

# 地工技術

## 大地工程發展史

### 天然災害

董家鈞\* 陳天健\*\* 陳江淮\*\*\* 林銘郎\*\*\*\*

#### 一、前言

洪如江教授的工程地質大綱一書中提及土木工程的範疇：土木工程在於雕塑地球以適合人類的的生活，雕塑地球，必然與地質有關，處理地質相關的土木工程技術便是大地工程(洪，2017)。洪(1992a)曾對國內外四十年來大地工程技術進行回顧，也說明了土木水利工程學會中大地工程委員會、大專院校大地工程組、以及大地工程技師的沿革。

人類的幾千年文字歷史之中，記載了不少滄海桑田的變化；即便是人的一生短短幾十年，也會經歷一些天災地變，感受到天然災害的威脅，並產生想要進一步了解如何因地制宜、減少損失。由於地球環境本身是一個動態的系統，地震、颱風、火山、山崩、狂風、豪雨、洪水、乾旱等現象，都是自然現象，也是地球環境演育過程之一部份，只要人類不與危險交會或接觸，未必會發生災害。但有些人，或因無知或刻意，進入危險之地(例如山崩活躍地區、洪水或土石流必經之地、經常發生雪崩之地等等)，就可能發生災害。當這些自然現象影響到或危害到人類的生存時，就被稱作是天然災害(natural hazard)或地質災害(geological hazards; geo-hazards)。Bell(1999)列舉的地質災害包括火山、地震、山崩、問題土壤、河流作用與洪水、海水作用與侵蝕、風成作用與砂丘、土壤沖蝕與沙(石)漠化、廢棄物與其掩埋、地下水污染、地層下陷等。事實上這些災害有些時候不全然是天然的，有時也會是人為引致或使之擴大。

臺灣地處西北太平洋的颱風常經之地，氣候屬於熱帶或亞熱帶，加速了地表岩石的風化和侵蝕；又位在歐亞大陸與菲律賓海洋板塊的擠壓碰撞帶，造山運動快速激烈、河川坡度

大、隆起作用與削平作用迅速、斷層密布、地震頻繁等特殊的地質背景，加上地狹人稠，土地利用需求已超出一般的開發，為臺灣帶來更多的災害問題。由於地震與颱風災害是國內最常見的天然害。對於天然災害的調查與防治，大地工程專業人員投入比較多心力的災害研究與因應對象也是地震災害與坡地災害，因此本文以此兩方面之災害課題，回顧國內大地工程在這兩類天然災害的發展沿革。

#### 二、我國重大地震與坡地災害

鄭與葉(2004)彙整了臺灣百年來的大地震資料，共有39個大地震，一般所謂的大地震，是指地震規模大於或等於7.0的地震。在這些大地震中，規模介於7.0~7.43的有32次，介於7.5~7.9者有6次，臺灣地區過去一百年中所發生的最大地震，則是1920年6月5日發生在花蓮外海，規模達到8.0的地震。鄭等人(2012)亦彙整分析了臺灣地區由30個歷史地震造成的233處土壤液化，整理的資料包括震源參數、土壤液化地點、現象、震度、震源距或斷層距、地質與地形狀況、相關圖片與相片等，應用地理資訊系統建置資料庫並進行統計分析，以探討土壤液化的分布與特性(鄭等人，2012)。

陳(2013a、2013b、2014a、2014b)從氣象學專業，對我國近一甲子以來重大天然災害案例進行了回顧及探討，其重大天然災害(包括颱風、豪雨及地震等)之案例眾多(約30多個)，時間橫跨一甲子(1951~2010年)之久，提供了基本的雨量、地震資料。與大地工程息息相關的重大天然災害事件，依年代順序排列摘要如下：

1. 1959年八七水災，臺灣土石流造成重大災害的歷史，可以追溯至1959年在臺灣中南

\*中央大學應用地質研究所 \*\*屏東科技大學水土保持系 \*\*\*聯興工程顧問股份有限公司 \*\*\*\*臺灣大學土木工程系

部發生的八七水災，其在彰化八卦山、苗栗三義鄉、南投國姓一帶造成土石埋沒村莊田園，卵石泥砂堆積至數公尺高，原來3-5公尺的小山溝變為30-50公尺寬，盛(1960)以「岩石冰川」描述之，該次水災共造成1075人死亡、295人受傷、受災面積1244平方公里、房屋全倒22426戶、半倒18002戶、財產損失約當時幣值34億元(洪，1992b)。值得一提的是當年位於災區內臺中縣清水鎮的鹿寮南北溪水土保持示範區，於1954年已完成利用逕流控制、農地水土保持、植生覆蓋等水土保持工程，於此次災害中山溝溝頭無崩塌現象、下游無甚損害(盛，1960)。但是，臺灣土石流的研究起步卻很晚，一直到1982年8月11日西仕颱風造成五股泰山地區相當大的災情後(死亡17人)，土石流的研究方才受到重視(江與林，1991、尹等人，1993)。

2. 1977年薇拉颱風來襲，臺北北投貴子坑溪下游災情慘重，政府下令貴子坑禁採礦土。

3. 1982年西仕颱風，林口、五股、泰山地區造成嚴重之土石流災害，道路沿線及河流上游等地之陡坡崩塌，造成16人死亡，以及交通中斷(陳與楊，1983；吳與江，1985)。

