析，使邊坡調查逐漸朝向智慧化、自動化與即時化方向發展。針對邊坡地質模型的建置，未來亦將更加重視不確定性分析與機率式地質建模，逐步導入 Random Field、Bayesian 更新與機率式分析方法，以提升後續大型崩塌與深層滑動分析之可靠性。

6.2 邊坡力學分析方法

未來邊坡穩定分析將逐步發展為「多物理耦合分析」、「高解析動態災害模擬」與「物理導向 AI 整合分析」架構，並更加重視地下水、地震作用、材料劣化、大變形行為與複合災害之整合分析。

在多物理耦合分析方面，未來水－力（HM）與水－力－化（HMC）耦合分析將逐漸普及。尤其在高山深層崩塌、長期降雨與地震作用環境下，地下水演化、岩體劣化與應力變化對邊坡穩定具有重要影響，因此未來分析將更加重視地下水流、滲流演化與材料劣化行為之長期影響。

另一方面，大型山崩與岩屑崩滑問題，將持續推動 DEM、DDA、MPM 與 FDEM 等大變形與非連續體分析方法之發展。未來分析不再僅探討「邊坡是否失穩」，而是進一步模擬崩塌啟動、運移、碰撞、堆積與河道堵塞等完整災害過程。特別是在高山河谷地區，未來將更加重視山崩堆積造成之堰塞湖形成、潰決洪水與下游淹水衝擊等複合災害分析，並逐步結合水利工程、水文分析與河道演變模擬，以建立跨領域之災害風險評估架構。此外，高效能運算（HPC）與 GPU 平行運算技術之進步，也將大幅提升大型三維模擬能力。未來甚至可能建立近即時崩塌模擬系統，於豪雨或地震發生後快速預估崩塌範圍、運移路徑與潛在影響區域，以作為防災決策與緊急應變之依據。

近年人工智慧技術快速發展，也將逐漸改變邊坡分析模式。Machine Learning、Deep

Learning 與 Physics-Informed Neural Networks（PINNs）等方法，已開始應用於山崩潛勢分析、降雨促崩模型與數值代理模型（Surrogate Models）。未來「物理－AI 混合分析架構」將成為重要研究方向，以兼顧分析效率、物理可信度與可解釋性。此外，Bayesian 分析、Monte Carlo 模擬與機率式風險分析，也將更加廣泛應用於可靠度分析與風險量化評估。

6.3 邊坡工程技術

未來邊坡工程技術將朝向「韌性化」、「低碳化」、「性能導向設計」與「智慧化」方向發展。過去邊坡工程主要以提高安全係數與防止崩塌為目標，但在極端氣候與大型災害頻率增加之背景下，未來工程理念的核心將由「完全避免災害發生」轉向「降低災害風險」與「提升系統韌性」。

在深層滑動治理方面，地下排水仍將是大型地滑治理之核心技術。未來將更加重視地下水長期演化、地下排水系統效能與地下水補注區控制，而不再僅依賴單純抗滑結構。此外，大口徑集水井、排水廊道與深層水平排水工法，也將持續朝向高效率與長壽命方向發展。在落石與崩塌防護方面，未來防護設施結構將逐漸整合智慧型告警系統形成一主動式防災設施，防護設施設計也將由傳統靜態外力設計，逐步轉向動態衝擊分析，且應跳脫單一安全係數之框架，在極端氣候條件下基於現地調查與長期監測資料，建立落石風險重現期（如林承翰等，2025），據以轉向性能導向設計。

未來臺灣邊坡工程亦將更加重視複合災害與國土韌性。例如大型山崩可能同時造成道路中斷、河道堵塞、堰塞湖形成與下游洪水災害，因此未來邊坡工程將更加重視與水利工程、交通工程、防災規劃與聚落管理之跨域整合，以提升整體國土防災與災後復原能力。智慧工程與數位化施工管理亦將逐漸應用於大型邊坡工程。BIM（Building Information Modeling）、GIS 與數位孿

生 (Digital Twin) 技術，可整合調查、設計、施工與監測資訊，建立全生命週期管理架構。另一方面，無人機巡檢、自動化量測與智慧施工管理技術，也將逐漸應用於高風險山區工程，以降低施工風險並提升維護效率。

此外，未來亦將更加重視結構工程與材料科技之整合應用，例如高延性纖維補強材料、FRP 複合材料、自癒混凝土與高韌性低碳材料等新型複合材料，將逐漸應用於邊坡補強、防護結構與耐震設計，以提升工程耐久性與災後韌性。另一方面，生態工法與低碳工程亦是邊坡工程之重要方向。植生工程、生態護坡、自然邊坡復育與低衝擊開發 (LID) 等概念，將更加廣泛應用於山區工程。未來低碳噴凝土、高延性纖維補強材料與可回收防護系統等技術，也可能逐漸普及。

6.4 邊坡監測技術

未來邊坡監測技術將朝向「全天候」、「近即時」、「多源整合」與「智慧預警」方向發展。隨著感測技術、無線通訊與雲端平台快速進步，未來監測系統將不再只是單純資料蒐集工具，而是智慧防災決策系統之核心。

未來邊坡監測將更加重視四維 (4D) 資料分析的整合應用，例如透過時間尺度上近乎連續的 LiDAR 點雲資料，可分析崩塌地形演變、河道侵蝕與落石源區變化，用以建立山區邊坡之長期演化模式，從而定義考量災害風險重現期之預警門檻。IoT、5G、GNSS 與分散式光纖感測技術之進步，也將使大量感測器資料可近即時回傳與整合分析，逐步建立整合降雨、地下水、位移、地震、交通與水位資訊之智慧監測平台。此外，人工智慧與大數據分析將大幅提升監測資料之應用能力。透過深度學習與異常辨識技術，可自動分析長期監測資料，判斷異常變形與潛在崩塌前兆，並降低傳統預警系統誤報率。AI 亦可應用於落石偵測、裂縫辨識與崩塌事件分類，以提升監測效率與災害辨識能力。

未來邊坡監測與分析亦將逐漸朝向「數位孿生 (Digital Twin)」方向發展。透過即時監測資料持續更新數值模型，可建立同步反映現地狀態之虛擬邊坡模型。例如大型地滑區未來可能建立專屬數位孿生系統，即時模擬降雨入滲、地下水演化與穩定性變化，以作為防災管理與工程決策之依據。進一步，智慧監測系統亦將更加重視與防災決策系統整合。例如未來監測系統可直接連結交通號誌、道路封閉系統、下游警報與避難系統，於崩塌風險升高或堰塞湖潰決風險增加時，自動啟動警戒與疏散措施，以提升山區道路與聚落之安全性。

七、結語

適逢大地工程技師公會成立三十周年，感謝《大地技師期刊》專刊邀稿，使本文得以回顧臺灣邊坡工程數十年來之發展歷程與技術成果。整體而言，臺灣邊坡工程在邊坡調查、穩定分析、工程治理與監測預警等方面，均已累積豐富經驗並獲得顯著進展。相關技術已由早期以現地踏勘、經驗判釋與安全係數分析為主之傳統模式，逐步發展為結合遙測、地球物理探測、高解析數值模擬、自動化監測與人工智慧分析之跨領域整合架構。現今之調查與監測技術，已可於多元時間與空間尺度下，掌握邊坡變形、地下水分佈、滑動面位置、崩塌運移與堆積行為，並配合高解析數值分析方法，進一步推估崩塌速度、運移距離、衝擊範圍與堆積厚度等重要災害資訊，作為邊坡治理與防災決策之重要依據，《大地技師期刊》第 31 期亦收錄數篇臺灣邊坡工程的技術發展現狀，有興趣的讀者可搭配本文一併參考閱讀。

整體而言，隨著大規模深層崩塌、極端降雨、同震山崩與複合災害風險日益增加，未來臺灣邊坡工程將全面朝向智慧化、即時化、高精度化與韌性防災方向發展。在邊坡調查方面，LiDAR、InSAR、UAV、近地表地球物理探測與 AI 影像辨識等技術之整合，將有助於建立具時

空演化能力之高解析三維地質模型；在力學分析方面，多物理耦合分析、大變形動態模擬、高效能運算 (HPC) 與物理導向 AI 模型 (PINNs) 之發展，將可更完整模擬崩塌啟動、運移、堆積與河道堵塞等災害過程，並進一步結合水利工程進行堰塞湖與複合災害分析。在工程治理方面，未來將更加重視韌性設計、低碳永續與智慧施工管理，並逐步導入高延性材料、複合材料與性能導向設計概念，以提升邊坡工程之耐久性與災後復原能力。另一方面，邊坡監測技術亦將朝向 IoT、5G、GNSS、分散式光纖感測與數位孿生 (Digital Twin) 整合之智慧監測架構發展，透過即時分析、自動預警與智慧決策，提升山區道路、聚落與重要基礎設施之安全性。

展望未來，臺灣邊坡工程界之重要目標，將是針對高山地區、大規模崩塌潛勢區及高風險交通路段，充分掌握其地質構造、地下水演化與潛在破壞機制，並結合調查、分析、治理與監測技術，建立具高山、高降雨、高地震與複合災害環境特色之新世代智慧邊坡防災體系，以提升國土防災韌性與永續發展能力。

參考文獻

1. 王國隆、柯明淳、林聖琪、柯永彥、林承翰、周昕成、郭觀豪、林于超、陳俊樺、楊哲銘、吳重君、詹家賓、林俊廷 (2024)，「2024 年 0403 花蓮地震地工災害初步調查報告」，《地工技術》，第 180，第 91 – 102。
2. 王國隆、陳昭維、呂家豪、汪俊彥、林錫宏、紀宗吉 (2019)，「板岩地滑治理的挑戰—以廬山北坡為例」，《地工技術》，第 167 期，第 61 – 68 頁。
3. 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」，《大地技師期刊》，第 22 期，第 64 – 73 頁。
4. 交通部公路總局第五區養護工程處、青山工程顧問股份有限公司 (2006)，「台 18 線五彎仔地滑區調查、整治規劃及安全評估—地質調查總

報告」，共 53 頁。

5. 吳建宏、陳春華、小山倫史、西山哲、大西有三 (2011)，「非連續變形分析法模擬地震地滑應用案例」，《地工技術》，第 129 期，第 89 – 96 頁。
6. 宋家宇、陳昭維、呂家豪、邱奕峰、白朝金 (2022)，「地電阻探測於崩塌地地下水調查之應用」，《地工技術》，第 171 期，第 29 – 38 頁。
7. 李錫堤、費立沅 (2011)，「山崩災害分析與區域製圖」，《地工技術》，第 129 期，第 67 – 76 頁。
8. 李錫堤、黃健政 (2005)，「區域性山坡穩定分析之回顧與展望」，《地工技術》，第 104 期，第 33 – 52 頁。
9. 林志平、吳采容、吳柏林、劉興昌、魏殷哲、林俊宏 (2020)，「近地表地球物理方法之簡介、挑戰及地工應用的調適」，《地工技術》，第 165 期，第 7 – 18 頁。
10. 林志平、魏殷哲、王凱、林婉婷、吳采容、鍾志忠 (2020)，「地工電磁波導監測技術之新近發展」，《地工技術》，第 166 期，第 25 – 34 頁。
11. 林承翰、林邵儒、張育瑄、林銘郎 (2022)，「節理岩坡之楔型破壞調查與分析案例介紹」，《地工技術》，第 173 期，第 7 – 16 頁。
12. 林承翰、郭觀豪、林于超、周昕成、陳俊樺、邱家吉、翁孟嘉、林銘郎 (2025)，「0403 花蓮地震後落石災害危害度評估—以臺鐵北迴線 K51 路段為例」，《地工技術》，第 184 期，第 83 – 92 頁。
13. 林俊廷、王國隆 (2019)，「運用差分干涉合成孔徑雷達技術 (DInSAR) 與模糊歸屬度分析邊坡潛在滑動範圍」，《地工技術》，第 161 期，第 71 – 80 頁。
14. 林美玲、黃紀禎、高贈智、王國隆 (2009)，「集集地震邊坡滑動門檻條件」，《地工技術》，第 121 期，第 5 – 14 頁。
15. 林真在、林四川 (1997)，「坍方地質調查案例介紹及探討」，《地工技術》，第 64 期，第 51 – 58 頁。
16. 林銘郎、陳樹群、游繁結 (2004)，「臺灣山崩

- 與地滑調查技術之發展」，《地工技術》，第 103 期，第 5–18 頁。
17. 林錫宏、紀宗吉（1997），「廬山溫泉北坡的大規模岩體滑動變形機制與地質模式探討」，《經濟部中央地質調查所彙刊》，第 25 號，第 1–26 頁。
 18. 邱家宏、李彪（2020），「應用 LiDAR 數值地形模型精進工程地質圖一以沉積岩區為例」，《大地技師期刊》，第 20 期，第 66–71 頁。
 19. 侯進雄、費力沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉（2014），「空載光達數值地形產製與地質災害的應用」，《航測及遙測學刊》，第 18 卷，第 2 期，第 93–108 頁。
 20. 侯進雄、費力沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉（2014），「空載光達數值地形產製與地質災害的應用」，《航測及遙測學刊》，第 18 卷，第 2 期，第 93–108 頁。
 21. 拱祥生、林宏達、吳宏偉（2003），「不飽和土壤邊坡基質吸力量測及其在邊坡穩定分析之應用」，《地工技術》，第 96 期，第 27–42 頁。
 22. 施乃慈、高玉惠、陳怡頻、林志交、王慶雄、陳正偉（2021），「科技技術應用於公路邊坡變異分析評估一以台 20 線南橫公路邊坡為例」，《大地技師期刊》，第 22 期，第 52–63 頁。
 23. 洪如江、李錫堤、林美聆、林銘郎、鄭富書、陳正興（2000），「天塹可以飛渡、崩山足以斷流（草嶺順向坡滑動）」，《地工技術》，第 77 期，第 5–18 頁。
 24. 洪靜、劉至軒、林承翰（2019），「應用有限離散元素法於分析大規模同震山崩」，《地工技術》，第 161 期，第 45–52 頁。
 25. 唐昭榮、胡植慶、羅佳明、林銘郎（2009），「邊變式山崩之 PFC3D 模擬初探一以草嶺與小林村為例」，《地工技術》，第 122 期，第 143–152 頁。
 26. 孫思優、黃進淇、許永松、陳家駿、陳國華、傅建華、王文祥（1998），「林肯大郡災變工程地質調查案例探討」，《地工技術》，第 68 期，第 19–28 頁。
 27. 翁孟嘉、李晉泓、彭嘉政、郭昱君、張荐宇、李沅昶、鄭富書、李宏輝（2021），「板岩葉理之非線性破壞準則及其邊坡穩定分析應用」，《地工技術》，第 167 期，第 51–60 頁。
 28. 翁孟嘉、許世孟、顧承宇、冀樹勇、高憲彰（2006），「音射式孔內探測儀於地質弱面調查之應用」，2006 岩盤工程研討會論文集，第 569–578 頁。
 29. 國道高速公路局北區工程處（2011），「國道 3 號 3k+100 崩塌事件動員救災與復原紀錄」。
 30. 張文城、翁作新（1986），「楔形岩塊邊坡穩定之電腦分析」，《地工技術》，第 15 期，第 37–45 頁。
 31. 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》，第 181 期，第 75–82 頁。
 32. 莊承穎、陳振宇、詹婉妤（2024），「應用地文脆弱度建立集水區不安定土砂潛勢分級」，《中華水土保持學報》，第 55 卷，第 3 期，第 122–130 頁。
 33. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯（2016），「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (1/2)」，交通部運輸研究所，共 165 頁。
 34. 陳昭維、高振誠、鄒鄭翰、呂家豪、汪俊彥、翁孟嘉（2023），「地工 40 紀念專刊～大地工程技術發展一邊坡工程技術發展」，《地工技術》，第 3 冊，第 51–78 頁。
 35. 陳進發（2018），「落石災害評分系統於省道邊坡分級管理之應用」，《臺灣公路工程》，第 10 卷，第 44 期，第 2–19 頁。
 36. 陳進發、林意晴、陳文信（2020），「蘇花公路因雨致災崩塌機率模式之建立與防災應用」，《地工技術》，第 166 期，第 55–66 頁。
 37. 陳樹群、王鑫（2012），「臺灣坡地災害調查與監測技術之發展」，《工程環境會刊》，第 31 期，第 1–15 頁。
 38. 黃安斌、何彥德、王建智、吳崑璋（2016），「光纖光柵在地工安全監測之應用」，《土木水利》，第 43 卷，第 1 期，第 48–52 頁。
 39. 黃南輝、黃建忠、陳宏宇、李錫堤、潘國樑（2002），「環境地質敏感度分析自動化系統開發」，《地工技術》，第 90 期，第 5–14 頁。
 40. 黃韋凱、魏倫璋、李璟芳、周姿良、楊丞勳、陳世元、林紹儒、林銘郎（2019），「手持式光達應用於海蝕洞岩體不連續面位態量測之初探一以龍峒海蝕洞為例」，《地工技術》，第 159 期，第 13–20 頁。
 41. 黃景川（1993），「加勁邊坡穩定分析」，《地工技術》，第 43 期，第 60–69 頁。
 42. 黃景川、蔡政晟、劉昭宏（1999），「不對稱邊坡之三度空間破壞自動化分析」，《地工技術》，第 73 期，第 101–112 頁。
 43. 黃鎮臺、王文能（1997），「梨山地滑工程地質調查及整治規劃案例探討」，《地工技術》，第 64 期，第 33–50 頁。
 44. 黃鎮臺、王文能（1997），「梨山地滑工程地質調查及整治規劃案例探討」，《地工技術》，第 64 期，第 33–50 頁。
 45. 楊國鑫、吳昱葵、鄧福宸、陳昭維、陳仁達（2020），「物質點法分析邊坡崩塌過程與運動機制一以貓空邊坡為例」，《地工技術》，第 166 期，第 79–92 頁。
 46. 楊潔豪（1989），「地球物理探勘技術簡介」，《地工技術》，第 27 期，第 6–14 頁。
 47. 楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻（2020），「地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討」，《中華水土保持學報》，第 45 卷，第 1 期，第 1–18 頁。
 48. 經濟部中央地質調查所（2021），「山崩調查觀測技術精進與應用」。
 49. 董倫道、楊潔豪（1998），「地球物理新技術在大地工程之應用」，《地工技術》，第 69 期，第 5–14 頁。
 50. 廖瑞堂（2001），《山坡地護坡工程設計》，科技圖書出版。
 51. 廖瑞堂、吳佳陵、陳志南（2005），「崩塌地之地下水調查方法探討」，《地工技術》，第 104 期，第 75–86 頁。
 52. 廖瑞堂、陳昭維、高振誠、邱昶瀚、謝哲雄、陳錫恩、郭清水、黃秋揚（2019），「崩塌地深層滑動是坡地的重大疾病，但不是絕症一以阿里山公路五彎仔崩塌地為例」，《地工技術》，第 161 期，第 7–18 頁。
 53. 廖瑞堂、陳昭維、楊品錚（2002），「地錨在台灣之邊坡穩定發展沿革及適用性探討」，《地工技術》，第 94 期，第 105–116 頁。
 54. 廖瑞堂、楊品錚（2020），「大地工程發展史一臺灣地錨的發展史」，《地工技術》，第 165 期，第 111–122 頁。
 55. 潘國樑（1984），「遙測一工程地質之調查工具」，《遙感探測》，第 4 期，第 141–151 頁。
 56. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅（2009），「莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例」，《地工技術》，第 122 期，第 133–142 頁。
 57. 賴典章（1984），「立體投影圖在岩坡工程上的應用」，《地工技術》，第 7 期，第 74–79 頁。
 58. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋（2016），「地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋」，《航測及遙測學刊》，第 20 卷，第 4 期，第 263–277 頁。
 59. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋（2016），「地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋」，《航測及遙測學刊》，第 20 卷，第 4 期，第 263–277 頁。
 60. 魏殷哲、林志平、趙韋安、康耿豪、戴東霖（2022），「開源物聯網於智慧邊坡調查整合應用」，《地工技術》，第 173 期，第 19–25 頁。
 61. 譚志豪、呂昱達、冀樹勇、費立沅（2011），「集水區降雨促崩潛勢分析」，《地工技術》，第 129 期，第 77–88 頁。
 62. 鍾志忠、林志平、廖志中、唐禎國（2008），「孔內聲波及光學造影儀於地質調查之應用」，《地工技術》，第 115 期，第 29–38 頁。

近三十年間臺灣基樁工程在工程實務與學術研究上重要發展與未來展望

張德文 淡江大學土木工程學系 / 教授、大地技師

徐明志 富國技術工程股份有限公司 / 總經理、大地技師

施志鴻 同豐營造工程股份有限公司 / 副總、大地技師

邱俊翔 臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

張有恒 台安工程技術顧問股份有限公司 / 副董事長

周永川 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 協理

江政恩 中興工程顧問股份有限公司 / 協理、大地技師

曾孝欽 亞新工程顧問股份有限公司 / 專案副理、大地技師

鄭世豪 臺灣科技大學臺灣建築科技中心 / 專案助理教授

摘要

本文旨在回顧整理臺灣近三十年有關基樁工程的技術應用和學術研究發展狀態，文中以基樁施工技術方法的演進為主軸，說明預鑄樁、場鑄樁，乃至海域基樁施工技術的進步與突破，同時簡要介紹各式檢測與監測技術的應用；學術研究內容則蒐集樁載重試驗數據演繹、數值分析評估應用、以及樁基礎規範修訂與增補之相關論文資料，說明相關研究貢獻；文末提出相關技術應用之未來展望，供各界人士參考。

一、前言

基樁工程技術在臺灣的大量應用可追溯至 1970 年代十大建設，隨後廣泛地用於各項公共工程與民生工程中，為我國大地工程中之重要技術。鑒於大地工程公會創建三十年，本文擬整理樁基工程技術近期發展，以基樁種類和施工技術演變為主軸，說明近各項技術相關案例，同時也闡述不同施工技術中所引用的各項檢測技術和監測技術作法；在學術研究方面，本文以基樁載重試驗的數據演繹為主，簡述代表性研究論點，同時整理和檢測和監測技術有關的學研發展；在基樁與樁基礎變形分析部分，論文介紹從簡易分析

到多維度數值方法的發展，並討論如何將相關分析乃至試驗數據成果應用於規範修編與制定上。最後由施工、檢測、監測、分析和規範等提供未來發展的可能方向。

二、基樁施工技術之發展與應用

2.1 預力混凝土樁

回顧 1990 年代，當時台灣經濟快速成長，各地重大工程建設蓬勃發展，工業區、發電廠、高速公路等重大工程遍地開花，對基礎工程之需求日漸提升，於當時的時空背景、技術、機具，

並不如現今成熟且多樣化，因此打擊式基樁這種具備經濟、快速且技術成熟之基方式，使其成為最為普遍的基樁工法，其中又以預力混凝土樁（PC 樁）最為大宗。PC 樁製造係於專業工廠裡完成，經鋼筋籠組立、設置端版施加預力、混凝土投料、高壓蒸氣養護等步驟後，送至現場以柴油氣動、振動、液壓或重力錘方式反覆敲擊或振動，以將樁身貫入地盤之方式完成基礎，詳可參閱胡邵敏（2009）。

打擊式基樁大量應用於中大型廠房建物、橋梁基礎、碼頭等設施，其樁徑多為直徑小於 1 m 的小口徑基樁，於台灣南部火力發電廠、中鋼煉鋼廠、台塑六輕、台北港廠房（圖 1）等案場，皆有使用打擊式 PC 樁之案例（胡邵敏，2004）；於塔山電廠碼頭設施基礎工程有使用鋼管樁配合鑿擊鑽掘工法，成功將基樁打設於花崗岩之案例（杜振宗等，2003），其他亦有使用木樁、鋼管樁、H 型鋼樁或雷蒙樁打設之案例，係早期大型建設常見的基礎型式，相關施工、品質管理與常見問題可參閱林永光等（1995）。

隨都市發展日漸完善，土地日益稀缺，傳統大型打樁設備難以進入狹小工程基地施作，打樁施工所造成的振動與噪音亦對都市生活品質產生衝擊，引致工程與民生之紛擾不斷，在機具與環境的雙重打擊下，植入式基樁工法從日本被引入國內。植入式基樁起源可參考王傳奇等（1995），於日本 1960 年代，因應環境保護相關



圖 1 台北港鋼鐵廠房基礎—打擊式 PC 樁施工（曾孝欽攝）

法令，日本工程界發展出植入式基樁，其施工低公害之特性，使其逐漸取代打擊式基樁，成為基樁工程較主流施工方式，打擊式基樁僅在偏遠、腹地廣大、低施工公害之工程現場使用。

植入樁之施工與案例參考王傳奇等（1995），施工方式可分為預鑽孔式、中掘式、旋轉壓入式等方式將預鑄樁植入，同時配合底部注漿強化、機械式擴座注漿強化、高壓噴射灌漿擴座、最後打擊等樁底處理，使基樁承載力符合設計要求，於高雄大林埔與林園地區之石化廠、再生水廠、大漢溪與新店溪之防洪工程等工程皆有使用案例。

設計作業方面，早期基樁檢核要點包含承載力、拉拔力、沉陷量等，其中以承載力最為重要，實務上多透過計算或現地樁載重試驗求取基樁承載力，段紹緯等（1991）於南部、中部發電廠案例中，以電子錐推估打擊式 PC 樁承載力，為求取基樁承載力提供了另一種方法。1999 年集集地震發生後，工程界開始大量關注耐震設計與土壤液化問題，樁基礎檢核逐漸導入地震反應、側向位移與樁土互制等設計觀念，時至今日，基樁設計已逐漸導向性能設計，使基樁設計於不同載重情況下能夠安全且兼具經濟性。

隨時代更迭，機具與技術有所進步，場鑄樁之品質與樁底處理較早期早已今非昔比，現今工程現場以鑽掘樁、壁樁等為工程主流。綜觀基樁工程於三十年間之演進，早期樁基礎設計追求「快速與經濟」，以應對重大建設發展需求，PC 樁之優勢契合，故成為市場主流；後因震災與都市化之因素，樁基礎設計考量更加重視「安全、耐震與環境友善」，場鑄樁、植入樁等施工公害較小工法逐漸取代打擊式 PC 樁，現今場鑄樁品質可有效控制，進而成為樁基礎之大宗；如今，樁基礎設計考量將「性能設計」納入考量，後續隨著學術研究日漸完善，基樁工程亦將持續精進，以因應未來複雜的都市建設需求。

2.2 鑽掘場鑄混凝土樁

現代動力機械進步帶動場鑄樁鑽挖技術發展，上個世紀初即有反循環鑽掘、旋挖土鑽、套管鑽掘等施工法應用於基礎工程。

反循環鑽掘係利用轉盤帶動空心鑽桿與鑽頭，將地層中土岩體與穩定液混合成泥水或切削成岩屑，並經空心鑽桿吸出沉澱後將泥砂棄運。台灣在 1960 年代引進反循環設備使用於台北大直橋、華江橋等樁基礎（林永光等，1987；陳泊鈞等，2025）；而 1970 年代橋梁基礎有新生北路高架橋、文昌橋、永福橋等案採用，建案基礎則有環亞大樓採用。1980 年代反循環樁大量使用，橋梁有迪化橋、永福橋、重陽橋、中興橋等；建案基礎有世界貿易中心國際貿易大樓、中正紀念公園二期工程、國家音樂廳及國家戲劇院等；此年代末開始興建的超高層建築新光站前大樓，建物基礎採深達 50 m 進入景美礫石層的大尺寸反循環樁（林三賢和廖振程，2019；何樹根，2019；張清森和林景文，1984）。

因 1980 年代施工業者回饋帶動機具性能大幅進步，國內機械廠將桁架、轉盤、離心泵浦與柴油動力等機械元件附加於平底或履帶底座，組裝成標稱排水管徑 12 吋高效排泥之 S-500 機型；1986 年為再增效率與吸取大顆礫石訂製標稱排水管徑 14 英吋平底式 S-600 機型，1989 年履帶式 S-600 機型問世，至今國內廠商仍多採此類台製機型（圖 2；施志鴻，2023）。早年反循



圖 2 履帶式 S-600 反循環機施工（同豐營造提供）

環鑽掘常採皂土穩定液，國內基礎業者於 1992 年始使用主要成分為聚丙烯醯胺之高分子穩定液並獲良好品質（盧怡志，2023）。高效抽泥水反循環鑽機搭配泥砂可快速沉澱之高分子穩定液，使得水中混凝土澆置可靠度與鑽掘速率均大幅提升。1998 年，臺北國際金融中心案（今稱「台北 101」）開始施作基樁，隔年 7 月施工完成，其塔樓由 380 支直徑 1.5 m 之群樁作為超高層建築基礎，其樁深 61.6 m 至 80.6 m，並貫入砂頁岩最深達 30 m，大部分樁採反循環工法完成（陳斗生，2004）。

旋挖土鑽係以旋鑽機轉盤帶動延伸鑽桿，其底部具羽翼之鑽掘桶切削地層並使土岩碎屑進入桶內及取出。1980 年代引進施作北投焚化廠樁基礎（黃俊鴻，2019），在 1990 年代國內較小尺寸基樁或擋土排樁多有使用。其藉桁架及鋼索快速升降鑽桿，在黏土、砂土、礫石或軟岩等地層中鑽掘效率均佳，然因伸縮鑽桿延伸後勁度不足、鑽桿接合處誤差，在遭遇傾斜或堅硬岩盤或岩塊時鑽掘垂直精度較差。部分旋鑽機型可裝置連接器驅動套管下壓，或選配搖管機驅動套管，除可為易坍地層之孔壁保護，亦可改善垂直精度。

早年深度淺或直徑小之基樁，業者常用振動夾將套管打入作為孔壁保護；但較大較深基樁，或者需貫入岩盤、大岩塊或礫石等堅硬地層，則需藉套管機作為鑽掘設備。除前述附掛套管連接器之旋鑽機外，有引進專以帶動套管搖動或轉動之搖管機或全迴機作為套管機。「全套管工法」指基樁全部鑽挖深度均採具切削齒與套管銜接、可重複使用之圓形鋼套管（制式套管）貫入地層並作為孔壁保護，管內土方、岩體或泥水可用錘式抓斗（俗稱鯊魚頭）、取泥水桶、伸縮鑽桿附掛取土桶或螺旋鑽等取出。制式套管不僅切削地層亦作為孔壁保護，在混凝土具良好流動性時須及時取出，故在樁體澆置時需先舉昇部分套管再續行澆置。一般而言，全套管工法因孔壁有套管保護而不需穩定液，但為避免鑽至砂層後

因套管內外水頭差引起砂湧，必要時可於套管內補水藉以提高水壓。1984 年台北榮總醫療大樓案用義製旋鑽機帶動直徑 1 m 套管施作擋土排樁；1988 年引進德製旋鑽機附掛短軸搖管機施作通霄電廠之全套管樁（林三賢等，2019）。1990 年代施作的北二高碧潭橋係採樁徑 2 m 之全套管樁，樁長平均 37 m，施工方式兼採兩種：(1) 旋鑽機配合延伸鑽桿及鑽掘桶與 (2) 搖管機配合錘式抓斗（樊成，1995）。此時期搖管機配合錘式抓斗之全套管機組，由於適合台灣本島各類地層條件而日漸增加。

在 2000 年代初期大跨度跨河橋梁構造與 921 強震後耐震設計需求、極端氣候河川沖刷、施工安全與可靠等因素驅動下而有大尺寸場鑄樁之設計需求，其帶動搖管機、錘式抓斗與制式套管等設備製造本土化，相關維修與零件備品供應鏈發展出規模經濟，因工法適用性高且成本降低使搖管機組大量被採用，此時期業界亦開始在大型橋梁與建築案採直徑 2.5 m 與 3 m 之套管鑽掘，臺 64 線八里新店線（二重疏洪道南岸）大量採直徑 2.5 m 全套管樁，最深達 101 m（陳泊鈞等，2025）；2006 年臺北捷運 CK570G 標為移除既有壁樁始有直徑 3 m 制式套管之製作，之後直徑 2.5 m 與 3 m 之大尺寸套管鑽掘樁常應用於都會區之逆打建案。相反地，因有國內旋鑽機業者退出市場或策略轉進鄰國使設備損壞維修困難，旋挖土鑽工法則較少採用。

沉積砂土或黏土地層為主之台北、高雄、台南等都會區，2000 年代初期之建築樁基礎施工仍普遍使用反循環鑽掘；而台灣高鐵在嘉南平原與高雄路段之高架橋或站體建築基礎亦多採用。然而，反循環鑽掘抽出沉澱後之廢土，因其含水量高常致直接棄土困難且成本高，在遭遇大礫石、卵石、岩塊地層時容易異物卡管或孔壁坍塌，近年多數橋梁港灣等公共工程常採較能適合各類地層之全套管樁；惟在都會區具深開挖且地下室採逆打工法之建築案，因基樁施作時需固定逆打鋼柱而常採與連續壁相同挖掘設備之壁樁設

計並施作，或以圓形油壓抓斗施作大尺寸圓樁取代，近二十年來反循環機組及專業技術人力正逐漸減少。2009 年曾對國內套管機設備數量進行訪查（何泰源等，2011），可知當時搖管機已達 90 組，全迴機亦達 20 組，大部分機組可施作樁徑達 2 m，5 組可達 3 m。淡江大橋主橋塔基樁是近年大尺寸深樁施作代表，其位於淡水河口深槽區，主橋塔基礎有 58 支直徑 2.5 m、實樁長 65 m，其施工場地採鋼管樁圍堰於背側止水灌漿後抽乾圍堰內河水並填土，再進行全套管樁施工，套管鑽挖至樁底，其深達 85 m（李榮瑞和江政恩，2022；圖 3）。近年旋挖土鑽工法在亞太鄰近國家大量使用，大廠亦就近建廠組裝旋鑽機並打造零件供應鏈，大尺寸樁已普遍運用，其樁徑可達 2.5 m 以上。2018 年後，國內業者陸續引進並投入大型建案與捷運站體基礎施工（圖 4）。

另外，海上深水環境施作場鑄樁以金門大橋深槽區為代表，樁徑 2.5 m 並貫入花崗岩之堅硬岩盤，採用複合工法，鑽挖優先使用錘式抓斗、三翼鑽頭等鑽挖，遭遇中度至輕度風化岩盤或新鮮岩體時則改以多個鑲嵌碳化鎢硬質合金滾輪鑽齒附掛於反循環平底鑽頭進行岩盤切削（陳泊鈞等，2025；陳聰海等，2025），該工程於 2018 年引進韓製反循環機組，其轉盤可安裝於套管上並與動力單元分離以適合海上鑽掘作業（圖 5）。



圖 3 淡江大橋主橋塔之全套管樁施工（江政恩攝）

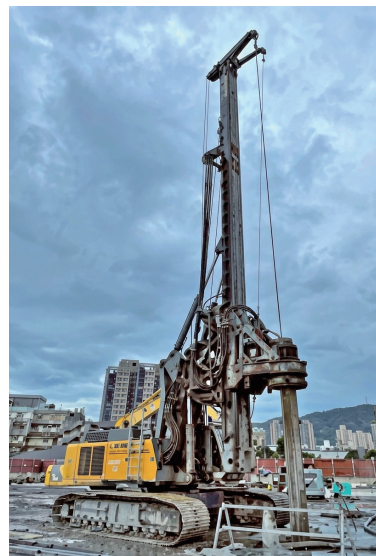


圖 4 旋鑽機施工 (同豐營造提供)



圖 5 分離式反循環機 (吳添貴攝)



圖 6 雙滾輪鑽掘機 (同豐營造提供)

壁樁 (或稱壁式基樁、矩形樁) 係指採連續壁挖掘機具施工，形狀為單一矩形單元或多個矩形單元組成者 (胡邵敏，2004)。1985 年台北市仁愛路國泰人壽大樓，地下開挖約 21.8 m，其樁基礎首創 H 型壁樁；1990 年高雄 85 大樓採「版狀摩擦樁」結合地中連續壁與筏基形成框格式基礎；1999 年台北市京華城購物中心，地下開挖 7 層約 32.5 m，基礎工程除採厚 1.5 m 連續壁與樁徑 2.4 ~ 3.0 m 反循環樁，另在球體結構下方採四支巨型柱，而支撐巨型柱之樁基礎則以三道壁厚 1.5 m、深達 82 m 之壁樁並排組合 (俞清瀚等，2013)。國道三號高屏溪斜張橋之主橋塔與 P1 橋台等兩處，採隔牆箱壁式基礎，壁厚 1.2 m，深度 37 m，19 m × 15.8 m 閉合箱，箱內尚有三道隔牆 (凌凱，1999)。國內早期使用機械式抓斗，1980 年代大量引進日製 MHL 系列油壓抓斗成為連續壁槽溝挖掘主要設備，其適合深度 55 m 以內、厚 0.5 至 1.5 m、一般砂土或黏土地層掘削，但是遭遇完整岩盤、緊密礫石、較大崩積岩塊等地層時效率極差，業者常輔以螺旋鑽、反循環或套管鑽掘等引孔後再挖掘，惟槽溝開挖放置時間較長、穩定液不易控制或遭遇地層因素可能造成大規模坍塌；2000 年後有業者改用國內自行製造之抓斗，可挖掘深達 80 m。因挖掘

深度限制與入岩困難問題因國內業者自製抓斗改善，且高層建築荷重增加、地下室逆打施作需單柱單樁並置入鋼柱，故壁樁大量運用於北高都會區建築工程。高雄遠雄 THE ONE 採用壁厚 1.8 m、深度 75 m，寬度 5.5 ~ 13 m，置逆打柱之壁樁 (何樹根等，2023)。另外，早年在高雄美麗島站連續壁施工即有採反循環抽取泥水之雙滾輪鑽掘機，2024 年業者引進新型雙滾輪鑽掘機以克服岩盤地層之施工困難 (圖 6)。

由於場鑄基樁施工不可避免擾動及造成樁底地層解壓，而且有孔底沉泥較難清除乾淨問題，實務上常於場鑄基樁成樁後通過預埋在樁身的灌漿管與裝置，利用壓力將固結的漿液注入樁底藉以提高樁底承载力或減少基樁的沉陷量。國內工程較常使用之樁底灌漿工法包括 U 型管、Flat Jack 及樁底高壓沖洗灌漿三種 (高秋振等，2008)，由於各種工法之原理及機制不同，而且灌漿成效視沉泥清除與灌漿品質有所差異，因此各工程視基地條件、基樁施工方式及成效需求，評估採用合適之灌漿工法。

