

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化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

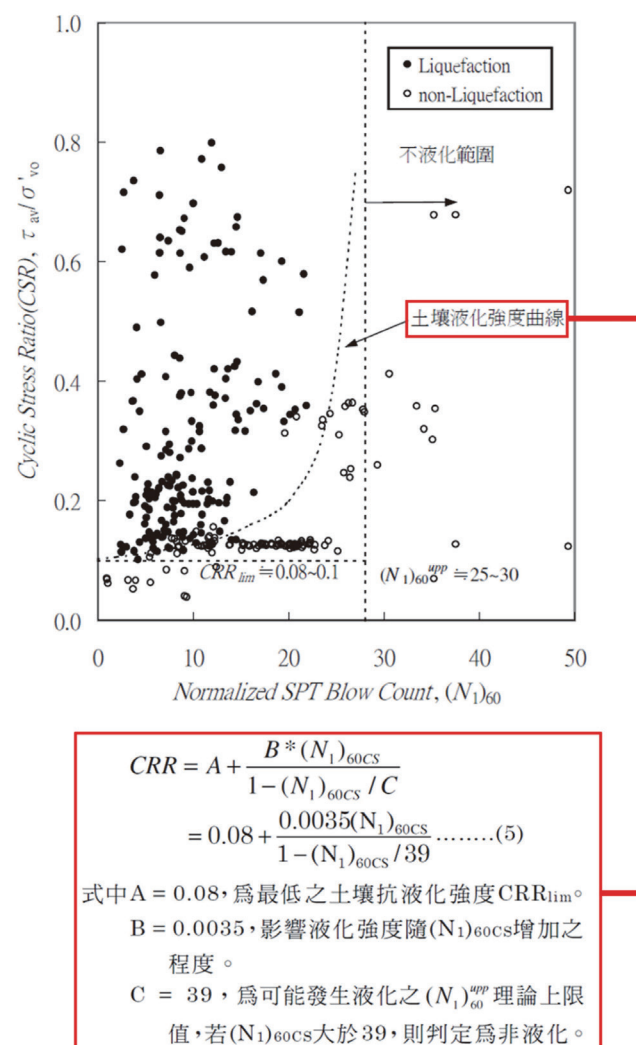


圖 1 本土化雙曲線土壤液化強度曲線（改繪自黃俊鴻等，2005）

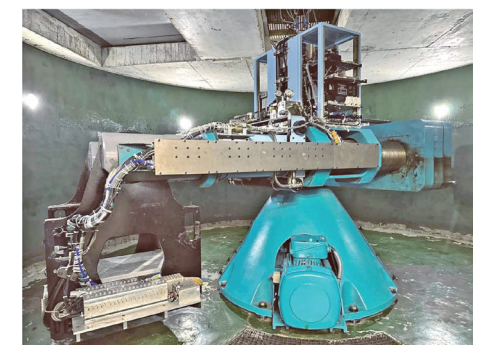
年起推動都市防災地質圖測勘發展計畫（邱禎龍等，2023），惟此時尚未將產出圖資釋出到公開平臺供大眾查閱。另一方面，機率式液化危害度評估也在集集震災經驗之基礎上持續發展，如黃富國（2008）綜合了世界各國與集集地震之液化與非液化場址鑽孔資料，針對基於 SPT-N 之液化潛能評估法建立液化機率與抗液化安全係數之關係，有助於液化損害程度之量化。

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。

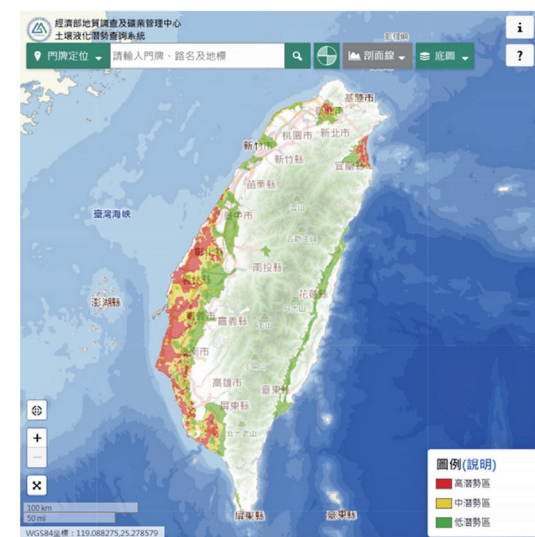


圖 3 土壤液化潛勢查詢系統畫面（www.liquid.net.tw）

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

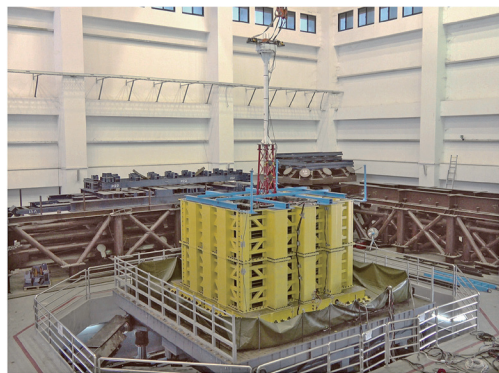


圖 4 成大土木 - 國震中心離岸風機結構模型振動臺試驗（筆者提供）

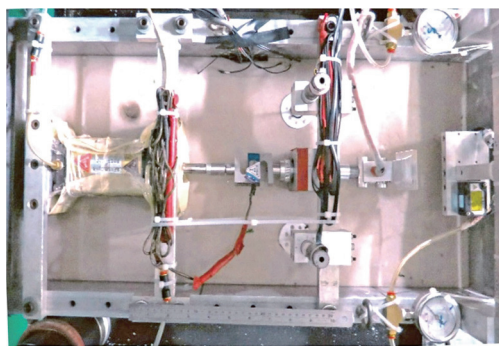


圖 5 液化時單樁式基礎模型側向承載性能離心模型試驗（中央大學洪汶宜教授提供）

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、張浚珣、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。