4. 1990年代國科會開始中部員林地地區液化研究，而後歷經1999年集集地震，地震導致之地震災害研究與技術發展更加受到重視。

5. 1990年歐菲莉颱風，造成花蓮縣秀林鄉銅門村12、3鄰因為山洪暴漲的關係，導致土石流掩埋，造成原住民10人死亡，25人失蹤，房屋25戶全倒、11戶半倒，開始了國內大地工程界土石流研究之濫觴(陳等人，1993)。

6. 1996年賀伯颱風，強烈颱風賀伯(Herb)於1996年7月31日至8月1日挾著強風豪雨侵襲臺灣，對臺灣地區造成重大災害，在新中橫沿線(陳有蘭溪流域)就至少造成20處顯著之災害。其中有13處災害與土石流有關、5處災害與河流之攻擊岸有關及3處邊坡崩塌與臺地側之陡坡有關。土石流的研究成為地質、地形、水土保持及土木水利工程學者研究的熱門主題。賀伯颱風各地災情嚴重，各界反應、討論熱烈，惟獨地工界沒有太多聲音，因此，洪如江教授提議財團法人地工技術研究發展基金會組團，前往災情最嚴重的新中橫公路沿線勘查，並從地工觀點，對賀伯颱風災害提出一些

看法，勘災成果出版了地工技術特刊-地工技術57期(潘國樑主編，1996)。後續於1997年3月13、14日由國科會、各相關學術及行政單位舉辦第一屆臺灣土石流研討會，以加強臺灣本土之土石流研究及推廣土石流防災技術，也促成了國內土石流研究能量快速累積。

7. 1997年溫妮颱風造成林肯大郡順向坡災害，造成28人遭到活埋。賀伯、溫妮颱風引發山坡地災變，造成民眾無辜傷亡及家庭變故，實為國家社會憾事；這些災例亦警示居住環境變遷，加上大規模山坡地社區開發日炙，因此都會區邊緣山坡地開發安全管理維護及偏遠山區聚落土石流防治，將會是我國山坡地災害防制重點。在這樣的社會氣氛與強烈需求下，內政部營建署建築研究所、中華民國大地工程學會、財團法人臺灣營建研究院聯合主辦了山坡地建築開發工程研討會，開始了都會區坡地開發之災害研究與整合(林美聆主編，1997)，也促成了建築技術規則山坡地建築專章-建築設計施工篇之第十三章「山坡地建築專章」於1998年1月1日發佈實施。財團法人地工技術研究發展基金會為了追悼林肯大郡災變罹難者，也特別在災變週年出版林肯大郡災變專輯(地工技術第68期)，並舉行林肯大郡災變～回憶與省思研討會，希望國人記取慘痛教訓，讓悲劇不再重演(田永銘主編，1998)。

8. 1999年集集地震，1999年的集集地震，造成臺灣近百年來之最重大災害，災區幾乎遍佈全臺，死亡人數更高達2,455人以上、11,305人受傷、房屋全倒38,935戶、半倒45,320戶，造成之財產損失，高達新臺幣2,900億元以上。集集地震的後續勘災活動，是前所未有的，包括政府人員、專業技師、工程界、學術界，人次以千、萬計；在各災區進行災情調查，與協助政府進行緊急措施，包括判定危屋、公路及橋樑之緊急設計與施工，此項工作至少持續二年以上。由於集集地震災害的規模過大，不僅是學術界及工程界人士的結合努力，政府各部門對於防、救災與復建工作，更須整合。於是在2000年8月25日行政院設立最上位之跨部會之「行政院災害防救委員會」。在防災技術方面，透過國科會，從1996年即有整合防災資源之提議(國家災害防救科

技中心)：1996年9月的第五次全國科技會議中，作成「加強防災科技研究及相關之基礎研究，特別是跨領域任務導向之整合研究，以國家型計畫推動之」的建議。1996年12月，在行政院第十七次科技顧問會議中，亦列有「天然災害防治」議題，討論結果建議：「國科會及其他部會應共同研擬國家型防災科技計畫，加強將防災科技研究成果落實於防災應用體系上，並應設立天然災害防治資訊及技術轉移機構，有系統地整合推動防災相關工作」；國科會乃於2003年7月15日成立國家災害防救科技中心。在大地工程領域方面，中部災區發生了兩萬多處的坡地災害，多處土壤液化災害，及多項地工構造物的損毀。在地震後，大地工程界同仁積極投入參與各項勘災及復建工作，而耐震規範也有適時的修訂(陳堯中主編，2000，第77期、林美聆主編，第81期，2001、林美聆主編，第121期，2009)。

9. 2001年納莉颱風都會型坡地災害管理開始於臺北地區發酵。到了2010年，臺北市政府學習香港坡地管理制度，成立大地工程處，對於坡地管理，大地工程處針對50條土石流潛勢溪流、119處溪溝集水區、24處老舊聚落、130處山坡地集合住宅、65條產業道路、130條登山步道、3處風景區及2處露營場等對象，訂定山坡地災害防救業務計畫，依「平時防災」、「災前整備」、「災中緊急應變」及「災後復建」4階段，分別訂定工作執行事項，期於坡地災害發生後，能迅速執行災害搶修及災後復舊處理，減輕災害損失。