2.3 海上基樁工程技術

海上基礎工程近年在臺灣逐漸受到重視，從跨海橋梁到離岸風力發電，基樁已不只是單純

將載重傳入地層的構件，而是需要同時面對海象、地質不確定性、施工平台、動態載重與耐久性等多重挑戰。相較於一般陸上基樁，海上基樁的困難不只在「做得深」，更在於調查不易、施工受限，且一旦判斷錯誤，後續修正成本極高。因此，海上基礎工程的核心，往往不是單靠設計公式，而是要結合完整地質調查、施工中即時回饋與適當的規範選用。

民國 111 年通車的金門大橋為連接大金門與小金門的重要跨海工程，橋梁段長約 4.77 km，下部結構包含 73 座墩柱及 532 支大口徑基樁，基樁直徑約 1.5 m 至 2.5 m，工程環境同時受到深水、強流、潮差及季風影響，屬典型大型海上深基礎工程 (陳聰海等，2025)。本案最值得注意的是，金門大橋橋址雖以花崗岩及花崗片麻岩為基盤，但深槽區之岩盤面起伏劇烈，風化程度高度不均，從完全風化岩體至新鮮岩盤均可能出現。甚至同一橋墩範圍內，不同鑽孔間的岩盤高程與風化程度也可能差異很大。換言之，花崗岩雖常被視為堅硬可靠，但實際工程上仍可能因風化、夾層、破碎帶及傾斜岩盤面，造成承載層判斷困難。面對高變異性的海底地質，基樁設計時不能只依賴設計階段少量鑽孔推估承載層位置，而須在施工階段透過「逐墩補充鑽探」，取得接近各基樁位置的岩心資料。金門大橋即由地質專業人員判釋岩性、風化程度與岩盤高程後，回饋

設計單位修正入岩深度及承載層位置，以確保基樁確實落於可靠岩盤。岩床面及強度的高變異性，除了影響承載層的判斷外，也讓基樁鑽掘時遭遇進尺效率低、傾斜岩面、坍孔及孔內回淤等問題，初期每支基樁耗時逾 30 天，發生坍孔 73 次、外套管拔除重打 10 餘次。後續透過判釋出水、出渣情形，掌握地層變化調整壓降速率，配合「慢削、慢磨」、水中混凝土整平孔底、套管保護及清孔續鑽等方式，逐步改善進尺效率，最終將工期縮短至每支約 7 天。由此可見，海上基樁的施工和設計，無不仰賴現場判釋、施工回饋與工法的靈活修正 (詳圖 7、圖 8)。

由離岸風力發電，則可看見海上基樁的另一種發展方向。離岸風機水下基礎常採大口徑鋼管樁，與陸域常見的鑽掘式或場鑄基樁不同；其基礎除承受自重與一般環境載重外，還須長期面對風、浪、流及機組運轉造成的反覆作用。因此，設計上需納入大量載重組合、打樁動力分析 (PDA)、疲勞壽命、自然頻率及樁土互制等課題。施工時若海床表層阻抗過弱，鋼管樁亦可能發生「拖樁」風險，這些都是陸上基樁較少強調的面向。

打樁動力分析係於打樁過程中量測樁身受力與應力波反應，用以推估基樁承载力、打擊能量傳遞及樁身完整性。其可即時反映打樁阻抗、偏心打擊、拉壓應力與可能損傷情形，適合應用於海上大型鋼管樁等靜載重試驗不易施作之工

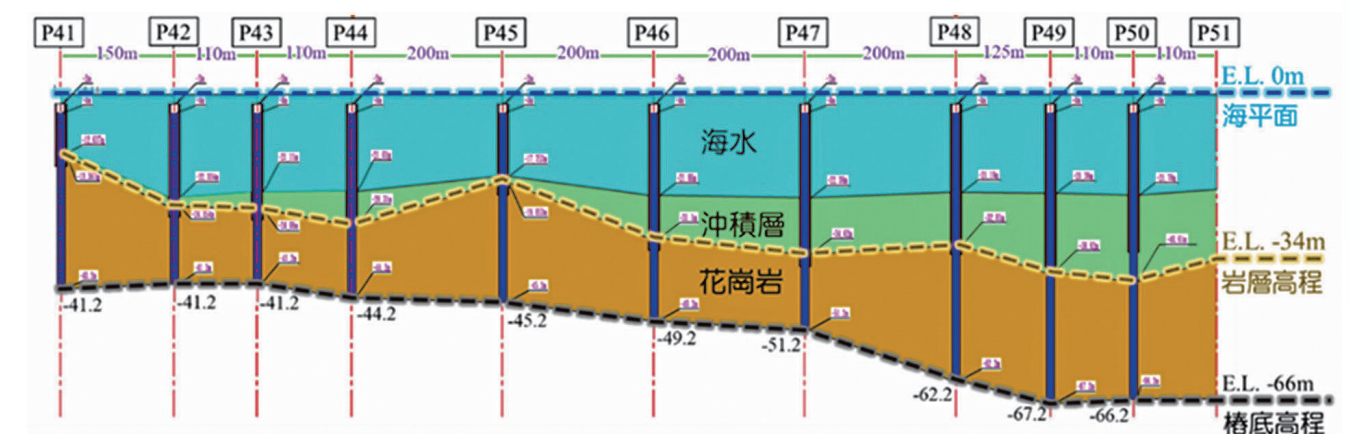


圖 7 金門大橋深槽區基樁入岩剖面圖 (CECI 提供)

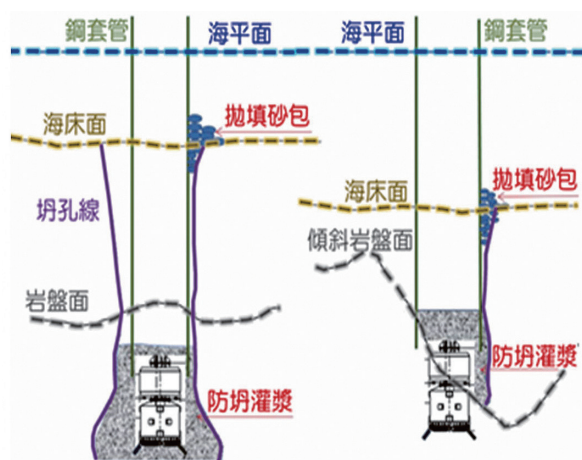


圖 8 岩床變化劇烈致使坍孔或鑽桿歪斜變形 (CECI 提供)

程。實務上亦可搭配 GRLWEAP 等軟體進行打樁可行性與施工控制模擬，惟模型參數、土壤阻尼及錘擊能量等設定仍高度仰賴經驗，需透過試打、監測與案例回饋逐步校正 (張有恆, 1995)。

在規範與調查方法上，由於國內離岸風電本土案例仍有限，設計多參考國外海工經驗，尤其是歐洲 DNV 相關規範 (詹穎裕等, 2026)。其中一項關鍵差異，在於地質參數的取得與使用。海上鑽探成本高，實務上常以探勘船進行圓錐貫入試驗 (CPT)，並利用錐尖阻抗、袖套摩擦及孔隙水壓作為基樁承載力分析依據，相較於

國內較熟悉的 SPT-N 值評估，CPT 能更敏感反映海床地層變化。然而，CPT 承載力分析並非單一方法，除國內規範有提及之 LCPC，另有 ICP-05、UWA-13...等模式，各自對砂土、黏土、開口鋼管樁及樁端阻抗的處理方式不同。因此，實務上仍須依個案地層條件、基樁型式及試驗資料比較選用，並透過試樁、施工監測與案例回饋，逐步累積臺灣海床條件下的驗證經驗 (圖 9)。

離岸風場由近岸發展至遠岸，對應之水深由淺水區進入深水區，水深為決定離岸風機基礎型式之主要選擇，下部結構基礎於淺水區 (水深 20 ~ 30 m) 採用單樁式基礎 (Monopile)，深水區則採用套筒式桁架基礎 (Jacket Pile) (圖 10)，由於都是直接在海上施工，須採用大型的施工船機與設備，包含重型吊桿船、駁船、氣泡幕船、清樁船、灌漿作業船，以及其他輔助船如鯨豚觀察船、警戒船、拖船、人員運輸船等 (圖 11)，主要之施工船須具有動態自動定位系統確認打樁之位置，上述船隊組成會根據風機基礎採用 Monopile 或者是 Jacket Pile 而有所調整。

Monopile 直徑至少 5 m 以上，打設前先用大型吊機將鋼管樁吊起垂直放入海中，定位後配合抱樁器以液壓打樁機將基樁打入預定深度

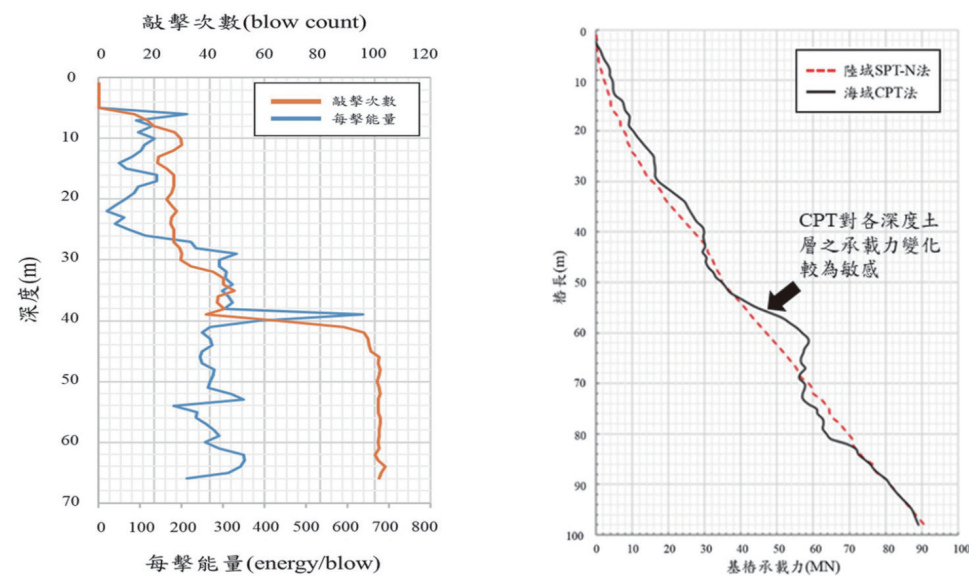


圖 9 SPT-CPT 承載力比較 (左)、打樁動力分析 (右) (CECI 提供)

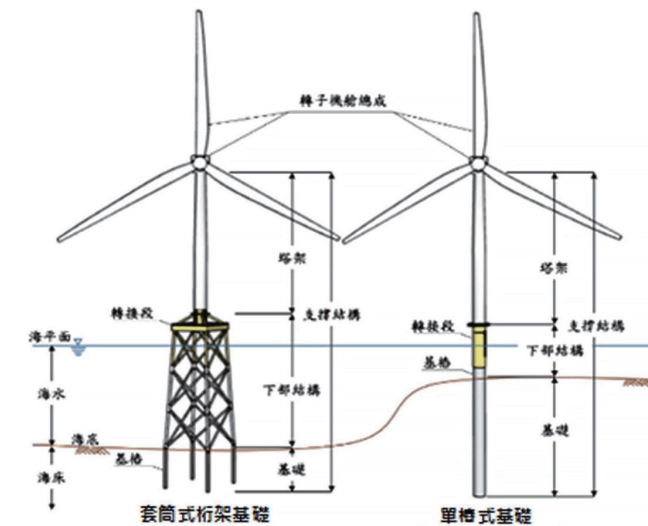


圖 10 離岸風機基礎示意圖 (摘自標檢局, 中興顧問提供)



圖 11 海上打樁 (Jacket Pile) 施工團隊 (摘自 JDN, 中興顧問提供)

(圖 12)。Jacket Pile 通常一座風機設置 3 ~ 4 支，樁徑約 2 ~ 4 m 左右，打設前須先將樣架放置於預定打設位置，再依序配合樣架控制位置與傾斜進行基樁打設 (圖 13)。

為避免打樁過程影響周邊生態 (如鯨豚等)，打樁前須配合氣泡幕船於樁周打設氣泡幕以隔離打樁所產生之噪音 (圖 14)，依據規定於距離打樁地點 750 m 處，必須將噪音降低至 180 分貝，以減輕噪音對鯨豚的干擾。另外由於台灣西部彰濱外海海床下主要以粉土質砂及粉土質黏土相互交疊所組成，淺層強度較低，採液壓樁錘 (Hydraulic Hammer) 打樁過程中倘控制不佳，



圖 12 Monopile 施工船機 (摘自 Sapura, 中興顧問提供)

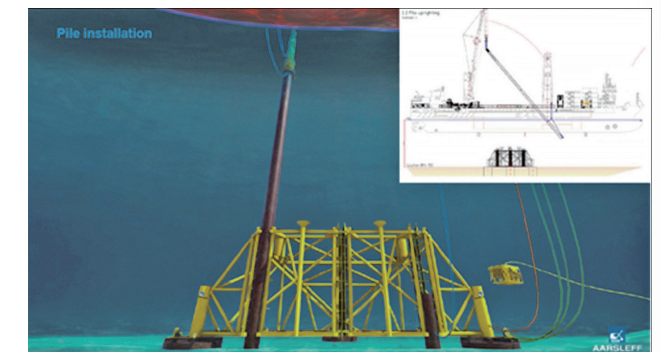


圖 13 Jacket Pile 施工 (摘自 AARSLEFF, 中興顧問提供)



圖 14 氣泡幕船 (摘自大地技師期刊)

將產生「滑樁」，除了控制打樁速率外，亦可採用低噪音、低震動傳導之震動樁錘 (Vibro Hammer) 以降低滑樁風險 (江政恩, 2026)。「拖樁」和「滑樁」差異在於前者樁將帶動土壤向下移動。

三、不同施工方式之基樁載重試驗與檢測／監測

隨著麥寮六輕建廠（1996）、台北市捷運系統（1991）、台灣高鐵（1997）、台北 101（1998）、台南科學園區（1997）等大型工程陸續推出，為滿足設計需求及基樁施工方法不同，基樁之品質控制方式（完整性檢測、載重試驗／監測），開始有明顯的進步及多樣化。

3.1 基樁完整性試驗

基樁檢測試驗（Pile Integrity and Non-Destructive Testing）是基樁工程中不可或缺的品質控制與施工驗證手段。由於基樁深埋於土層且具備「不可重複性」（受損後難以拔除重置），其品質控管顯得尤為重要。試驗之核心目的在於確認樁體完整性、幾何尺寸及混凝土均質性，藉此識別斷樁、縮頸、夾泥、離析及樁底沉渣等缺陷，確保基礎安全並提供後續載重行為分析之依據。

3.1.1 孔壁完整性試驗

為了解鑽掘樁孔壁品質，超音波孔壁檢測儀（日本海上電機，已停產多年），首次應用於台北市新生北路高架工程，目前，所有鑽掘圓樁／壁樁均必須先行孔壁檢測，確保孔壁及垂直度後品質無虞後才可進行後續混凝土澆置，使用於壁樁尤其是載重試驗主樁，一般基樁廠商僅測短向，建議應加測長向，對試樁結果分析將有很大幫助。一旦孔壁發生嚴重坍孔，極有可能造成混凝土品質異常，因此，需要進行完整性試驗確認樁體品質。

3.1.2 樁體完整性試驗

1. 低應變檢測法（Low Strain Integrity Test）

台灣最早引進荷蘭 TNO-BOUW 之 SIT 檢測系統，後期則進美國 PDI PIT 檢測系統，本試驗方法因為無法檢測樁底沉泥、僅能測出第一個瑕疵位置、超過 30 m 長樁無樁尖反射、試驗樁頂

須打除弱質等限制，工程上應用受限；大部份用於樁長較短之 PC 樁或 PVC 檢測管遭到塞管之鑽掘樁，國內較大規模檢測案例為社子島堤防加高之 PC 樁長度檢測（圖 15），檢測數量高達 1,251 支，試驗結果顯示有極高比例之基樁長度遠低於設計樁長。

2. 跨孔超音波法（Cross-hole Sonic Logging Integrity Test）

紀錄方式從最早的拍立得照片進步到筆式記錄器再到現行的數位式檔案，國內檢測最深基樁長度為 96 m，最大檢測樁徑則為 3 m。因為本項試驗費用占比很小，一般業主均將該項目含於基樁廠商承包範圍，如果業主能直接發包給第三者檢測廠商，將更能掌握基樁之實際施工品質。高樓大廈之基樁屬於高承載樁，由於數量不多，建議所有基樁均應全面埋設 PVC 檢測管，完整性試驗占比可依施工紀錄提高至 100% 全面檢測。



圖 15 PC 樁低應變完整性試驗防潮堤加高工程（1991，台安技術提供）

3.2 基樁載重試驗

3.2.1 靜載重試驗

1. 呆重直接加載法

只需打設試驗主樁，反力系統設備容量須為試驗載重之 110% 以上，包括 H300 × 300 型鋼載重平台、混凝土塊／鋼板／鋼胚／鋼材、反力梁、承壓箱梁等，除求得基樁承載力以外，國內

已有工程案例，為求得礫石層變形模數，於主樁周圍設置地層變位計、應變計；打設 12 × 12 m ($t = 30$ cm) RC 版；除進行傳統的呆重壓力載重試驗外，特於每一層呆重塊吊裝完成及拆除階段同步自動化密集量測地層、RC 版變位／變形及主樁樁身軸向應力／變位，呆重壓力系統全景詳圖 16。

2. 反力樁法

早期為節省費用，有使用連續壁體及永久結構樁為反力系統，隨著高承載樁試驗載重需求逐步提高，反力樁大部份為另行打設或利用基地內之扶壁，壓力試驗使用兩支或四支反力錨樁，拉力則以兩支基樁為反力系統。目前國內最大壓力及拉力試驗案例詳圖 17 及圖 18。



圖 16 呆重試樁及礫石層變形模數試驗（2025，台安技術提供）

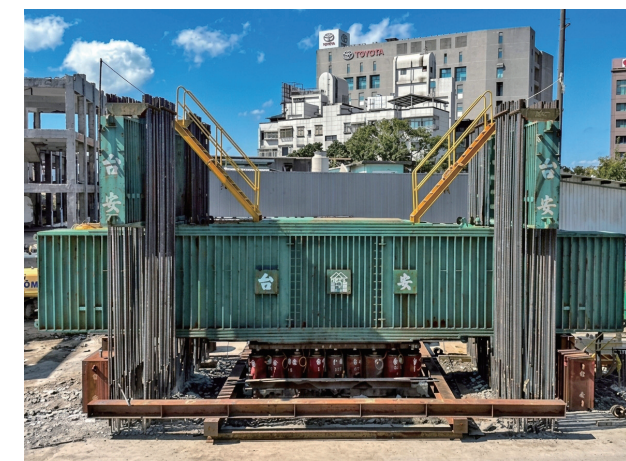


圖 17 壁樁 8257T 壓力載重試驗（2024，台安技術提供）



圖 18 壁樁 4800T 拉力載重試驗（2026，台安技術提供）

3. 雙向加壓法（Bi-Directional Static Load Test，BDSLT）

透過預先埋入基樁樁身或靠近樁底的液壓千斤頂進先後加壓行載重試驗，Single Level Test 將基樁向上頂升與向下推擠，Multi Level Test 則需先加壓樁底千斤頂後再加壓樁身千斤頂，藉此量測樁身極限承載力，惟本方法無法像傳統下壓方式直接量測樁頂及基礎開挖底面的沉陷量，而是經由併入彈性壓縮量的相關計算方式間接求得等效樁頂位移曲線（Equivalent Top Load-Settlement Curve），台灣大部份都是屬於長樁，樁身均配置兩個千斤頂（Multi Level Test），基樁之變形行為將更為複雜，國內對本試驗方法的接受度呈現分歧現象。BDSLT 樁身千斤頂安裝詳圖 19。

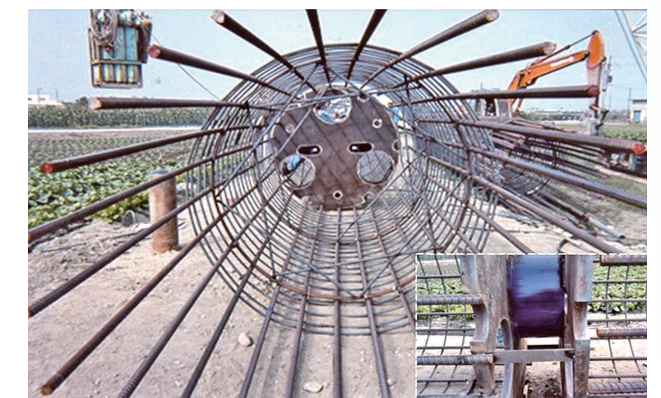


圖 19 雙向加壓靜載試驗（BDSLT）油壓千斤頂安裝（2001，高鐵工程，台安技術提供）

BDSL T 會對基樁產生極大位移，樁周摩擦力及樁端底承力極可能在雙向加壓後達到極限破壞並產生斷樁，如果應用於永久結構樁，位於平衡點對應千斤頂位置將因無鋼筋連續及千斤頂埋設位置灌漿成效與其強度難以驗證，此外，永久結構樁經過雙向加壓法後，土壤點承力／摩擦力已接近或達到極限破壞值加上樁體也已經造成斷樁，將會影響基樁之永久性，日後也可能因此產生差異沉陷問題，台灣位處地震帶，永久結構樁採用 BDSLT 的適用性，建議應審慎評估；建築物基礎構造設計規範 5.7.4 節【解說】第 3 項已有明文規定：『基樁載重試驗之加壓方式須與將來結構物所承受之荷載或外力方向相同，以符合基樁之實際受載行為，同時針對永久結構樁之載重試驗須以不破壞樁體結構為原則』。

4. 側向載重試驗

(1) 單樁側向載重試驗

側向試驗則以兩支基樁或呆重塊為反力系統，國內試驗大部份屬於「樁頂自由 (Free Head)」方式配置，以「樁頂旋轉束制 (Fixed Head)」方式之首例為觀音工業區杜邦 Ti-Pure Plant (1991)，詳圖 20。為模擬離岸鋼管樁承受波浪推擠時的側向力行為，選擇一處地質條件相似之陸地進行反覆載重試驗 (2015)，在 180T 載重時，與第 1 次相較，因加載次數之增加而使位移量相對增加之比例分別為 18.81% (20 次)、



圖 20 台灣首例「樁頂旋轉束制」側向載重試驗 (1991, 台安技術提供)

30.02% (100 次)、48.64% (500 次)，其側向試驗配置詳圖 21。

(2) 群樁側向載重試驗

高鐵橋樑基礎最佳化研究案 (以下簡稱高鐵研究案) 完成了國際上罕見的 2000T 容量 (Target Test Load = 1500T) 之群樁側向試驗，在鑽掘式群樁 (3 × 2 支) 樁帽與打擊式 PHC 群樁 (3 × 2 支) 樁帽之間設置 5 支型鋼，兩端各配置 5 只 500T 容量油壓千斤頂同步兩側樁帽施加側向荷重 (圖 22)。



圖 21 側向反覆 (500 次) 加載試驗 (2015, 台安技術提供)



圖 22 2000T 群樁側向載重試驗全景 (1997, 高鐵研究案, 台安技術提供)

3.2.1.1 靜載重試驗加壓程序

國內壓力載重試驗最原始規範為 CNS12460，國外則為 ASTM D1143，加壓程序有 7 種，公共工程大部分採用標準加載程序，試樁時間約 3 ~ 4 天，一般民間工程則採用快速加載程序，試樁時間約 7 ~ 8 小時，ASTM

D1143M-07 版本將 Procedure A: Quick Test 視為默認程序，其他 6 種則改為選項 (Optional)，D1143M-20 版本則改成 3 種加載程序，仍以 Procedure A: Quick Test 為主，以試驗載重之 5% 為增量加載至最大載重，解壓則分 5 階段，每個加載階段持壓 4 ~ 15 分鐘。ASTM D3689M-22 拉力試驗加載程序與壓力試驗內容相似。

ASTM D3966M-22 側向載重試驗規範所列示之加載方法共計 8 種，國內均採用默認之加載程序 Procedure A: Standard Loading；為模擬離岸風場 (Offshore Wind Farm) 鋼管樁，承受波浪反覆推擠之力學行為，加載程序採用正向、反向來回反覆加載，試驗結果顯示在同一試驗載重經過最多 500 次反覆載重後，水平位移會有明顯增加。

3.2.1.2 靜載重試驗成果分析演進

藉助於完整的先期基樁載重試驗規劃及善用樁身監測儀器，先期基樁極限載重試驗已漸漸成為整個建案價值工程中一個重要角色，業主依據試樁成果、回饋基樁設計參數、優化永久結構樁尺寸，除了可以省下基樁施工費用亦可縮短工期。

先期基樁極限載重試驗分析成果報告的由基本的第 1 項內容漸漸擴增至第 4 項。

1. 荷重 vs. 沉陷／上拔量位移曲線；極限 & 降伏承載力／拉拔力分析
2. 軸向荷重、樁周摩擦應力及樁底點承應力分佈
3. 樁周 $t-z$ 曲線 (摩擦應力 vs. 位移)、樁底 $Q-w$ 曲線 (點承應力 vs. 位移)
4. 回饋分析 (基樁設計參數建議、垂直地盤反力係數、不同基樁尺寸容許承載力／拉拔力分析、基樁長度建議、基樁施工建議等)

3.2.2 靜動試樁法 (Statnamic Loading Test)

只需打設試驗主樁，係利用燃料產生氣體的壓力加載於樁頂，因能產生 20g 的加速度，反力塊總重僅需試驗載重的 5%，國內於 1997 年於

北投垃圾焚化廠進行首度試驗、台北 101 則於 1997 年創世界首例在基礎開挖底面 (GL-21.8m) 進行試樁，另於 2015 年完成金門大橋海上試樁 (詳圖 23)。



圖 23 海上靜動壓力載重試驗 (2015, 金門大橋, 台安技術提供)

3.2.3 高應變動力載重試驗 (High-Strain Dynamic Load Test, DLT)

高應變動力載重試驗依試驗目的可分為：

1. 於初打階段 (上樁) 同步進行打樁動力分析 (Pile Driving Analysis, PDA)，其目的在求得樁身之壓應力、張應力、完整性、傳輸能量、打擊土壤阻抗。
2. 基樁打設完成且待地層特性回復後，再進行 Restrike DLT 並以 CAPWAP 求得該基樁之靜承載力與推估其荷重 - 沉陷曲線。

PDA & DLT 廣泛的使用於工業區廠房、港灣、碼頭、資源回收 (焚化) 廠等 PHC 樁或鋼管樁工程，圖 24 為海上打樁船針對斜樁進行 DLT 紀錄照片。鑽掘樁由於樁錘能量較難以打動基樁，國內試樁數量相對較少，圖 25 為高鐵 C291 標所使用地自由落錘 (44.6T) DLT 系統。水下 DLT 應變計及加速度儀產品已經相當成熟，防水深度可達 300 m (1 個月) 及 900 m (2 周)，離岸風場鋼管樁因為靜力試樁方式成本及困難度都很高，DLT 試驗方式應該是可以考量的選項。

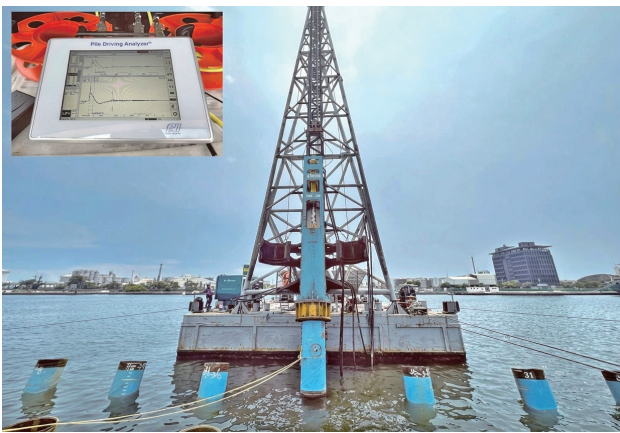


圖 24 海上打樁船以油壓樁錘進行斜樁 DLT 試驗
(2025, 台安技術提供)



圖 25 使用 44.6T 落錘進行鑽掘樁 DLT 試驗
(2000, 高鐵 C291 標, 台安技術提供)

3.3 樁體監測儀器

試樁監測儀器除了樁頂位移計荷重計外，於樁體配置鋼筋應力計、鋼柱應變計、鋼管樁應變計、混凝土應變計、樁體變位計、樁底電子荷重計、傾斜管、樁頭電子傾度儀等，樁體外地層則有安裝孔隙水壓計（臺北捷運 CT207A、高鐵研究案）、土中傾斜管（高鐵研究案）及地層變位計／應力計（某大工程呆重試樁 + 礫石層變形模數研究案，2025）

樁身軸向荷重量測儀器以鋼筋應力計最為普遍，惟其應力所求得之傳遞荷重可能會因彈性模數及基樁實際施工斷面積影響分析荷重大小，如果以電子荷重計直接量測最為可靠，因此，早期臺北捷運新北投支線（1991）、北投焚化廠（1994）及高鐵研究案（1997）先期試燕基樁均在樁底安裝電子荷重計。

植入式 PC 樁亦曾在樁身及樁底設置電子荷重計（高鐵 S295 車站，2002），均成功的直接測得各監測斷面之軸向荷重。側向試驗之樁身撓曲變形，傳統上使用傾斜管（Inclinometer），惟使用人工量測往往耗時 10 分鐘以上，與樁頭之位移及荷重無法同步，陣列式位移計（SAA）則提供了即時／同步的量測數據，台灣第一次採用反覆加載試驗（500 次），便是在樁身設置 SAA 才得以立即同步量測到撓曲變形曲線。

四、基樁載重試驗結果判釋和基樁檢測試驗

隨著基樁技術的應用與發展，樁載重試驗數據的判釋和基樁檢測成為近三十年學術研究的重要課題。

4.1 基樁載重試驗結果判釋

載重試驗是樁基礎工程中最重要且直接的現地驗證方法，主要目的在於評估基樁承載能力、位移特性與樁－土互制行為，並作為校核設計參數與驗證施工品質的重要依據。依受力方向與性質，可區分為垂直壓力載重試驗、基樁拉拔試驗與側向載重試驗三大類。垂直壓力試驗主要用於評估軸向極限承載力、位移沉陷行為及荷重傳遞機制；拉拔試驗則針對抗拉拔樁評估其極限抗拉力；側向載重試驗則著重於水平荷重下的位移反應、彎矩分布與土壤反力特性（李建中，1984；李咸亨和李慶福，1988；李咸亨，1990；陳逸駿和張崇義，2000；俞清翰等，2023）。

在垂直壓力載重試驗方面，台灣工程界廣泛採用荷重－位移（ $P-S$ ）曲線進行判釋，常見判釋法包含：Davisson 法、Chin 法、Brinch Hansen 80% 法、De Beer 法、Terzaghi 法及 Fuller & Hoy 法等（張德文等，2005）。黃俊鴻和楊志文（2000）針對高速鐵路嘉義太保試樁計畫結果得到 Terzaghi 法

（即以樁頭位移達 0.1D 作為準則）在物理意義、一致性與實務性上最具代表性，建議作為判定極限承載力的標準方法。此外，該研究亦建議以 $P-S$ 拐點法作為判定降伏承載力的最佳方法。在基樁拉拔試驗方面，陳逸駿和張崇義（2000）認為荷重與位移關係與垂直壓力試驗類似，但其達到極限抗拉力所需的位移量與樁徑無關，常用判釋法包括曲線法、切線法和總沉陷量法等，其中，切線法的判釋結果最接近平均值且變異性最小，是相對適中的判釋方法；反之，曲線法的判釋結果通常較為樂觀。在側向載重試驗方面，基樁行為深受土壤非線性及樁身勁度影響，國內常採用「位移準則法」，並以 Pyke 提出的 5% 樁徑位移法所判釋之承載力最接近統計平均值（偏差僅約 6%），結果較為折衷且具可靠性。相較之下，傳統規範常用的容許位移（如 1 cm 或 1%D）立場較為保守。此外，隨著分析技術進步， $p-y$ 曲線分析已成為模擬樁身位移與地盤反力關係的主流工具（陳逸駿和李志成，2000；張德文等，2005）。為

解決雙向載重試驗數據演繹問題，林三賢等已建議更為周延的解讀方法，詳見 Lin *et al.*, (2024, 2026)、Doan *et al.*, (2026) 研究成果。

過去三十年間，台灣累積了大量現地試樁資料，並逐步由傳統經驗法轉向性能導向（Performance-Based Design, PBD）與可靠度設計（Reliability-Based Design, RBD）。如圖 26，在本地化資料庫的建立，讓工程師能透過模型因子（model factors）分析，量化預測模型與實際量測值之間的誤差（bias）與變異（dispersion）。在分析技術上，除了結合波動方程分析 $t-z$ 、 $Q-w$ 和 $p-y$ 曲線模擬外，近年更導入了人工神經網路（Artificial Neural Network, ANN）等人工智慧技術結合雙曲線擬合法，能根據樁身幾何與地質參數，精準預測完整的荷重－位移曲線，其預測結果與現地試驗資料具有高度一致性，代表著台灣基樁載重試驗結果判釋已邁向數據驅動、高精度分析與智慧化決策的新階段（Hsiao *et al.*, 2025；Chen *et al.*, 2026）。

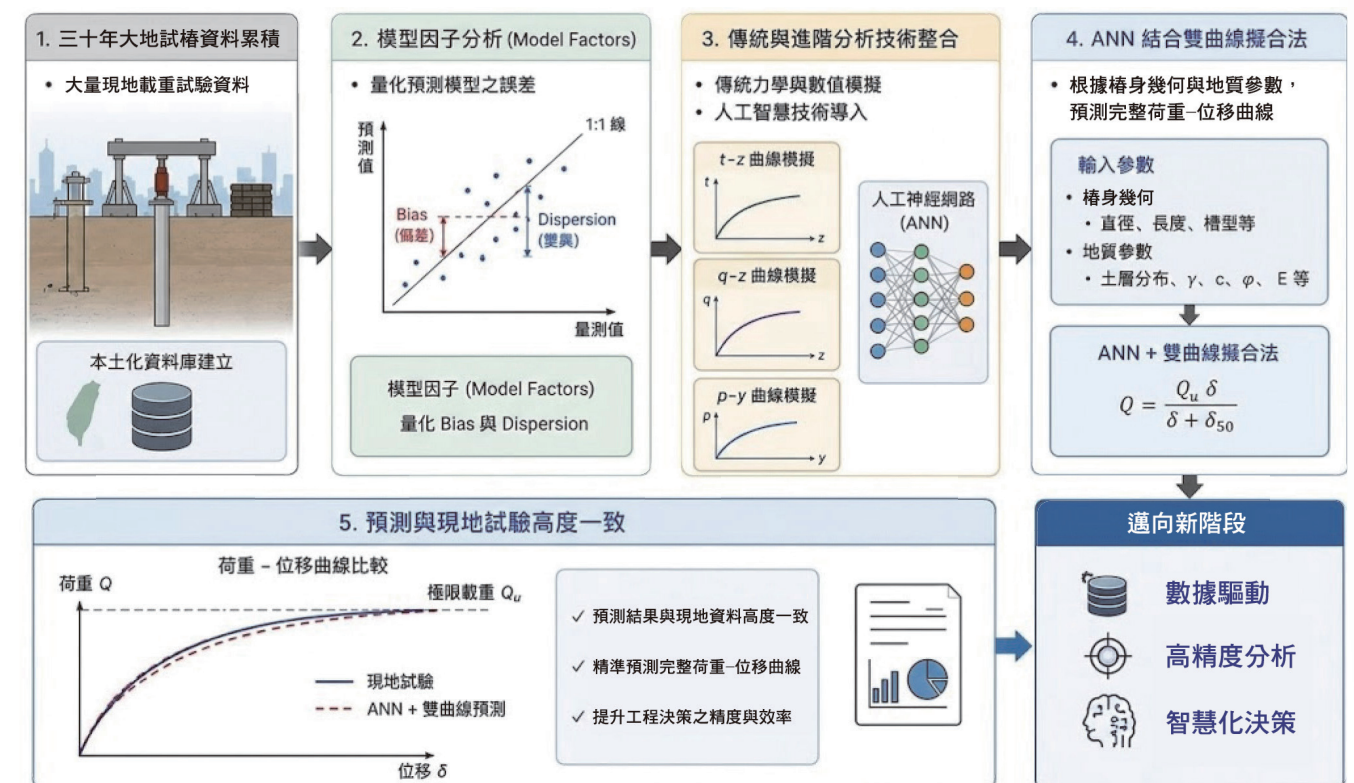


圖 26 未來台灣基樁載重試驗結果判釋邁向數據驅動和智慧化決策的過程（鄭世豪提供）

4.2 基樁檢測試驗

一般在學術研究上，基樁完整性檢測可分為「簡易式」（如反射震測法、跨孔音波、平行震測）與「動力式」（如振動試驗、應力波分析法）兩大類。台灣工程界常用之方法包含低應變反射法（Pile Integrity Testing, PIT）、高應變動力試驗（Pile Dynamic Analyzer, PDA）、跨孔聲波檢測（或 Cross-Hole Sonic Logging Test, CSL）及針對既有結構的平行震測法（Parallel Seismic Method, PS）與鑽心取樣等（倪勝火，1995；楊清源，1995；林廷芳等，2014）。

在簡易完整性檢測中，低應變反射法（PIT）利用樁頭輕擊產生的應力波傳遞特性，判斷樁長與缺陷，具備快速且低成本之優勢。然而，其對局部微小缺陷辨識力有限，且訊號易受樁周土阻抗與樁帽邊界效應干擾，需配合其他方法綜合判讀。對於大型鑽掘樁，跨孔聲波檢測（CSL）已成為主流，透過預埋於鋼筋籠內的聲測管傳遞超音波，分析波速與能量衰減，相關研究指出壓力波波速在 4,570 m/sec 以上代表混凝土品質優良，若低於 3,050 m/sec 則屬不佳（林廷芳等，2014）。高應變動力試驗（PDA）則屬於動力完整性檢測，透過重錘撞擊產生高應變波，結合波動方程理論與 CAPWAP 訊號回饋分析，除能檢核完整性外，更可估算基樁之極限承載力與荷重傳遞模型，此技術已廣泛應用於橋梁、高鐵及離岸風電基礎等重大建設（楊清源，1995；張德文等，2005；Yu *et al.*, 2022）。