10. 2004年敏督利颱風帶來罕見豪雨及災害，行政院經濟建設委員會特委託中國土木水利工程學會，成立「七二水災災區調查與復建策略研擬」專案研究，邀請相關學者及專家緊急分赴各地災區調查，並蒐集相關資料。接著進行致災原因分析，從而釐清災害產生之機制與控因，透過對致災原因之瞭解，從專業面向政府提出復建策略、復建項目的執行優先次序相關建議，並針對特定復建課題，提出復建有關之緊急、短、中長期作法建議(七二水災專案小組，2004、鄭等人，2005)。

11. 2009年8月8日起莫拉克颱風，在中南部地區於短短三天內，即降下2500mm的雨

量，除了高雄、屏東、臺南、嘉義、南投等地發生邊坡、道路、橋梁之破壞及淹水災害外，亦在東臺灣造成臺東太麻里溪潰堤嚴重、知本金帥飯店倒塌，高屏地區雙園大橋斷裂等，這些災情被媒體反覆播放，令人感到慌目驚心。然而，真正攸關人命如小林村滅村山崩事件以及交通通訊中斷淪為孤島的多處山區聚落居民受困消息，是隨著救難直昇機進入災區後才逐漸傳出。在此一期間，有許多大地工程界的友人彼此連繫，期望能以個人的專業為國家社會與災民貢獻一份心力。本次風災，在颱風豪雨季節未結束之際，勘災工作的急迫性與重要程度，甚至超過921地震，因此地工界研商能夠發起自主勘災計畫，群策群力分工進行。此次自發性的活動很快地得到地工基金會陳正興董事長、大地工程學會廖洪鈞理事長以及許多地工界伙伴的熱烈回響與支持，依災區之流域分了五個流域加上一行政資源與資訊管理組共六個組，計有十五所學校、以及學者專家熱心參與。地工技術也特別於2009年、2013年刊出莫拉克颱風之地工災害、莫拉克風災災害調查與重建兩次專輯(林銘郎主編，2009、林銘郎主編，2013)。

### 三、地震防災研究與技術發展

地震災害評估與防、減災對策研擬，與大地工程專業息息相關。導致地震災害之因素包括地表/地下之震動/變形，以及因反覆剪力作用造成土壤液化與其相關災害(林，1983)。以下分三小節加以介紹。

#### 3.1 地表/地下之震動

不論是土壤特性對地震波波傳之影響或是土壤特性受地震之影響(如土壤液化)，均與土壤動態特性有關。建築技術規則於1974年開始即已有耐震設計的相關規定與震區劃分，而臺灣土壤動力學之研究，則是始於70年代末。當時，臺大與成大均已購置動力三軸設備，並有學生開始利用動三軸進行液化研究(如：胡，1981；張，1981；鐘，1981；林，1981等等)。80年代初期，連同臺大、成大，中央大學與交通大學也都陸續有研究生利用動態三軸量測土

壤動力特性(如:何, 1985; 張, 1985b; 林, 1985; 余, 1987; 吳, 1987; 潘, 1987; 林, 1987; 蘇, 1987等等), 臺灣土壤動力學研究也就此奠基。臺灣大學吳偉特教授於地工技術雜誌第2期(吳, 1983)發表之專文, 介紹了土壤動力試驗於大地工程上之應用, 以及當時我國土壤動力試驗設備, 由本文可略窺當時臺灣土壤動力學發展之情況。

吳偉特教授於1985年主編之地工技術雜誌第9期「土壤動力振動基礎與抗震設計」, 為大地工程抗震研究與技術發展相當重要的一本專刊, 吳教授於「土壤動力學與大地工程」一文(吳, 1985), 介紹了震動(包括地震與機械)引致之土壤行為與問題、土壤對震動之影響與波傳特性、基礎之振態特性、擋土牆動態土壓、邊坡穩定動態分析、因振動引起之土壤液化、沈陷以及土壤與基礎互制等等課題, 對於大地工程基礎之動態設計與分析提供了相當完整的介紹。

樁基礎動態分析考量, 美國聯邦公路局曾於1983年委託富國公司進行相關研究。陳斗生博士於地工技術雜誌專刊(陳, 1985)介紹了地震設計時樁基礎之勁度特性, 並分別介紹樁基礎側向勁度之決定以及其受土壤液化與剪力強度弱化之影響。十幾年後, 集集地震的發生也更讓學界開始注意深基礎之設計對於液化問題之考量(黃, 2000; 林等人, 2009; 陳與翁, 2010)。

翁作新教授(翁, 1985)則是介紹了擋土牆之動態土壓力估計三種方法: 1. 完全塑性(擬靜態)分析; 2. 彈性理論分析; 3. 彈塑性及非線性理論。並表示當時一般擋土設施考慮動態土壓力皆以Mononobe-Okabe完全塑性方法分析之。關於擋土牆之動態土壓力塑性分析, 交通大學方永壽教授則是進行了長期的研究, 研究成果亦為Das所著的教科書引用。

對於土石壩之耐震設計, 亦首見於本專刊, 張吉佐先生(張, 1985a)發表了「地震對土石壩之影響」, 指出壩體對地震之反應, 係隨築壩材料、壩型、壩基地質情況等因素之不同而異, 亦即土石壩設計與安全評估必須有大地工程專業人員參與。

關於土壤特性對地震波傳特性之影響, 重

要的研究領域之一為場址效應。1985年1月之地工技術專刊發表了兩篇與場址效應有關之文章: 「地盤受震反應分析」與「覆土地層之地震修飾作用與高樓震災」(林與趙, 1985; 熊與梁, 1985), 前者介紹了地盤反應分析方法之基本思維與公式推演以及常用的SHAKE程式, 後者則是利用實例說明建築物震災與土層特性之關聯性。