過去三十年間，台灣已累積大量基樁檢測案例與資料庫，並逐漸建立本土化之訊號判讀與缺陷評估方法。1990 年代初期國內學者引進應力波理論，成功將非破壞檢測（Nondestructive Testing, NDT）制度化並納入公共工程施工規範，之後，隨著高鐵與西部濱海高架橋梁的動工，面對台灣多變的沖積層、卵礫石層及軟弱岩盤，工程界逐步修正了國外原廠軟體在阻抗分析上的盲區，發展出考量特殊地質的應力波衰減參數。近年基樁檢測標的更由「新設樁之品質品

管」延伸至「既有老舊結構物與危老重建之地下既有樁長勘驗」，平行震測法（Parallel Seismic, PS）與孔內物探技術之結合，填補了都市更新中舊有基礎資料遺失的技術空白（張嘉峰和廖惠菁，2023）。這段歷程讓台灣的基樁 NDT 技術，由「驗收」轉變為具備高度現地適應性的「診斷」，而且，隨著數值分析與智慧監測技術快速發展，台灣基樁檢測也由經驗判讀轉向數據化與智慧化分析（Yang and Ni, 2019），可有效過濾現地背景雜訊，提升缺陷辨識精度與判讀之一致性。此外光纖感測器、分散式應變量測（Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS）及無線監測系統逐漸應用於大型基礎工程，未來應用在監測樁身應變、溫度與變形行為可期，如圖 27 可提供基樁生命週期管理與性能化設計之重要依據，為高風險地質與超深基礎工程提供更具韌性的安全保障（Ni and Lehmann, 2012；Yang and Ni, 2019；Liao *et al.*, 2021；余志鵬和洪偉庭，2025）。

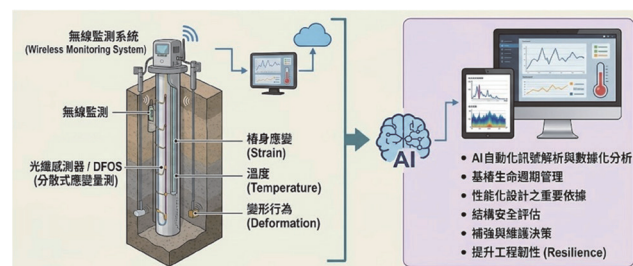


圖 27 基於韌性設計之智慧基樁檢／監測發展示意圖（鄭世豪提供）

五、數值分析相關研究發展

除載重試驗和基樁檢測數據分析外，樁基礎力學行為模擬亦是重要課題。單樁受力可類比於梁受力行為，倘若基樁周身地質條件簡單，吾人可配合假設邊界條件以解析方式求解（黃俊鴻和鍾明劍，2006）；倘若地質條件複雜，則須以數值解方式進行分析。

單樁常用數值解以有限差分法為主，APILE 和 LPILE 等程式均為基樁簡易靜態力學分析代表，配合基樁周身土壤的 $t-z$ 、 $Q-w$ 和 $p-y$ 曲線，此

類分析經常用於模擬基樁承載力；Hsiung *et al.*, (1997, 2003, 2006) 亦曾建議基樁受水平力作用的簡易解供分析使用。為處理動態基樁受行為，張德文等（2003, 2005）曾開發基樁受動態軸力和側力的有限差分程式，並將該等分析用於地震力分析，開發 EQWEAP 程式（Chang *et al.*, 2014）。此分析參考黃俊鴻（2000）建議以力法和位移法考慮地震影響，在選擇基樁周身土壤彈簧（或反力係數）和阻尼係數時須特別注意；為克服阻尼係數選取，Chang *et al.*, (1999, 2000) 曾建議用於基樁反應分析時域之轉換阻尼模式供動態分析使用。

傳統上，橋梁或一般建築物樁基礎之樁帽（或筏基）可視為剛體，分析時以中心點位移和旋轉角為基準，配合基礎幾何條件即可計算筏基任意點的位移量，GROUP 分析即如是。若筏基具柔度，且無偏心垂直靜態荷重作用時，筏基中心處沉陷量最大，角隅沉陷量低；角隅荷重最大，中心或中間樁承重最少，上述現象將因土壤種類、筏基大小和筏基埋深而改變（Chang *et al.*, 2022, 2024, 2025a, 2025b）。若承受穩態（steady-state）振動或暫態（transient）荷重（如來自上構之慣性地震力影響）時，各樁所承受力量將隨作用頻率而產生變化。若以水平向荷重為例，Chang *et al.*, (2009) 曾以基樁間互制公式以及鏡面假設分析剛性樁帽受側力的分配特性，並和物理模型試驗比較印證，研究發現在各樁若在暫態衝擊力作用下（地盤地震影響），各樁受力將相仿；反之若隨上構慣性力作用時，各樁力量仍將有所不同，此現象說明力源不同將造成基礎不同反應。林三賢等人（2005, 2009）曾討論地盤側潰之耦合和非耦合分析對樁基礎所產生的影響。將樁應用於擋土亦常見於開挖和坡地工程，相關文獻可見於林三賢與葉樹機（2001）、張睦雄等（2010）、林德貴等（2015）、黃御恩和馮正一（2025）。

隨著建築物維度和載重攀升，近年樁筏基礎設計觀念亦受到重視，樁筏基礎中，筏底部土壤支承力是節能減碳重要手段。以一維或二維筏基構造配合土壤彈簧和基樁彈簧進行樁筏基礎

分析可見於 Poulos、Randolph（靜態）、Matsumoto（靜態／動態）等人研究成果。此類離散式結構系統無法完全掌握樁－筏基－土壤間的互制行為，樁筏基礎分析仍以具連體特性之有限元素法或高階有限差分法為最佳數值解法。

鑒於地工軟體發展益趨成熟，採用數值軟體模擬基樁行為的研究亦日益增多，陳正興和曾駿杰（2003）、陳正興和莊淳堯（2003）曾分別以 FLAC 和 ABAQUS 軟體模擬南科園區基樁振動試驗，馮正一等（2005）則採用 FLAC 分析基樁靜動載重試驗；採 PLAXIS 分析進行基樁靜動態載重試驗之研究亦可見於林三賢和倪敏倉（2006）。Chang *et al.* (2019, 2021) 曾採用 Midas 分析模擬壁樁承受垂直荷重以及側向推力之行為，討論樁身摩擦力和樁底反力乃至壁樁長短和其側力作用方向的關係；此外，也曾以 Midas 分析探討黏土層和砂土層垂直地盤反力係數以及基樁反力係數隨土壤勁度、筏基尺寸、荷重大小改變而產生的變化（Chang *et al.*, 2024, 2025a）。嚴謹的二維或三維有限元素分析可用於判定地工設計參數，土壤應變量範圍須注意，經驗上，靜態試驗所得的土壤參數遠較動態試驗或現場地球物理試驗波傳法所得者低 1/3 ~ 1/2，表 1 為使用有限元素分析樁筏基礎之黏土和砂土地盤反力係數 K_v 值。

近期針對液化地盤中基樁行為，採有限元素法或有限差分法進行各式樁基礎耐震行為分析的研究如：盧之偉等（2010, 2013）、盧志杰等（2018）、徐明志（2024）、徐煜淳等（2024）、張德文和鄭世豪（2024）、黃郁惟（2025）等，採用 FLAC、PLAXIS、DBLEAVES、ABAQUS、MIDAS、OPENSEES、DEEPSOIL 等軟體進行分析；若以有效應力分析（ESA），UBCSand 和 PM4Sand 係許多商用軟體的常用土壤模式；建物群互制影響、上構慣性互制影響、近斷層效應、地震力組合、二維三維分析差異、液化土壤壓縮沉陷機制等均為探討議題。翁作新和陳家漢（2009）、李崇正等（2013, 2015）、張文忠和陳家漢（2023）、黃俊鴻（2024）等則透過振動台和離

表 1 樁筏基礎在黏土層和砂土層的垂直向地盤反力係數值 (K_v) (單位: kN/m^3)

黏土層 ($V_s = 120 \text{ m/s}$ 、 $E_s = 82 \text{ MPa}$ 、 $S_u = 41 \text{ kPa}$)											
筏基埋深 (m)	連續壁深 (m)	荷重比值 (註)	筏基寬 (B)								
			$B = 16 \text{ m}$			$B = 26 \text{ m}$			$B = 36 \text{ m}$		
			中間	邊緣	角隅	中間	邊緣	角隅	中間	邊緣	角隅
8	16	1	9821	13743	13898	5062	8472	8638	3683	6746	7100
12	24	1	11020	17451	17538	5324	10398	10331	3851	8115	8277
8	20	1	10211	15021	15254	5124	9132	9214	3733	7190	7428
12	30	1	11869	19948	20128	5528	11656	11731	3900	8939	9169
8	16	1.5	6129	7577	7095	3258	4492	3988	2280	3412	3026
12	24	1.5	6629	9121	8634	3145	5023	4430	2129	3627	3170
8	20	1.5	6368	8200	7824	3276	4868	4249	2319	3659	3135
12	30	1.5	7339	10316	10042	3317	5538	5113	2161	3955	3513
砂土層 ($V_s = 150 \text{ m/s}$ 、 $E_s = 119 \text{ MPa}$ 、 $\text{SPT-N} = 7$ 、 $\phi' = 31^\circ$)											
筏基埋深 (m)	連續壁深 (m)	荷重比值 (註)	筏基寬 (B)								
			$B = 16 \text{ m}$			$B = 26 \text{ m}$			$B = 36 \text{ m}$		
			中間	邊緣	角隅	中間	邊緣	角隅	中間	邊緣	角隅
8	16	1	15607	23877	24589	7985	13920	14423	5757	10511	11288
12	24	1	16554	28168	29032	8006	16492	16717	5652	12468	12728
8	20	1	16231	26118	27037	8153	15195	15515	5829	11417	11929
12	30	1	17644	32257	33550	8284	18649	19011	5759	14068	14190
8	16	1.5	13276	16717	16418	7461	9975	9715	5428	7568	7651
12	24	1.5	14149	19790	19550	7588	11737	11252	5430	8882	8611
8	20	1.5	13828	18454	18014	7596	10883	10478	5489	8250	8090
12	30	1.5	15013	22747	22490	7851	13336	12737	5544	10020	9586

註：荷重比值 = 基礎荷重 / 挖方土重

心機的物理模型試驗探討單樁以及樁基礎的各式力學行為，對於基樁行為分析具有啟迪之影響。

隨著性能設計的推展，基樁耐震性能設計也是近年研究的重點之一，林宏達（2003, 2006）曾推動 LRFD 設計法在場鑄基樁的應用；陳正興等（2009）、陳正興和邱俊翔（2012）、陳正興等（2015）、陳正興和黃俊鴻（2016）曾針對地工性能設計原則和方向進行討論；基樁韌性設計之性能函數相關研究可參考邱俊翔等（2008, 2009, 2014, 2024, 2026）的建議。近日柯永彥等（2026）針對 2023 年版規範內容展示樁基礎設計範例。

六、樁基礎設計方法進展與規範沿革

國內基礎設計常參考「建築物基礎構造設計規範」，其最早版本可追溯至民國 77 年，過去三十年間已於民國 90 年及 112 年歷經兩次大幅修訂。樁基礎設計主要包括垂直樁、側向樁及群樁三大面向。

在垂直樁設計方面，主要考量為垂直承載力。早期規範主要針對打入式與鑽掘式基樁，利

用標準貫入試驗（SPT） N 值及圓錐貫入試驗（CPT）推估樁周摩擦力與樁底承載力。隨著國內許多大型工程（如雲林麥寮地區抽砂回填人工島、高速鐵路工程）推展，累積了大量樁載重試驗資料（陳正興等，2000），以及植入式基樁之廣泛應用（王傳奇等，1995），90 年版規範除更新以 N 值推估承載力之經驗式外，亦將相關公式直接納入主條文，並增列植入式基樁之承載力經驗式。在安全係數方面，90 版規範以前，係以單一安全係數除總極限承載力以求得樁之容許承載力；不過由於樁周摩擦力與樁底承載力的發展機制不同，112 年版規範提出針對二部分分別採用不同安全係數，基於樁周摩擦力相較於樁底承載力較早發揮，建議採用較大之安全係數。此修訂期能改善以往工程界重樁底承載力而輕摩擦力的思維。另外，樁在地盤下陷地層常面臨棘手的負摩擦力問題，因樁大部分位於負摩擦力區，導致部分案例難以設計。由於規範建議的中立點深度未考慮結構載重，Chiou and Wei（2021）透過有限元素分析探討樁頭載重對負摩擦力之影響，結

果顯示樁頭載重可降低負摩擦力效應，且摩擦點承樁的表現優於摩擦樁。基於實際樁頭均承受結構載重，建議於負摩擦力設計中納入其影響。

在側向樁設計方面，相較於垂直樁，樁受側向力作用時之破壞型態主要為樁體破壞及側向位移過大，因此設計上以樁頭變位作為主要控制指標。在側向位移分析方面，90 年版規範參考日本規範（日本建築學會，1988），提供以彈性基礎梁理論為基礎之張氏法（Chang, 1937）相關公式。該方法係假設土壤行為為線彈性，其關鍵參數為水平地盤反力係數。由於張氏法主要適用於線彈性土壤，112 年版規範進一步考量土壤非線性行為，建議可採用 p - y 曲線法進行非線性分析。此外，針對完全彈塑性土壤條件，Hsiung（2006）及陳正興和黃俊鴻（2016）亦曾提出相關理論解，並已納入規範解說供設計者參考。

在群樁設計方面，與單樁不同，尚須考慮樁間應力場及承載區重疊所造成之群樁效應，其可能導致位移增加與承載力降低。目前規範主要針對承載力降低進行考量，但在位移分析方面，尚未提供群樁效應之相關修正方法。對於側向受力群樁，一般多採用 p 修正法修正 p - y 曲線之土壤反力（ p 值），或類似日本規範以地盤反力係數折減方式處理群樁效應。范嘉程（1998）提出模數修正係數法，藉由修正單樁 p - y 曲線的模數以推求群樁之 p - y 曲線；邱俊翔和陳正興（2006）則進一步考量不同位移階段之群樁互制機制差異，提出二階段修正方法：於小位移階段採用位移放大因子（ γ 修正），而於大位移階段則採用地盤反力折減因子（ p 修正），以更合理反映群樁之側向互制行為。

112 年版規範的重要修訂之一，係導入性能設計概念，並增列極限限界狀態下之載重條件與相關檢核規定。然而，目前規範中有關性能設計之內容尚未完全建構完備。性能設計係以性能要求為中心，如圖 28 所示，共包含三個部分，依序為目的、性能要求及性能規定與驗證，其中為確實達到各項性能要求，設計重點在於性能規定

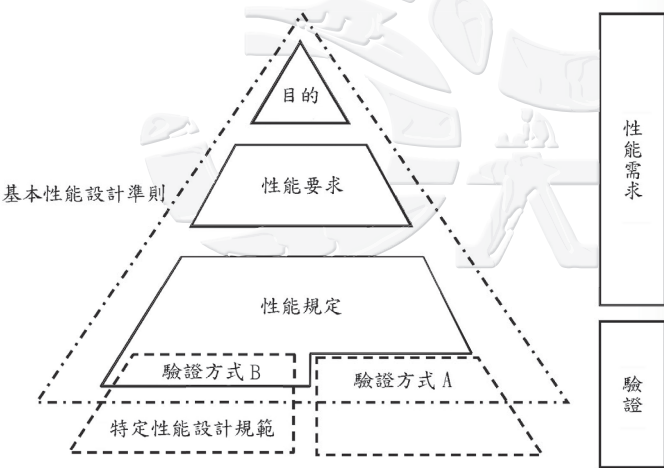


圖 28 性能設計規範階層圖（Honjo, 2003）

與驗證（邱俊翔，2023）。若未來欲進一步朝向性能設計發展，則有必要建立完整之非線性分析方法，並配合明確之性能檢核準則。目前日本規範已全面邁入性能設計階段（邱俊翔，2019），不僅側向樁須進行位移檢核，垂直樁之設計承載力亦考量所容許之變位。因此，除側向樁可採用 p - y 曲線法模擬土壤側向反力與位移外，垂直樁亦可分別採用 t - z 曲線與 q - z （或 Q - w ）曲線，以模擬樁身摩擦力 變位行為及樁底壓力 變位行為，以進行非線性分析。

有關非線性分析所採用之 t - z 、 q - z 與 p - y 曲線，其原始發展背景係用於海事工程中的鋼管樁，相關模式最初由美國石油協會（American Petroleum Institute，簡稱 API）提出。雖然目前國內顧問公司亦常應用相關模式，但其參數與適用條件未必能完全反映國內地盤特性。取得上述曲線最直接的方法，為透過試樁資料進行回饋分析。其中， t - z 與 q - z 曲線可藉由樁身軸力變化與樁身、樁底變位關係建立。然而，在推求樁身軸力時，需透過樁斷面模數將鋼筋計量測之應變轉換為軸力，不同之斷面模數假設（如線性或非線性）將導致所得曲線有所差異（林三賢和廖振程，2019）。相較於 t - z 與 q - z 曲線， p - y 曲線之推求則更為困難，因此一般試樁報告多未提供相關結果。其主要困難在於土壤反力 p 值之計算通常需透過微分運算求得，亦即由傾度管量測之位

移資料進行四次微分以反算 p 值；然而，多次微分會大幅放大測量誤差，進而產生不合理之土壤反力結果。有鑑於此，邱俊翔和陳正興（2000）發展一套可減少微分次數之分析方法，得以推求合理可靠的 p - y 曲線。

如前所述，側向樁設計主要以位移控制與樁體結構破壞為設計考量。然而，目前多數分析仍假設樁體為彈性行為，尚未充分納入樁之非線性反應。傳統耐震設計多採彈性樁設計，因此在一般情況下，此假設尚屬合理；然而，在某些特殊情況下，例如壁式基礎或液化地盤中，若仍強制要求樁體維持彈性，往往會導致過於保守甚至不合理之設計結果。因此，若能將樁基礎視為具韌性之構件進行設計，將可使設計更為合理可行。為進行樁基礎韌性設計，可透過側推分析（pushover analysis）評估樁基礎之韌性容量（Chiou *et al.*, 2011；邱俊翔等，2026）。而在側推分析中，必須考量樁體之塑性行為。結構分析中常採用塑鉸模式，於構件受力最大處設置塑鉸，以模擬降伏後形成之塑性區。然而，對於深埋於地中的樁基礎，其塑性區位置與發展範圍通常難以事先確定，因此傳統單一塑鉸模式並不適用。為此，Chiou *et al.*, (2009) 提出分布塑鉸模式（distributed plastic hinge model），於樁身可能產生塑性之區域配置多個塑鉸。此方法不僅可避免事先精確決定塑性區位置，亦可依據實際發生作用之塑鉸範圍，自動判定塑性區之發展範圍。其後，Chiou and Lin (2022) 進一步發展可自動考量軸力變化之塑鉸模式，適用於群樁系統分析，以反映受載重作用過程中軸力變化對樁斷面塑鉸性質之影響。

近年來，隨著國內離岸風電工程之發展，風機樁基礎施工與設計亦帶動一系列離岸樁基礎相關研究。有關離岸風機基礎設計，目前主要參考 DNVGL-RP-C212 (2021) 與 ISO 19901-4 (2025) 等國際規範。不同於國內陸域樁基礎設計多以 SPT 參數為主，離岸樁基礎之垂直承載力設計主要係依據 CPT 參數進行評估。王俊翔與黃俊鴻

(2022) 曾針對不同設計方法所得之樁垂直承載力差異進行比較分析。此外，側向受力行為亦為離岸風機樁基礎設計之重要課題。由於離岸風機常採用大口徑單樁基礎，近年有許多研究探討傳統 p - y 曲線分析法於大口徑單樁設計中的適用性，以及反覆載重對基礎側向行為之影響（Martin Achmus 和郭玉樹，2014；Chiou *et al.*, 2018）。

七、未來展望

綜上所述，除了各項課題的精進與既有問題之解決外，隨著資訊科技（IT）與人工智慧（AI）的進步、永續工程（SDGs and ESG）議題備受社會所重視，以及未來世代人力短缺的進展，樁基技術未來發展方向大致如下：

1. 有助於基樁和樁基礎之設計、施工、營運的智能輔助性（自動化）工具開發與應用；
2. 在自然力或人為力等作用下，對於基礎更為精確即時的監測和監控技術，以及主動控制減災的技術開發；
3. 優化設計減少碳排放量；採高階數值分析掌握土壤結構互制行為；重視性能設計之不確定性分析、以及控制結構體變形量，並改善相關分析的準確性；
4. 在離岸風電基礎、地熱、洋流等新能源工程議題中，基樁和樁基礎所能扮演的角色和技術開發與應用。

八、結語

基樁技術在臺灣的大量應用始於 1970 年代的十大建設，迄今，基樁技術已成為大型建築工程和橋樑工程中的關鍵項目。本文整理臺灣迄今（2026 年）近三十年的基樁工程技術之實務應用與學術研究重要發展，嘗試說明基樁技術之施工與試驗、檢測與監測、分析與設計等各項課題的進程，盼能拋磚引玉、啟發未來相關工程技術之精進與突破；由於樁基工程課題廣博，本文尚有未盡處，尚祈各界指正，以臻完備。

誌謝

本文內容甚為廣泛，承蒙富國技術工程俞清瀚董事長協助成立共筆小組，惠請富國徐明志總經理、同豐工程施志鴻副總、台大邱俊翔教授、台安技術張有恒副董事長、台灣世曦周永川協理、中興工程江政恩協理、亞新工程曾孝欽專案副理、台科大鄭世豪博士等地工先進協力合著；眾人分別於 2026 年 4 月 26 日和 5 月 11 日於富國技術工程股份有限公司召開會議，確定論文架構與分工和撰寫方式，眾志成城，順利完成並使文章豐富精實，筆者謹申最大謝忱。

參考文獻

1. Chang, D.W. and Yeh S.H. (1999). Time-domain wave equation analysis of single piles utilizing transformed radiation damping, *Soils and Foundations*, JGS, 39(2), 31-44.
2. Chang, D.W., Lin, B.S. and Cheng, S.H. (2009). Lateral load distributions on grouped piles from dynamic pile-to-pile interaction factors, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(2), 173-191.
3. Chang, D.W., Cheng, S.H. and Wang, Y.L. (2014). One-dimensional wave equation analyses for pile responses subjected to seismic horizontal ground motions, *Soils and Foundations*, JGS, 54(3), 313-328.
4. Chang, D.W., Cheng, S.H., Chiu, M.C. and Ge, L. (2025a). A study on subsoil and pile reactions of embedded piled raft foundations in loose sands under vertical loads, *KSCE Journal of Civil Engineering*, March 10023.
5. Chang, D.W., Huang, D.W., Lin, Y.K., Lu, F.C., Kuo, C.J. and Zhussupbekov, A. (2021). Length influences on lateral performance of barrette from three-dimensional finite element analysis, *J. of Applied Science and Engineering*, 25(4), 577-591.
6. Chang, D.W., Lin, C., Wang, T., Lin, Y.K., Lu, F.C. and Kuo, C.J. (2019). Three-dimensional finite element analyses of barrette piles under compression and uplift loads with field data assessments, *Geotechnical Engineering, SEAGS & AGSSEA Journal*, 50(3), 58-73.
7. Chang, D.W., Lin, J.H., Cheng, S.H. and Ge, L. (2024). Dimensionless reaction coefficients for embedded piled raft foundations in soft clays under vertical loads, *Int. J. of Geomechanics*, ASCE, 24(4).
8. Chang, D.W., Lu, C. W., Tu, Y.J. and Cheng, S.H. (2022). Settlements and subgrade reactions of surface raft foundations subjected to vertically uniform load, *Applied Sciences*, 12(11), 5484.
9. Chang, D.W., Roesset, J.M. and C.H. Wen (2000). A Time-domain viscous damping model based on frequency-dependent damping ratios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Science Ltd. 19, 551-558.
10. Chang, D.W., Zheng, W.C., Cheng, S.H., Tseng, C.Y. and Ge, L. (2025b). Serviceability performance of piled raft foundations under vertical loads in clayey and sandy soils, *Soils and Foundations*, JGS, 65(4), Aug. 101650.
11. Chang, Y.H. (2004). Statnamic loading test on instrumented bored pile in Taiwan, *Proc. of the 7th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to the Piles*, Kuala Lumpur, Malaysia.
12. Chang, Y.L. (1937). Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by L.B. Feagin, *Trans., ASCE*, 102, 272~278.
13. Chen, Y.J., Wang, K., Phoon, K.K., Guo, M. and Jos, M.A. (2026). Pre-bored PC pile capacity prediction in drained soils using artificial neural network. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, Part A: Civil Engineering, 12(2), 04026007.
14. Chiou, J.S. and Lin, Y.S. (2022). Axial force dependent pushover analysis model for laterally loaded piles. *Journal of GeoEngineering*, 17(2), 59-71.
15. Chiou, J.S. and Wei, W.T. (2021). Numerical investigation of pile-head load effects on the negative skin friction development of a single pile in consolidating ground. *Acta Geotechnica*, 16(6), 1867-1878.
16. Chiou, J.S., Chiang, C.H., Yang, H.H. and Hsu, S.Y. (2011). Developing the fragility curves for a pile-supported wharf. *Soil Dynamics and Earth-*

- quake Engineering, 31(5-6), 830-840.
17. Chiou, J.S., Xu, Z.W., Tsai, C.C., and Hwang, J.H. (2018). Lateral cyclic response of an aluminum model pile in sand. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(5), 554-563.
 18. Chiou, J.S., Yang, H.H. and Chen, C.H. (2009). Use of plastic hinge model in nonlinear pushover analysis of a pile, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 135(9), 1341-1346.
 19. DNVGL-RP-C212 (2021). Offshore Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, DNV, September 2021.
 20. Doan, M.T., Lu, C.W., Lin, S.S., and Nguyen, V.D. (2026). Advanced framework for interpretation bi-directional pile load tests using nonlinear load transfer models and metaheuristic optimization, *Ocean Engineering*, 349, 123981,
 21. Honjo, Y. (2003). Comprehensive design codes development in Japan: Geo-code 21 ver. 3 and code PLATFORM ver. 1, LSD2003: International Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering Practice.
 22. Hsiao, M.H., Chen, Y.J., Phoon, K.K. and Jos, M.A. (2025). Statistical evaluation of pre-bored PC pile behavior under axial compression. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-44.
 23. Hsiung, Y.M., Chen, S.S. and Chou, Y.C. (2006). Analytical solution for piles supporting combined lateral loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10), 1315-1324.
 24. Hsiung, Y. M. (2003). Theoretical elastic-plastic solution for laterally loaded piles, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(6), 475-480.
 25. Hsiung, Y.M. and Chen, Y. L. (1997). Simplified method for analyzing laterally loaded single piles in clays, *Journal of Geotech. and Geoenvironmental. Engr.*, ASCE, 123(11), 1018-1029.
 26. ISO 19901-4 (2025). Oil and Gas Industries Including Lower Cabin Energy – Specific Requirements for Offshore Structures, Part 4: Geotechnical Design Considerations, Edition 3.
 27. Liao, S.T., Yu, C.P., Tong, J.H., Lai, J. and Chang, C.T. (2021). Improved sonic echo method with multiple receivers and amplifier to evaluate the length of capped piles, *International Journal of Applied Science and Engineering*, 18(3), 1-12.
 28. Lin, S.S., Nguyen, V.D., Doan, M.T., Lu, C.W., and Chiang, C.E. (2026). Back analysis of bi-directional pile load tests of drilled shaft socketed in weak rock, *Proc. of the Institution of Civil Engineers- Geotechnical Engineering* (Accepted and in press)
 29. Lin, S.S., Su, C.Y., Chiang, C.E., and Wang, C.H. (2024). Interpretation of bi-directional pile load tests using instrumented gauge data, *Journal of the Chinese Institute of Engineer*, 47(1), 96-107.
 30. Ni, S.H. and Lehmann, L. (2012). Defect identification of bored piles using cross-hole sonic logging tomographic imaging, *Structural Health Monitoring*, 11(6), 685-696.
 31. Yang, Y.Z. and Ni, S.H. (2019). Applicability of complex wavelet transform to evaluate the integrity of commonly used pile types, *Journal of Geotechnical Engineering*, 14(1), 21-32.
 32. Yu, C.P., Liao, S.T. and Kallivokas, L.F. (2022). An extension of the mobility analysis of the impulse response method for coupled pile-soil integrity testing, *Journal of Earthquake Engineering*, 26(7), 3703-3723.
 33. Martin Achmus、郭玉樹 (2014), 「離岸風機大口徑單樁基礎地工設計考量」, 地工技術, 第 142 期, 第 25-35 頁。
 34. 內政部 (2023), 「建築物基礎構造設計規範」, 內政部 112.06.20 台內營字第 1120807974 號令修正發布。
 35. 日本建築學會 (1988), 「建築基礎構造設計指針」。
 36. 王俊翔、黃俊鴻 (2022), 「離岸風機基樁軸向承載力計算方法之比較研究：(II) 海底土層」。地工技術, 第 174 期, 第 85-94 頁。
 37. 王傳奇、徐建一、余明山 (1995), 「植入式基樁及其施工品管管制」, 地工技術, 第 52 期, 第 27-34 頁。
 38. 江政恩 (2026), 海上基樁施工, 技術分享, 中興工程顧問股份有限公司。
 39. 何泰源、吳文隆、蕭秋安、蔡立盛 (2011), 「臺灣河川橋樑基礎問題與案例介紹」, 地工技術, 第 127 期, 第 29-40 頁。
 40. 何樹根 (2023), 「臺灣高樓基礎之發展」, 地工 40 大地工程技術發展專刊 第三冊 專業技術發展史, 第 III-97- -122 頁。
 41. 余志鵬、洪偉庭 (2025), 「基樁完整性試驗之實例應用探討—以市政路延伸工程為例」, 研究成果, 國立中興大學土木工程學系。
 42. 李成亨、李慶福 (1988), 「垂直基樁載重試驗結果詮釋法在台灣地區之適用性探討地工技術」, 第 24 期, 第 49-59 頁。
 43. 李咸亨 (1990), 「基樁載重試驗規範和資料建檔之研究營建工程技術」第 13 期 第 75-82 頁。
 44. 李建中 (1984), 「試樁加載過程及結果詮釋之探討地工技術」, 第十卷, 第五期, 第 3-16 頁。
 45. 李崇正、洪汶宜、蔡晨暉、涂亦峻 (2013), 「離心模型試驗技術 (1)」, 國家地震工程研究中心技術報告, NCREE-13-048。
 46. 李崇正、許尚逸、洪汶宜、邱俊翔、楊宗翰 (2015), 「離心模型樁動態試驗」, NCREE 簡訊, 第 93 期。
 47. 李榮瑞、江政恩 (2022), 「淡江大橋主橋基礎基樁自體平衡試樁」, 第十九屆大地工程學術研討會暨科技部成果發表會, 台北。
 48. 杜振宗、丁金彪、張富吉、賴文三、范弘芳 (2003), 「塔山電廠碼頭設施基礎工程之設計與施工艱困檢討」, 地工技術叢書之六：大地工程困難案例, 第 98-104 頁。
 49. 林三賢、倪敏倉 (2006), 「應用 PLAXIS 程式於靜動樁載重試驗分析研究」, 研究成果, 國立台灣海洋大學河海工程學系。
 50. 林三賢、張德文、盧之偉 (2009), 「地盤側向滑移對樁基礎影響之研究」, 地工技術, 第 121 期, 第 19-26 頁。
 51. 林三賢、曾玉如、江承家、李維峰 (2005), 「液化土層產生側潰對基樁之影響分析」, 地工技術, 第 103 期, 第 43-52 頁。
 52. 林三賢、葉樹機 (2001), 「擋土排樁側向土壓力計算法簡介」, 地工技術, 第 85 期, 第 75-80 頁。
 53. 林三賢、廖振程 (2019), 「鑽掘樁之工程實務及載重試驗與分析」, 地工叢書之十二, 地工技術研究發展基金會。
 54. 林永光、呂芳熾、程日晟 (1995), 「打擊式預力混凝土基樁施工及品管簡介」, 地工技術, 第 52 期, 第 5-14 頁。
 55. 林永光、高聰忠 (1987), 「樁基礎型式與施工機械」, 地工技術, 第 18 期, 第 4-7 頁。
 56. 林宏達 (2003), 「場鑄基樁載重阻抗係數 (LRFD) 設計方法之探討」, 地工技術, 第 97 期, 第 67-76 頁。
 57. 林宏達、郭紘志 (2006), 「濱海地層中 PC 樁 LRFD 設計法之阻抗與載重係數分析」, 地工技術, 第 109 期, 第 63-72 頁。
 58. 林廷芳、高穆賓、黃智暉 (2014), 「3D 成像技術在跟孔式超音波完整性檢測之應用」, 三聯技術, 第 94 期, 第 2-7 頁。
 59. 林德貴、陳威翔、王勝賢 (2015), 「擋土止滑樁穩定邊坡之力學行為三維數值分析」, 中華水土保持學報, 第 46 卷, 第 4 期, 第 205-212 頁。
 60. 邱俊翔 (2024), 「液化地盤基樁非線性側推分析」, 土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會, 10/31-11/1, 國家地震工程研究中心, 台灣 台北。
 61. 邱俊翔 (2019), 「日本鐵路基礎構造物設計規範簡介與橋梁群樁基礎耐震性能分析示範例」, 地工技術, 第 160 期, 第 5-14 頁。
 62. 邱俊翔 (2023), 「大地工程設計現況與展望」, 地工技術, 第 177 期, 第 27-33 頁。
 63. 邱俊翔、陳正興、楊鶴雄 (2008), 「樁基礎非線性側推分析之樁材塑鉸設定方法」, 國家地震工程研究中心, 報告編號: NCREE-08-012。
 64. 邱俊翔、何政恩、王筱妝 (2026), 「液化地盤樁基礎非線性側推分析」, 地工技術, 第 187 期, 第 35-42 頁。
 65. 邱俊翔、柯永彥、黃俊鴻、陳正興 (2014), 「剛性基腳之旋轉性能曲線與工程設計考量」, 地工技術, 第 140 期, 第 79-86 頁。
 66. 邱俊翔、陳正興 (2000), 「側向載重樁非線性變形反應之回歸分析」, 中國土木水利工程學刊, 第 12 卷, 第 3 期, 第 455-464 頁。

- 67.邱俊翔、陳正興（2006），「側向荷載群樁之 p-y 曲線修正方法」，中國土木水利工程學刊，第 18 卷，第 3 期，第 325-335 頁。
- 68.俞清翰、張有恒、何應璋、高秋振、徐明志（2023），「試樁工法及應用之演進與展望與應用」，地工技術，第 177 期，第 13-24 頁。
- 69.俞清瀚、徐明志、簡進龍（2013），「台灣壁式基樁之應用發展與案例介紹」，2013 海峽兩岸地工技術 / 岩土工程交流研討會，台北。
- 70.俞清瀚、張有恒、何應璋、高秋振、徐明志（2023），「試樁工法及應用之演進與展望」，地工技術，第 177 期，第 7-12 頁。
- 71.施志鴻（2023），「場鑄鑽掘樁及大型載重試驗之設備與技術發展」，地工 40 大地工程技術發展專刊第三冊專業技術發展史，第 III-253-266 頁。
- 72.柯永彥、何金益、蔡祁欽、陳厚銘、廖振程（2026），「基於 2023 年版《建築物基礎構造設計規範》之樁基礎設計示範例」，地工技術，第 187 期，第 25-34 頁。
- 73.段紹緯、王瑞芳、王劍虹（1991），「電子錐在推估打擊式基樁承载力上之應用—一案例介紹」，地工技術，第 36 期，第 6~19 頁。
- 74.胡邵敏（2004），「台灣樁基工程的回顧、現況與展望」，地工技術，第 100 期，第 23~40 頁。
- 75.胡邵敏（2009），「樁基工程（增訂一版）」，地工技術叢書之九：樁基工程（增訂一版）附錄二。
- 76.范嘉程（1998），「承受橫向力之群樁分析」，地工技術，第 66 期，第 85-96 頁。
- 77.倪勝火（1995），「基樁之非破壞性檢測與案例」，地工技術，第 52 期，第 49-62 頁。
- 78.凌凱（1999），「高屏溪斜張橋連續壁基礎施工」，地工技術，第 72 期，第 55-66 頁。
- 79.徐明志（2024），「既設建築物採用格子狀地盤改良抗液化設計案例介紹」，土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會，10/31-11/1，國家地震工程研究中心，台灣 台北。
- 80.徐煜淳、章順強、江政恩（2024），「離岸風機之土壤液化評估」，土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會，10/31-11/1，國家地震工程研究中心，台灣 台北。
- 81.翁作新、陳家漢（2009），「振動台試驗探討土壤液化與樁土互制作用」，地工技術，第 121 期，第 55-62 頁。
- 82.高秋振、徐明志、何樹根（2008），「樁底高壓沖洗灌漿工法之介紹」，陳斗生博士紀念論文集，第 197-220 頁。
- 83.張文忠、陳家漢（2023），「近斷層地震橋梁防災工程技術研究—本土土壤近斷層液化特性與樁基礎液化折減因子探討（子計畫五）（III）」，國科會專題研究計畫報告，MOST 110-2625-M-006-012。
- 84.張有恒（1995），「淺談基樁之承载力試驗」，地工技術，第 52 期，第 71-83 頁。
- 85.張有恒（1999），「打擊式基樁之 PDA/DLT 動力試樁」，土木技術期刊。
- 86.張有恒（2000），「基樁品質檢驗方法之比較與適用性之探討」，地工技術，第 80 期，第 51-66 頁。
- 87.張有恒、施志鴻、謝謹至、駱志能（2011），「壁樁之施工與承载力試驗」，地工技術，第 128 期，第 47-58 頁。
- 88.張清森、林景文（1984），「中正紀念公園二期反循環樁施工控制與試樁」，地工技術，第 5 期，第 33-42 頁。
- 89.張睦雄、張俊隆、陳建華、蔡魏勇、蔡宗成（2010），「公路邊坡抗滑排樁現地土壓力之量測與判釋」，台灣公路工程，36(1)，第 2-19 頁。
- 90.張嘉峰、廖惠菁（2023），「建物基樁長度檢測與探討」，營建知訊，第 480 期，第 34-48 頁。
- 91.張德文、林伯勳、林冠吾（2005），「波動方程解於層狀土壤樁基承载力之應用與分析」，中國土木水利工程學刊，第 17 卷，第 1 期，第 19-30 頁。
- 92.張德文、林伯勳（2003），「含樁帽及互制影響之波動方程分析」，地工技術，第 95 期，第 49-60 頁。
- 93.張德文、林伯勳、林冠吾（2005），「詮釋基樁承载力之波動方程分析與應用」，岩土工程學報，第 27 卷，第 1 期，第 30-37 頁。
- 94.張德文、鄭世豪（2024），「液化地盤之樁筏基礎性能研究」，土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會，10/31-11/1，國家地震工程研究中心，台灣 台北。
- 95.陳斗生（2004），「臺北國際金融中心大樓岩土工程簡介」，2004 海峽兩岸地工技術交流研討會，第 15-30 頁，台北。
- 96.陳正興、邱俊翔（2012），「國內性能設計規範之基本架構與公路橋梁耐震性能設計規範之基礎設計」，地工技術，第 132 期，第 7-14 頁。
- 97.陳正興、莊淳堯（2003），「南科園區基樁振動試驗與 ABAQUS 模擬分析」，研究成果，國立台灣大學土木工程學系。
- 98.陳正興、曾駿杰（2003），「南科園區基樁振動試驗與 FLAC 模擬分析」，研究成果，國立台灣大學土木工程學系。
- 99.陳正興、黃俊鴻（2016），「基礎性能分析」，地工叢書之十一，地工技術研究發展基金會。
- 100.陳正興、黃俊鴻、邱俊翔、柯永彥、吳文隆、曾駿杰（2015），「大地工程性能設計之架構與基礎性能分析」，中華技術，第 105 期，第 98-106 頁。
- 101.陳正興、黃俊鴻、彭祖德、張龍騰（2000），「台灣西部海埔地預力混凝土基樁載重試驗資料之分析」，中國土木水利工程學刊，第 12 卷，第 1 期，第 51-62 頁。
- 102.陳正興、黃俊鴻、鄧崇任（2009），「公共工程性能設計準則之研究」，行政院公共工程委員會專案研究計畫。
- 103.陳泊鈞、何泰源、周永川、施志鴻（2025），「國內橋梁深基礎之演進及困難施工挑戰」，地工技術，第 185 期，第 7-16 頁。
- 104.陳逸駿、李志成（2000），「場鑄樁側向載重試驗詮釋法之探討」，地工技術，第 80 期，第 39-50 頁。
- 105.陳逸駿、張崇義（2000），「基樁拉拔試驗詮釋法之探討」，地工技術，第 80 期，第 27-38 頁。
- 106.陳聰海、周坤賢、林宜修、蕭秋安（2025），「金門大橋海上基礎設計與施工探討」，地工技術，第 185 期，第 31-40 頁。
- 107.馮正一、李俊男、蔡佩勳（2005），「靜動樁載重試驗之數值分析」，第十一屆大地工程學術研討會，台灣，萬里，E29-1~5。
- 108.黃俊鴻（2000），「液化地盤中樁基礎之耐震設計」，地工技術，第 82 期，第 65-78 頁。
- 109.黃俊鴻（2019），「基樁施工學」，科技圖書，台灣。
- 110.黃俊鴻（2024），「微型樁抗液化對策—離心機試驗」，土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會，10/31-11/1，國家地震工程研究中心，台灣 台北。
- 111.黃俊鴻、楊志文（2000），「基樁載重試驗承载力判釋方法之探討與建議」，地工技術，第 80 期，第 5-16 頁。
- 112.黃俊鴻、鍾明劍（2006），「液化流動壓作用下側向樁之簡化解析解」，中國土木水利工程學刊，第 18 卷，第 4 期，第 465-474 頁。
- 113.黃郁惟（2025），「建築物群於近斷層可液化與改良地盤上的受震行為」，2025 抗液化技術精進與研發成果交流會 09/26，台灣 台北。
- 114.黃御恩、馮政一（2025），「道路邊坡擋土排樁設計之應力分析與參數研究」，中華水土保持學報，第 56 卷，第 1 期，第 13-19 頁。
- 115.楊清源（1995），「基樁完整性檢測」，地工技術，第 52 期，第 103-105 頁。
- 116.詹穎裕、張永杰、周永川（2026），「各國規範風力發電設計—調查及承载力」，地工技術，第 188 期，第 109-112 頁。
- 117.樊成（1995），「全套管式基樁施工與品管」，地工技術，第 52 期，第 37-48 頁。
- 118.盧之偉、林家興、彭楷翔（2013），「以三維有效應力分析法分析群樁動態試驗研究」，岩土工程學報，第 35 卷，第 2 期，第 974-981 頁。
- 119.盧之偉、洪璋億、賴信成（2010），「以有效應力法探討因大地震所引起土壤液化造成樁基礎破壞之實例分析」，地工技術，第 123 期，第 59-68 頁。
- 120.盧志杰、黃郁惟、黃俊鴻（2018），「低矮建物與液化基礎土層互制 為之簡化分析模式」，國家地震工程研究中心研究成果報告，第 106 期，第 33-36 頁。
- 121.盧怡志（2023），「穩定液使用現況與展望」，地工技術，第 177 期，第 7-12 頁。

新奧工法的回顧與展望

王泰典 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

摘要

新奧工法源於 Rabcewicz 於 1948 年提出的雙層支撐襯砌概念，1950 至 1960 年代結合噴凝土、岩栓與現場量測技術逐漸成形，核心在於允許圍岩於可控範圍內適度變形，動員圍岩自承能力並形成俗稱的地拱效應，再依觀測回饋調整支撐與施工程序；結合閉合約束法闡釋其隧道力學理論後廣為應用，成為 20 世紀後半葉廣泛採用的山岳隧道工法，近期更演變為以風險管理為導向的觀測施工體系。台灣自 1982 年自強隧道引進後，廣泛應用於鐵路、公路與水力隧道並趨於成熟。展望未來，新奧工法憑藉其完整的隧道力學理論與施工彈性，將與全斷面鑽掘機形成複合施工策略，並朝數位化觀測、數位孿生驅動的智能化回饋設計、全生命週期監測與風險管理制度化方向發展；材料與設備將朝低碳化、自動化與高品質控制精進。

一、前言

山岳隧道工程具有施工前難以完全掌握地質、施工中必須持續驗證設計的本質。隧道開挖使原有應力重新分布，圍岩可能產生收斂、鬆弛、剪動或擠壓變形；支撐設計若僅依調查階段的有限資料採取固定而厚重的配置，往往難以兼顧安全、施工性與經濟性。1950 至 1960 年代逐漸形成的新奧工法（New Austrian Tunnelling Method, NATM），將噴凝土、岩栓、鋼支保、仰拱閉合及現場量測整合為圍岩－支撐共同作用系統，其關鍵不在特定材料或開挖機具，而在允許圍岩於可控制範圍內適度變形，機動發展其自承能力，並依實際觀測行為調整支撐與施工程序（Rabcewicz, 1964a, 1964b, 1965; Rabcewicz and Golser, 1973; Müller and Fecker, 1978）。

新奧工法往往被簡化為巨觀可視的鑽炸開挖、噴凝土襯砌或某一組標準支撐型式，未見其結合岩體力學、閉合約束分析與觀測法的設計施工管理理念。其實施過程應在施工前建立可能地盤行為、設計條件與假設、監測項目、預警值、以及輔助工法或備援措施，施工中則以開挖面地質、隧道周壁變位、支撐受力、地下水及施工紀錄持續檢核，形成設計預測－施工觀測－比較修正的閉合回饋（Peck, 1969; Nicholson *et al.*, 1999; Austrian Society for Geomechanics, 2010）。

台灣位處活躍造山帶並深受東亞季風影響，地質構造複雜、斷層與剪裂帶密集，地下水與颱風豪雨補注作用顯著，山岳隧道施工常遭遇破碎岩盤，出現擠壓變形、湧水及開挖面不穩定等現象。新奧工法自 1980 年代引進後，逐漸成

為國內鐵路、公路及水力隧道的重要工法。本文由歷史發展與力學概念出發，回顧新奧工法在國際及台灣的演進，並從與 TBM 複合施工、數位化觀測、工程地質模型、數位孿生、智慧化回饋設計、風險管理及全生命週期維護等面向，探討其未來挑戰與發展方向。

二、新奧工法的發展

2.1 新奧工法的萌芽

1940 年代以前，山岳隧道施工通常先開挖底導坑或小導坑，再逐步擴挖至全斷面，並配合木支保、磚石襯砌或鋼拱支保支撐，再設置混凝土襯砌。這類工法，也就是國內俗稱的傳統工法，在地質不良的地盤中雖具施工安全性，但支撐系統厚重、施工程序複雜、工期長且成本高。傳統工法的隧道力學觀點，圍岩是需要由支撐系統承受的地壓來源，也就是說，支撐與襯砌的主要任務是抵抗岩體壓力，而不是主動引導圍岩形成穩定承載環。

Rabcewicz 在 1948 年提出的雙層支撐／襯砌概念，可謂是新奧工法最早的基礎論述：隧道開挖後先設置第一層初期支撐，用於穩定圍岩並控制變形；第二層為永久襯砌，通常於初期支撐與圍岩變形趨於穩定後再施作，以避免永久襯砌承受過大的早期變形荷載。此一概念的工程意義相當重要，改變了隧道支撐需要愈早設置、愈厚重、愈剛硬的傳統思維，提倡依據岩體反應與支撐作用時機控制圍岩變形。

1950 年代末至 1960 年代初期，噴凝土與岩栓等新技術快速發展，配合隧道內量測技術的進步，新奧工法的基礎論述得以整合實踐。噴凝土在開挖後迅速封閉岩面，減少節理張開、岩塊鬆脫、風化與地下水作用，並形成薄而連續的初期支撐層。岩栓補強節理岩體，使破碎岩體形成較完整的受力區域，增加岩拱效應與圍岩自承能力。而現場量測的圍岩收斂變形、支撐應力、岩體變位等資料，不僅反應隧道行為，更提供調整支撐與開挖程序的依據。

一般認為，新奧工法的正式形成與 Rabcewicz、Müller、Pacher 三人密切相關。1962 年，Rabcewicz 在薩爾斯堡第 13 屆地質力學研討會中提出「New Austrian Tunnelling Method (NATM)」的名稱；1964 年起，他在 *Water Power* 期刊連續發表 3 篇英文論文，使 NATM 開始獲得國際注意。

依據前述，圖 1 與表 1 整理新奧工法萌芽歷程，並納入其後續發展。

2.2 閉合約束法的輔助

Fenner (1938) 採用二維方式處理圍岩－支撐互制的概念，可謂地盤反應曲線與圍岩約束觀念的濫觴。Pacher (1964) 圖示地壓與支撐變形關係；Panet 和 Guellec (1974) 進一步以約束損失因素 (confinement loss factor) 表示支撐安裝前已發生的變形。法國隧道與地下空間協會 (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, AFTES) 在 1978 年巴黎研討會引用相關研究，並正式提出閉合約束法 (Convergence-Confinement Method) 的名稱；其後 Panet (1995) 進一步系統化其理論與應用。

圖 2 簡要說明隧道周圍岩土材料收斂曲線與支撐作用曲線的關係。地盤收斂曲線描述隧道周圍岩土材料自初始狀態 (P_0) 受開挖擾動後，收斂變形量 (δ) 達到平衡狀態所需的徑向應力分量值，而支撐作用曲線則描述支撐設置時機對應的圍岩收斂變形量、以及構件變形所發揮的支撐作用力 (S)。地盤收斂曲線與支撐作用曲線之交會點即為隧道開挖支撐後新的平衡狀態點。

圖 2 繪出 3 種地盤收斂曲線，代表不同隧道工程地質條件下典型的開挖面附近圍岩變形特性。岩體工程特性佳、現地應力不大情況下，隧道開挖後周壁收斂變形量小，周圍岩土材料即達到了新的平衡狀態，隧道開挖面附近的變形特性可以 $P_0 H$ 曲線描述。對於軟弱岩體或是現地應力過大情況下，隧道開挖後周壁顯露明顯的收斂變形特性，然而過量的變形快速發生，周圍岩土材料擾動範圍迅速增大，收斂曲線出現上凹現象，

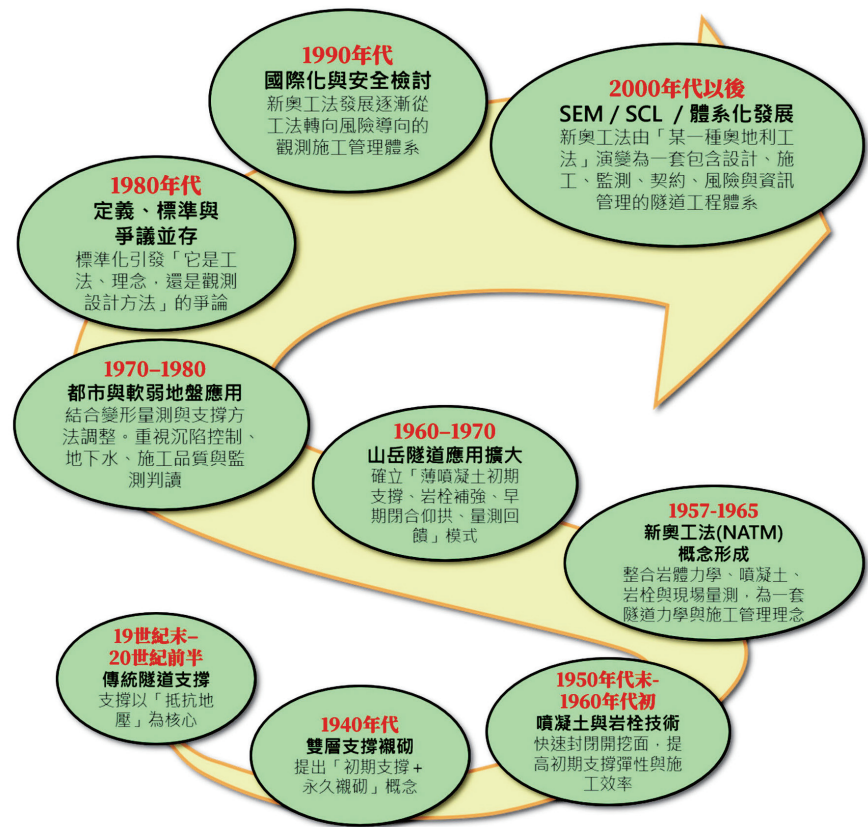


圖 1 新奧工法的發展歷程

表 1 新奧工法發展歷程彙整

時期	發展階段	主要內容	工程意義
19 世紀末至 20 世紀前半	傳統隧道支撐階段	以木支保、磚石襯砌、鋼拱支保為主，常採多導坑分部開挖。	隧道支撐多以「抵抗地壓」為核心，施工慢、支撐厚重，較少明確利用圍岩自承能力。
1940 年代	雙層襯砌觀念出現	Rabcewicz 於 1948 年提出「初期支撐 + 永久襯砌」雙層支撐概念，並主張允許岩體與初期支撐先產生可控制變形，再施作永久襯砌。	奠定「變形控制」與「支撐時機」的觀念基礎。
1950 年代	噴凝土與岩栓技術成熟	噴凝土、岩栓、鋼筋網、鋼支保等支撐技術逐漸普及。Palmström (1996a、1996b) 指出 NATM 利用了 1950 年代末至 1960 年代初期成熟的岩栓與噴凝土技術。	快速封閉開挖面、抑制岩體鬆弛、提高初期支撐彈性與施工效率。
1957 ~ 1965 年代	NATM 概念形成	Rabcewicz、Müller、Pacher 等人整合岩體力學、噴凝土、岩栓與現場量測，逐漸形成新奧工法。1962 年 Rabcewicz 於薩爾斯堡地質力學研討會正式提出 NATM，1964 年於 Water Power 發表英文論文。	NATM 從工程經驗與支撐技術組合，提升為一套隧道力學與施工管理理念。
1960 ~ 1970 年代	山岳隧道應用擴大	NATM 應用於奧地利、德國、瑞士等山岳隧道，特別是弱岩、擠壓性地層、高地壓或複雜地質條件。	確立「薄噴凝土初期支撐、岩栓補強、早期閉合仰拱、量測回饋」的典型模式。
1970 ~ 1980 年代	都市與軟弱地盤應用	NATM 逐漸擴展至地鐵、都市隧道與軟弱地盤；Arlberg Road Tunnel 等大型工程亦採用 NATM 並結合變形量測與支撐方法調整。	工法從山岳岩盤隧道推廣至都市地下工程，但對沉陷控制、地下水、施工品質與監測判讀要求更高。
1980 年代	定義、標準與爭議並存	1980 年奧地利 ITA 國家委員會提出官方定義；但 Kovári 等人後來批評「ground ring」與「activation」等概念不夠明確。	NATM 一方面被標準化，一方面也引發「它是工法、理念，還是觀測設計方法」的爭論。
1990 年代	國際化與安全檢討	NATM 進入英國與其他地區，Heathrow Express Link 隧道坍塌後，英國 HSE 於 1996 年出版 NATM 安全檢討報告。	工程界更重視風險管理、監測預警、施工品質、契約責任與停工準則。
2000 年代以後	SEM/SCL/Conventional Tunnelling 體系化	美國、英國等地常以 SEM (Sequential Excavation Method) 或 SCL (Sprayed Concrete Lining) 描述類似施工體系；FHWA 2009 年道路隧道手冊將 SEM 納入道路隧道設計施工指南。	NATM 逐漸演變為更廣義的「分序開挖、噴凝土襯砌、監測回饋、風險管理為導向」地下工程體系。

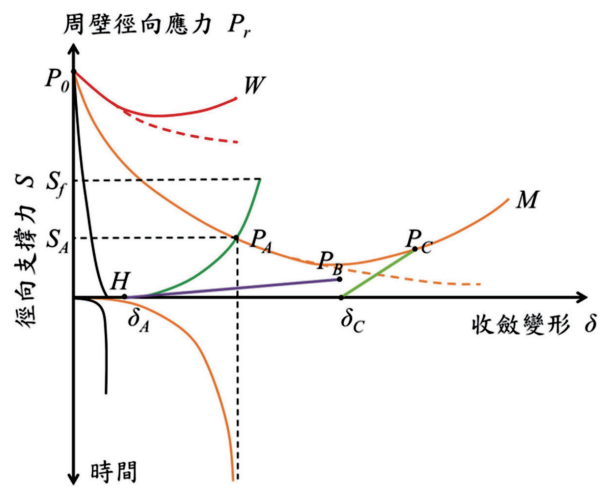


圖 2 地盤收斂曲線及支撐作用曲線（取自王泰典等，2016）

隧道周壁所需的平衡應力可能接近初始狀態應力值，甚至更大，此情況下隧道開挖面附近的變形特性可以 $P_0 W$ 曲線描述。若岩體工程特性中等，現地應力不致過大，則隧道開挖面附近的變形特性介於 $P_0 H$ 與 $P_0 W$ 曲線之間，可以 $P_0 M$ 曲線描述：隧道開挖後周壁可量測到收斂變形量，透過支撐系統可以抑制收斂變形，且收斂變形量的大小與支撐系統設置的時機、支撐勁度大小有關。圖中 $\delta_A P_A$ 曲線與橫坐標軸的交點 δ_A 表示支撐系統設置時，隧道周壁已經發生的收斂變形量，此時支撐系統因構件無變形，而尚未提供支撐作用力， $\delta_A P_A$ 曲線與 $P_0 H$ 曲線的交點 P_A ，表示地盤收斂變形與支撐作用曲線達到平衡，力學上隧道開挖後達到了穩定狀態。此時支撐構件的安全係數可以透過支撐強度 S_f 與平衡狀態支撐受力 S_A 的比值估算。相同的隧道工程地質條件下，支撐系統可能因為勁度不足，或是設置時機過晚，而降低了安全性，分別如 $\delta_A P_B$ 、 $\delta_C P_C$ 曲線的情況。

新奧工法在 1950 ~ 1960 年代逐漸成形，其核心觀念是：開挖後不應立即以極剛性支撐完全承受地壓，而應讓圍岩在可控制範圍內產生適度變形，藉此動員圍岩自承能力，也就是俗稱的地拱效應，噴凝土、岩栓、鋼支保、仰拱與圍岩閉合形成共同承載系統。閉合約束將「圍岩變形－支撐反力－支撐時機」之間的關係轉化為可計

算、可繪圖、可比較的力學方法，清晰地解釋開挖過程中圍岩與支撐的互制效應，並決定適當支撐時機。

2.3 新奧工法的茁壯

在閉合約束法的輔助闡釋下，新奧工法在 1960 年代逐漸與岩體力學、地壓理論及支撐反力觀念結合，並突顯其幾個重要概念，包括：1. 圍岩變形不是完全有害，而是需要控制：適度變形可使開挖後的應力重新分布，降低作用於支撐上的荷載；但若變形過大或支撐過晚，則可能導致鬆弛、剪動、擠壓變形或坍塌；2. 強調支撐－圍岩互制，支撐剛度與支撐時機同等重要：太剛的支撐可能承受過大早期荷載；太柔或太晚的支撐則可能導致過度變形；3. 現場量測納入設計與施工：Pacher (1964) 於試驗坑變形量測與支撐設計的代表性研究逐漸發展，以變形量測作為判斷地盤行為與支撐設計的重要依據，將閉合約束法以及前述 1、2 點概念在隧道工程的應用獲得實踐與檢驗。

1970 年代以後，新奧工法在歐洲山岳隧道、交通隧道與都市地下工程中快速擴展，應用範圍也從深埋山岳隧道擴展到都市軟弱地盤與地鐵工程，挑戰的重點除了圍岩自承能力，還包括：沉陷控制、鄰近建物保護、地下水控制、淺覆土穩定、開挖面穩定、施工分序以及輔助工法等。

1980 年奧地利工程師與建築師協會 (ÖIAV) 所屬道路研究學會之隧道工作組提出新奧工法官方定義：新奧地利隧道工法係藉由啟動地下洞室周圍岩土體所形成的承載環，使周圍岩體或土體本身成為隧道整體承載結構的一部分；此一將圍岩由「施加荷載的對象」轉變為「承擔荷載的主要結構構件」，支撐系統則用來維持、調節並充分發揮圍岩的自承能力，使新奧工法更具制度化與國際識別性 (ÖIAV, 1980; Austrian Society for Geomechanics, 2010)。在新奧工法發展的歷程，瑞士 Kovári 教授多次地批評圍岩自持力、地拱等觀念的定義不明確，並舉例不能夠以發現水具有浮力，來支持某種游泳技

術的發明 (Kovári, 1993)。這一系列的挑戰反而促進了新奧工法理論論述的精進，如今回顧觀之，饒富趣味。

1990 年代，新奧工法已被廣泛用於歐洲以外地區。然而，隨著其在都市軟弱地盤與複雜地下工程中應用增加，安全事件與概念爭議也受到重視。最具代表性的事件之一，是英國 Heathrow Express Link 隧道坍塌。英國健康與安全執行署 (Health and Safety Executive, HSE) 檢討應用新奧工法施工隧道坍塌事件，工法的檢討報告指出，新奧工法不只是噴凝土、岩栓或分部開挖的應用，而應建立完整的管理體系，包括：現場地質判釋、監測資料判讀、警戒值設定、停工與補強準則、設計者與施工者責任分工、契約彈性、第三方審查與風險溝通。HSE 的報告於 1996 年出版 (Health and Safety Executive, 1996)，2014 年再以 PDF 形式重新發布。此後，新奧工法的發展逐漸從工法轉向為以風險管理為導向的觀測施工體系。

2000 年代以後，不同國家對新奧工法的名稱與內涵有不同用法。其中以強調分階開挖、支撐與量測回饋的 (Sequential Excavation Method, SEM)、以及國際隧道協會工作小組 (International Tunnelling Association (ITA), Working Group 14, 2000) 常用、強調與機械化全斷面隧道鑽掘機 (Tunnelling Boring Machine, TBM) 掘進相對的傳統循環式開挖方法 (Conventional Tunnelling) 最為普遍。美國 FHWA 2009 年出版 Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements，其範圍涵蓋明挖覆蓋、鑽炸、機械掘進、沉埋、箱涵推進與 SEM 等道路隧道設計施工內容 (Hung *et al.*, 2009)。FHWA 手冊中的 SEM 指南強調地盤分類、支撐類型、初期支撐、輔助工法與完整監測系統。這代表新奧工法的現代化方向已經自「某一種奧地利工法」，演變為一套包含設計、施工、監測、契約、風險與資訊管理的隧道工程體系 (ITA Working Group

19 Conventional Tunnelling, 2009; Laufer, 2010; Gall and Munfah, 2010)。

三、在我國的應用

按蒐集所得的紀錄資料，台灣的隧道工程最早始於清朝時期台灣巡撫劉銘傳在 1888 ~ 1890 年間建造的獅球嶺隧道，當時曾委託英籍工程師協助。隨著技術的演進，隧道開挖支撐也從 19 世紀末期的人工或半機械化鑽炸開挖、砂岩、紅磚疊砌，木支保、鋼支保，逐步走向油壓鑽堡、噴凝土、鋼線網、岩栓、鋼纖維噴凝土、自動噴漿機與系統化監測。台灣山岳隧道工程長期面臨地質構造複雜、斷層與剪裂帶密集、地下水豐沛、颱風豪雨補注快速等問題。工程實務上，隧道開挖經常遭遇破碎岩盤、擠壓變形、湧水、沉泥、剪裂帶及開挖面不穩定等狀況，因此需要一種能夠依照現地地質變化調整開挖與支撐方式的工法。新奧工法強調開挖後即時支撐、利用圍岩自承能力、現場監測與彈性調整，正好符合台灣山區隧道地質變化快速的工程需求。

儘管 1970 年代新奧工法的理論與施工所需的技術已趨成熟，但 1970 ~ 1980 年代在台施工的北迴鐵路隧道群、奇萊引水計畫隧道群、明湖抽水水力發電工程隧道群等，主要仍以鑽炸開挖、鋼支保配合木楔、木背板等傳統工法施工。儘管奇萊引水計畫隧道工程曾在較佳岩盤區段採用噴凝土與鋼線網取代傳統鋼支保支撐，但並未搭配施工觀測與圍岩變形控制。1982 年東線鐵路自強隧道施工遭遇沉泥段，委請奧地利 Geoconsult 及法國 BSG 公司工程師現場指導，以及德國鐵路顧問 DEC 派員駐地顧問，可視為台灣隧道工程正式引入新奧工法的重要起點。早期引進新奧工法期間，除謝玉山先生曾赴奧地利專題研習並返國應用於自強隧道沉泥段外 (謝玉山與林清標，1984；謝玉山，1985)，王文通先生亦曾親赴歐陸研習新奧工法，並將奧地利隧道工法及岩體分類相關知識整理介紹至國內 (李宏徹，1989；王文通，1989)。林肇振 (1983) 在營建世界發表之新

奧工法 (NATM) 在隧道工程上之應用，則是國內首見新奧工法的技術討論與知識傳播。

1980 年代後期至 1990 年代，南迴鐵路隧道群局部採用新奧工法施工，佳山計畫與明潭抽水水力發電計畫隧道工程則大量或全部採用。明潭地下廠房並被記載為國內首次採用鋼纖維噴凝土與自動噴漿機的重要案例。新奧工法已從單一隧道困難區段處理，擴展為大型地下工程與水力發電地下廠房的主要施工理念。

1990 年代新奧工法成為鐵路與公路山岳隧道常用工法，代表性的案例包括山線鐵路三義壹號隧道、北二高隧道群、北迴鐵路新南澳、新觀音、新永春等隧道，並逐漸累積大量開挖支撐、施工監測與不良地質處理經驗。而 1990 年代後期台 76 線東西向快速公路「芳苑－草屯線」八卦山隧道穿越第四紀台地礫石、砂層及其透鏡體，採用新奧工法設計與施工，將新奧工法應用範圍自岩盤山岳隧道擴展至膠結程度不一、地下水敏感的礫石與砂質地盤 (Wallis, 1999)。

值得一提的，1990 年開工的北宜高速公路雪山隧道原規劃設計以 TBM 為主要工法，僅兩端洞口段使用鑽炸法輔助；然而後續施工過程遭遇斷層、湧水等困難地質狀況致 TBM 受困，改採鑽炸法施工，按新奧工法理論進行灌漿改良地盤突破施工困難區段 (高速公路局網站，2026)。此一經驗突顯新奧工法在地質條件不利隧道施工區段的應用性。

2000 年代後期至 2010 年代，花東鐵路瓶頸路段雙軌化、蘇花公路山區路段改善計畫隧道工程除全面採用新奧工法設計與施工外，更廣泛納入鋼纖維噴凝土等新材料，配合不同尺度隧道工程地質特性整合預測、異質採購最低標 (當時法規名稱，現稱為「評分及格最低標」、施工風險管理、以及即時通報與資訊公開等 (公路局網站，2015；邵厚潔等，2015、2018；王泰典等，2018)，新奧工法在台灣隧道可謂進入成熟化、機械化、材料升級與品質管理強化階段。圖 3 繪出新奧工法在我國隧道工程的應用歷程，表 2 整理相關隧道工程應用紀要。

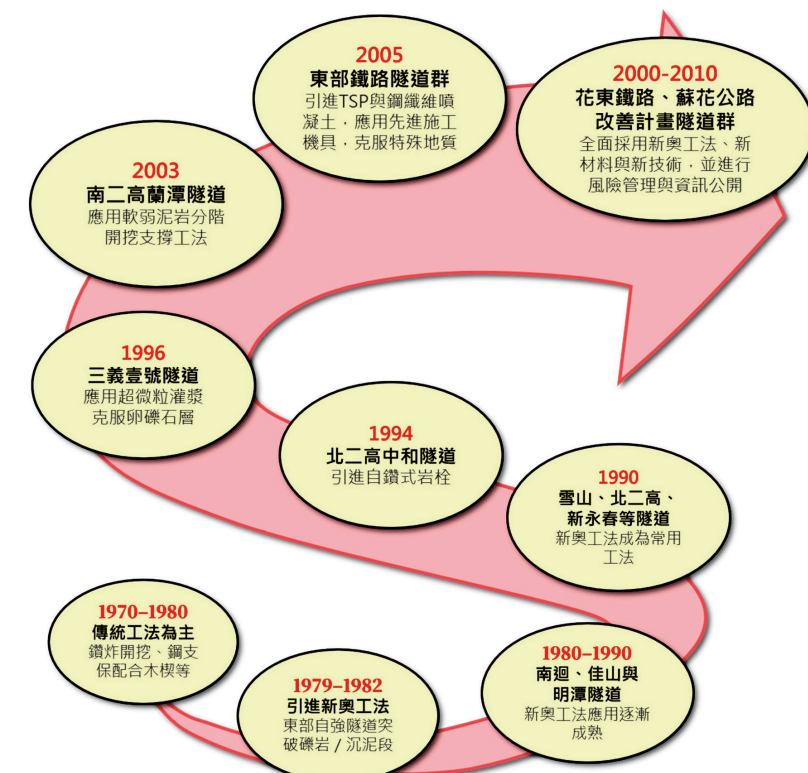


圖 3 新奧工法在我國隧道工程的應用歷程

表 2 新奧工法在我國隧道工程應用紀要（修改自王泰典等，2018）

年代	隧道名稱	紀要	備註
1979 ~ 1982	台鐵自強隧道	首次引進新奧工法突破礫岩／沉泥段	沉泥、擠壓特殊地質
1980 年代	南迴鐵路隧道群	隧道施工全線進行開挖面地質評估、岩體分類、監測及記錄	
1990 年代	北宜高雪山隧道	TBM 屢遭夾埋後，運用新奧工法協助突破	首度設計採用 TBM 開挖
1994	北二高中和隧道	岩栓鑽孔退桿後屢屢坍塌，引進自鑽式岩栓	
1996	台鐵三義號隧道	應用超微粒灌漿改善施工條件，自鑽式岩栓大量應用	卵礫石層
2003	南二高蘭潭隧道	分階開挖支撐，同一橫斷面最多分 9 階開挖	軟弱泥岩
2005	東部鐵路隧道群	引進隧道內震波探測（TSP）技術以及鋼纖維噴凝土，應用先進自動化隧道施工機具	大規模抽坍、高壓巨量湧水等特殊地質
2010 年代	蘇花改隧道群	搭配異質採購最低標（法規現稱為「評分及格最低標」、高風險管理、即時通報及資訊公開等	
2020 年代	國家生技研究園區聯外道路隧道工程	採用全斷面光達掃描及 3D 開挖面動態數位孿生系統	
2026	蘇花安隧道群	設計階段納入三維視覺化工程地質模型、光達掃描施工動態測繪孿生模型、隧道周壁變位模型，開啟數位孿生為核心的隧道設計及施工管理	

四、蛻變與挑戰

4.1 新奧工法在國際隧道工程的未來展望

土層隧道與山岳隧道工程特性不一，施工方法原本大異其趣，前者以潛盾工法為主流，後者則有鑽炸與全斷面鑽掘機（Tunnel Boring Machine, TBM）開挖等不同方式。潛盾機著重於維持開挖面與周圍地層穩定，配合環片襯砌，成為軟弱地盤隧道施工的基礎。TBM 則源自岩盤隧道全斷面機械切削需求，早期多為適用於穩定岩盤的開放式 TBM，隨著滾刀、刀盤以及撐靴等系統持續改良，展現極佳的開挖效率。

1960 年代以後，兩條技術路線逐漸整合。軟弱地盤潛盾由人工開挖發展為全斷面機械切削，並形成土壓平衡式及泥水加壓式潛盾，以開挖土體或加壓泥漿平衡土壓與地下水壓。岩盤 TBM 加裝圓筒形護盾，發展為單盾式 TBM，可在破碎岩盤中保護設備與人員，並以已完成的環片襯砌提供推進反力；雙盾式 TBM 機身具備伸縮護盾設計，結合開放式與單盾式 TBM 優點，可以在挖掘岩石的同時進行襯砌環片組裝，同時具有撐靴及環片推進系統，在穩定岩盤中可同步掘進與組裝環片，遇不良地質時則轉為潛盾機型式推進，大幅提升整體掘進速度與適用地質條件。1990 年代出現兼具土壓平衡與泥水加壓的開挖面穩定與排土系統雙模潛盾機；2010 年代更發展適用於混合地盤的多

模式 TBM，可在開放式、土壓式與泥水式模式間轉換，顯示兩者已由早期的「岩盤切削」與「地層支撐」分工，整合為兼具開挖作業、開挖面穩定、出土、推進及襯砌組裝的一體化機械施工系統。而潛盾機與 TBM 用語的界線也逐漸模糊，國際隧道協會在 2000 年出版的 TBM 建議與導則（Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines）已將潛盾機納入分類，反映 TBM 逐漸成為廣義的上位名詞（International Tunnelling Association, 2000）。

1. 新奧工法與 TBM 形成混合式施工策略

約莫在 20 世紀末，山岳隧道施工出現了鑽炸與 TBM 工法之競合，前者結合新奧工法圍岩變形控制等理論、多元施工機械支援、以及前進支撐與地盤改良等輔助工法，適用的隧道施工地質條件較 TBM 工法廣泛，施工亦具彈性；而 TBM 工法數個嚴重夾埋事件，發展應用一度受到熱議。然而，21 世紀後隧道應用場域大幅擴充，十數公里、甚至數十至百餘公里的長大隧道工程計畫陸續推出，鑽炸工法多元施工機械與開挖效率難以滿足此類長大隧道工程規劃，加速隧道工程朝向機械化施工，再加上土木工程人力資源流失，施工人員需求相對較低的 TBM 工法逐漸成為隧道工程的主流。具有高度施工彈性的新奧工法／分階開挖工法（NATM/SEM）則在斷層破碎帶、洞口淺覆土、大斷面、橫坑、聯絡通

道、擴挖段、避難空間以及地質快速變化區等應用場域被突顯。

因此，未來新奧工法在國際上的發展，可能不再強調「新奧地利工法」這個名稱，而是更重視其背後的工程精神：分序開挖、初期支撐、現場觀測與監測作業、快速回饋、支撐調整與風險管理。而依據地質風險、斷面需求、工期、環境限制與施工可及性彈性調整的施工特性，在施工人力可支持的條件下，仍具競爭力，可以預見的，採用 TBM + NATM/SEM + 輔助工法的複合式策略將是國際隧道施工未來十數至數十年的趨勢。

2. 由傳統觀測法走向數位化觀測法

觀測施工，包括開挖面揭露的地質工程特性、開挖面圍岩穩定性以及支撐後隧道周壁變位等，可謂實施新奧工法本質的要項，但傳統觀測多仰賴人工地質判釋、經驗判斷與收斂量測等監測作業，資料整合與傳遞費時費力。近期觀測作業已朝向數據化與即時化數位發展，包括開挖面影像紀錄、數位地質紀錄與辨識、三維雷射掃描（王泰典等，2018）、收斂自動化量測、配合必要的地下水壓力、湧水量監測，以及支撐構件受力等施工參數整合。國際上亦已提出以資料服務架構整合新奧工法多源施工資料的構想（Du *et al.*, 2018）。

同時，新奧工法應用的核心在於即時現場監測、施工資訊回饋與施工方案動態調整；而未來挑戰在於如何快速取得、管理與分析施工中大量、多源且異質的資料，並建立不同地質條件與施工資料間的關聯。

3. 工程地質模型、數位孿生與智慧化回饋設計

建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）是一套整合設計、施工、營運與維護資訊的數位化協同管理平台，也是土木工程邁向智慧化與全生命週期管理的重要基礎（ISO, 2018）。對於山岳隧道工程而言，地質條件難以完整特徵化與模型化，卻是工程不確定性的主要來源，因此 BIM 在山岳隧道的導入較地上工程困難（Gall *et al.*, 2026）。近年工程地質模型（Engineering

Geological Model, EGM）的發展逐漸受到重視；EGM 可隨工程各階段增補與修正，並結合數位孿生呈現施工觀察及監測結果，使新奧工法傳統「觀察－判釋－修正」的模式，轉變為以 EGM 為核心的「模型－監測－預測－修正」智慧化管理流程（Baynes and Parry, 2024）。