基於場址效應之考量, 重要都會區之「震度微區化」即顯得重要。1989年我國建築物耐震設計規範, 已考慮盆地效應, 將臺北盆地另外劃分為特別震區。1990年6月地工技術雜誌第30期由陳正興教授主編了「地震與地工」專刊, 該專刊首度介紹了震度微區化(李與吳, 1990), 並開啟了臺北盆地震度微區劃分之相關研究(施, 1992; 劉, 1999; 馬, 2000; 謝, 2001; 鄧, 2011), 相關研究也逐步精緻化了建築技術規則耐震設計中關於臺北盆地震度微分區圖, 高雄都會區之液化潛能微分區亦於2000年由陳與林(2000)發表了相關研究成果。

上述之專刊亦引入了「工程地震學」此一名詞, 工程地震學介於地震學與地震工程學之間, 範疇包括地震發生之可能地點與機率、地盤運動之情形、地盤變形之程度以及其對人為構造物所造成之影響等等(陳, 1990a), 其中, 土壤-結構互制問題即為重要議題之一(陳, 1990b)。為了解臺灣強震時地動特性(受震源、路徑與場址效應影響), 作為結構物耐震設計之參考, 中央研究院地球科學研究所與美國柏克萊加州大學在國家科學委員會和美國國家科學基金會之資助下, 於1980年在羅東設置了世界第一個數位式強震儀陣列稱為SMART1 (Strong Motion array in Taiwan, phase I; 臺灣較廣泛使用之名稱則為羅東地震儀陣列), 另外, 臺灣電力公司與美國電力研究所亦共同出資委託地球科學研究所在羅東陣列區設立一個密集的三維強震儀陣列, 亦稱為羅東大比例尺模型震測試驗LSST陣列, 羅東地震儀陣列與大型試驗場對於場址特性研究與結構反應、土壤反應及相互間之關係了解有相當大的貢獻(羅, 1990; 蕭與黃, 1990)。

1999年9月21日, 發生了芮氏規模7.3之集集地震。集集地震的發生, 對於耐震設計產生非常

重大的影響，亦促成了2005年版建築物耐震設計規範考慮活斷層效應，並改變地震震區劃分之相關規定。集集地震後，當時之國家科學委員會(目前已改制為科技部)國家地震工程研究中心，立即委由臺灣大學林美聆教授召集了大地工程專家學者進行勘災(包括坡地破壞、基礎破壞、土壤液化與地層下陷三個分項)，很快的在地震後兩個月內即出版了「921集集大地震大地工程震災調查報告」(林，1999)。根據調查結果發現，坡地災害數量與震度呈正相關，對於液化與基礎破壞機制而言，除了震度以外，地形、地質與工程設計因素也會有顯著之影響。勘災報告亦指出了結構-土壤互制效應之重要性，並建議應經過深入研究後納入規範，以降低未來之地震災損。地震過後五個月(2000年2月)，地工技術基金會則是迅速出版了「集集大震地工災害報導(第77期)」，主編臺灣科技大學陳堯中教授除了邀集了多位專家學者針對坡地、基礎破壞以及土壤液化進行撰稿以外，亦針對隧道與壩工災害進行了完整之報導。77期出刊後，地工技術基金會則又在2000年10月與2009年9月出版了「集集大震週年回顧(第81期)」與「921地震十週年地工相關議題之回顧(第121期)」，這兩期主編均為臺大土木林美聆教授。

集集地震之發生對於大地工程規劃設計考慮地表/地下變形與液化災害亦產生莫大影響，這三項災害之相關研究與實務工作將分別於3.2~3.3節介紹。

### 3.2 地表/地下之變形

集集地震後近達百公里之地表破裂，讓全世界見識到活動斷層造成之巨大地表變形(水平最大位移10公尺、垂直最大位移8公尺)以及對地表、地下結構物之影響，也讓臺灣開始認真思考活動斷層帶兩側之禁限建，並間接催生了活動斷層敏感區之劃設。

事實上，大地工程界很早就開始注意活動斷層。1984年地工技術第6期(「工程地質之應用」)由沈耀珍先生撰寫之「地震與活斷層」，即介紹了活斷層、將活斷層當做地震震源區以及決定構造物耐震設計用之假想地震，並詳細說明美國加州政府如何統合工程師地質師之不同專業，以獲得設計地震參數(沈，1984)。

1990年英國倫敦大學Vita-Finzi教授，受邀為地工技術撰寫了一篇重要論文「新地體構造運動與地震災害」(Vita-Finzi, 1990)，翻譯者為林銘郎教授(當時尚為臺大土木博士生，或許此一機緣埋下了其後續研究地震引致地表變形之種子?)，該篇論文從地震定年學角度，介紹了地殼變形與地震之重要關係，及其對地震災害風險評估扮演之關鍵角色。事實上這個觀念是從Allen (1975)於BSSA論文發表後才開始受到重視，臺灣地工界開始重視此一課題之時間並未落後世界地質、地震界太久。

中央大學李錫堤教授是全球最早開始開課教授地震地質學之學者之一，李教授於1993年地工技術第44期「活斷層工程評估的新發展」一文中(李，1993)，介紹了斷層分段、特性地震、最新活動年代、重複間隔及/或斷層滑移速率資料，在應用上，可以用這些資料來推算一條斷層未來某一時段內的發震機率，以為長期地震預測及防災之用。這些資料亦可用來推算一條斷層的地震規模機率密度函數，以供工程上進一步做地震危害分析之用。值得一提，地震地質學家Kerry Sieh於JGR發表有關於San Andreas Fault古地震著名之論文時間為1989年(Sieh et al., 1989)。