EGM 不僅是設計階段的靜態剖面，更整合鑽探、地球物理探測、岩性與構造分布、地下水及現地應力等資料，並於施工過程依前進探查、開挖面紀錄持續更新，動態表達空間變異與不確定性的三維模型。數位孿生則將實體隧道與虛擬模型連結，持續匯入整合數據化觀測成果，特別是近期近景攝影建置數值表面模型或是地面光達掃描所得點雲，透過各項觀測資料反算岩體參數，檢核設計條件，並使數值模型反映當前圍岩狀態。數位孿生與地工觀察法具有高度互補性，可由單純呈現施工資訊，進一步發展為風險預測及支撐決策平台。此種由現地資料流持續更新虛擬模型，並以模型支援預測及決策的概念，正是土木工程數位孿生的重要發展方向（Sacks *et al.*, 2020; Boje *et al.*, 2020）。

智慧化回饋設計可進一步結合物理模型、機器學習及專家知識，比較實測行為與預測包絡線，自動辨識變形加速、支撐負荷異常及湧水風險，並建議調整開挖進尺、開挖順序、岩栓配置、噴凝土厚度與仰拱閉合時機。目前已在 TBM 開挖隧道逐步應用。可以預期的，由經驗導向、現場觀察調整的新奧工法，很快地將提升為工程地質模型驅動、數位孿生支援及智慧化回饋設計新世代隧道工法。

4. 安全管理與契約制度將更受重視

儘管施工彈性為新奧工法主要優點之一，但也可能因現場判斷、支撐時機、監測警戒值與責任分工不明而產生風險。英國 HSE 在 Heathrow Express Link 隧道坍塌後出版新奧工法安全檢討報告，內容涉及新奧工法失敗與坍塌歷史、法規、風險導向方法與風險管理模式。

新奧工法近年發展已跳脫單純的施工技術框架層次，實務應用上納入完整的風險管理制度已成國際潮流，包括地質基準報告、施工中地質預報、支撐等級調整程序、監測警戒值、停工準則、補強決策、第三方審查、設計－施工－監造責任分工與契約變更機制。各國不盡相同的工程管理與契約制度，也使新奧工法衍生了多元的風險管理制度與對應的應用方法。

4.2 新奧工法在台灣隧道工程的未來展望

台灣位處活躍造山帶，並深受東亞季風影響，多山地的地形特性加上豪雨、颱風的侵襲，基礎設施的邊坡構造物長期維護費用高昂，加上地震與極端氣候事件不時擾動，隧道工程必然是永續發展中關鍵設施的一環。不論山區公路改善、鐵路截彎取直或災害路段改善、水資源開發利用或調度備援等交通、或是水力基礎設施韌性觀點，隧道皆是最重要的構造物。不論與 TBM 工法的競合結果，新奧工法在洞口段、短、中長度山岳隧道、施工橫坑、避難聯絡通道以及局部破碎帶、特殊斷面的隧道扮演的角色勢必不可或缺。另一方面，長大或高覆蓋隧道地質在設計階段難於全線調查，一旦因地質風險考量而採用鑽炸開挖配合新奧工法施工，施工挑戰自然不在話下。換言之，新奧工法應用在更多困難施工隧道工程環境是可以預期的。此一情境下，新奧工法在台灣隧道工程將朝向幾個方向發展：

1. 數位孿生為核心的工程地質模型、超前探查與施工監測結合

乘數位科技進步之便，EGM 得以三維數位化呈現。我國在科技領域亦居全球領先群，隧道工程數位孿生發展進度具優勢地位。王泰典等（2025）提出山岳隧道設計施工多模型整合應用技術，將工程地質模型、數值模擬模型與施工動態測繪孿生模型、以及隨開挖面前進變化的隧道周壁變位模型等於同一平台整合呈現，具有精進隧道施工監測作業效益。將其所提技術應用位於台北市南港的國家生技研究園區聯外道路大斷面

隧道工程通過極淺覆蓋區段施工監測，按開挖面測繪地質結果修正視覺化三維工程地質模型，並據以調整數值模擬模型；繼而按施工過程應用先進測繪技術建立的隧道施工動態孿生模型以及隧道周壁變位模型進行反算分析，求得地盤參數後，提供檢核並調整淺覆蓋段支撐設計與施工策略，成功地克服施工挑戰。數值模擬模型預測的隧道周壁與隧道周壁變位模型在量值與空間分布特性相符，顯示以數位孿生為核心的多模型整合技術具有精進山岳隧道施工監測的應用性。該整合技術可望將推廣至國內近期推動的山岳隧道工程。此工程亦由臺北市政府公開說明採用全斷面光達掃描及 3D 開挖面動態數位孿生系統（臺北市政府工務局新建工程處，2025）。

2. 從施工期監測擴展到全生命週期監測

台灣隧道工程發展已逾 130 年，最早一批採用新奧工法施工的隧道使用已逐漸接近早期一般土木構造物設計考量的服務年限，並且陸續出現襯砌漏水、裂縫等現象，甚至已有結構安全堪虞而改建案例。隧道結構安全檢測經驗回饋了數個涉及隧道設計、施工以及維護管理要項，包括透過數位孿生技術保存隧道設計、施工階段工程地質調查、施工監測、特殊地質處理、以及建築資料模型等，以及觀測營運期隧道結構長期演化，以提供維護管理決策依據。

爰此，以往台灣新奧工法隧道工程多強調施工期間的監測作業，未來應進一步延伸到營運期，包括襯砌裂縫、滲漏水、地震後變形、背後空洞、排水系統阻塞、長期潛移或擠壓變形等監測。此一變革將使新奧工法強調圍岩變形觀測與隧道行為掌握的精神，由施工階段延伸至智慧化隧道維護管理。

3. 發展台灣化的新奧工法資料庫與案例回饋機制

台灣已有豐富的新奧工法隧道施工案例，包括鐵路、公路、水工、地下廠房與長隧道工程，但資料常分散在設計報告、施工紀錄、監測

報表、災變處理紀錄與學位論文中。未來若能建立台灣新奧工法案例資料庫，將開挖面地質、岩體分類、支撐型式、變形曲線、湧水量、災變事件、補強措施與施工速率整合，可大幅提升新工程的地質風險評估與支撐設計合理性。

國際上已有研究主張以大數據環境建立新奧工法施工資料服務系統，整合多源異質施工資料並建立資料關聯，提供類似工程快速查詢與決策參考。這一方向非常適合台灣推動本土化隧道工程知識庫。

4. 材料與設備將朝低碳化、自動化與高品質控制發展

台灣新奧工法已從早期鋼支保、噴凝土與人工噴漿，發展到桁型鋼支保、自鑽式岩栓、鋼纖維噴凝土與自動噴漿機。近期並進一步強化濕拌噴凝土品質控制、噴凝土回彈量降低、早強與韌性控制、低碳膠結材料、機械手臂噴漿、無人化危險區作業與數位施工紀錄。花東鐵路瓶頸路段雙軌化與蘇花公路山區路段改善隧道工程經驗已顯示，這些新技術已逐漸成為台灣新奧工法隧道施工的配套措施，未來可望進一步成熟應用。

5. 與智慧基礎設施及防災管理結合

台灣隧道不只面臨施工風險，營運期間也面臨地震、豪雨、滲漏水、排水系統老化、襯砌劣化與坡地災害連動問題。未來新奧隧道應與智慧基礎設施管理結合，將施工期監測資料保留下來，作為營運期健康監測的初始狀態資料；再透過光纖感測、影像辨識、雷射掃描、物聯網感測器與人工智慧異常判釋，建立從施工到維護的一體化資料鏈。

五、結語

回顧新奧工法的發展可知，其形成並非單一設備或支撐材料的發明，而是岩體力學、噴凝土與岩栓技術、閉合約束觀念及現場量測逐步整合的結果。其核心理念是明瞭地下工程地質條件

的不確定性，以可控制的圍岩變形機動發展其自承能力，再透過適時、具變形相容性的初期支撐與及早發展地拱效應，使圍岩與支撐形成共同承載系統。觀測結果不是施工紀錄的附屬品，而是驗證設計假設、調整支撐等級與管理施工風險的必要依據。

台灣自 1980 年代由自強隧道困難地質處理開始引進新奧工法，歷經鐵路、公路、水力工程與大型地下空間的應用，已逐步建立開挖面地質判釋、岩體分類、分階開挖、初期支撐、輔助工法及監測管理等實務能力。台灣複雜多變的地質條件、豐沛地下水、強震與豪雨環境，使新奧工法彈性的施工應用尤其重要；但也說明它不能被視為固定的支撐表或施工循環。工法成效取決於工程地質模型的可靠度、現場判釋品質、支撐施作時機、監測反應速度，以及設計、施工、監造與業主間清楚的責任及契約調整機制。

面對長大隧道機械化施工潮流、土木工程人力流失以及地質風險升高的趨勢，TBM 工法必然將成為隧道工程的主流。新奧工法憑藉其隧道力學完整理論與施工彈性，未來將與 TBM、超前探查、灌漿及其他地盤改良技術形成複合施工策略；其觀測法亦將由人工量測轉向影像、光達、物聯網及自動感測所構成的數位化觀測。以數位孿生為核心，整合工程地質模型、數值模擬模型與施工動態測繪孿生模型、以及隨開挖面前進變化的隧道周壁變位模型等於同一平台整合呈現，可使施工揭露的地質與變形資料即時更新模型，進一步進行參數反算、風險預測與支撐方案比較，將傳統的「觀察－判釋－修正」提升為可追溯且具不確定性管理的智慧化回饋設計。同時，施工期資料應延伸至營運維護，作為滲漏水、襯砌裂縫、排水功能、地震後反應及長期變形評估的初始基準。新奧工法的名稱與施工配套可能持續演變，但「以圍岩行為為核心、以量測證據修正設計、以風險管理確保安全」的基本精神，仍將是未來山岳隧道工程不可取代的核心。

參考文獻

1. Austrian Society for Geomechanics. (2010). Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation.
2. Baynes, F. J., & Parry, S. (2024). Guidelines for the Development and Application of Engineering Geological Models on Projects (Version 2.0). IAEG Commission 25 Publication No. 1.
3. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
4. Du, B., Du, Y., Xu, F., He, P. 2018. Conception and Exploration of Using Data as a Service in Tunnel Construction with the NATM, *Engineering*, 2018, 123-130.
5. Fenner, R. (1938). *Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks*. Essen: Glückauf.
6. Gall, V.E., Mleczo, V., Robert, F., Angerer, W., Salmi, J., Ye, Z., Grasmick, J., Rives, M., Aldrian, W., Dohmen, P., Jacobs, A., Ninic, J., Karlovsek, J. (2026). ITA-AITES – BIM in tunnelling – Guideline for mechanised and conventional tunnels. 168. [10.1016/j.tust.2025.106714](https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106714).
7. Gall, V., Munfah, N. (2010). Design Guidelines for Sequential Excavation Method (SEM) Practices for Road Tunnels in the United States. North American Tunneling Conference. 415-422.
8. Health and Safety Executive. (1996; reissued 2014). Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels: A Review of Sprayed Concrete Lined Tunnels with Particular Reference to London Clay. HSE.
9. Hung, C. J., Wisniewski, J., Monsees, J., & Munfah, N. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. FHWA-NHI-10-034, Federal Highway Administration.
10. ISO (International Organization for Standardization). (2018). ISO 19650-1:2018, Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM)—Information Management Using Building Information Modelling—Part 1: Concepts and Principles. Geneva: ISO.
11. ITA Working Group 14 Mechanized Tunnelling. (2010). Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines—ITA Report.
12. ITA Working Group 19 Conventional Tunnelling. (2009). General Report on Conventional Tunnelling Method—ITA Report No. 2.
13. Kovári, K. (1993). Erroneous Concepts behind NATM. Lecture at the Rabcewicz-Geomechanical Colloquium, Salzburg.
14. Lauffer, H. (2010). The Development of the NATM – A Historical Review. *Geomechanics and Tunnelling*, 3(6), 763–772.
15. Müller, L., Fecker, E. (1978). Grundgedanken und Grundsätze der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“. In O. Natau, E. Fecker, & G. Reik (Eds.), *Grundlagen und Anwendung der Felsmechanik: Felsmechanik-Kolloquium Karlsruhe 1978* (pp. 247–262). Trans Tech Publications.
16. Nicholson, D., Tse, C.-M., & Penny, C. (1999). The Observational Method in Ground Engineering: Principles and Applications. CIRIA Report 185. London: CIRIA.
17. ÖIAV (Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein). (1980). Neue Österreichische Tunnelbaumethode: Definition und Grundsätze. Wien.
18. Pacher, F. (1964). Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues. In: Müller, L. (eds) *Grundfragen auf dem Gebiete der Geomechanik / Principles in the Field of Geomechanics. Felsmechanik und Ingenieurgeologie / Rock Mechanics and Engineering Geology*, vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-25703-6_12
19. Palmström A. (1996a). Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering. Part 1: The development of the rock mass index (R_{Mi}). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175 – 188.
20. Palmström A. (1996b) Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering. Part 2: Some practical applications of the rock mass index (R_{Mi}). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), 287 – 303.
21. Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
22. Panet, M., Guellec, P. (1974). Contribution à l'étude du soutènement derrière le front de taille. *Roc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mechanics*, 2B.
23. Peck, R. B. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187.
24. Rabcewicz, L. V. (1964a). The New Austrian Tunnelling Method, Part One. *Water Power*, November 1964, 453–457.
25. Rabcewicz, L. V. (1964b). The New Austrian Tunnelling Method, Part Two. *Water Power*, December 1964, 511–515.
26. Rabcewicz, L. V. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part Three. *Water Power*, January 1965, 19–24.
27. Rabcewicz, L. V., Golser, J. (1973). Principles of Dimensioning the Supporting Systems for the New Austrian Tunnelling Method. *Water Power*, March 1973, 88–93.
28. Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with Digital Twin Information Systems. *Data-Centric Engineering*, 1, e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.
29. Wallis, S. (1999). NATM Takes on Gravel Deposits in Taiwan. *Tunnels & Tunnelling International*, 31, 30-2.
30. 公路局網站，2015，公告「資訊」新聞專區「本局最新消息」1445 日無數汗水與努力，蘇花改最長觀音隧道全線貫通，https://www.thb.gov.tw/News_Content_table.aspx?n=87&s=51457。
31. 林肇振，1983，新奧工法 (NATM) 在隧道工程上之應用，*營建世界*，23，75-82。
32. 王文通，1989，部份斷面挖掘機在隧道工程和開礦中之應用，*地工技術*，28，50-60。
33. 王泰典、李亮瑩、郭育安、許宗傑，2016，岩石隧道開挖面工程地質特性及開挖支撐快速量化評估新技術，*大地技師*，12，14-27。
34. 王泰典、林璋元、黃詠智、莊海岳、邱家宏、李佳翰、林俊良、陳正勳，2025，測繪學生結合工程地質與數值模擬模型精進山岳隧道施工監測探討，第 23 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會 (TUSS 2025)。
35. 王泰典、陳正勳、邵厚潔，2018，新奧工法在我國隧道工程應用回顧及蘇花公路山區路段改善計畫的精進，*地工技術*，157，7-16。
36. 李宏徹，1989，編者的話，*地工技術*，28，4。
37. 臺北市政府工務局新建工程處網站，2025，國家生技研究園區聯外道路工程榮獲 113 年度優良隧道工程獎肯定，https://nco.gov.taipei/News_Content.aspx?n=BB8CF6F431E10630&sms=72544237BBE4C5F6&s=FF00921F4D46299D。
38. 謝玉山，1985，自強隧道沉泥段之突破，*地工技術*，11，41-50。
39. 謝玉山與林清標，1984，新奧工法在自強隧道之應用，*土木工程*，20，12-26。
40. 邵厚潔、林蔚然、蔡立盛、陳正勳、吳文隆，2015，臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫隧道規劃及特殊考量，*中華技術*，105，66-83。
41. 邵厚潔、陳正勳、吳宗翰、林志權、郭育安、鄭斯元，2018，臺 9 線蘇花改計畫南澳和平段隧道特殊考量及困難地質因應，*中華技術*，119，52-67。
42. 高速公路局網站，2026，本局資訊「歷史專區」國道新建工程局歷史專頁「國道路網規劃及建設成果」國道 5 號工程，<https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=3009>。

臺灣大地工程近三十年之發展與回顧——潛盾隧道之發展與研究趨勢

熊彬成 國立中興大學土木工程學系 / 教授、大地技師

一、前言

所謂的潛盾隧道工程，即主要使用潛盾機進行隧道挖掘之工程。而潛盾機（Tunnel Boring Machine；或稱 Shield Machine）（如圖 1）是一種以鋼構筒體為主體之隧道施工機具，其鋼製外殼可在隧道開挖過程中承受並平衡地下水壓與土壓，因此施工較不易受到地層與地下水條件影響。依施工方式不同，潛盾機可分為密閉式與開放式兩類。施工時藉由刀盤切削前方土體，並配合土艙控制開挖與出土量，以維持開挖面穩定，避免坍塌發生。此外，以密閉式潛盾機挖掘隧道，尚分為泥水加壓式或土壓平衡式，其差別在於泥水式利用泥水壓力平衡挖掘所遭遇的土壓力，土壓平衡式則是直接在潛盾機機首的後方，用油壓千斤頂加壓的方式，提供與前方土壓類似的壓力，在二者達平衡之後，讓潛盾機向前掘進。

潛盾機在往前掘進的過程中，主要依靠前端刀盤旋轉進行土體或岩體切削，刀盤（如圖 2），由驅動系統帶動持續旋轉，並利用配置於刀盤表面不同類型的刀具（例：碟刀或刮刀等等）破碎前方地層使整體盾體向前推進。被切削下來之破碎土體會進入土艙內，再透過螺旋輸送機或泥水循環系統排出至後方，以維持開挖面之穩定與壓力平衡。刀盤的轉速、推進速度及排土量需依據地層條件進行調整。

近年來，潛盾工法已成為都市地下工程中最重要且最常見的隧道開挖技術之一，尤其台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界帶，地質環境多變，工程常遭遇軟弱夾層、高塑性黏土、含礫層甚至岩層等複雜地層。在台灣高密度的都市開發下，潛盾機將持續為地下開挖之主力機具。而隨著潛盾機的廣泛運用，潛盾隧道工程之施工效率與成本控制，已成為其核心問題之一。切刀刀具的磨耗行為與壽命管理機制，對於潛盾工法的效率與成本深具影響力。

刀盤為潛盾機中直接負責岩層破碎與切削的重要構件，其使用壽命及刀具更換頻率，對整體施工效率、工期控制與經濟效益皆具有重要影響。在硬岩地層掘進過程中，刀具會持續與岩石表面接觸並產生摩擦，岩體材料在應力作用下會產生塑性變形；當應力集中達到較高程度時，亦可能因衝擊能作用而導致岩石發生脆性破壞，以達成切削效果。

過去台灣都會區中的潛盾隧道同質性較高，多是在軟弱土壤中掘進，加上用地與路權較容易取得，所以多著重在直線／接近直線隧道所導致的地表／建物沉陷，以及相關的建物保護措施。然由於近年來地上／地下環境複雜、用地與路權取得不易、新都會區的地層條件不同、加上必須考慮永續與節能減碳的議題，以致會衍生出新的研究議題，以下就一一探討。

二、刀具磨損探討與評估

在軟弱地層的掘進，潛盾機面盤上的刀具磨損通常較為輕微，故過去較少予以探討，但若在較硬地盤進行切削，如礫石或岩層，刀具磨耗大，刀具磨損的程度與相關議題就變成需要探討的議題。刀具磨耗型態一般可分為正常磨耗與異常磨耗兩大類（如圖 3 和圖 4 所示）。正常磨耗主要為沿刀具徑向方向所產生之均勻磨損；而異常磨耗則包含平面磨損、開裂、開口環脫落以及剝落等形式。上述磨耗現象除會降低刀具切削效率外，亦可能增加刀具更換頻率與施工風險，因此刀具磨耗行為之分析與預測，對潛盾施工管理具有重要意義。

影響刀具磨耗的主要因素，包含地質條件（如土體成分、粒徑分布）與操作參數（如掘進速度、刀盤轉速與壓力控制）。目前針對潛盾機掘進性能與刀具磨耗預測，已有多種相關模型與概念被提出。其中較具代表性的方法為：Teale（1965）提出「比能」概念，定義為鑽掘工具破壞單位體積岩石所需消耗之能量，該指標常用於評估施工效率、刀具磨耗以及成本效益。

為了能夠模擬刀盤磨耗，Shu *et al.* (2026) 利用分離元素法（Discrete Element Method；DEM），模擬刀盤切削礫石所產生前述的比能（Specific Energy；SE），再利用 SE 去協助評估刀盤所造成的磨耗，並搭配小型實驗室實驗予以部分驗證。同樣利用 DEM，筆者亦嘗試建立一套合理的數值模擬分析模型；首先是先利用單壓試驗結果，在數值模型中建立微觀參數以模擬大地材料，接著再以潛盾隧道施工時，潛盾機的實際操作參數作為輸入參數，在模型中置入簡化後的潛盾機刀盤，並加入現地地層條件，模擬刀具與地層交互下的磨耗反應（如圖 5）。由於潛盾隧道掘進作業的效率與設備磨損的情形將直接受刀盤－地層交互行為的影響，了解刀具於推進過程中所承受的應力與能量是有必要進行的研究。

誠如前文所言，本分析採用 DEM 作為數值模擬的基礎工具，將現實試驗數據所獲得的岩石力

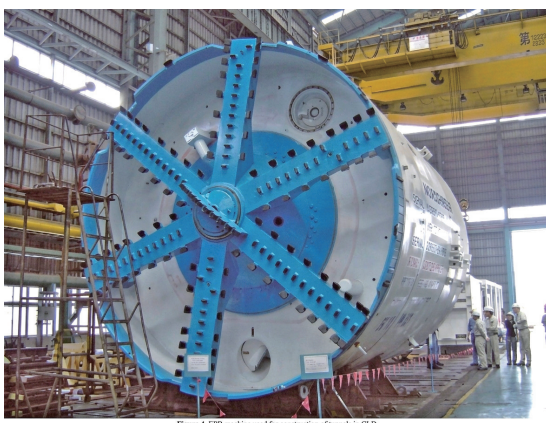


圖 1 潛盾機



圖 2 潛盾機刀盤



圖 3 正常磨損刀具



圖 4 潛盾數值模擬模型

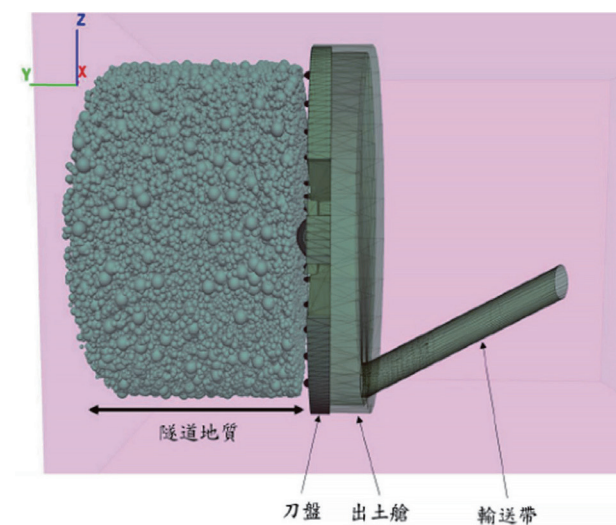


圖 5 異常磨損刀具

學性質（宏觀參數），在軟體裡進行微觀參數校正與模擬分析，以建立能夠反映刀盤與地層間真實互制行為之數值模型。利用校正後之模型，可更有效模擬刀具於掘進過程中的受力、破岩機制及磨耗行為。另外，結合現地施工監測資料（如：潛盾機推力、刀盤扭矩），作為模型驗證依據，並進一步評估刀具的磨耗量。透過數值分析與現地資料的相互比對，不僅能更有效評估刀具磨耗程度，也有助於掌握刀盤於施工期間的運作狀態。期待能作為提升磨耗預測能力與精進工程設計的工具。

而近年來，人工智慧與機器學習技術於土木工程領域中的應用日益廣泛，尤其在大數據分析、工程預測與數值模擬等方面展現出良好成效。相較於傳統經驗公式或理論分析方法，機器學習能夠透過大量資料訓練，自動建立輸入參數與工程行為間之非線性關係，進而提升預測效率與準確性。

為了建構一套能夠隨施工進度即時預測潛盾刀盤磨耗趨勢之模型，目前亦進一步導入機器學習技術於刀盤磨耗分析中。首先，將 DEM 數值模擬所得結果與現地施工監測資料進行比對，以驗證數值模型之合理性與準確性。完成模型驗證後，再利用已校正之數值模型模擬不同施工操作條件下之掘進行為，藉此獲取大量不同工況下的刀盤受力與磨耗結果。將上述數值模擬成果作為機器學習模型之訓練資料，透過大量樣本建立潛盾操作參數、地層條件與刀盤磨耗之間的關聯性。進一步建立具預測能力之刀盤磨耗模型，以即時推估切刃齒之磨耗趨勢與可能之磨耗程度。

除此之外，相關研究亦嘗試將潛盾機運行狀態與刀盤磨耗行為進行連結。以現地施工監測數據作為原始資料來源，包括潛盾機推力、刀盤扭矩、掘進速度、刀盤每分鐘轉速（rpm）等操作參數，並分別導入兩種不同之機器學習演算法進行模型訓練與結果比對（如圖 6 和圖 7 所示，分別採用 PCA+XGBoost+KMeans 與 Kernel PCA+KMeans 兩種不同的演算法；兩種演算都是以潛盾機實際操作參數，搭配不同權重來計算圖上的 PC1 跟 PC2 兩種指標）。

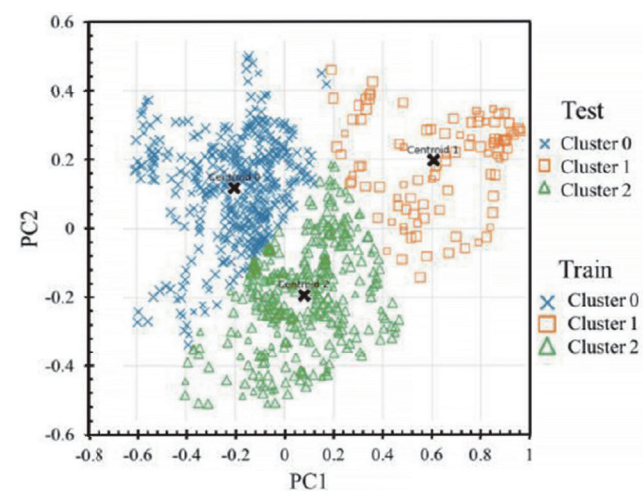


圖 6 機器學習應用於磨耗預測之模型(一)

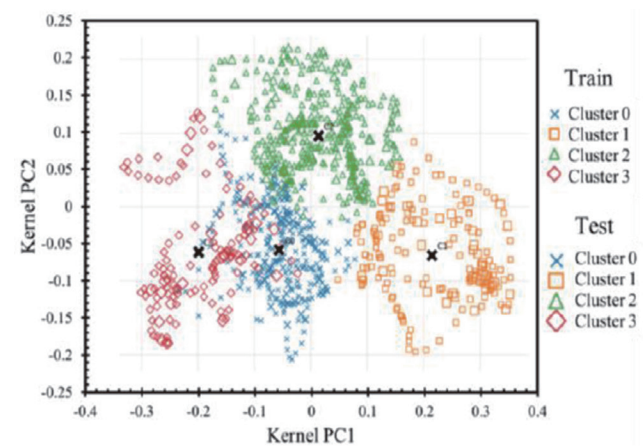


圖 7 機器學習應用於磨耗預測之模型(二)

透過演算法對大量施工資料之分析，可進一步找出影響刀盤磨耗之主要關鍵參數。並將潛盾機於不同施工階段之運行狀態進行分類，藉此了解不同工況下對刀盤磨耗所造成之影響程度。期望透過此機器學習模型，能更有效掌握潛盾機施工過程中的刀盤磨耗趨勢，並且找出其相對物理意義，以圖 7 為例，潛盾機在 Cluster 0 指在低掘進速率與高推力條件下，卻仍有適當／正常的（Moderate）刀具磨耗；Cluster 1 則指低掘進速率、高推力與高扭矩時，會有更多的刀具磨耗且掘進效率不佳；當潛盾機堵塞時（可能有類似 clogging 效應），導致刀盤旋轉不易，有較小的推力與接近平均的掘進速率，但承受更高的扭矩，造成刀具異常磨耗，就屬於 Cluster 2；若潛盾機有高掘進速率、低推力與高扭矩，代表此時效率較佳，可能是刀具剛更換或地層較軟，則屬於 Cluster 3。

期望未來能建立潛盾施工管理與刀具維護決策的重要輔助工具，進一步提升施工效率、降低停機風險，並增進工程規劃與設計之可靠性。綜觀隧道工程之發展歷程，如今已逐步演進至高度機械化與智慧化之潛盾施工技術。隨著都市化快速發展與地下空間需求增加，潛盾工法已成為現代都市地下工程中不可或缺的重要施工技術。而在台灣複雜的地質條件下，刀盤磨耗的問題直接影響了施工效率、工程成本與施工安全性。因此，近代研究開始導入理論分析、數值模擬及大數據／機器學習／人工智慧資料分析技術，欲建立更具科學依據之刀具磨耗預測方法。另一方面，有效的預測刀具磨耗，避免無謂的浪費，亦可達到永續之目的。

隨著人工智慧與機器學習的興起，進一步推動地下工程分析模式之轉變。透過整合現地監測資料、施工參數與數值模擬結果，機器學習能有效建立複雜參數間之非線性關係，大幅提升刀具磨耗預測與模型校正效率。尤其在離散元素法建模方面，人工智慧技術的導入能提供更快速且系統性的道路。也期望未來能整合多項理論、技術，進一步朝向智慧化潛盾施工發展，建立兼具即時監測、數值分析與預測能力之整合系統，以提升地下工程施工效率、降低施工風險，並增進整體工程管理與設計品質。

三、潛盾機設備的改善

針對前述路幅／路權取得困難、加上所遭遇的地層可能又較過去案例複雜，捷運工程於地下隧道潛盾機的設備改善上，也作了以下的調整：首先是刀盤與中折設備的改變，以位在新北市的某案例來說明，由於隧道的曲率半徑僅有 51 公尺與 57 公尺，潛盾機採用雙中折設備，並適當的使用超挖刀，可有效降低在急轉彎的時候施工性，以及所引致的地表沉陷，由圖 8 可得知，在雙隧道開挖完成後所引致的最大地表沉陷，大約為 40 mm 左右（劉富傑，2024），較過去經驗公式所預估得來得小。此外，為了降低盾尾間隙所使用的背填灌漿設備，體積也大量減少，可完全置入機尾內，進行同步背填灌漿。

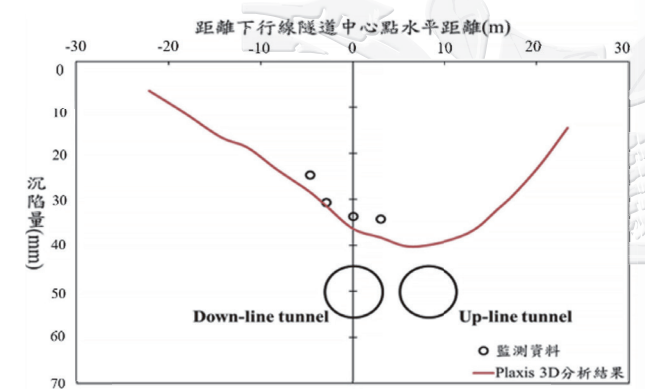


圖 8 捷運急曲線隧道施工所引起之地表沉陷

再者，因應長推進，甚至在較堅硬地盤掘進時，有較頻繁更換切刃齒之需求，目前各潛盾機製造商紛紛開始改用多增加了電子式感應計的面盤，以同步了解切刃齒在掘進時的磨耗。另外，更換切削齒的方式，也從過去僅能進行地改後出艙換齒，改成能由艙內進行換齒，以降低在更換切刃齒時可能產生的風險。

四、大圓潛盾機與 GFRP 鏡面的運用

以傳統的捷運潛盾隧道施工而言，大多採外徑為 6.2~6.25 公尺的標準圓潛盾機來施作；然由於車站位置的限制，在桃園綠線 G07-G10 車站中間的主線段，改採兩部外徑約 8 公尺的中圓潛盾機來施作隧道，並在接近車站的區域，利用額外的空間作為車站的月台，之後再以聯絡通道的方式與主車站區聯通，相關中圓潛盾機的捷運或軌道工程上之使用，在國內雖屬創舉，但在國外早就屢見不鮮（熊彬成，2021），故在國內仍有繼續推廣之必要。另外，為了能達成節能減碳的目的，世界各國開始紛紛接受所謂「再生（refurbishment）潛盾機」，也就是將使用過的潛盾機之重要配件更新、保養與維修之後，再重新使用。這不僅有減少採購潛盾機的空間，也降低處理廢棄舊機的成本，甚至達到節能減碳的目的。

另外，更有許多國家開始紛紛改採單一大圓（即直徑 10 m 以上）潛盾機，取代兩部傳統圓潛盾機，來進行捷運地下隧道的開挖；目前有相關經驗的計畫，包含西班牙巴塞隆納地鐵，以及新加坡地鐵正施工中的環島線（Cross-Island Line），其潛

盾機（如圖 9 所示）直徑達 12.2 m。其概念也是認為與兩部傳統圓潛盾機比較起來，僅採用一部大圓潛盾機，不論在製造或施工的碳排放量上，都會較低，可以達成永續的目的。另外，採用大圓潛盾機，減少出發到達次數，還有聯絡通道施作等高風險工項的施作，對降低工程風險，有一定的幫助。

GFRP（玻璃纖維增強聚合物）是一種複合材料，由玻璃纖維增強聚合物基體製成。玻璃纖維通常由二氧化矽、氧化鋁和鈣組成，嵌入聚合物基體中以增強材料的機械性能。由於 GFRP 能提供一定的抗拉強度，但在潛盾機破鏡時，會較傳統鋼筋容易切削，故可被使用在連續壁的鏡面上，不只潛盾機出發／到達時相對容易切削，地盤改良的成本也將大幅降低。

國內目前較常使用在以連續壁作為擋土結構上的鏡面（如圖 10），但國外也有將類似鏡面安裝在以排樁／切削樁式擋土結構上的經驗，未來在進行須採用樁式擋土結構之潛盾隧道之出發到達，亦可予以考慮。此外，由於該材料的製造，幾乎無碳排產出，也可符合減少碳排的需求。



圖 9 新加坡地鐵所使用的大圓潛盾機



圖 10 GFRP 鏡面

五、鋼纖維混凝土環片之使用

國內目前潛盾隧道所使用的預鑄環片，依使用材料區分，大致上有鋼筋混凝土、鑄鐵跟鋼三種環片。然實際上，以一般環片的受力行為來說，大部分受壓，並非受拉，所需抵抗的張應力，應該相當的有限。再者，在台灣，混凝土環片所使用的鋼筋量與國外相較之下，量體高出許多。近幾年來不論是鋼筋本身的材料價格，或者是鋼筋綁紮所需要的人工價格，都大幅度提升，而環片製造時間長，產量有限，且國內需求量又大，確實是有開始研發具同等或更佳功能，價格卻可能相對低廉且生產速度較快的預鑄環片之必要性。

因此，針對前述需求，國內開始對國外已使用多年的鋼纖維混凝土環片，進行初步的研究。所謂的鋼纖維混凝土環片，即是以鋼纖維來取代鋼筋，使用在預鑄環片中。預鑄鋼纖維混凝土環片的生產，由於不需要進行鋼筋捆紮，應該能大幅減少鋼筋的用量，進而大幅縮短環片廠生產環片的時間，大量增加產線的產能，加上又有減少碳排，成本降低，延展性（韌性）較佳，生命週期較長（可達 120 年），甚至若有裂縫產生，還有進行修補的可能等等之優點。為了進一步驗證預鑄鋼纖維混凝土環片的強度與功能性，2024 年曾經在中部某預鑄廠試作了相關型式的環片，並且就抗彎試驗（如圖 11）、灌漿孔拉拔試驗與抗推試驗的結果，與預鑄鋼筋混凝土環片的試驗結果作比較，發現其差異不大，然鋼纖維的使用量，僅有每立方公尺混凝土 40 公斤而已，遠低於目前所使用的鋼筋量。另外，為考量或許預鑄環片在有額外側壓的環境下，可能會承受額外的張力，此時預鑄鋼纖維亦可搭配少量的鋼筋、甚至前述的 GFRP，形成所謂的複合環片（如圖 12），以滿足實際的工程需求。以圖 12 來進一步說明，可以看到僅在環片邊緣放置少量鋼筋或 GFRP（即有畫線條部分），其他部分的則全部為鋼纖維所取代，此即為所謂的複合環片。圖 13 則是環片的抗彎試驗結果，比較了純 SFRC（鋼纖維環片）跟複合環片（即 SFRC+GFRP），可以發現複合環片的抗彎能力（主要是抗拉能力）是大幅提升的。



圖 11 預鑄鋼纖維混凝土環片抗彎試驗

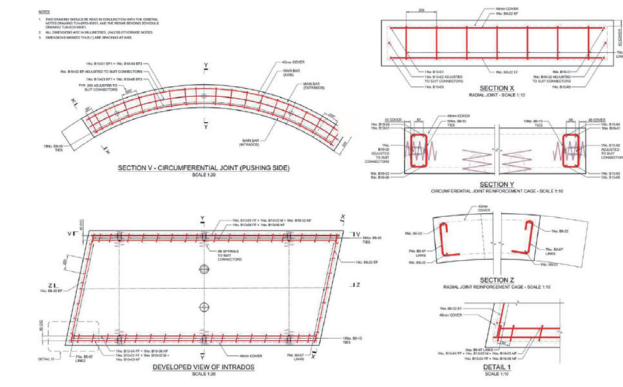


圖 12 複合式預鑄環片

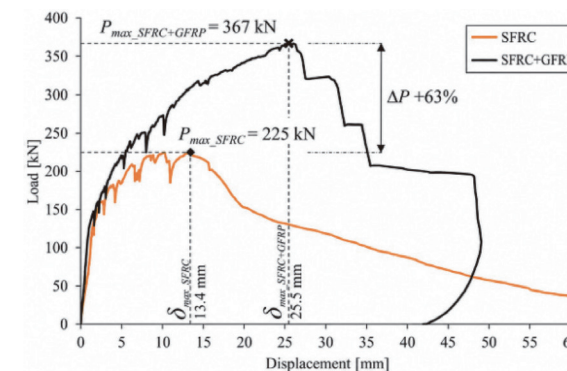


圖 13 複合式與純鋼纖維混凝土預鑄環片之 Load-Displacement 曲線差異

六、機械式聯絡通道開挖

在主隧道中間的聯絡通道開挖，由於目前在國內皆採地改後人工開挖，所以一向被視為高風險工項，國內最近較知名因聯絡通道開挖導致事故，當數 2005 年高雄捷運橘線隧道於中正路下方開挖聯絡通道之集水井時，產生大量湧水，然後演變成大規模的坍塌，雖所幸無人傷亡，但卻導致工期之延宕，以及額外新台幣 20 億工程費的支出。