斷層泥之力學特性為了解地震動力學以及探討斷層活動導致地表變形與土壤結構互制研究之關鍵因素，林銘郎等人早在2000年已針對斷層泥之力學特性有整體性之回顧(林等人，2000)。地表變形與土壤結構互制研究則在最近十年來有長足發展，臺大土木系林銘郎教授團隊，一開始先以正斷層、逆斷層與走向滑移斷層活動造成之地表變形特徵為主軸，透過物理模型與數值模型試驗進行深入探討(林等人，2014)。後續再進一步分析了斷層活動導致之地表變形與結構互制行為，並針對集集地震埤豐橋落橋、豐原社區建築物傾斜以及中寮隧道橋臺變形等案例進行分析，結果顯示斷層活動造成地表變形與土壤結構互制行為可以一定程度的被預測(李，2019)。

### 3.3 土壤液化

1964年日本新瀉及美國阿拉斯加分別發生了規模7.5及8.3的強震，所造成之液化現象

象，引發液化研究之熱潮。臺灣土壤液化之研究於70年代末陸續開展，成大游啟亨教授、臺大吳偉特教授以及翁作新教授，分別指導研究生探討安平與福隆砂之液化現象以及擾動因素與黏土含量對土壤液化潛能之影響，這些研究成果於1981年以碩士論文形式發表。成大游啟亨與金永斌教授1983年共同指導之研究生亦提出了添加水泥熟料提高抗液化能力之相關研究成果(蕭，1983)。1986年中央大學李建中教授指導的碩士生，則是透過砂土導電度量測，了解液化過程中砂土之結構變化，並發現液化潛能和構造因素有關(何，1986)。

地工技術雜誌於1983年出版的創刊號與第4期，已出現與液化防治有關之振動揚實法(郭與歐，1983)與動力壓密法(黃與鍾，1983)相關介紹。1985年地工技術雜誌第9期「土壤動力振動基礎與抗震設計」，開始出現與液化研究相關論文，包括鄭與吳(1985)發表之「土壤液化之災害型態與現地研判」以及吳(1985)介紹之「土壤動力學與大地工程」，同年4月第10期，中原大學張達德(張，1985c)則是介紹了「砂土液化行為與防治方法之探討」。1992年地工技術38期第一次出版了與液化相關之專刊「液化與防治」，主編為當時任職於中華顧問工程司(現在之臺灣世曦)之周功台先生。海洋大學陳俶季教授則於本專刊提出了機率式液化評估方法(陳，1985)，另外，本專刊亦收錄了由中央大學張惠文教授等人介紹的液化防治方法(張等人，1985)以及由余明山先生等人介紹之永安液化天然氣接收站夯實砂樁改良之案例探討(余等人，1985)。

黃俊鴻教授與陳正興教授於1998發表了「土壤液化評估規範之回顧與前瞻」(黃與陳，1998)，文中回顧了各種簡易土壤液化評估法，並探討我國現行耐震設計規範中土壤液化評估方法之不合理處，以及針對我國本土化土壤液化評估規範提出建議。也在同一年，由大地工程學會接受內政部建研所之委託案(臺灣大學陳正興教授為計畫主持人)，將土壤液化潛能評估以專章納入了建築技術規則建築構造編之基礎構造設計規範(含解說)中，同時，該設計規範亦要求基礎調查、設計需考慮液化因素。

1999年集集地震，為影響臺灣液化研究與液化災害防治發展的一個重要事件。如前所述，集集地震發生後，於林美聆教授統籌之下，於1999年11月完成了「921集集大地震大地工程震災調查報告」(林，1999)。該報告報導了臺中、彰化、雲林及南投之液化調查成果以及與液化有關之結構物基礎損壞情況(召集人與副召集人分別為翁作新教授與陳正興教授)。地工技術也立即分別於2000年2月與10月(第77期與81期)出版了「集集大震地工災害報導」與「集集大震週年回顧」(陳堯中教授主編)，報導了員林、霧峰、南投、太平、海埔新生地、臺中港等地區之液化案例，科技部同時亦委託了亞新工程顧問公司進行員林鎮、霧峰鄉與南投市之鑽探調查與試驗，根據這些案例與調查成果，臺灣累積了大量本土資料，也成為臺灣液化潛勢統計分析之重要基礎。機率式液化評估法(莊(林譯)，2000)也得以開始使用本國資料進行(黃與陳，2000)。

集集地震後，解決因液化造成之結構物基礎損壞之修復與補強之急迫需求，立刻成為大地工程師之重要任務(臺灣省大地工程技師公會，2000)，同時，也累積了許多傾斜建築物扶正之經驗。大地工程技師公會受政府徵召，於土壤液化嚴重災區設置『土壤液化諮詢服務站』，提供土壤液化受災戶有關建物基礎修護補強之諮詢，是臺灣第一次針對土壤液化災區投入大量專業人力協助重建，也初步建立了地震後大規模土壤液化災害救治諮詢機制。液化諮詢服務站是由當時行政院員蔡清彥政務委員向行政院九二一震災災後重建推動委員會提出，1999年12月初接獲指示辦理。大地技師公會隨即於12月10日起進註災區設置『土壤液化諮詢服務站』，至2000年元月10日止為期一個月，共計派出大地技師30人，分別於員林鎮、社頭鄉、南投市、霧峰鄉等四個液化嚴重地區設置服務站，總諮詢服務數量共計210件。依土壤液化諮詢服務案件，以南投市最為嚴重，其次為員林鎮及霧峰鄉，當時提供之土壤液化諮詢服務申請書及土壤液化診斷意見書，分別如表一及表二。依據現場勘查液化災損區現象特點如下：