有鑑於此，日本、德國與中國大陸的各專業廠商，紛紛推出可挖掘聯絡通道的小型潛盾機，以機械式挖掘的方式（如圖 14 所示），來

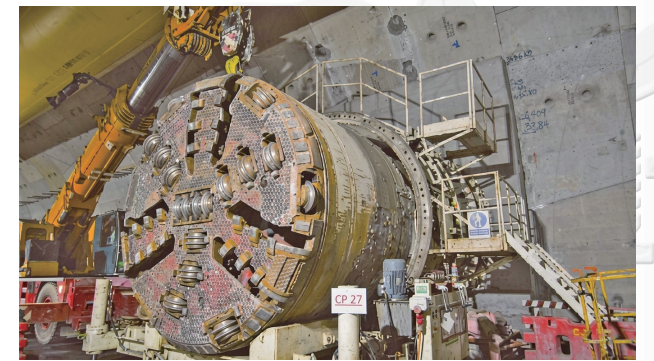


圖 14 機械式聯絡通道開挖

取代目前的人工挖掘的方法，且相關工法已被應用在國外的數個案例，已大幅降低聯絡通道施工之風險。然為了採用相關機械式開挖，潛盾隧道設計可能就必須配合調整，例如兩條主隧道間之距離跟可使用空間，必須符合小潛盾機的需求，且聯絡通道不得再作為集水井之用。因此，在相關應用上，仍有進一步探討的空間。

七、結論

本文從分析、設計、施工、機具設備與材料使用等不同面向，探討了潛盾隧道工程近年來的發展，尤其是與捷運或軌道工程相關的捷運隧道。預期在未來十年內，基於對環境、資源與工程風險的需求，國內對潛盾機或潛盾隧道的需求，將有增無減，本文所提及的各項議題，應該有更多的研究資源來投入，進行必要的分析與探討。

參考文獻

- Shu, P. Y., Chen, Y. F., Wang, T. T., Hsiung, B. C. B., Liao, C. Y. & Ge, L. (2026). Simulation of Cutter Wear in Gravel Using a Discrete Element Method Approach, *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 44, article number 85.
- Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling, *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon.
- 熊彬成 (2021)。海外大地工程經驗回顧兼漫談海外計畫管理，*地工技術* 169 期，第 91-102 頁。
- 劉富傑 (2024)。運用大數據與機器學習法預測捷運急曲線隧道施工所引致之最大地表沉陷，國立中興大學碩士論文。

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，供後續回饋分析，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、張欽儀、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。

臺灣大地工程監測之維度轉型——從多尺度時空感知邁向數位孿生的即時決策回饋

林俊宏 國立中山大學海洋環境及工程學系 / 副教授、大地技師

一、緒論

在大地工程與岩土力學實務中，地下地質構造的非均質性、材料強度的非線性以及地下水文動態的複雜性，共同構成了工程設計與施工階段的高度不確定性。大地工程監測技術的導入，在維護地盤穩定、保護鄰近結構物安全以及預防地質災害上，扮演著無可替代的角色。

適逢中華民國大地工程技師公會成立三十週，這三十年不僅記錄了台灣經濟與基礎建設的蓬勃發展，更見證了大地工程監測技術從早期手動觀測，逐步走向自動化、物聯網化，乃至當前數位孿生與智慧化主動預警的演進歷程。

相較已有眾多文獻介紹之詳細的監測技術原理描述，本文旨在回顧過去 30 年裡，臺灣大地工程監測技術上的發展與趨勢，監測設備配置的核心邏輯建構以及技術面上從自動化、數位化、智慧化與大範圍遙測的導入，達到空間維度上「由離散點訊號擴增至連續線與多維面」、時間維度上「由低頻收錄提升至近即時傳輸」，以及預警機制上「由靜態管理值躍升至動態數位孿生即時回饋」的技術變革。期望透過多尺度、高精度的現代監測整合概念，以及全生命週期思維的導入，協助大地工程技師在既有的監測體系

下，有效掌握新興技術的應用時機，提升國內的工程與環境安全。

1.1 大地工程監測技術的目的

大地工程監測技術的主要目的，是在工程建設或自然邊坡、地下構造物、基礎設施等環境中，持續掌握地盤與結構物的變化行為，以評估安全性、降低風險並支援工程決策。其主要核心目的有

1. 掌握地盤與結構物的變形行為：例如監測沉陷、側向位移、傾斜、裂縫發展、孔隙水壓變化、地下水位變化等，了解工程或地層是否正在產生異常變化（Kavvas, 2005）。
2. 確認設計假設是否符合現地狀況：大地工程常受地層不均質、地下水、施工擾動影響，監測資料可用來檢核原本設計採用的參數與分析結果是否合理（Finno and Calvello, 2005）。
3. 提供施工期間的安全預警：在開挖、隧道、邊坡整治、填海造地、基礎施工等工程中，監測可即時發現異常趨勢，避免災害突然發生（Kavvas, 2005; Lollino *et al.*, 2002）。

4. 支援觀測法與動態調整施工：當監測結果顯示變形或水壓變化超出預期時，可即時調整開挖順序、支撐系統、排水方式、補強措施或施工速率（Peck, 1969; Spross and Johansson, 2017）。
5. 評估工程完成後的長期穩定性：對於邊坡、堤防、水庫壩體、擋土牆、橋梁基礎、離岸風機基礎、海堤或地下結構物，長期監測可評估其服役期間是否仍維持安全（Luo *et al.*, 2019）。

1.2 以防災決策證據鏈建立之儀器配置概念

為更加優化監測儀器的效益以達到監測之目的，在進行監測儀器的選擇以及配置上應當考慮

1. 空間配置之協同性提升：若能將單點式（Point-based）感測器（如支撐應變計或地表沉陷釘）與擋土結構的側向變形（如傾斜觀測管）進行空間上的協同配置，將能建立更穩健的應力與變位關聯分析，有效驗證並優化初始設計假設（中華民國大地工程學會，2025）。
2. 物理機制因果關係之完整性：若在觀測壁體側移或地表沉陷的同時，加強與地下水位或孔隙水壓的動態校核，當位移發生異常加速時，現場工程師將能更精準地判定其物理機制（如主動側土壓力因入滲飽和而劇增），從而做出更科學的應變決策（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

3. 動態管理值之精進調校：針對工址特定地層建立客製化的動態管理值，相較於僅套用通用規範，能顯著提升預警的準確性。特別是在軟弱黏土地層，能有效調校因潛變（Creep）所產生的警報機制；而在硬岩裂隙中，則能精準捕捉應力前兆，爭取寶貴的防災黃金時間（廖瑞堂等，2013）。

為充分發揮監測系統之效益，核心關鍵在於重塑監測數據與力學行為之間的因果關係。基於此一觀點，可藉由監測數據分類與協同設置之概念，作為監測系統規劃之依據，並進一步建構支撐防災決策所需之證據鏈。

監測數據分類：眾多的監測技術可根據其所獲得之數據將其區分為「直接量測之主證據類」與「間接量測之機制與誘發類」的物理分工（如表 1 所示）。直接量測（主證據類）係指結構物或地體之位移（Displacement）、角變位（Rotation）及力學受力（Stress/Strain）者為之。位移與變形是岩土體自剪力屈服至極限平衡狀態發展的直接物理表現。結構受力則與設計應力路徑直接對接。這些數據是判定結構與地體是否發生幾何不穩定或強度破壞的「直接證據」（中華民國大地工程學會，2025；廖瑞堂等，2013）。而間接量測（機制與誘發類）係指地下水位、孔隙水壓及降雨量等。這些量測數據並不直接代表幾何形變的發生，而是用於解釋應力演變、土體內部有效應力消散以及邊坡安全係數降減的驅動機制（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

表 1 監測數據分類與特性

監測物理層級	代表量測參數	力學物理機制與本質	對決策與證據鏈之定位	主要不確定性來源	基本校正與品質保證／控制要求
直接量測 （主證據類）	結構位移、壁體側移、地層滑動量、支撐軸力、地錨荷重	反映應變累積至屈服或結構承受之實時應力	判定幾何不穩定與強度破壞的直接證據，與管理值及應變決策綁定	零點飄移、溫度效應干擾、邊界錨定點（Fixed Base）位移	定期基準點閉合校核、溫度補償率定、初值須多次讀取採用平均值
間接量測 （機制與誘發類）	地下水位、超額孔隙水壓、累積降雨量、土壤含水量	改變岩土體有效應力降低抗剪強度，或增加滑動力	解釋位移異常加速的「機制證據」，用於動態調整位移管理值與早期預警之安全係數	土層非均質滲透性、水位井遲滯效應、孔壓計局部氣阻干擾	水壓計飽和排氣處理、水位計鋼捲尺實測對位、氣壓效應修正

（本表整理自中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023；廖瑞堂等，2013）

協同配置：先前提到單純觀測壁體側移或沉陷若缺乏水壓校核將導致成因判定困難，但若能透過前述直接與間接量測之協同配置，則可將地下水文變化（間接機制）與幾何剪切形變（直接表現）之結果進行具機制解釋之判讀，實現完整的力學因果解析。例如，在預警機制中，降雨量等環境因子雖具備極高的便利性與前瞻預報價值，但若能同時結合考量工址特定地質的非均質性與入滲延遲效應，將更臻完善。因此，實務上推薦採取主、輔結合的雙重邏輯，將環境因子與位移等直接力學證據協同應用，以達到更全面且穩健的防災預警效果。

二、臺灣大地工程監測 30 年的演進

回顧 1996 年至 2026 年這三十年間，臺灣大地工程監測技術經歷了四次關鍵的變革（如表 2 所示），每一次的技術變革，皆是由重大地質災害、國家級基礎測繪網路的佈設，以及資通訊技術的躍升所共同驅動。各技術的發展與累積非一蹴可就，此處僅就應用端的明顯轉折與事件分為 4 期，而非採編年史方式鋪陳，特此說明。

2.1 奠基期與手動量測

在九〇年代末期，臺灣大地工程監測以手動點位觀測為主流，仰賴精密水準儀、光電全站

儀、人工計讀式傾斜觀測管、水位井以及初期的振弦式力學儀器（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。此時期的監測數據主要用於施工紀錄與變位之校核。

手動點位監測在特定工程尺度下具有其穩健價值，而隨著對降雨或開挖步序中岩土體瞬時非彈性變形響應的掌握需求提高，手動觀測也在時間與空間解析度上展現了轉型自動化的契機，從而可進一步精進因天候或人為抄錄帶來的系統性挑戰。這段時期不僅成功建立了臺灣大地工程監測的基本力學語言與管理習慣，更為後續主動型預警與防災決策的蓬勃發展奠定了不可或缺的實踐基石。

2.2 九二一地震與國家及空間資訊基礎建設之引進

1999 年集集大地震（九二一地震）成為臺灣大地與地球物理觀測網擴展的關鍵轉折點。地震引發了全臺大規模地滑、山崩與地體結構毀損，大地工程界深刻意識到區域性、高頻率監測網絡的必要性。中央氣象署隨即展開台灣地殼動態觀測網（TGNS）之規劃，並於 2001 年建置完成高密度 GPS 動態觀測站，用以監測地殼板塊動態變形與地震誘發之滑移（中央氣象署，2021；內政部國土測繪中心，2014）。

隨後，內政部國土測繪中心亦於 2006 年起籌建 e-GPS 系統，2009 年正式營運，並於 2014 年升級為 e-GNSS 實時動態定位系統（內政部國土測繪中心，2014）。這些國家級衛星觀測站的佈設，提供了解算毫米級至厘米級地表三維變形的時間序列基準，使台灣大地監測逐步從單一工址走向系統性、網絡化的監測階段，為後續大範圍不穩定邊坡區的空間幾何基準確立奠定了基石（內政部國土測繪中心，2014）。

2.3 莫拉克颱風後與多維度、多尺度新興技術的導入

2009 年莫拉克颱風後，國內對於大型崩塌與下游警戒需求升高，進入 2010 年代，隨著衛星雷達遙測（InSAR）、無人飛行載具（UAV）以及地面三維雷射掃描（TLS）技術的成熟，監測視野徹底突破了傳統「點位觀測」的空間局限，實現了「面狀連續監測」（中華民國大地工程學會，2025；內政部建築研究所，2023）。

透過永久散射體雷達干涉（PS-InSAR）與小 baseline 集（SBAS）等先進差分技術，觀測人員能利用合成孔徑雷達（SAR）相位差，在不架設現地儀器的前提下，獲取大範圍、多時相的沿視線（LOS）地表微量形變（中央氣象署，2021；內政部建築研究所，2023；余騰鐸等，2026）。結合農村水保署自 2000 年代中期起逐年更新之全台崩場地圖層，以及多時相高解析度光學衛星影像，大地工程師得以在坡地開發或鐵路沿線規劃初期，採用「先廣域快篩、篩出活動性熱點、再針對特定工址進行精密現地觀測」的配置程序（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

此外，UAV 攝影測量與 UAV-LiDAR（光達測繪）的進場，大幅補足了林下植被遮蔽區的地形盲區，在公路邊坡巡檢與落石崩塌災害應變中，成為中尺度高精度三維幾何重建的標準配置（曾廷睿等，2025）。

2.4 雲端治理期之資通訊整合與大數據分析

近年來（2020 年代），臺灣大地監測技術的關注已從「如何獲取量測數據」轉移至「如何治理與應用數據」（中華民國大地工程學會，2025）。隨著低功耗廣域網路（LPWAN，如 LoRaWAN、NB-IoT）與雲端計算的普及，現場監測儀器已高度集成物聯網架構，實現了高頻率、自動化數據回傳（謝志龍，2021）。在 2024 花蓮地震與 2025 馬太鞍溪事件更加凸顯透過平台整合的快速偵測需求。

地方政府（如台北市、台中市等都市建築主管機關）已針對深開挖工地、高風險坡地社區，制定了嚴格的自動化監測數據上傳雲端平台規範，並要求於工地周邊設置 QR Code 告示牌，即時對大眾揭露安全觀測數據（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。同時，政府機關亦著手推動數據格式標準化（如農村水保署訂定之《大規模崩塌監測資料規範》），規範統一的點位代碼、時間戳、觀測頻率與資料交換欄位，使大數據融合分析與跨單位協作治理成為可能（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2024）。

三、新興技術與跨域技術的應用介紹

近年來新興監測技術的快速發展，使大地工程監測逐漸由傳統點位式量測，擴展至面狀、連續化、自動化與智慧化的資料獲取模式，在本章中簡要介紹其近年來在臺灣大地工程監測中的應用狀況。

3.1 廣域快篩與衛星／機載遙測

3.1.1 雷達遙測（InSAR/GB-SAR）

合成孔徑雷達干涉測量（InSAR）利用衛星或地面雷達波發射與接收的相位差，可對大面積區域（如山坡地、地層下陷區）進行毫米等級的高精度三維變形解算，並能穿越雲霧於夜間施測（王國隆等，2018）。王國隆等（2018）利用

表 2 臺灣大地工程監測 30 年之演進階段

演進階段	核心技術特徵	代表性空間／力學尺度	典型數據更新頻率	制度與政策推動背景	對防災決策之實質意義
第一階段： 手動點位觀測期 （1996～2000）	水準測量、手動傾斜管、人工水位計、全站儀。	工址尺度單點觀測（幾十公尺內）。	週、月或每施工步序施測一次	依憑傳統《建築物結構設計規範》與施工圖說要求。	建立基本安全紀錄與長期基準，並為後續自動化變形分析奠定基礎
第二階段： 自動化奠基期 （2001～2009） （中華民國大地工程學會 2025）	TGNS 高密度 GPS 連續觀測站、e-GPS、有線自動化數據擷取	區域板塊至大型單案尺度	小時、天級別數據自動儲存與傳輸。	1999 年九二一地震震災響應、國家幾何測繪網絡建置。	建立毫米級大地幾何運動時間序列，將監測成功融入國家級防災系統。
第三階段： 廣域遙測面測期 （2010～2019）	PS-InSAR、SBAS、UAV 攝影、UAV-LiDAR、TLS、地基雷達。	廣域面狀至中尺度（公里至公頃級）。	衛星軌道周期（6～12 天）至現地即時（分鐘級）	極端氣候變遷事件、大規模崩塌潛勢調查計劃啟動	實現「先廣域快篩、再精準佈站」之雙重尺度防災，大幅拓展工程勘查視野
第四階段： 雲端智慧治理期 （2020～2026）	IoT/LPWAN、雲端大數據庫、智慧 AI 分析、數位孿生、共通 Metadata。	多源跨案場大數據融合	動態實時（秒級至分鐘級）	都會區深開挖工地安全新制（如 QR Code 告示）、農村水保署監測資料交換規範	監測數據資產化，實現高透明度的社會協同治理與智慧化動態預警。

Sentinel-1 衛星雷達影像進行 PS-InSAR 分析，成功觀測到 2018 年花蓮地震後的地表變形，同時也精準解算出雲林臺西鄉冬季持續發生的地層下陷現象，驗證了遙測技術在大範圍地表變形監測的可靠性。

楊宇恩等 (2024) 在高雄寶來老濃溪右岸邊坡、新竹縣尖石鄉 DS194 崩塌地，以及國道一號 10.1K 汐止段邊坡坍塌災害搶修工程中，透過地基式合成孔徑雷達 (GB-SAR) 在施工與搶災期間，無需派人進入不穩定邊坡掛設稜鏡的前提下，對整個滑動面進行了全天候連續面狀監測，記錄短時間內邊坡變化趨勢並提供二次災害預警。

3.1.2 光達 (LiDAR) 與無人機攝影測量

在局部高風險邊坡、交通道路或災後人員難以接近的崩塌工址，無人飛行載具攝影測量與無人機光達 (UAV-LiDAR) 已成為不可或缺的中尺度三維幾何重建工具 (中華民國大地工程學會, 2025; 曾廷睿等, 2025)。光達 (LiDAR) 與無人機攝影測量 (UAV Photogrammetry) 可快速獲取地表高解析度的 3D 點雲資料，藉由多時序影像的比對自動建立數值高程模型 (DEM)，並計算出坡面或結構物的整體變位量 (何金益等, 2024)。

台灣山區植被極為茂密，傳統光學無人機攝影僅能獲取植被樹冠表層的三維表面模型。而無人機光達具備多重回波特性的第一個回波多反射自樹頂，而最後一個回波則可透過林木間隙穿透至地面層。經過去噪、分類與濾波算法，能過濾林木植被點雲，重構出真實的裸露地表數位地形模型 (曾廷睿等, 2025)，這對顯露林下隱蔽的微地形特徵 (如張裂縫、剪切滑坡坡腳隆起、古滑坡特徵) 具備極高的價值，有助於早期防範。

曾廷睿等 (2025) 在台 21 線 141k+415 塔塔加高陡岩質邊坡落石防災工作中，針對高程自 2,110 公尺延伸至 2,597 公尺、總面積達 8.74 平方公里之複雜高陡邊坡 (該路段地質較為脆弱，曾發生多次非降雨誘發的落石事件) 導入 UAV 攝影建模與光達技術，透過林下裸露點雲差分

析，成功在人員不便接近之高陡崖壁上精確定位出落石源頭，量化了防護工程前後的坡面堆積演變，並在處置工法完工後使邊坡安全評估指標顯著優化。

何金益等 (2024) 針對燕巢地區的泥岩滑動邊坡，採用了不移動式的智能 LiDAR 變位預警系統。透過全天候的面狀雷射掃描獲取 3D 形貌，並即時解算邊坡位移，若達管理值即連動告警裝置發布預警。羅國峯等 (2025) 於草埔隧道採用雷射掃描系統，定期對營運中的隧道主線與通風管道進行 360 度影像與點雲掃描，可精確判釋寬度 0.5 mm 以上的裂縫，建立歷年襯砌異狀展開圖以診斷破壞機制。

3.2 微地動地聲邊坡監測

微地動地聲邊坡監測技術主要是利用滑動體在變形、剪裂、塊體脫離、摩擦滑移與撞擊過程中所產生的地表微振動訊號。三向度地震檢波器可同時記錄垂直向與兩個水平向之粒子速度或加速度，因此不僅能判斷振動能量大小，也可進一步分析振動方向性、波形到時差、頻率組成與持續時間。當邊坡由穩定狀態逐漸進入加速變形或局部破壞時，裂隙擴展與顆粒摩擦可能形成短延時、高頻率的地聲事件；若進一步發展為落石、土石流或大規模滑動，則常伴隨較長延時、能量逐漸增強或呈三角形能量分布的時頻特徵。

實務上，監測資料可透過連續波形、頻譜圖、STA/LTA、PGA 或能量門檻進行事件偵測，再結合多測站到時差、振幅衰減或交相關定位方法，區分地震、降雨、交通、人為干擾與可能的邊坡滑動訊號。

臺灣已有若干相關應用案例。嘉義八寶寮潛在崩塌地曾佈設三部 Raspberry Shake RS-3D，以三向度短週期檢知器進行連續監測，資料透過 4G 傳輸並以太陽能供電，初步可辨識地震、降雨及不明局部振動事件，作為滑動徵兆判釋資料庫 (Yen *et al.*, 2020)。另在較大尺度上，臺灣亦利用即時寬頻地震網建置近即時山崩震波監測系

統，並應用於莫拉克颱風等大規模山崩事件分析 (Chao *et al.*, 2017)；公路邊坡落石與岩體崩落案例也已發展以地震訊號快速定位、估計規模並判釋破壞過程的技術 (Chang *et al.*, 2021)。

整體而言，地聲邊坡監測價值在於夜間、暴雨、濃霧、震後孤立或視線受限條件下，先於人工巡查與部分影像手段發出異常徵候，再把訊號直接轉譯成下游封橋、停駛、疏散與收容的啟動條件，是山崩預警與災後快速判釋的重要輔助技術。

3.3 光纖感測技術

光纖感測 (Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS) 將光纖電纜自身作為傳感介質，其核心優勢在於抗電磁干擾、高耐久性、極佳的抗拉應變能力以及在長線性基礎設施上的連續觀測能力。根據其採用之技術原理的不同，有眾多不同的應用，在地工監測中，光纖光柵感測技術 (Fiber Bragg Grating, FBG) 以及分佈式聲學感測技術 (Distributed Acoustic Sensing, DAS) 具有高度應用潛力。

3.3.1 光纖光柵感測 (FBG)

光纖光柵 (FBG) 技術是在光纖特定位置利用雷射蝕刻布拉格光柵。當光纖受拉或受壓時，光柵週期發生改變，導致反射的光布拉格波長產生偏移。其波長漂移量與溫度、應變呈線性關係，因此可作為應變、溫度、孔隙水壓或結構受力感測器；其特性屬於「多點式」或「準分散式」量測，適合理設於邊坡鑽孔、隧道襯砌、擋土構造與地錨系統。Huang *et al.*, (2012) 於南部公路邊坡深層崩塌監測案例中，成功於 60 m 深鑽孔內布設多組 FBG 孔隙水壓感測器，追蹤颱風降雨期間的孔壓剖面變化，並用於力學式邊坡穩定評估。

3.3.2 分佈式聲學感測技術 (DAS)

DAS 利用光學干涉和光相位解調技術，將整條通信光纖轉化為密集的高頻振動與地震感測器陣列 (Anjana *et al.*, 2024)。其原理是利用瑞利

回向散射 (Rayleigh Backscattering) 在光纖受到微弱聲學或機械振動引致折射率改變時產生的干涉相位偏移作為訊號。在土壤開挖、滑動面初始微剪切、隧道掘進等過程中，地體內部會發生微細裂縫發育並釋放出彈性波 (即微地震或地聲信號)，DAS 能以動態頻率捕捉這些高頻振動訊號，並沿光纖路徑進行微震事件定位。此技術在地工監測的應用尚在起步階段，Huang *et al.*, (2026) 在宜蘭蘭臺大規模崩塌地之 60 米深鑽孔安裝有 DAS 監測系統，成功捕捉到深部的微小滑移。未來若將其與前述微地動地聲邊坡監測整合，將可更進一步發揮其效益。

3.4 時域反射儀 (TDR) 技術

TDR 技術是利用電磁波在波導 (通常為同軸電纜) 內傳輸，並以其作為感測器量測環境中之電學性質或介面的變化。最初應用在地層滑動之深度位置監測上，當地層剪動、冲刷面下降或構件產生斷裂、脫黏、灌漿缺陷時，會造成阻抗不連續，反射波形的位置與振幅即可用來判斷異常深度與變化趨勢。相較於單點式儀器，TDR 具維修少、可自動化、其分佈式的感測特性使其可提供更高的空間解析能力等優點，適合作為邊坡與基礎設施安全監測的輔助技術。隨著理論的持續擴充與創新式的感測設計，相關應用領域逐漸擴充到橋墩冲刷、土釘與地錨等現地監測工作 (林志平等, 2020)。

國內已有眾多現地應用案例。吳輝龍等 (2003) 在梨山地滑區進行 TDR 纜線安裝，作為連續性感測器，藉由反射波形變化判斷滑動面位置與位移量。該研究彙整三年現地監測成果，確認 TDR 用於不穩定邊坡滑動面監測具有可行性。黃安斌等人 (2008) 搭配人工傾斜管監測之量測於新山水庫右山脊安裝一處自動化 TDR 錯動變形監測儀器進行效能測試，比對傾斜管與 TDR 之量測資料顯示，TDR 錯動變形監測儀器在邊坡穩定之使用上，透過室內大型試驗之剪動量參數標定，除可正確獲得剪動深度外，亦可良好估計剪動量。

3.5 影像分析與 AI 智能判識

現代監測系統，特別是物聯網與大範圍遙測，會產生龐大的連續性數據（Big Data）。面對複雜多變的大地工程環境，傳統基於簡化假設的力學模型常難以精準預測所有行為（Wu *et al.*, 2022），因此，導入機器學習（Machine Learning）與人工智慧（AI）成為關鍵。AI 技術（如神經網路、分類演算法）能自動從海量監測數據中清理雜訊、尋找隱藏的關聯性特徵，並建立預測模型（Tan *et al.*, 2025）。例如，利用 AI 結合歷史監測數據與降雨紀錄，可以實時預測邊坡安全係數或預判隧道開挖的岩體變形量；而在最佳化無線感測網路部署中，也可利用演算法來優化感測器節點的位置與降低能耗（Lv *et al.*, 2026; Tan *et al.*, 2025）。

黃俊維（2016）應用大數據演算法，比較 K-means 分群演算法與基因演算法，用於最佳化無線感測網路（WSN）的節點佈設與路由分配，有效解決了邊坡監測感測器耗電不均及資料傳輸的問題。何金益等（2024）在高雄燕巢邊坡監測案例中，光達掃描產生的大量 3D 點雲資料，透過人工智慧物聯網技術（AIoT）自動濾除環境雜訊（如植被干擾或天候雜訊），提升變位解算的精準度與即時性。

另一方面在影像分析上，可透過監視器影像流或空拍影像，搭配影像分析技術（如光流法、卷積神經網路 CNN 與 YOLO 算法等），能在無需接觸地體的條件下，實現對落石軌跡追蹤、坡面局部土石坍方範圍自動圈定以及地表張裂縫影像寬度特徵的實時識別。王又德（2020）利用光流法有效追蹤落石軌跡並有效計算其落下動力，可作為防護設計參考；交通部運研所（黃宇謙與胡啟文，2025）已聚焦於 UAV 影像結合深度學習技術，開展公路邊坡破壞特徵自動化判釋研究，將其作為人工徒步巡檢的高效替代與異常初篩工具，大幅提高管理效率。

四、核心成熟技術之定位與新興技術之協同

新興技術的導入，無疑大幅提升了監測資料的空間覆蓋率、資料更新頻率與異常辨識效率，也使監測成果更容易與數位孿生、風險地圖及即時預警系統整合。然而，新興技術的興起並不代表傳統監測儀器的角色被取代，相反地，越是在多元資料快速湧入的監測環境中，越需要精密水準、全站儀、GNSS、傾斜觀測管、定置型孔內傾斜計、鋼筋計、支撐應變計、地錨荷重計、沉陷點與鄰房傾斜計等傳統現地監測系統，作為資料校核、力學解釋與防災決策的基準骨架。在現代大地工程監測系統中，傳統儀器已不再只是單純的資料蒐集工具，而是多元監測資料整合過程中不可或缺的幾何基準、地下真值、力學反驗證與防災決策依據。

4.1 證據鏈的主軸：直接量測的位移與受力

4.1.1 精密水準、全站儀與 GNSS 的基準角色

新興遙測技術的最大優勢，在於其能以高效率取得大範圍地表形變資訊，補足傳統點位監測在空間覆蓋上的不足。以 InSAR 為例，其所解算之形變通常為相對於特定參考點的相對觀測值，且多為沿衛星視線方向之形變分量。其成果可能受到參考點選定、大氣延遲、去相關、軌道誤差、地表散射條件變化，以及垂直與水平變形分量轉換假設等因素影響。因此，若缺乏穩定的地面基準點與現地量測校核，新興遙測成果容易停留在形變影像或相對變化趨勢層次，而難以進一步轉化為具工程意義的絕對坐標、變位歷程與安全判斷依據。其成果常需透過水準測量或 GNSS 觀測量進行檢核，方能提升其在工程監測與地層下陷分析中的可信度（沈鈺旻等，2021）。

因此，精密水準量測、自動全站儀與 GNSS 連續站，在現代監測系統中仍具有不可取代的基準角色。精密水準可提供高精度垂直位移控制，全站儀可提供三維坐標與視準線位移監測，

GNSS 則可提供長期連續之絕對坐標變化趨勢。這些儀器所建立的地面基準點，能將 InSAR、UAV、LiDAR 或影像式監測成果錨定至實際工程坐標系統中，使新型面狀觀測資料不只是呈現空間變化圖像，而能進一步與結構物、地層、開挖階段與安全管理值產生可追溯、可驗證的幾何關聯。

4.1.2 傾斜觀測管與定置型孔內傾斜計之基準配置與側向應變分析

在地下變形行為的判讀上，傾斜觀測管至今仍是最具工程判讀力的地下位移觀測手段之一。廖瑞堂等（2013）彙整臺灣多處邊坡監測案例後指出，與邊坡穩定性最直接相關的監測項目，通常為地層位移量測資料；其中，傾斜觀測管可清楚呈現量測深度範圍內之水平位移分布、滑動速率及滑動深度。相較於雨量、地下水位或孔隙水壓等間接誘發因子，傾斜觀測管所呈現的是地層是否已實際產生變形或滑動的直接證據。因此，在邊坡防災與滑動機制研判中，傾斜觀測管不僅是位移量測工具，更是判斷潛在滑動面位置、建立管理值與研擬預警門檻的重要依據。特別是在滑動深度定位、剪切帶厚度研判、邊坡滑動機制分析，以及連續壁側向變形分析等工程課題中，傾斜觀測管所提供之深度方向位移剖面，仍是建立力學因果鏈的核心資料（中華民國大地工程學會，2025；廖瑞堂等，2013）。此地體內部之滑動數據是新興技術無法取代之處。

隨著自動化監測需求持續增加，定置型孔內傾斜計（In-Place Inclinator, IPI）、陣列式位移計（SAA, ShapeAccelArray）、時域反射儀（TDR, Time Domain Reflectometer）地滑監測技術（Chung *et al.*, 2021）可視為傳統傾斜觀測管的功能延伸，而非單純替代。傳統傾斜觀測管通常依賴人工定期量測，具有穩定、可重複、長期資料品質佳等優點，適合用於建立長期監測基線與人工複核資料。自動化地滑監測技術提供高頻率、連續化與自動化的側向位移量測，特別適用

於鄰近捷運、高鐵、重要管線、既有建築物或高敏感保全對象之高風險工址。透過手動傾斜觀測管與自動化地滑監測技術的協同配置，監測系統可同時兼具長期穩定性、資料可驗證性與突發性變位即時預警能力。

因此，在新興技術快速發展的浪潮中，傾斜觀測管的不可取代性，並不僅在於其能量測位移，而在於其能提供滑移深度與方向的力學資訊，而此正是將地表變形訊號轉化為地下變形機制判讀的關鍵橋樑，也是現代大地工程監測系統中仍難以被取代的核心觀測數值。

4.1.3 結構受力與支撐內力之直接度量

在深開挖工程中，擋土壁與支撐系統的內力響應直接關係到結構安全極限。位移監測雖可反映擋土系統整體變形趨勢，但若缺乏結構受力資料，工程師仍難以判斷壁體彎矩、支撐軸力或地錨拉力是否已接近設計容許值。因此，鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計構成了位移觀測之外的力學反驗證鏈條。這些儀器所提供的不是外觀變形，而是擋土結構與支撐構件實際承受內力的直接或近直接量測資料。

因此，鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計的核心價值，在於其能將監測系統由單純的變形觀測提升為內力驗證。新興遙測與影像技術可以協助掌握空間變化，但無法直接量測支撐軸力、壁體彎矩或地錨預力，唯有透過結構受力監測，才能將觀測到的位移與設計安全極限相互連結，形成可供工程師採取行動的力學證據鏈。

4.2 新興技術與傳統監測之協同設置

4.2.1 協同設置之精神

綜合上節討論可知，現代大地工程監測系統的發展方向不在於新興技術取代傳統儀器，所要專注的是在於新興技術擴大觀測尺度，傳統儀器提供基準與力學真值，唯有將二者協同設置，才能形成兼具廣域辨識、局部精度、地下判讀與結構安全驗證的完整監測系統。

這樣的協同關係將監測拆分為三個層次，精密水準、全站儀與 GNSS 提供穩定坐標與高程控制，提供幾何基準，使 InSAR、UAV 或 LiDAR 成果可被校正至工程坐標系統中；第二是力學機制層次，傾斜觀測管、定置型孔內傾斜計與沉陷點提供地層及結構變形剖面，使工程師能判斷變形深度、沉陷槽形態與滑動機制；第三是安全驗證層次：鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計提供受力資料，使監測成果能進一步對應至設計內力、安全裕度與管理值。

監測系統的核心目的並非蒐集越多資料越好，而是建立足以支持防災決策的證據鏈，在此，在協同配置監測儀器的精神下，在此提出「一主、一輔、一驗證」之技術組合概念，以不同情境提供協作參考。

4.2.2 都會深開挖情境

一主（直接受力與變位）：以擋土壁內側傾斜觀測管（可協同搭配自動化技術）為主量測量，精確獲取壁體隨開挖步序產生的水平側向變形剖面。

一輔（環境與機制因子）：以壁背側水位觀測井及特定不透水層下方之孔隙水壓計為輔助，實時監控超額孔隙水壓動態與抗上舉安全係數，完備水文分析。

一驗證（廣域幾何基準）：以自動全站儀（RTS）或高密度地表沉陷剖面觀測點，實時觀測開挖影響區內鄰近建物與道路的沉陷特徵，與壁體側移形變槽進行幾何互補校對與三維反演，大幅強化數據可信度。

4.2.3 山區不穩定滑坡情境

一主（地下深部變形）：以深孔傾斜觀測管（配手動或 IPI 連續觀測）為主，精確定位地體內部的剪切滑動面垂直位置與滑移速率。

一輔（水文驅動機制）：以滑動面孔隙水壓計、現地雨量計與土壤含水量計為輔，監控降雨入滲過程、地下水位線抬升高度以及有效應力動態，提供深層力學解釋。

一驗證（面狀空間位移）：以地基雷達（GBSAR）或 UAV-LiDAR 多期點雲差分，提供整個坡面暴露區的實時面狀變形場，有效擴展地下傾斜管點位離散之觀測成果。

4.2.4 地層下陷區域治理情境

一主（垂直分層沉陷）：以磁環分層式地層下陷監測井為主量測量，定位出地層在不同地下水抽汲層位下的特定壓密壓縮特徵。

一輔（含水層水頭波動）：以分層地下水位觀測井及孔壓計為輔，記錄含水層承壓水頭的季節性與人為抽汲波動，科學評估壓密演變機制。

一驗證（廣域空間形變）：以衛星 InSAR 雷達遙測形變圖，提供整個盆地或沖積扇的大範圍形變地圖，並以現地 GNSS 基準連續站進行坐標絕對修正與基準校核，展現跨尺度觀測效益。

五、展望：資料管理與數位學生之導入

5.1 監測資料之標準化

地工監測技術在自動化以及新興技術的導入後，資料的取得已不再是防災決策的瓶頸，需進一步思考的是，監測資料如何被充分應用，轉化為風險判讀、災害預警、維護管理與決策支援的核心依據。

傳統邊坡與基礎設施監測常以單一指標作為判斷基準，例如累積雨量、地下水位或單點位移量。然而，地工災害通常並非由單一因子所控制，而是地質條件、降雨入滲、孔隙水壓、地表與地下變形、振動事件及人為擾動等多重因素共同作用的結果。因此，現代地工防災更應朝向多參數融合監測發展，將不同物理意義的資料納入同一個工程判讀架構。

多參數融合監測的重點，並不是單純增加儀器數量，而是使不同監測資料能夠彼此對話。GNSS、全站儀與 InSAR 可提供地表位移與廣域變形趨勢；傾斜管與 SAA 可掌握地下變形深度與滑動面發育；孔隙水壓與土壤含水量可反映降

雨入滲與強度折減機制；微地動或地聲訊號則可捕捉落石、崩塌、裂隙擴展等事件型訊號。當這些資料被整合於 GIS、三維地質模型或智慧防災平台時，監測系統便可由「點狀量測」提升為「空間化、時間化與機制化」的風險判讀工具。建構連續風險面，協助判斷潛在災害影響範圍、道路封閉區段與搶災優先順序。

然而，多參數融合監測能否發揮效益，關鍵在於監測資料是否已標準化與結構化。不同儀器廠牌、資料格式、取樣頻率、時間戳記、坐標基準、單位、安裝深度、品質註記與維護紀錄若缺乏一致規範，即使資料量龐大，也難以進行跨系統整合、長期比對與模型更新。地工監測資料至少應包含測點編號、觀測對象、三維坐標與高程基準、感測器型號、安裝方式、取樣頻率、量測單位、資料品質旗標、缺值處理、校正紀錄、警戒值、事件註記與維護歷程等欄位。

如此一來，資料才不只是單一專案中的紀錄，而能成為可查詢、可比對、可計算、可回饋模型的工程資訊資產。開放地理空間協會 (Open Geospatial Consortium, OGC) 觀測與量測標準即強調，觀測資料應描述觀測行為、觀測對象、取樣特徵與觀測結果，以支援不同科學與工程社群之間的資料交換，這對地工監測資料平台尤其重要。

農村水保署於 2024 年修訂之《大規模崩塌監測資料規範》為業界提供了一套示範基準（農業部農村發展及水土保持署，2024），訂定統一格式與交換語法並結構化元數據（Metadata）之必要欄位以確保數據鏈的完整性。希冀可作為地工監測資料標準化的開端，未來持續擴大至各類新興技術，完善監測資料之管理以及有效的應用。

5.2 數位學生之定位與推行

監測資料標準化也是地工數位學生建構的前置條件。數位學生的核心並非單純建立三維模型，而是在物理場域與虛擬模型之間形成即時映射，使三維地質模型、BIM 模型與數值分析模型能夠隨監測資料持續更新，形成「感知—建模—

分析—決策—回饋」的閉環系統（羅百喬等，2025）。

若監測資料缺乏統一格式、空間基準與語意描述，虛擬模型便無法正確接收現地狀態，也難以進行預測分析與預防性維護。臺灣在大型工程中已逐步導入 BIM、共通資料環境與工程資訊平台，未來若能將自動化監測資料依標準格式即時回饋至三維地質—結構模型，並與警戒值、風險推估、維護策略及防災儀表板連動，地工監測便可由「看見變化」進一步邁向「理解機制、預測風險與輔助決策」的數位學生階段。

然而，建構數位學生之監測防災技術需大量資源的投入，建議數位學生導入工程監測時，宜採取分階段與分層級推動，而非一次性追求完整系統。推動初期可先建立資料標準化與監測儀表板，整合既有監測資料、圖資、警戒值與事件紀錄，使資料具備可查詢、可比對與可追溯性。中期則可針對高風險邊坡、深開挖、隧道、橋樑基礎或重要管線等關鍵場域，導入多參數融合監測，將位移、水文、振動與地質模型連結，建立場址化風險判讀與預警邏輯。後期再進一步結合 BIM、GIS、三維地質模型與數值分析模型，使現地監測資料能即時回饋虛擬模型，形成預測分析與維護決策的閉環。不同工程類型亦應區分導入深度：一般工程可著重資料管理與視覺化，高風險或長生命週期工程則應朝動態模型更新與預防性維護發展，以提高導入效益與可行性。

六、結論與建議

本研究針對台灣過去三十年大地工程監測技術的演進與展望進行了系統性梳理。大地的變形與結構的受力具有高度關聯性，在新興技術蓬勃發展的當下，本文以監測數據分類與協同設置之概念，作為監測系統規劃之依據，避免在眾多新興技術下無所適從，建立「一主、一輔、一驗證」協同設置之決策思維，優先辨識工址的主控力學問題與破壞機制，據以配置核心主量測量、環境機制輔助量以及面狀幾何驗證量，形成具有

物理因果印證關係的完整證據鏈，提升監測設計的安全韌性。

隨著地工監測技術在自動化以及新興技術的導入後，大量的資料累積帶來對現場狀態的掌握的可能性，但如何有效利用監測數據，透過多參數融合監測發展，將不同物理意義的資料納入同一個工程判讀架構為下一步提升的重點。其中，針對監測資料推動資料標準化與 Metadata 治理，便利不同單位間的資料流通，即為其中的一項。

地工數位學生的建構推動可將地工監測由看見變化進一步邁向理解機制、預測風險與輔助決策的階段，但數位學生之監測防災技術的建構需大量資源的投入，宜採取分階段與分層級推動。短期以達成監測資料標準化為目標，繼而建構數據管理平台，再開場址級學生，最後推進生命週期全治理之漸進式路徑，以確保資源的最佳化配置與長效維管。另方面也應參考工程規模，調整其導入程度，以提高導入效益與可行性。

期許，在下一個十年裡，藉由上述具前瞻性的管理與技術變革，臺灣的大地工程監測技術邁向「智慧預測與資產永續治理」，在氣候極端變遷與高密度都會開發的時代，為國土與人居安全奠定更為穩固的科技屏障。

參考文獻

- Anjana, K., Herath, M., & Epaarachchi, J. (2024). Optical fibre sensors for geohazard monitoring—A review. *Measurement*, 235, 114846. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114846
- Chang, J. M., Chao, W. A., Chen, H., Kuo, Y. T., & Yang, C. M. (2021). Locating rock slope failures along highways and understanding their physical processes using seismic signals. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 505-517. DOI: 10.5194/esurf-9-505-2021.
- Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., Chen, H., Chen, Y. G., Chang, J. M., & Lin, C. M. (2017). A first near real-time seismology-based landquake monitoring system. *Scientific Reports*, 7(1), 43510. DOI: 10.1038/srep43510
- Chung, C. C., Lin, C. P., Ngui, Y. J., Lin, W. C., & Yang, C. S. (2022). Improved technical guide from physical model tests for TDR landslide monitoring. *Engineering Geology*, 296, 106417. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106417
- Finno, R. J., & Calvello, M. (2005). Supported excavations: observational method and inverse modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 826-836. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(826).
- Huang, A. B., Lee, J. T., Ho, Y. T., Chiu, Y. F., & Cheng, S. Y. (2012). Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements. *Soils and Foundations*, 52(4), 737-747. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.07.013
- Huang, H., Huang, Y., Chen, H., Wang, K., Hsu, Y., Chen, C., & Ku, C. (2026, April 14-18). *Unveiling stick-slip dynamics in deep-seated landslides using borehole distributed acoustic sensing* [Conference presentation]. 2026 Annual Meeting Seismological Society of America Technical Sessions, Pasadena, CA, United States.
- Kavvasdas, M. J. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, 79(1-2), 93-113. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.10.011.
- Lollino, G., Arattano, M., & Cuccureddu, M. (2002). The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure (North-Western Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(36), 1545-1550. DOI: 10.1016/S1474-7065(02)00175-4.
- Luo, J., Zhang, Q., Li, L., & Xiang, W. (2019). Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China. *Engineering Geology*, 248, 50-60. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.11.007.
- Ly, Y., Pang, Y., Ju, L., Xu, W., Liang, Z., He, J., & Zhang, L. (2026). Automating digitalization of engineered slopes to support interactive digital twin visualization. *Automation in Construction*, 181, 106564. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106564.
- Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171-187.
- Spross, J., & Johansson, F. (2017). When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural Safety*, 66, 17-26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.01.006.
- Tan, W., Wu, S., Li, Y., & Guo, Q. (2025). Digital twins' application for geotechnical engineering: A review of current status and future directions in China. *Applied Sciences*, 15(15), 8229. DOI: 10.3390/app15158229
- Wu, J., Dai, L., Xue, G., & Chen, J. (2022). Theory and technology of digital twin model for geotechnical engineering. In *Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering: ICCE 2021* (Vol. 213, pp. 403-411). Springer. DOI: 10.1007/978-981-19-1260-3_37
- Yen, Y. T., Lin, P. S., Ke, C. C., & Lin, Y. Y. (2020). Seismic monitoring for potential local landslide: A case study of the Babaoliao site in Taiwan. In *the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE* (Article No. C001550). International Association for Earthquake Engineering.
- 中央氣象署 (2021)。台灣地殼動態觀測網 (TGNS) 網站說明與運作，交通部中央氣象署。
- 中華民國大地工程學會 (2025)。建築物基礎開挖工程監測準則，中華民國大地工程學會。
- 內政部建築研究所 (2023)。坡地社區智慧防災系統暨安全管理計畫 (一)——廣域地表變形雷達衛星遙測技術應用，內政部建築研究所。
- 內政部國土測繪中心 (2014)。e-GNSS 實時動態定位系統與坐標系統更新報告，內政部國土測繪中心。
- 王又德 (2020)。以動態光學影像估算運動與動力分析於落石坡災緩衝網之研調——南投原址足尺試驗為例，國立臺北科技大學碩士論文。
- 王國隆、林俊廷、賴正儒 (2018)。差分干涉合成孔徑雷達方法偵測活躍地表變形——以地震、地層下陷、坡體活動為例，大地技師大地期刊，16，16-23。
- 何金益、黃慧仁、陳聰海、陳正勳、蕭秋安 (2024)。應用物聯網與雲端技術於特殊地工安全監測之案例分享，地工技術，179。
- 余騰鐸、楊宇恩、林彥均、彭文飛、藍士欽、蘇昱瑄 (2026)。從點位量測至面狀監測——地基雷達即時毫米級變形監測在工程管理中的應用，營建知訊，519，33-42。
- 吳輝龍、陳德天、蘇苗彬 (2003)。TDR 岩層滑動監測的新方法建立，水土保持學報，35，271-278。
- 沈鈺旻、蕭宇伸、卓宥瑄、賴柏霖 (2021)。以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果，水土保持學報，59，3069-3082。
- 林志平、魏殷哲、王凱、林婉婷、吳采容、鍾志忠 (2020)。地工電磁波導監測技術之新近發展，地工技術，166。
- 曾廷睿、吳宥增、劉昱緯、邱雅筑 (2025)。多期無人機影像建模及光達測繪於落石型災害公路邊坡之養護與減災應用，水土保持學報，55，3499-3512。
- 黃宇謙、胡啟文 (2025)。UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討，交通部運輸研究所。
- 黃安斌、林志平、王彥博 (2008)。水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發 (3/3)，成果報告書，經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 黃俊維 (2016)。使用 K-means 分群以及基因演算法建置最佳化無線感測網路系統。國立交通大學碩士論文。
- 楊宇恩、余騰鐸、林彥均 (2024)。線性地基合成孔徑雷達技術在露天礦場與自然邊坡監測實際應用與技術限制，鑛冶，68，11-20。
- 農業部農村發展及水土保持署 (2023)。大規模崩塌調查與監測作業指引，農業部農村發展及水土保持署。
- 農業部農村發展及水土保持署 (2024)。大規模崩塌監測資料規範，農業部農村發展及水土保持署。
- 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏 (2013)。由臺灣監測案例探討邊坡位移量之管理值，地工技術，136，59-70。
- 謝志龍 (2021)。IoT 物聯網傳輸技術於大地工程監測之應用，地工技術，169，126-135。
- 羅百喬、林璋元、黃詠智、王泰典 (2025)。數位學生模型在工程實務的介紹，地工技術，185，91-92。

數據與模型——大地工程中 偏差－變異權衡的過去、現在與未來

卿建業 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

一、地下空間的不可見性：我們從何開始？

大地工程與其他許多工程領域的根本差異，不僅在於研究材料本身，也不僅在於所採用的分析工具，而在於我們所面對的對象是地下空間。與結構構件或製造系統不同，地盤無法被完整觀測，我們從未真正「看見」過一個完整場址。鑽孔僅提供點位量測，現地試驗僅探測有限體積，地球物理方法可提供空間上連續的影像，但解析度仍然有限。即使在最嚴謹的場址調查計畫下，我們所取得的仍然是稀疏樣本與間接量測。地層分布、沉積歷史、空間變異與應力演化，大多仍隱藏於地表之下。此種不完全可觀測性是一項內在限制，而非暫時性困難。我們無法為了檢視而全面開挖整個場址，也無法對地下每一單元土壤進行現地全面試驗。即使量測技術持續進步，地下條件的完整揭示仍將受到技術與經濟條件的限制。因此，大地工程始終是在資訊不完整的條件下開始。

1.1 數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性

地下空間的不可見性（subsurface invisibility）直接導致數據稀疏性（data sparsity）。挑戰不僅在於我們探測的體積有限，更在於所取得的數據在空間上呈現不連續、碎片化與多尺度特性。除了數據稀疏性，地工資訊進一步受到兩項特徵所強化：空間變異性（spatial variability）與場址獨

特性（site uniqueness）。空間變異性——地下空間從來不是均質域，土壤性質因沉積過程、風化作用與應力歷史等因素而在空間中連續變動。即使在看似均一的土層中，強度與勁度等參數亦可能呈現顯著的局部波動。這些變異並非純粹隨機，而是反映形成地盤之地質過程。場址獨特性——每一場址皆具有特定的地質成因、沉積環境與應力歷史。即便兩個場址具有相似的土壤分類，其組織構造與歷史演化差異仍可能導致顯著不同的工程反應。因此，一個場址的經驗與數據無法在未經審慎評估下直接轉移至另一場址，資訊的可轉移性具有內在限制。

地下空間的不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性，共同累積為不可避免的不確定性。此種不確定性源於地下空間僅部分可觀測且不可重製的本質，我們必須在高度不確定的條件下作出設計決策。

1.2 為何模型不可避免

在數據有限且不確定性高的條件下，模型變得不可避免。模型將零散且部分的觀測組織為具可詮釋性與預測能力的框架。然而，模型並非現實本身，而是對現實的抽象與簡化，每一個模型都包含假設，而每一項假設皆伴隨權衡。當我們將土壤理想化為均質、連續與均向性時，我們獲得分析上的可處理性，卻同時忽略地層非均質性與沉積複雜性。當我們構建更精細的組成律

時，或許更接近材料行為，但同時也引入更多參數與新的不確定來源。在數據稀疏、空間變異與場址獨特性的條件下，模型複雜度本身即成為方法論選擇。若數據有限而模型過於複雜，參數將變得不可辨識，預測結果可能對微小觀測差異高度敏感。若模型過度簡化，預測或許穩定，但可能存在系統性偏差。以統計語言而言，此即偏差－變異權衡（bias-variance tradeoff）：簡化模型可能增加系統性偏差，卻降低變異；複雜模型可能降低偏差，卻放大在有限數據下的敏感性。

1.3 早期理論與簡化邏輯

此種偏差－變異權衡並非新現象，而是早期大地工程模型與理論中已隱含的結構。十八與十九世紀提出之古典土壓力理論（例如 Coulomb, 1776; Rankine, 1857），係在地下數據極為有限之時期，在高度理想化假設下推導而成。這些封閉解在理論上相對簡潔（偏差較高但變異較低），卻為工程實務提供穩定且可重複的預測框架。早期理論並未試圖捕捉土壤行為與空間變異的所有細節，而是隱含遵循一項理性原則：當複雜假設無法驗證時，應優先採用較低複雜度之解釋。

因此，大地工程的歷史並非單純朝向模型日益精細化的線性過程，而是一個隨數據條件不斷校準模型複雜度的持續調整過程。從高度理想化的經典解析解，到結合經驗的模型，再到當代對空間變異與不確定性的處理，本學科反覆面對同一核心問題：在本質上不確定的環境中，如何構建既穩定又具表達能力的模型？理解地下空間的不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性，乃理解大地工程演進之起點。這些基本限制並不會隨技術進步而消失，數據與模型之間的平衡，始終是一項持續存在且無可避免的工程選擇。

1.4 本文範圍

本文主要聚焦於大地工程中與「土壤力學」相關之發展；土壤的成因與空間變異性，在數據

與建模之間形成獨特張力。岩石力學同樣面臨地下空間不可見性與不確定性問題，但其材料行為與理論發展軌跡有所不同，值得另行專論。本文之範圍界定應理解為主題聚焦，而非對岩石工程之排除。

二、從物理到實務：數據與模型間的早期平衡

若第一章建立了大地工程所面臨的內在限制，則本學科的歷史發展，可被視為對這些限制的一系列回應。在偏差－變異權衡（bias-variance tradeoff）等統計術語尚未普及之前，早期先驅便已意識到有限數據與模型複雜度之間的張力。

2.1 有效應力——框架的誕生

1925 年，有效應力原理（effective stress principle）被提出（Terzaghi, 1925），標誌著土壤力學概念上的重大轉變。土壤不再僅被視為由摩擦顆粒組成的介質，而是透過有效應力概念，建立一個連結應力、孔隙水壓力與變形的近似連續體框架。此一發展並非源自大規模數據庫，而是來自有限室內證據、現地觀測與物理推理的綜合。有效應力原理在概念上簡潔，卻具有高度解釋力，它將複雜的顆粒行為壓縮為可處理的連續體核心，同時保留物理可詮釋性。以現代語言而言，它是一種具有物理合理性偏差（physically plausible bias）、但變異極低的模型：即便在數據稀疏條件下，仍能在廣泛條件下保持穩健。

《Theoretical Soil Mechanics》（Terzaghi, 1943）的出版，代表此一形式化工作的高峰，其目標明確：為土壤力學提供嚴謹的理論基礎；然而，此一理論努力從未脫離工程實務。值得注意的是，書中許多解析解建立於高度理想化假設之上，包括線性（linearity）、均質（homogeneous）與均向性（isotropic）材料、剛塑性（rigid-perfect plasticity）行為，以及簡化邊界條件。這些假設不僅是數學便利手段，更反映當時的知識限制，

在極度有限且空間稀疏的數據條件下，簡化是必要的。因此，早期大地工程的發展路徑，更傾向於理論可處理性與概念清晰性，而非追求理論完備性。

2.2 案例研究與觀測法

隨後出版的《Soil Mechanics in Engineering Practice》(Terzaghi and Peck, 1948)，由當時領先的現場工程師 Peck 共同撰寫，標誌著土壤力學由理論形式化走向工程實務整合的一次重要調整。此一調整並非對理論分析的否定，而是對理論、現場經驗與施工觀測之間關係的重新定位。Terzaghi 在該書序言中對當時土壤力學發展方向提出如下觀察：

Unfortunately the research activities in soil mechanics ... diverted the attention of many investigators and teachers from the manifold limitations imposed by nature on the application of mathematics to problems in earthwork engineering. As a consequence, more and more emphasis has been placed on refinements in sampling and testing and on those very few problems that can be solved with accuracy. Yet, accurate solutions can be obtained only if the soil strata are practically homogeneous and continuous in horizontal directions. Furthermore, since the investigations leading to accurate solutions involve highly specialized methods of sampling and testing, they are justified only in exceptional cases. On the overwhelming majority of jobs no more than an approximate forecast is needed, and if such a forecast cannot be made by simple means it cannot be made at all. If it is not possible to make an approximate forecast, the behavior of the soil must be observed

during construction, and the design may subsequently have to be modified in accordance with the findings. These facts cannot be ignored without defying the purpose of soil mechanics. They govern the treatment of the subject in this book.

上述文字清楚說明，Terzaghi 所關切者並非取樣、試驗或理論精細化本身沒有價值，而是當土壤力學過度集中於少數可精確求解的理想問題時，可能忽略自然地盤對數學與理論應用所施加的多重限制。對多數大地工程而言，地下條件往往並非均質且水平連續，完整精確的解答通常不具現實可行性；工程上真正需要的，常是一個合理的近似預測，並於施工過程中依據現場觀測結果加以修正。因此，《Soil Mechanics in Engineering Practice》的重要性，不僅在於將土壤力學理論應用於工程問題，更在於將理論、案例歷史、現場經驗與觀測修正整合為一種面對不確定性的工程方法。焦點轉向案例歷史、現場行為以及觀測在工程決策中的角色。此一調整反映對數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性的隱含認識：當地條件無法事前完全掌握時，設計必須保持可調整性。觀測法 (observational method) (Peck, 1969) 的提出，並非對理論的否定，而是對不確定性的承認：模型提供初始結構，現場數據提供修正。此一方法並未增加理論複雜度，而是強化模型與可觀測現實之間的連結。它強調模型可演進，但現場觀測具有持久價值。以本文將提及之語言而言，這可被視為在資訊受限條件下早期的「數據優先」(data-first) 設計哲學。

2.3 參數可量測性與工程可操作性

1950 年代，研究焦點轉向將理論概念轉化為可量測參數。孔隙水壓力參數 (Skempton, 1954)、剪力強度相關關係與過壓密效應被形式化為可透過試驗辨識的參數 (Skempton, 1964)。這些發展的重要性不在於數學精細程度，而在於其可量測性。這些努力並未引入更多抽象理論層

次，而是將複雜的力學行為轉譯為可由室內與現地試驗取得的參數。模型形式仍相對簡潔，但具物理可詮釋性，且參數可透過試驗辨識。此種作法透過將參數錨定於可觀測試驗結果而降低變異，即便某些簡化可能引入系統性偏差。再一次地，模型複雜度與數據條件之間的平衡雖未明言，卻是有意識地存在。

2.4 數據標準化

在理論發展之外，試驗程序標準化亦同步推進。阿太堡限度 (Atterberg limits) 之室內試驗方法經改良 (Casagrande, 1932)。三軸試驗設備與程序獲得改進，以確保可重現性。土壤分類系統被正式化：統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS) (Casagrande, 1948) 為二十世紀中葉之代表性成果。該系統透過粒徑分佈與阿太堡限度等相對容易量測的參數，將複雜土壤行為壓縮為分類架構，建立穩定且可轉移的工程語言。USCS 並未試圖描述所有機制，而是在表達豐富性與操作清晰性之間作出取舍。其長期延續性顯示，在數據稀疏且異質條件下，模型簡潔性往往較理論完備性更具工程價值。

2.5 組成律的興起

至 1950 年代末與 1960 年代，組成律建模 (constitutive modeling) 開始更為正式化。Cam Clay 模型 (Roscoe *et al.*, 1958) 以及後續之 Modified Cam Clay 模型 (Roscoe and Burland, 1968)，嘗試將土壤行為納入一套基於臨界狀態土壤力學 (critical state soil mechanics) 的彈塑性框架，此類發展代表模型表達能力的重要擴展。該框架統一描述壓密行為、降伏面與應力－應變關係。然而，即便在此階段，模型參數數量仍然有限，具物理可詮釋性，且可透過試驗辨識，平衡尚未轉向過度複雜。模型結構較古典土壓力理論更為精細，但仍受限於可量測參數與可取得的室內數據。

2.6 一種模式的浮現

回顧這些早期年代，可以觀察到一種模式：

- 理論框架的引入保持審慎；
- 參數與可量測量綁定；
- 案例始終居於核心地位；
- 模型複雜度逐步但有選擇性增加。

事後觀之，這些發展可被理解為在嚴重數據限制下對偏差與變異進行管理的嘗試。早期大地工程並非追求絕對簡化，而是使簡化具有物理基礎。此一時期顯示，本學科的基礎既非純經驗導向，也非過度理論化，而是在地下不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性的條件下所作出的平衡回應。下一階段的發展，將在計算能力提升速度超越量測能力之際，使此種平衡面臨更嚴峻考驗。

三、計算力崛起：當模型容量超越數據

若土壤力學的早期數十年以在嚴重數據限制下審慎擴展模型結構為特徵，則 1970 年代標誌著另一階段的開始。計算能力迅速提升，數值方法日益成熟，模型複雜度首次不再受限於解析可解性，而是受限於想像力與計算資源，此一轉變根本改變了大地工程建模的格局。

3.1 有限元素法與可能性的擴展

1960 至 1970 年代，有限元素法 (finite element method, FEM) 的廣泛採用 (例如 Clough and Woodward, 1967; Zienkiewicz, 1971)，使工程師得以超越封閉解析解與理想化幾何假設。過去難以處理的邊界值問題得以透過數值方式分析；複雜地層、分階段施工與非線性材料行為皆可納入模擬之中。此一發展具有變革性意義，大幅提升模型的表達能力，然而，它並未消除地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性。當數值求解器日益強大時，材料參數仍須依賴有限的現地與室內試驗估計。換言之，模型容量的提升速度，快於數據品質的提升。

3.2 組成律模型的繁衍

隨著計算限制的放寬，組成律模型的發展進入快速多樣化階段。除 Cam Clay 及其變體（Roscoe *et al.*, 1958; Roscoe and Burland, 1968）外，多種彈塑性延伸模型陸續出現，包括：

- 受限面塑性（bounding surface plasticity）模型（例如 Dafalias and Popov, 1975）；
- 處理液化與應變累積之循環載重模型（例如 Prevost, 1985）；
- 廣義塑性（generalized plasticity）模型（例如 Pastor *et al.*, 1990）；
- 納入應力依賴勁度與塑性硬化之 Hardening Soil 類型模型（例如 Schanz *et al.*, 1999）；
- 以及其他更多的模型。

理論精細度與模型參數數量顯著增加，降伏面之形狀與維度亦日益複雜。若從偏差－變異權衡角度觀察，此階段可被理解為試圖降低模型偏差，以捕捉早期模型無法描述之土壤行為細節。然而，模型複雜度的擴張亦帶來新挑戰，參數辨識變得更加困難，校準過程需依賴精密控制的室內應力路徑試驗，而此類試驗未必能代表實際現場條件。在許多實務工程中，僅有部分參數可被可靠決定，其餘參數則須推估、假設或引用文獻值。因此，即使模型偏差可能降低，模型變異卻增加，預測結果對參數不確定性與場址特定變異更為敏感。

3.3 數值平台的擴展

模型複雜度的擴展亦伴隨數值平台的多樣化。有限元素法成為邊界值問題（boundary value problem）之主流工具，但為了描述連續體假設之外的現象，其他計算方法亦被發展。離散元素法（distinct element method, DEM）（Cundall and Strack, 1979），以及後續之 PFC3D（Itasca, 1998），使顆粒尺度材料模擬成為可能。物質點法（material point method, MPM）（Sulsky *et al.*,

1994）則用以處理大變形、演化邊界與多相耦合問題，例如邊坡滑動與土壤－結構互制。這些平台顯著提升大地工程模擬之表達能力。

然而，數值能力的進展再一次快於量測能力；DEM 中的顆粒尺度參數或 MPM 中的組成律關係，仍需依賴室內或現地數據進行校準。儘管此類方法對理論理解與研究探索具有重要價值，其在例行設計中的應用仍受限於相同的數據條件。因此，數值平台的多樣化不僅未消除模型與數據之間的張力，反而使其更加明顯。

3.4 數值能力與數據限制

這時期的計算力崛起，形成一種微妙但重要的不對稱。數值分析幾乎可以模擬任何力學情境，只要組成律與邊界條件可以被指定，然而，指定這些條件需要數據。當數據仍然稀疏，土壤性質仍具有空間變異，場址仍具獨特性時，數值精細化並不必然轉化為預測能力。實務中因此出現一種現象：

- 模型日益精細；
- 然而工程實務仍傾向採用相對簡化之模型與參數。

換言之，計算工具使多參數模型成為可能，但數據條件往往迫使工程師回退至參數較少之簡化模型。此一現象反映地下不可見性所帶來的數據限制。

3.5 業界作為隱含模型篩選者

工程實務中可觀察到一項值得注意的現象：儘管先進組成律模型數量眾多，真正長期主導設計之模型卻有限。Mohr-Coulomb 塑性搭配線彈性模型（例如 Potts and Zdravkovic, 1999）仍廣泛使用，Modified Cam Clay 持續作為軟黏土之參考模型，Duncan-Chang 雙曲線模型（Duncan and Chang, 1970）於路堤與基礎分析中獲得廣泛採用，Hardening Soil 類型模型則在進階 FEM 平台中受到青睞。這些模型具有共同特徵：在複雜

度與數據限制之間取得平衡。它們並非文獻中最精細的土壤行為描述，而是參數可由標準試驗校準、且在一般數據條件下數值穩定的模型。

業界的選擇因此可被視為一種大規模模型選擇機制：需要過度校準努力、數值不穩定或依賴罕見數據的模型，往往難以在實務中長期存活。從數據與模型關係觀之，此種存活模式顯示，最具影響力的模型並非單純追求最低偏差，而是在現實數據條件下維持可控制變異。

3.6 日益加劇的張力

至二十世紀末，一種張力逐漸顯現：

- 理論與數值能力迅速擴張；
- 量測與場址調查方法雖改善，但速度較慢；
- 組成律模型日益複雜；
- 數據仍然稀疏、具有空間變異且場址特定。

此種分歧並未否定先進建模之價值：在受控室內試驗條件下，高擬真模型可產生重要洞見；然而，在例行工程上，第一章所述基本限制依然存在。因此，計算力崛起並未消除偏差－變異權衡，而是使其更加明顯。大地工程面臨一項新問題：與其僅精緻化確定性組成律，是否應將不確定性本身納入明確建模目標？下一階段的發展，將朝此方向前進。

四、不確定性的顯性化：變異性、可靠度與貝氏更新

若說計算力崛起擴張了模型容量，卻未能解決地下空間數據受限的根本問題，那麼隨後的大地工程發展則朝向另一個方向前進。與其持續提升組成律的複雜度，學界逐漸將焦點轉向：將「不確定性」本身視為建模對象。這一轉向並非否定確定性的模型（deterministic modeling），相反地，它承認在地下空間不可見、數據稀疏、空間變異性與場址獨特性長期存在的條件下，不確定性並非單純雜音，而是一種內在特性，值得被直接建模與量化。

4.1 變異性的早期認識

在可靠度方法（reliability methods）廣泛應用之前，土壤的變異性已受到觀察與記錄。Lumb（1966）在早期系統性研究中指出，土壤性質之變異可視為圍繞平均趨勢之隨機偏差，且常可近似為常態或對數常態分布；他進一步主張，設計參數的選取應基於可接受的失效機率（failure probability），而非僅依賴決定論安全係數（safety factor）。若以偏差－變異權衡觀之，這代表了一種不同於提升模型複雜度以降低偏差的策略：與其追求更精細的模型以減少偏差，不如直接量化並管理變異性。此時，大地工程推論開始承認：在數據受限條件下，變異性本身即為不可忽視之核心結構。

4.2 可靠度方法與隨機場模型進入大地工程

可靠度方法最初發展於其他土木工程領域（例如 Benjamin and Cornell, 1970），隨後逐漸影響大地工程設計思維。Tang 等（1976）與 Christian 等（1994）指出，可靠度方法提供一種更透明的架構，以顯性方式處理不確定性。在此架構下，設計問題轉化為：建立極限狀態函數（limit-state function）、指定參數之機率分布、設定目標失效機率，設計不再僅是選擇安全係數，而是量化失效風險。

進一步的發展來自於對空間變異性的認識：土壤空間變異並非各點彼此獨立，而是具有空間相關結構。Vanmarcke（1977, 1983）提出隨機場（random field）理論，將土壤性質表示為具有平均值、變異數與波動尺度（scale of fluctuation）的空間隨機場，此一觀點使空間相關性得以納入可靠度分析。隨機有限元素法（random finite element method, RFEM）（例如 Griffiths and Fenton, 2004; Fenton and Griffiths, 2008）進一步顯示：在相同平均強度下，不同相關結構與變異程度可能導致截然不同的失效機率。換言之，空間變異性本身即為決定性因素。

同時，研究者亦開始彙整土壤統計特性，包括變異係數（coefficient of variation, COV）、波動尺度與不同土壤參數間之轉換不確定性（例如 Phoon and Kulhawy, 1999a, 1999b）。這些彙整提供可靠度分析與隨機場模型所需之統計基礎。從偏差－變異的觀點來看，可靠度方法與隨機場模型承認：在數據受限條件下，確定性模型的偏差無法完全消除，與其以高度複雜的確定性組成律過度擬合有限數據，不如直接模擬其不確定性。值得注意的是，此轉向並未要求持續增加組成律複雜度，相反地，它有時更傾向於使用較簡潔、參數可辨識之組成律，以利於機率分析。因此，不確定性建模並非組成律複雜化之延伸，而是建模焦點的重新分配：從捕捉力學細節、轉向量化「無法完全確知」之變異性與不確定性。

4.3 貝氏更新與觀測法

可靠度思維的自然延伸為貝氏更新（Bayesian updating）（例如 Ang and Tang, 1975; Baecher and Christian, 2003）。貝氏方法不再將設計參數視為場址調查後即固定不變，而允許隨施工監測數據之取得而持續更新，於分階段施工、隧道工程及深開挖專案中，現地監測可被納入分析，以逐步降低不確定性，此一架構使模型與數據之關係由靜態轉為動態。概念上，貝氏更新提供了一種在偏差－變異權衡中動態調整的機制：先驗模型（prior model）包含物理理解與假設（含偏差）、新觀測數據透過條件化（conditioning）降低變異、後驗模型（posterior model）則反映重新平衡後之狀態。因此，貝氏方法並非在確定性的模型與觀測數據間做出選擇，而是以機率方式將兩者整合。從歷史脈絡觀察，貝氏更新可被視為 Peck（1969）所提出觀測法（observational method）的機率化形式，觀測法主張：基於最佳可得資訊提出初步設計、於施工過程中持續監測、依據觀測結果調整設計決策，貝氏更新為此哲學提供數學結構，它將確定性的調整轉化為機率化的更新。Peck 所強調之

觀測法，在貝氏語言中即為：在新證據下對先驗信念進行序列更新，因此，貝氏方法並非引入全新的工程哲學，而是將長期存在的觀測導向決策實務加以顯性化與量化。

4.4 一種不同形式的成熟

至二十世紀末，大地工程發展出兩條並行的成熟路徑：

- 組成律與數值平台複雜度的提升（第三章）
- 變異性與不確定性之顯性建模（第四章）

前者主要透過提升物理描述能力以降低偏差，後者則透過量化與管理不確定性以控制變異，兩者並非互斥。然而，在地下空間不可見、數據稀疏、空間變異性與場址獨特性持續存在之條件下，第二條路徑提供了另一種穩定性來源：它不主張更強的確定性模型，而是將不確定性納入模擬範疇。此時，大地工程關注的不再僅是：「如何更精確描述土壤行為？」而同時是：「我們對所知之事有多不確定？」下一章將轉向當代情境：在量測技術進步、數據庫彙整與人工智慧（Artificial Intelligence, AI）興起的背景下，數據與模型之張力正被重新形塑。

五、數據更為豐富，但尚未真正進入數據豐富時代：當代圖像

若二十世紀末的發展標誌著透過可靠度方法與隨機場建模將不確定性顯性化，則二十一世紀初期則出現另一種轉變：量測技術進步、數據庫逐步建立、計算基礎設施大幅擴張，以及人工智慧（Artificial Intelligence, AI）方法進入工程實務。乍看之下，大地工程似乎正邁向數據豐富（data-rich）時代，然而，此一轉變更為細緻；當代大地工程確實「數據更為豐富」，但尚未真正進入全面數據豐富的狀態。

5.1 量測技術與監測規模的擴張

當代量測技術顯著進步：圓錐貫入試驗（Cone Penetration Test, CPT）更為成熟與標準

化，地球物理調查方法（geophysical survey methods）如下孔（downhole）、跨孔（crosshole）、表面波（surface wave）、電阻率層析（electrical resistivity tomography）與地面穿透雷達（ground penetrating radar, GPR）（例如 Stokoe and Woods, 1972; Loke and Barker, 1996; Park *et al.*, 1999; Daniels, 2004）均提升地下空間特性辨識能力，遙測（remote sensing）與干涉式合成孔徑雷達（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）（例如 Massonnet and Feigl, 1998）使區域尺度地表監測成為可能，分散式感測（distributed sensing）（例如 Soga and Luo, 2018）提升觀測數據之密度、頻率與時間解析度。在隧道與深開挖工程中，位移量測、孔隙水壓紀錄與應力監測產生大量時間序列數據（例如 Huang *et al.*, 2018），此類數據在過去難以取得。然而，即使量測技術進步，地下空間不可見性仍未消失：鑽孔仍為離散，地球物理方法仍受解析度限制，

監測數據仍只能偵測局部反應，量測密度提升改善了解析能力、但未消除資訊不完整性。因此，儘管數據量增加，第一章所指出之基本特性——數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性——仍然存在。

5.2 數據庫之建立與彙整

二十一世紀另一重要發展為大地工程數據之系統化彙整。除量測技術提升外，地下空間資訊逐漸被整理、標準化並匯集成大型數據庫。在國家層級，多國建立公開大地工程數據平台，例如：紐西蘭之 New Zealand Geotechnical Database（NZGD），整合鑽孔紀錄、CPT 與試驗結果；美國 Pacific Earthquake Engineering Research Center（PEER）所維護之震害與場址反應數據庫；香港土木工程拓展署（CEDD）及其岩土工程處（GEO）所提供之可查詢鑽孔與工程檔案；歐洲 EuroGeoSurveys 推動跨國地下數據共享；在台灣，經濟部地質調查及礦業管理中心建置之工程地質探勘資料庫（經濟部地質調查及礦業管

理中心，2026），亦整合工程地質鑽探與地表地質調查等資料，反映台灣近年亦逐步朝向工程地質與大地工程資料之系統化、標準化與資料庫化方向發展。除國家級平台外，主題型數據庫亦逐步形成，例如：土壤統計特性彙整（Phoon and Kulhawy, 1999a），CPT 數據庫（Ching *et al.*, 2023），模型不確定性統計（Tang and Phoon, 2021），Next-Generation Liquefaction Database（Brandenberg *et al.*, 2020），國際岩土力學與地工學會（ISSMGE）技術委員會 TC304 亦發表關於變異性與不確定性之現況報告（ISSMGE, 2021）。

這些努力反映出一項共識：單一專案數據不足以支撐廣泛應用，跨場址彙整可提升統計能力、支持模型驗證與變異性描述。然而，大型數據庫並未消除場址獨特性，也未克服地下空間不可見性，它們降低的是「母體層級」的變異，而非個別場址的不確定性。因此，大地工程確實比過去更具數據基礎，但尚未進入真正數據豐富時代。

5.3 人工智慧與模型容量擴張

人工智慧（AI）與機器學習（Machine Learning, ML）模型，包括：類神經網路（neural networks）（Haykin, 2009）、支持向量機（support vector machines）（Schölkopf and Smola, 2001）、樹狀集成模型（tree-based ensemble models）（Zhang and Ma, 2012）、深度學習架構（deep learning architectures）（Bengio, 2009; Goodfellow *et al.*, 2016）已廣泛應用於土壤分類、液化評估、沉陷預測與參數反算。此類模型具有高度表達能力與彈性，可逼近複雜非線性關係，而不需預先假設物理定律，在影像辨識與語言模型等數據極為豐富領域，其效果顯著。然而，在大地工程中，數據仍具：稀疏性、空間變異性、場址獨特性，高彈性模型雖可良好擬合現有數據，但跨場址泛化能力仍存在不確定性。以偏差－變異觀之：高模型彈性提升可降低局部偏差，但在數據稀疏或未見場址條件下可能放大變異。因此，AI