1. 液化災損區域大都集中臺地邊緣之坡腳

處與舊河泛區，局部地區可能有受壓水之影響。

2. 液化土層分佈深度略淺，大都發生在地表下10公尺以內，液化層之厚度亦不太厚。

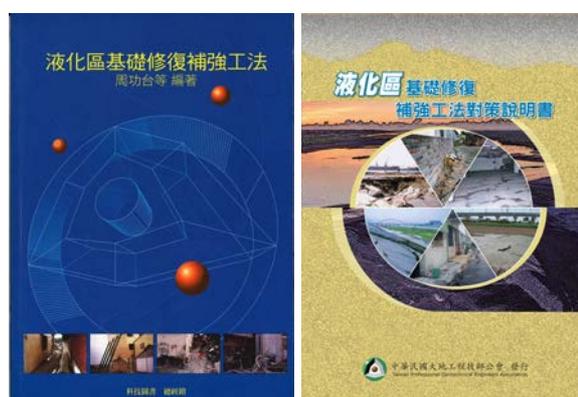
3. 曾有部份地區(大村鄉)液化湧出之地下水，其水為熱水。

當時損壞建築物樓層及基礎型式方面，根據內政部建築研究所(2001年)統計921地震資料顯示，液化區內4層以下建築之基礎型式多採獨立基腳，其中3-4層建物液化受損情形較1-2層建物嚴重；5層以上之建物採用筏式基礎的比例達70%以上，其液化受損情形明顯較相對較採獨立基腳型式者輕微。

其後大地技師公會於2000年11月將土壤液化諮詢服務站工作期間之勘查結果，匯編出版『液化區基礎修復補強工法』一書(臺灣省大地工程技師公會，2000)，其內容包括921地震之液化現象及勘查紀錄、液化損壞型態、基礎修復補強問題及液化區新建建築因應對策等，該書封面如圖一左所示；並於2016年2月6日美濃地震之後再版『液化區基礎修復補強工法對策說明書』(中華民國大地工程技師公會，2016)，如圖一右。

除了液化災損及工程補強外，內政部

1997年6月6日訂頒之『建築物耐震設計規範及解說』也因921地震於1999年12月29日第一次修正，於第七章其他耐震相關規定中增列第7.1節建築基地土壤液化潛能評估與土壤參數之折減，『可能產生液化之砂質土層，須評估其地震時之液化潛能，並據以折減其土壤參數值』。其內容包括7.1.1砂質土層液化潛能之判定、7.1.2土壤參數之折減及7.1.3建築基地有液化之處理，是國內建築規範首先針對土壤液化評估、參數折減及處置之明確規定。



『液化區基礎修復補強工法』、『液化區基礎修復補強工法對策說明書』(臺灣省大地工程技師公會，2000) (中華民國大地工程技師公會，2016)

圖一 大地工程技師公會液化相關之出版品

表一 土壤液化諮詢服務申請書

申請人姓名	聯絡電話				
受損建築之住址	身份証字號				
建築物型式	<input type="checkbox"/> 獨棟	<input type="checkbox"/> 連棟	基礎型式	<input type="checkbox"/> 筏式基礎	<input type="checkbox"/> 未知
	地上	地下		<input type="checkbox"/> 獨立基礎	<input type="checkbox"/> 其他
申請者使用狀況	<input type="checkbox"/> 1. 現在暫住親友家或租屋		<input type="checkbox"/> 3. 現仍居住在原址		
	<input type="checkbox"/> 2. 現住帳篷				
希望服務內容 (可複選)	<input type="checkbox"/> 1. 對安全性有疑慮		<input type="checkbox"/> 3. 希望提供修復時品管顧問諮詢		
	<input type="checkbox"/> 2. 想瞭解修復工法之適宜性		<input type="checkbox"/> 4. 其他(請說明)		
現場照片 (不夠用，可黏貼在次頁)					
申請者請儘量提供以下資料：1. 損傷照片，至少1~2張(越多越好，以利研判) 2. 建築物平面草圖 3. 若無法提供亦請說明					
鄉鎮公所初審	有無重複： <input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	編號			
聯絡電話	大地工程技師公會 TEL：(02)2704-8826 0932322543, 0932183085 鄉鎮公所專線 TEL： (請各鄉鎮公所填寫)				

說明：1. 填妥資料後請先送鄉鎮公所初審後，再安排時間勘查。  
2. 本顧問諮詢服務不包括房屋半倒、全倒及其他補償之認定。  
3. 屬集合住宅者請大樓管委會提出申請。  
4. 本服務係提供液化區基礎修復補強及建築物扶正之顧問諮詢服務，上部結構之修復補強不在服務範圍內。

表二 土壤液化診斷意見書

臺灣省大地工程技師公會液化區建物修復顧問諮詢		TEL：(02)2704-8826
		FAX：(02)2700-2249
技師		
日期		
損害情形描述		
修復工法建議或其他建議		
是否需複查追蹤	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