並未消除偏差－變異權衡，而是將其於更高容量模型空間中重新呈現。

AI/ML 在大地工程中的擴散往往伴隨整體 AI/ML 社群技術浪潮：早期神經網路與支持向量機、隨機森林 (random forest) 與 XGBoost、卷積神經網路 (CNN)、循環神經網路 (RNN) 與長短期記憶網路 (LSTM)、以及近期的轉換器架構 (transformer)。若採用這些 AI/ML 模型的動機是為解決大地工程數據之非線性、多尺度與空間變異特性，則符合「數據優先 (data-first)」哲學；但若主要動機來自技術流行趨勢，則容易形成「模型優先 (model-first)」現象，導致模型容量與數據條件不匹配。AI 對大地工程真正的貢獻，不在於最新架構的引入，而在於重新檢視模型容量與地下空間數據特性之相容性。

5.4 AI 的轉移學習能力

近期 AI 基礎模型 (foundation models) 與轉移學習 (transfer learning) 的發展，進一步擴展此議題。大型預訓練模型在語言、影像與科學計算中展現跨任務泛化能力。例如：大型語言模型可在未明確接受物理訓練情況下推理工程問題 (Wei *et al.*, 2022)，影像基礎模型可用少量標註數據轉移至醫學影像或材料缺陷辨識 (Raghu *et al.*, 2019)，語言模型可跨語系進行泛化 (Zoph *et al.*, 2016)。理論上，轉移學習為大地工程提供跨場址學習之可能，然而，轉移學習依賴來源域與目標域間的相似性。在大地工程中不同場址的地質成因、沉積環境、應力歷史，可能顯著不同，若相似性判斷錯誤，轉移學習可能降低變異卻引入隱性偏差。因此，即使在最先進轉移學習架構下，根本限制仍存在：模型容量無法取代對數據結構的理解。

5.5 物理導引式人工智慧建模

面對上述挑戰，物理導引式人工智慧 (physics-informed AI) 逐漸興起。物理導引神經網路 (Physics-Informed Neural Networks, PINN)

(Raissi *et al.*, 2019) 將控制偏微分方程嵌入訓練目標。而熱力學人工神經網路 (Thermodynamics-based Artificial Neural Networks, TANN) (Masi *et al.*, 2021) 將熱力學定律限制嵌入資料驅動的組成律模型。此類方法的概念核心為：透過物理結構引入合理偏差、以降低純數據驅動模型之變異，在偏差－變異框架下，此為重新平衡策略。

5.6 數據豐富的錯覺

當代容易產生「數據豐富」之錯覺。相較於早期土壤力學，數據量確實增加，計算工具更普及，AI 框架更成熟。然而，多數工程專案仍受限於有限鑽孔數量、經費限制、地質非均質性，即使大型數據庫亦由大量稀疏觀測彙整而成。因此，當代狀態可總結為：

- 數據比過去豐富，但尚未全面豐富；
- 模型容量大幅擴張；
- 不確定性仍然存在。

數據與模型之張力並未消失，只是更加細緻與隱性。關鍵問題不再是我們是否已具備足夠數據進行完全數據驅動工程？而是在數據更為豐富但仍然稀疏的條件下，模型容量應如何校準？此問題自然引向更深層的方法論反思。若偏差－變異權衡可作為統計統一視角，是否能成為評估當代建模策略之概念骨幹？下一章將直接探討此問題。

六、偏差－變異權衡作為統一視角

前述各章回顧了大地工程從理論萌芽、計算能力擴張、不確定性顯性化，到當代數據成長與人工智慧興起的歷程。在這些轉變之下，始終存在一項反覆出現的張力：模型容量不斷提升，但地下空間數據仍然本質上稀疏、具空間變異性，且高度場址特定。為了更一致地理解這種張力，統計學中的偏差－變異權衡 (bias-variance tradeoff) 提供了一個有力的分析視角。在監督式

學習 (supervised learning) 中，總預測誤差可分解為偏差 (bias) 與變異 (variance)，隨著模型複雜度提升，偏差通常下降，因為模型更能逼近潛在機制；然而，變異則隨之上升，因為預測結果對數據波動更為敏感。總誤差通常呈現 U 形曲線：過度簡化模型 → 高偏差、低變異，過度複雜模型 → 低偏差、高變異，中間存在一合理平衡區域，圖 1 示意此概念。

在大地工程中，地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性，構成所有模型的基本限制。從歷史角度觀察，本學科的發展可被重新詮釋為：在這條曲線上反覆尋找可行平衡區域的過程。

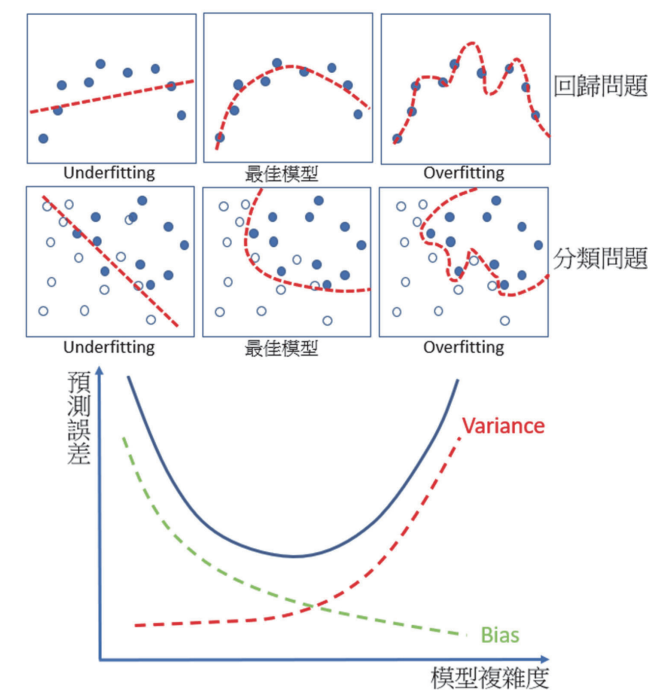


圖 1 偏差－變異權衡示意圖

6.1 歷史證據一：長久存續的模型是平衡模型

若檢視那些在工程實務中長期具有影響力的模型，可發現一項顯著現象：最具持久性的模型，往往並非理論複雜度最高者，而是其複雜度與當時數據條件相匹配者。有效應力原理 (Terzaghi, 1925) 建立了一個簡潔而具物理意涵

的框架，其基礎來自有限但謹慎詮釋的試驗與現地觀測。統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS) (Casagrande, 1948) 透過粒徑分布與阿太堡限度等可量測參數，將複雜土壤行為壓縮為少數工程分類。Seed 與 Idriss (1971) 提出之液化評估架構，將循環阻抗比 (cyclic resistance ratio, CRR) 與循環應力比 (cyclic stress ratio, CSR) 關係整理為簡化曲線，奠基於案例資料之審慎分析。此外，現地十字片剪試驗修正係數 (Bjerrum, 1973)、SHANSEP 架構 (Ladd and Foott, 1974)、狀態參數 (state parameter) 概念 (Been and Jefferies, 1985)、Bolton 的摩擦角公式 (Bolton, 1986)、Robertson 的土壤行為類型 (soil behavior type) 分類 (Robertson, 1990)，以及 Ishihara 與 Yoshimine (1992) 提出之液化後體積應變關係，皆呈現類似特徵：

- 以可觀測數據為出發點；
- 嵌入物理機制；
- 保持參數可量測性與可校準性；
- 避免不必要的模型複雜化。

從偏差－變異觀點來看，這些模型既未追求極端簡化，也未追求理論極致複雜，而是在當時數據限制下達成合理平衡，其長期存續顯示，在數據有限條件下，穩定性可能比理論完整性更具價值。

6.2 歷史證據二：業界隱含的模型篩選機制

若從組成律發展角度觀察，同樣可見此規律。數十年來，眾多模型試圖捕捉更細緻的土壤行為。然而，真正於設計實務中長期使用者有限。Mohr-Coulomb 塑性模型、Cam Clay (或 Modified Cam Clay)、Duncan-Chang 模型，以及 Hardening Soil 類型模型，仍為常用架構。這些模型並非文獻中最複雜者，其存續原因在於：

- 參數可由標準室內或現地試驗辨識；
- 數值實現具穩定性；
- 對典型數據條件具有可操作性。

工程專案必須在有限經費、有限調查範圍與有限時間內完成。需要大量校準數據、數值不穩定或依賴罕見量測的模型，往往難以在實務中長期存在。此篩選過程與偏差－變異邏輯高度一致：當模型複雜度超出典型場址數據所能支撐的範圍，變異迅速上升，導致預測不穩定。因此，模型存續反映的並非單純保守主義，而是在數據限制下的隱含最佳化。

6.3 當代人工智慧與權衡的再形塑

人工智慧的興起並未消除偏差－變異權衡，而是在更高彈性模型空間中強化此張力。高複雜度 AI/ML 模型（如神經網路、集成樹與轉換器架構）可在未預設物理限制情況下逼近非線性關係，在數據極為豐富領域，此類模型有效降低偏差。然而，在大地工程中，數據仍具稀疏性、空間變異性與場址特定性。模型複雜度提升可能在局部降低偏差，卻在跨場址應用時放大變異。即使大型基礎模型與轉移學習展現跨領域泛化能力，其成功仍依賴來源域與目標域之相似性；若地質成因、沉積過程或應力歷史顯著不同，轉移可能引入隱性偏差。物理導引式人工智慧模型則透過引入物理結構以控制變異，然而，此並非逃離權衡，而是重新分配偏差與變異。

6.4 作為學科層級視角的偏差－變異權衡

回顧數十年發展，大地工程與其說是線性邁向日益複雜，不如說是在偏差－變異曲線上來回擺盪：

- 早期古典模型在極端數據稀缺下採取高度簡化；
- 組成律擴張試圖降低偏差；
- 可靠度與隨機場模型承認不可消除之變異；

- 當代 AI 提升表達能力，但重新帶入變異風險；
- 物理導引 AI 嘗試透過物理結構控制變異。

第一章所述之基本限制——地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性——從未消失，改變的並非權衡本身，而是其導航方式。偏差－變異權衡提供一種診斷框架，它提醒我們，總預測誤差並非透過理論雄心即可最小化，而是必須使：

- 模型結構；
- 參數可辨識性；
- 數據可得性。

三者相互匹配。從此角度觀之，大地工程的長期發展可理解為在持續數據限制下，不斷重新平衡數據與模型之過程。下一章將由詮釋轉向方向性思考：若偏差－變異權衡確實刻畫了本學科的歷史張力，則在數據更為豐富但仍未完全豐富的條件下，未來建模策略應如何設計？

七、在持續數據限制下重新平衡：未來方向

若偏差－變異權衡（bias-variance tradeoff）提供了一種統一視角以理解過去，它同樣為未來提供方向。第一章所指出之基本限制——地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性——短期內不可能消失，然而，量測技術將持續進步，數據庫將擴張，人工智慧工具亦將更加成熟。因此，關鍵問題不在於如何消除偏差－變異權衡，而在於：在「數據更為豐富但尚未真正數據豐富」且「模型能力高度發展」的條件下，如何重新校準此權衡。

7.1 推進「數據優先」建模哲學

Phoon 與 Zhang (2023) 提出「數據優先實務核心議程（data-first practice central agenda）」，主張模型應盡可能解釋所有真實世界數據，而非僅選擇少量「高品質且相關」數據，再要求工程師詮釋場址調查數據以配合既有模型。「數據優

先」哲學並非排斥物理模型，而是回到一個更根本問題：我們的數據能支撐什麼樣的模型？在選擇或發展模型之前，幾項問題應成為核心考量：

- 目標數據是否清楚為模型之輸入或輸出？
- 可用數據質與量是否足夠支撐高度模型彈性？
- 參數是否可直接量測，或能透過間接方式合理推估？

模型複雜度應源自上述問題的答案，而非理論野心或方法學的流行趨勢。在數據有限與稀疏條件下，即使存在系統性偏差，較簡潔模型仍可能降低總預測誤差；當長期監測數據逐漸累積，較高複雜度模型方可能合理化。

此外，大地工程之數據與案例並不僅限於反映地下空間本身。工程決策常涉及人為因素，包括詮釋、判斷與風險接受程度，許多工程失敗並非源自組成律錯誤，而是來自偏誤解讀、決策延誤或判斷失準。若數據優先哲學被嚴肅對待，未來建模應逐步納入人因工程（human factors）與決策不確定性（decision uncertainty），使風險評估不僅涵蓋材料變異，也涵蓋決策過程中的不確定性。

7.2 從數據／經驗累積到轉移學習

大地工程並非真正缺乏數據，而是大量數據分散於案例紀錄、工程報告與學術出版物之中。將這些分散之數據與經驗轉化為結構化、可搜尋之數據庫，是未來重要方向。此轉化不僅包括案例彙編，更包括：

- 土壤性質及其相關性之系統性統計描述；
- 轉換不確定性與模型不確定性之量化；
- 數據格式之標準化；
- 案例中失效機制與不確定性之透明報告。

在此基礎上，現代 AI 中的轉移學習（transfer learning）提供跨場址、跨區域與跨專案的知識轉移機制。然而，轉移學習隱含來源與

目標條件之相似性假設，當地質成因、應力歷史或邊界條件差異顯著時，轉移可能引入隱性偏差。因此，未來進展不僅在於更大規模數據或更強演算法，而在於發展具有理論基礎的相似性評估方法，使知識轉移建立於可檢驗之比較基礎上。

7.3 深化空間變異性與不確定性建模

地下空間系統之不確定性具有多層次結構。第一層為大地材料變異性（geotechnical variability）：同一土層內性質在空間上的連續變動，例如強度與勁度隨空間位置改變。第二層為地質不確定性（geological uncertainty）：地下空間結構本身之不確定，包括土層界面位置、厚度與側向延續性。方法論上已有顯著進展。隨機場模型（random field models）廣泛用於描述材料參數之空間相關；馬可夫隨機場（Markov random field）（例如 Li, 2009）與其他地質統計方法則用於模擬地層轉換與地質不確定性，然而，實務應用仍面臨挑戰。空間相關長度、變異係數與地層轉換機率等參數，多須由場址特定數據辨識，而此類數據往往稀疏、不完整且碎片化，限制模型之統計穩定性與預測能力。

理論上，這些模型可透過跨場址數據庫進行轉移學習以提升統計穩定性。然而，此需具備另一種規模之數據：大量來自不同場址的三維地下空間觀測資料（例如 CPT、鑽孔、十字片剪試驗與表面波調查），目前此類三維地下空間大數據庫尚未被建立。即使建立，其內部資料仍將呈現不完整之「片段式地下空間快照」，而非連續三維影像。因此，在稀疏與碎片化數據結構下，如何發展具有原則性的轉移學習方法，仍為未來關鍵研究課題。

7.4 數據庫建置與共享

單一工程專案通常不足以產生支撐高容量模型之數據，國家級、區域級與主題型數據庫構成學科重要基礎設施，因此數據庫建置至關重

要。除建置外，數據共享文化亦需逐步建立，顧問公司、業主與政府單位往往面臨資料隱私、契約義務、智慧財產權、責任風險與基礎設施安全等顧慮，因而限制數據公開。未來若能建立資料匿名化與抽象化機制，並設計清楚治理架構，將有助於降低共享疑慮。此外，適當之激勵機制亦可能發揮作用，例如：研究合作平台、專業認可制度、政策層級之鼓勵或獎勵措施，若能在不損及隱私與安全前提下共享地下空間資訊，整體數據基礎將大幅提升，不僅強化數據基礎，也將促進模型長期演進。

7.5 物理導引式人工智慧建模

物理導引式人工智慧（physics-informed AI）（例如 PINN、TANN）之重要性在於其承認偏差－變異權衡，透過在高彈性 AI 模型中嵌入控制方程或熱力學原理的限制，模型可引入具有物理合理性的偏差，以控制變異。此策略在「數據極度稀疏但系統高度複雜」的大地工程情境中特別具有意義：地下空間系統涉及非線性組成律、多物理耦合與空間非均質性，但場址數據仍然有限。若完全採用高容量 AI 模型，可能在局部擬合良好，卻在跨場址應用時產生不穩定泛化。物理導引機制提供穩定化效果：在數據支撐不足之方向上限制模型彈性，使學習方向符合已知力學結構，降低變異，目標並非消除權衡，而是在數據不足之處刻意引入合理偏差，以達成更穩定預測。未來研究應釐清：

- 在何種數據條件（例如監測密度與空間覆蓋程度）下，物理導引模型優於純 AI 模型？
- 物理限制之強度應如何設計，方能在偏差與變異間取得最佳平衡？

八、結論

本文從一項簡單卻長期存在的觀察出發：大地工程始終運作於若干內在限制之下，而這些限制並不會隨技術進步而消失：地下空間不可見性、數據稀疏性、空間變異性與場址獨特性，構

成本學科的基本背景條件。在超過一世紀的發展過程中，大地工程透過不同策略回應這些限制。早期古典理論在極端數據稀缺條件下選擇高度簡化；計算力崛起大幅擴張模型複雜度；可靠度方法與隨機場模型將不確定性顯性化；當代數據庫與人工智慧工具則進一步提升建模能力。然而，這些轉變並未消除數據與模型之間的張力，而是以不同形式重新組織與呈現此張力。

偏差－變異權衡（bias-variance tradeoff）為理解此歷程提供一致視角，它說明為何長期存續的模型往往是平衡模型；說明在數據稀疏條件下過度複雜可能導致推論不穩定；亦說明為何不確定性建模的興起象徵學科成熟。此視角並未將模型簡化視為絕對美德，也未全面擁抱純資料驅動擬合。模型複雜度並不同於進步；真正的進步取決於模型結構是否與數據條件及參數可辨識性相匹配。從此意義觀之，大地工程既非純粹物理導向，也非純粹數據導向，其理論發展可被理解為在有限數據條件下，持續平衡複雜度與穩定性的過程，本領域最具影響力的模型，往往是尊重此平衡者。

展望未來，數據量將持續增加，監測將更為密集，數據庫將擴張，人工智慧工具亦將演進。然而，地下空間仍將大多不可見，工程決策仍將在不确定性下涉及人為判斷，核心方法論問題將持續存在：在數據較過去豐富、但仍未真正數據豐富的條件下，我們應如何設計模型？因此，大地工程的未來不在於在數據與模型之間做出二選一，而在於持續校準兩者之關係。若將偏差－變異權衡不僅視為統計概念，而視為學科演進之透鏡，它所提供的長期提醒是明確的：模型穩定性並非來自最大複雜度，而來自假設與數據之間的健康比例關係。

揭露聲明

本文係作者英文論文“Data versus Model: Past, Present, and Future of Bias-Variance Tradeoff in Geotechnical Engineering”之中文翻譯與整理版

本，原文刊載於 Journal of GeoEngineering（中華民國大地工程學會）。本文用詞已依本刊讀者對象進行適度調整，並經原出版單位同意翻譯刊載，特此說明。

參考文獻

1. Ang, A.H-S. and Tang, W.H. (1975). Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. I: Basic Principles. Wiley.
2. Baecher, G.B. and Christian, J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Wiley.
3. Been, K. and Jefferies, M.G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2), 99-112.
4. Bengio, Y. (2009). Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2(1), 1-127.
5. Benjamin, J. and Cornell, C.A. (1970). Probability, Statistics, and Decisions for Civil Engineers, McGraw-Hill.
6. Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 3, 111-159.
7. Bolton, M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36(1), 65-78.
8. Brandenberg, S.J., Zimmaro, P., Stewart, J.P., et al. (2020). Next-generation liquefaction database. *Earthquake Spectra*, 36(2), 939-959.
9. Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8), 121-136.
10. Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions*, ASCE, 113, 901-991.
11. Ching, J., Uzielli, M., Phoon, K.K., and Xu, X.J. (2023). Characterization of autocovariance parameters of detrended cone tip resistance from a global CPT database. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(10), 04023090.
12. Christian, J.T., Ladd, C.C., and Baecher, G.B. (1994). Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(12), 2180-2207.
13. Clough, R. and Woodward, R. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 93(4), 529-549.
14. Coulomb, C.A. (1776). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, Paris, 7, 343-382.
15. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65.
16. Dafalias, Y.F. and Popov, E.P. (1975). A model of nonlinearly hardening materials for complex loading. *Acta Mechanica*, 21, 173-192.
17. Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar. 2nd Edition, IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15 (Ed.). The Institution of Electrical Engineers, London.
18. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96(SM5), 1629-1653.
19. Fenton, G.A. and Griffiths, D.V. (2008). Risk Assessment in Geotechnical Engineering. Wiley.
20. Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
21. Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. (2004). Probabilistic slope stability analysis by finite elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(5), 507-518.

22. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.), Prentice Hall.
23. Huang, H.W., Li, Q.T., and Zhang, D.M. (2018). Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 166-176.
24. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.
25. ISSMGE (2021). State-of-the-art Review of Inherent Variability and Uncertainty in Geotechnical Properties and Models. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) Technical Committee TC304 'Engineering Practice of Risk Assessment and Management'.
26. Itasca (1998). PFC3D – Particle Flow Code in 3 Dimensions. Itasca Consulting Group, Minneapolis.
27. Ladd, C.C. and Foott, R. (1974). New design procedure for stability of soft clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 100(7), 763-786.
28. Li, S. Z. (2009). *Markov Random Field Modeling in Image Analysis*. Springer.
29. Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
30. Lumb, P. (1966). Variability of natural soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), 74-97.
31. Masi, F., Stefanou, I., Vannucci, P., and Maffi-Berthier, V. (2021). Thermodynamics-based artificial neural networks for constitutive modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 373, 113531.
32. Massonnet, D. and Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
33. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
34. Pastor, M., Zienkiewicz, O.C., and Chan, A.H.C. (1990). Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14, 151-190.
35. Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171-187.
36. Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624.
37. Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 625-639.
38. Phoon, K.K. and Zhang, W.G. (2023). Future of machine learning in geotechnics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(10), 1-16.
39. Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford.
40. Prevost, J.H. (1985). A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(1), 9-17.
41. Raghu, M., Zhang, C., Kleinberg, J., and Bengio, S. (2019). Transfusion: Understanding transfer learning for medical imaging. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. *arXiv:1902.07208*.
42. Raissi, M., Perdikaris, P., and Karniadakis, G.E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.
43. Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147, 9-27.
44. Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158.
45. Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968). On the generalised stress-strain behaviour of wet clay. In *Engineering Plasticity* (eds. J. Heyman and F.A. Leckie), Cambridge University Press, Cambridge, 535-609.
46. Roscoe, K.H., Schofield, A.N., and Wroth, C.P. (1958). On the yielding of soils. *Géotechnique*, 8(1), 22-53.
47. Schanz, T., Vermeer, P.A., and Bonnier, P.G. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. In *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, 281-290.
48. Schölkopf, B. and Smola, A. (2001). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press.
49. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(9), 1249-1273.
50. Skempton, A.W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 4(4), 143-147.
51. Skempton, A.W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77-102.
52. Soga, K. and Luo, L. (2018). Distributed fiber optics sensors for civil engineering infrastructure sensing. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 3(1), 1-21.
53. Stokoe, K.H. and Woods, R.D. (1972). In situ shear wave velocity by cross-hole method. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, 98(5), 443-460.
54. Sulsky, D., Chen, Z., and Schreyer, H.L. (1994). A particle method for history-dependent materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 118, 179-196.
55. Tang, C. and Phoon, K.K. (2021). *Model Uncertainties in Foundation Design*, CRC press.
56. Tang, W.H., Yucemen, M.S., and Ang, A.H.S. (1976). Probability-based short term design of soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), 201-215.
57. Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke, Vienna.
58. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
59. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York.
60. Vanmarcke, E.H. (1983). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. MIT Press.
61. Vanmarcke, E.H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(11), 1227-1246.
62. Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., et al. (2022). Emergent abilities of large language models. *arXiv preprint arXiv:2206.07682*.
63. Zhang, C. and Ma, Y. (2012). *Ensemble Machine Learning: Methods and Applications*. Springer.
64. Zienkiewicz, O.C. (1971). *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill, London.
65. Zoph, B., Yuret, D., May, J., and Knight, K. (2016). Transfer learning for low-resource neural machine translation. *Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 1568-1575.
66. 經濟部地質調查及礦業管理中心 (2026)。工程地質探勘資料庫。 <https://geotech.gsmma.gov.tw/> (擷取日期：2026年6月11日)。

精選 日本四國溫泉之旅

張文仁 大地技師

引言

帶著愉快且放空的心情參加公會舉辦的國外旅遊，暫時避開惱人的公事，放鬆也好逃避也好當作是短暫休息及充電，本次安排四國旅遊主要在香川縣、德島縣及愛媛縣，公會辦的旅遊會員參加十分踴躍，為避免抽籤造成會員遺憾，在福委會主委努力下分成兩梯次，擴大會員參與機會，本次旅遊參加第二梯次，5 天旅遊每天泡湯享受不同溫泉，分別體驗道後溫泉、琴平溫泉及小豆島溫泉。

Day1-2 小豆島溫泉

班機是晚到的班機，到達高松機場已晚上

6 點，天色微暗，夜宿高松市 villy 塩川渡假飯店，遠離市中心，鳥叫聲晨喚，一早飯店附近走走，早晨空氣涼涼的頭腦也清醒了，早上要搭渡輪到小豆島，小有空檔增加玉藻公園行程，玉藻公園利用高松城遺跡所成立的公園，也被稱作「玉藻城」，因鄰近海邊，城牆外圍護城河直接取用海水，公園內高松城為「日本三大水城」，搭渡輪到小豆島後登上日本三大絕美溪谷之一的寒霞溪，在寒霞溪公園，觀賞到滿山的新綠，並且遠眺瀨戶內海，搭乘纜車下山觀賞各式各樣的岩石，這是 1300 萬年前火山活動而形成的岩塊，經地殼變動及風化、侵蝕，形成特別美景。



照片 1 寒霞溪國立公園

二十四瞳映畫村是保存電影《二十四瞳》拍攝場景而設立觀光景點，展現昭和初期的景象，很像小時候鄉下景象，場景有住民、木造校舍等，因為在海邊沙灘給人一種淒涼感覺，吹著海風，跟海是如此親近，都可以聞到鹹鹹的海水味，不免俗的要體會一下醬油冰淇淋及橄欖汽水，是種特別體驗，我有一點懷疑學校蓋在海邊，小朋友應該會常去海邊玩。

小豆島橄欖公園位於山腰上，要爬階梯走上去，可以遠眺瀨戶內海，在公園內，約種植了 2,000 株左右的橄欖樹，以及 130 種以上的香草植物，橄欖樹公園因「魔女的宅急便」的拍攝地而聞名，橄欖樹紀念館提供租借影片中魔法掃把給遊客，騎著騎著大家很快便掌握到騎掃把的技巧。由白色希臘風車騎到櫻花樹下，很幸運地在小豆島橄欖公園看到滿開的吉野櫻，風吹來感受櫻吹雪花瓣飄落。



照片 2 二十四瞳映畫村



照片 3 小豆島橄欖公園

天使之路「天使的散步道」是個會隨著漲退潮而出現或消失的砂道，通過天使的散步道的時刻要配合潮水退潮時間，一天兩次於退潮時露出地面砂道全長約 500 公尺，與心愛的人手牽手一起走過天使步道，就會有天使降落在兩人之間，並實現您的願望，被認為「戀人的聖地」，靠近天使之路的入口端，還有個可以眺望天使之路的【約束之丘展望】，來到頂端有個幸福鐘，戀人們來排隊敲鐘，因此被譽為戀人的聖地。

結束小豆島一天行程，夜宿「Olivean 小豆島夕日丘溫泉度假飯店」，是日本享譽盛名的景觀美食飯店，獲選〈夕陽百選〉與〈夕照美景飯店〉，擁抱整個蔚藍海灣與庭園綠意的無敵美景，大廳後方休憩區可欣賞一望無際的瀨戶內海景色，飯店大廳免費招待香檳，柳橙汁、蘋果汁、鳳梨汁，提供休息欣賞無敵海景，運氣好的話還可以看到夕陽，只可惜雲層太厚部分夕陽露臉，晚上飯店自助餐（buffet）更令人驚豔，草莓吃到飽，又大又甜，大概今年一整年都不會想吃草莓了。

照片 4 天使之路



Day-3 道後溫泉

一早離開飯店通過世界最窄的海峽，土瀨海峽（土淵海峽）位於瀨戶內海，小豆島與中前島之間，全長 2.5 公里，最寬處約 400 公尺，最窄之處只有 9.93 公尺，最狹窄處為連通海峽兩端的永代橋，於 1996 年登錄金氏世界紀錄為世上最狹窄海峽，短短 10 分鐘來回海峽兩端好幾次，再搭渡輪回到高松市。

參觀松山城，松山城別名「金龜城」、「勝山城」，為了與日本其他的松山城區分，也稱作「伊予松山城」。遺址的大部分區域目前作為公園開放，包括大天守（日本 12 座現存天守之一）在內的 21 座現存建築物被指定為國家重要文化財產，松山城位於松山市中心，本丸在勝山（城山）山頂，是一座平山城。位於山頂本壇的大天守為連立式，也與姬路城堡並列三大連立式平山城之一。

松山城留存的古建築有幕末重建的大天守、現存甚少的望樓型二重櫓之野原櫓（騎馬櫓），因為為古蹟不是重建天守參觀要換鞋，也沒有電梯，登上天守要爬樓梯而且樓梯很陡，登上天守可遠眺松山市。

利用纜車往返松山城，松山城纜車同時有兩條不同系統的纜車並行，一條是往復式的大纜車，採固定時刻發車；另外一款則是單人座小纜車開放式座椅，隨時都可以搭乘，我們是都選擇搭乘小纜車上山、下山，是種特別體驗，還沒搭乘以前心裡還有點忐忑，坐上纜車以後覺得相對安全，在纜車索道下方都有安全網，於搭纜車過程中小心不要讓手機、眼鏡、帽子及包包掉下去，要撿還有點麻煩，來到松山城公園，公園裡八重櫻（牡丹櫻）盛開。

來到道後溫泉，好像來到【神隱少女】的場景，除了可以享受三大湯屋泡湯樂趣，還有充滿趣味的少爺列車，少爺鐘及星巴克道後溫泉站，逛逛商店街嘗嘗在地美食及選購伴手禮，道後溫泉位於日本四國愛媛縣松山市的東北部，是日本歷史最悠久的溫泉之一，擁有超過 3,000 年的歷史。自古以來，道後溫泉就以其療癒身心的溫泉水聞名，並且深受天皇與貴族的喜愛。這裡不僅保留了傳統的溫泉建築，也融合了現代旅遊設施，讓遊客可以同時享受歷史文化與舒適泡湯體驗。



照片 5 土瀨海峽



照片 6 松山城及松山城公園



道後溫泉本館由 7 個不同的建築物結合而成，在建築學上是十分罕見的結構。內部走廊及樓梯的奇特位置分布，以及玄關和後門不在同一水平線上，更突顯其獨特的外觀設計。另外，走進室內可以發現只有在室外建築時才會使用的日本傳統建築的屋頂設計，其實這是把以前建在屋外的部分移入屋內保存下來的關係。而設計上，主要的建築物均不會建在溫泉的上方，避免蒸汽使之腐蝕以保護這座極具歷史價值的建築物。

具有健康保健功效的道後溫泉，在歷史上也曾面臨數次危機。其中 1946 年發生的大地震，幾乎使泉水枯竭殆盡。為了挽救這座歷史悠久的古泉，當時的村民採用了金剛石切割技術、油壓鑽技術等當時的先端技術，終於使泉水重歸大地，而且泉水湧出量高於以前的 3 倍，不僅度過了這次危機，還使這座古泉得以保存及繼續發展至今。非常受外國人士歡迎的道後溫泉，就是這樣傳承下來的。



照片 7 道後溫泉

矗立於道後溫泉車站前的「少爺機關鐘」，是當地極具代表性的地標。每天早上 8 點至晚上 10 點，每隔半小時或一小時，機關鐘便會啟動。少爺列車以伊予鐵路當年的蒸汽機車為模型製作而成，因為夏目漱石的小說「少爺」裡有描寫登場人物搭乘這輛列車的情節，所以被取名為「少爺列車」，少爺列車博物館位於松山市車站前，館內展示有一輛當年伊予鐵路一號機關車的原尺寸模型。

晚上住宿「道後溫泉 茶玻璃」提供不同於傳統的現代住宿體驗，於頂樓觀景露天溫泉，白天可一覽松山市區風光，夜晚則能邊泡湯邊欣賞璀璨夜景。

Day-4 琴平溫泉

祖谷葛藤橋為國家指定重要民俗文化財，為日本三奇橋之一，位於秘境「祖谷」的葛藤橋，隱藏著平家落人的悲劇故事，葛藤橋由約 6

噸的白藤葛藤所編織而成，長度 45 公尺，寬度 2 公尺，距離河面高度 14 公尺，在以前是深山溪谷地區唯一的交通設施，現在則是每 3 年會重新架設一次。被陡峭的四國山地環抱的祖谷地區，相傳是由在「屋島之戰」中戰敗的平國盛以及安德天皇一行人逃亡至此，為了祈求平家復興再起而定居下來的隱居村落。

流經祖谷地區的祖谷川上，架設著被指定為國家重要有形民俗文化財的祖谷葛藤橋。這座橋使用在嚴寒冬季於山野中採集的白藤葛藤所編織而成，這座橋隱生於周圍的自然景觀，從橋面的縫隙間可以直接看得到溪底，全長 45 公尺的吊橋，於行走過程中橋身輕微的搖晃，能體驗到恰到好處的驚險與刺激。從葛藤橋走過去後，左轉直行約 50 公尺便能抵達高低落差約 40 公尺的琵琶瀑布，可走到祖谷溪畔，祖谷溪水十分清澈，回頭仰望祖谷葛藤橋。

照片 8 少爺列車及少爺機關鐘





照片 9 祖谷葛藤橋

大步危溪谷遊船，大步危峽位於四國中部，隸屬劍山國定公園的一部分，為德島縣著名的景點，由於大步危峽谷是一個湍急河流冲刷而成的懸崖河谷，保留著懸崖峽谷的美麗崎嶇的未開發風景，被稱為日本西部風景最優美的景點之一，搭乘大步危峽觀光船順流而下，欣賞歷經 2 億年時光侵蝕的山谷，感受山谷中夏季新綠之美。

從沿著閃耀著翡翠綠光的吉野川順流而下的遊覽船上，可近距離欣賞兩岸高聳陡峭的岩壁、兩岸岩石為白色砂質片岩，隨風搖曳的樹木，以及清澈優雅的水流，感受由這片峽谷所交織而成、充滿震撼力與自然氣勢的地形之美。

【金刀比羅宮】是位於日本香川縣仲多度郡琴平町的神社，別稱金毘羅宮，位於香川縣西部海拔 521 m 的象頭山山腰上。最廣為人知的就是需要攀爬相當長的石階梯參拜，到本宮為 785 階，至後院合計階梯數為 1368 階。

照片 10 大步危峽



金刀比羅宮是知名的海神，但主祭神為大物主神，司掌農業、漁業、醫藥、技藝等職，神威顯赫而被崇拜。江戶時代，庶民不允許自由旅行，但允許參拜金刀比羅宮，故參拜金刀比羅宮為一年一度的盛事，也是令人憧憬的旅遊地。而無法前往參拜者，也有以金比羅犬（早昔無法親自前往參拜者，除了託人代行之外，也有將香油錢及路上伙食費綁在狗脖子上，由路途上參拜者引領該犬隻前往）及流水酒桶（無法前往參拜者，將酒樽流放，由撿拾者代為參拜，流放者、撿拾者均受金比羅公庇佑）方式代為參拜，到象頭山山腰的正宮前可以一覽讚岐平原。

到金刀比羅宮商店街下著小雨，天氣陰陰的遊客不多，爬上正宮已接近 5 點，想想來都來了就接續爬到後院奧社，下山到正宮已經不讓人上山了，也感謝老天給個好天氣，爬山過程中雨停了。



照片 11 金刀比羅宮及敷島館

夜宿敷島館，造訪琴平的遊客喜愛的老字號旅館，既保留了傳統外觀，同時也融入令和時代新穎意趣。這樣的溫泉旅館，就在通往金刀比羅宮的表參道上復甦，飯店本身以榻榻米鋪設，飯店內要穿飯店提供鞋子，行李箱由工作人員擦乾淨後才拿進飯店，飯店有大浴場及 4 座包場浴池可提供遊客選擇，泡完湯可以吃冰棒或養樂多，屬五星級高檔飯店。

Day-5 賦歸

栗林公園為國家指定的特別名勝，以深綠色的紫雲山為背景，巧妙地分布著六個水池和十三座假山。為江戶時代初期，以有接近四百年歷史著稱的環遊式大名園林，栗林公園有著優越的地域劃分，也有點景石，同時又富有木石的雅趣，栗林公園有一千顆姿態優美的松樹，景象可以說是一步一個變化，非常美麗。

於參訪栗林公園，好運用完了天氣陰下著小雨，公園內松樹有不同姿態，6 個水池隨著四季有不同風貌，雖然下著雨也留下令人難忘景象。

照片 12 栗林公園



行程最後到中野烏龍麵學校學習做烏龍麵，日本三大烏龍麵分別為讚岐、水澤及稻庭，台灣以讚岐烏龍麵最為知名，「讚岐」指的就是日本四國香川縣，體驗在教室 DIY 製作烏龍麵，親手製作並於中午享用這世上獨一無二的手工自製烏龍麵。

參加公會旅遊感謝福委會精心安排，品質有一定保證，而且大家都相互熟識一起旅遊更有一層親切感，有別於一般商業團，大家都收穫滿滿，放鬆充電再出發。

參考文獻

1. <https://shikoku.letsgojp.com/archives/648245/> © 樂吃購！日本 shikoku.letsgojp.com。
2. <https://www.visitehimejapan.com/zh-tw/discover/stories/0008/>
3. <https://www.matsuyamajo.jp/zh-hant/>
4. <https://www.mylovefamily.tw/?p=152086>
5. <https://www.my-kagawa.jp/static/zh-TW/ritsurin/>