# 土壤工程技術

2001年12月內政部頒佈建築物基礎構造設計規範時更將土壤液化相關規定列為第十章土壤液化評估專章，惟當時為免造成一般民眾自宅申請建照時之困擾，3.1.3節一般要求第2點『四層以下非供公眾使用建築物之基地，如基地面積為六百平方公尺以內，且基礎開挖深度為五公尺以內及無地質災害潛勢者，得引用鄰地既有可靠之地下調查資料代替地下探勘調查。』此一因應時空背景之良意，卻造成四層以下非供公眾使用建築物之一般民眾自用住宅，可能未取得完整的地表下20公尺鑽探資料，而無法或沒有進行液化評估。對照921地震及0206美濃地震液化損壞類型多為4層樓建築，顯示2001年以後興建之四層以下非供公眾使用建築物，可能是地震災區容易發生液化災損之對象。

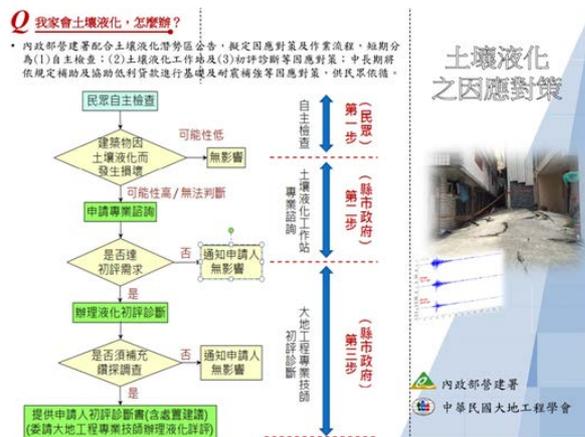
為因應近年土壤液化問題及配合2016年經濟部地調所公開液化潛勢圖資，內政部於0206美濃地震後函令解釋說明建築基礎基地位於土壤液化高潛勢區下，不得引用鄰地既有資料，仍應依規定辦理地基調查，回歸建築物基礎構造設計規範第十章土壤液化評估規定，2017年12月內政部建築研究所委託大地工程學會研擬建築物基礎構造設計規範之修正時一併列入修訂。

2016年2月6日高雄美濃地震(簡稱0206美濃地震)再次引起液化災害，繼921地震之後液化議題再次受到重視，也開啓了國內近程一系列液化防災及治理之相關工作。首先是時任行政院長張院長善政於春節後2月14日指示經濟部1個月內公開國內土壤液化潛勢區的初

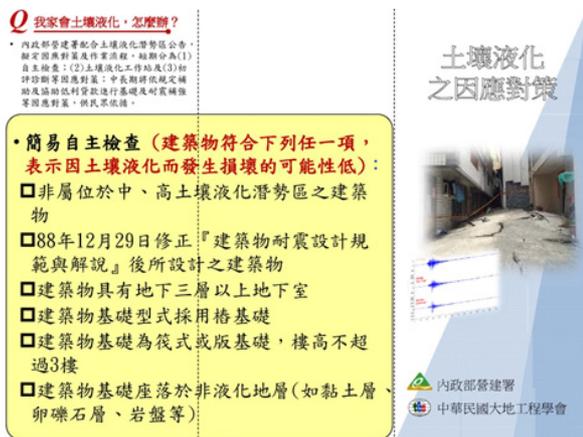
級圖資；2月15日內政部邀集國內主要技師公會召開『研商如何強化建築物施工管理』會議，會中由大地工程技師公會代表提出應因土壤液化潛勢區的初級圖資公開應有配套措施之提議，提供民眾諮詢及參考使用，以減少民眾無謂的恐慌。其後由大地工程學會及大地工程技師公會共同負責初級圖資公開之配套措施說帖，主要內容包括因應對策及流程如圖二所示；民眾自主檢查流程及內容如圖三。

2月17日地工基金會邀集臺大黃鐘博士後研究員、國震中心林克強博士研究員及中央大學黃俊鴻教授，分別針對0206美濃地震之地質、結構及土壤液化三個部份進行勘災感想即時論壇，把地震後第一時間災損調查資料作初步的記錄並即時公開討論，當時的課題內容如表三所示；其後在2018年花蓮地震也有類似的勘災論壇，形成了震災後大地工程界資訊分享平臺的固定模式。

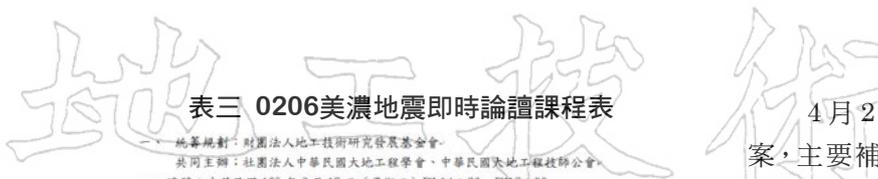
3月14日經濟部地質調查所公開初級土壤液化潛勢圖資，同時間由大地工程技師公會派員進註公開圖資之縣市液化諮詢工作站，包括臺北市、新北市、新竹縣市、臺南市、高雄市、屏東縣及宜蘭縣等，提供民眾電話諮詢及現場臨櫃解說，是繼921地震後大地技師第二次支援全國液化工作站之動員，當時設計的土壤液化潛勢區液化初評診斷書如表四；診斷內容如表五，對照前述的921液化工作站申請書及土壤液化診斷意見書可見有作了大部份的更新，3/14至4/15期間，液化工作站每日由二位大地技師協助解說，當時各縣市液化工作站諮詢案件數量統計如圖四所示。



圖二 液化潛勢初級圖資公開配套措施流程圖



圖三 液化潛勢初級圖資公開民眾自主檢查流程及內容



表三 0206美濃地震即時論譎課程表

籌畫地點：財團法人地工技術研究發展基金會  
 共同主辦：社團法人中華民國大地工程學會、中華民國地工工程師公會  
 二、時間：中華民國 105 年 2 月 17 日 (星期三) PM 14:30~PM 17:00  
 三、地點：大地工程師公會 R2 演講室(台北市南港區成功路一段 32 號頂樓)  
 四、課題及時程

時間	課題	引言人	主持人
14:10-14:30		報到	
14:30-14:35	主辦單位致辭	地工技術基金會執行長 董樹勇 博士	
14:35-14:55	地質勘測感想 台灣西南部地體架構及特性	國立臺灣大學地質科學系 黃鐘 博士後研究員	地工基金會 榮譽董事長 鍾敏東
14:55-15:15	結構勘測感想 建築及橋樑結構損壞類型	國家地震研究中心 林克強 博士研究員	
15:15-15:35	土壤液化物究感想 基礎損壞型式及液化対策	國立中央大學土木系 黃俊鴻 教授	
15:35-16:30	綜合論壇	全體引言人及與會人員	

表四 土壤液化潛勢區液化初評診斷書

編號	初評日期	
門牌號碼 (全部)		
申請人	<input type="checkbox"/> 單一建築所有權人或 <input type="checkbox"/> 管理委員會 (主任委員或負責人)	姓名 身分證字號 聯絡地址 聯絡電話 電話： 手機：
	<input type="checkbox"/> 每幢(棟)所有權人 1/2 以上委託代表人	電子信箱
	大地技師(1)	連絡電話
	大地技師(2)	連絡電話
建築物型式	地上 層 地下 層	基礎型式
現況照片(依實際內容增減頁次)		
1. 建築物全景	2. 立面照片(外牆目視是否異常傾斜)	
3. 基礎與室外地坪交接處照片	4. 室內地坪與柱位交接處照片	
訪談(依實際內容增減頁次)		
1. 921 地震時是否有發現基礎或地坪異常現象或損壞		
2. 曾因地震發生室外地坪下陷或其他損壞		
3. 其他基礎或地坪異常現象或損壞		

表五 診斷意見書

診斷內容(依實際內容增減頁次)	
1. 建築執照日期(或設計完成年度)：	
2. 建築物基礎及擋土措施平面圖：(擇照或照相張貼) 基礎型式： <input type="checkbox"/> 筏式基礎/深度：___m <input type="checkbox"/> 橋基礎/深度：___m <input type="checkbox"/> 聯合基礎/深度：___m <input type="checkbox"/> 採獨立基腳/深度 ___m <input type="checkbox"/> 其他___ 開挖擋土措施： <input type="checkbox"/> 連續壁/深度：___m <input type="checkbox"/> 排樁 間距：___m、樁徑：___m、深度：___m <input type="checkbox"/> 其他___	
3. 地質鑽探報告有無頸孔柱狀圖及地下水深度：(擇照或照相張貼) 鑽孔柱狀圖： <input type="checkbox"/> 有， 孔、深度：___公尺 <input type="checkbox"/> 無 地下水深度： <input type="checkbox"/> 有，地表下深度：___m <input type="checkbox"/> 無	
4. 地質鑽探報告土壤物理性質試驗結果(錘擊)：(擇照或照相張貼)	
5. 地質鑽探報告有無地層液化潛能分析：(擇照或照相張貼) <input type="checkbox"/> 有(分析結果：具液化土層 <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無) <input type="checkbox"/> 無(或資料不足)	
6. 初步檢視既有鑽探報告及建(竣)照基本資料結果：(簡述原因及依據) <input type="checkbox"/> 發生土壤液化而危害建築物安全風險低(直接填寫初評診斷結果) <input type="checkbox"/> 應進行下列分析判斷	
7. 判定須進行土壤液化之砂質土層性質： <input type="checkbox"/> 地下水位在地下 10m 以內，且飽和砂層在地下 20m 以內 <input type="checkbox"/> 細料含量 FC≤35%或 FC>35%且塑性指數 PI<15% <input type="checkbox"/> 平均粒徑 $D_{50} \leq 10\text{mm}$ 且 10%粒徑 $D_{10} \leq 1\text{mm}$	
8. 是否屬土壤液化之砂質土層：(簡述原因及依據) <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否(直接填寫初評診斷結果)	
9. 依據既有資料進行初步液化評估(統一採用新日本道路橋液化評估法，日本道路協會，1996)，包括分析成果摘錄。	
初評診斷結果	
<input type="checkbox"/> 發生土壤液化而危害建築物安全風險低。 <input type="checkbox"/> 既有資料不足，須進一步委託大地工程專業技師進行現場補充土壤鑽探調查與試驗等詳評(說明原因、鑽探孔數、位置及深度、概估鑽探費用)。 <input type="checkbox"/> 應進行必要之補強措施條件，初評技師說明原因，並提報地方縣市政府合併既有住宅結構安全性能詳評後，一併進行必要之基礎補強措施。	

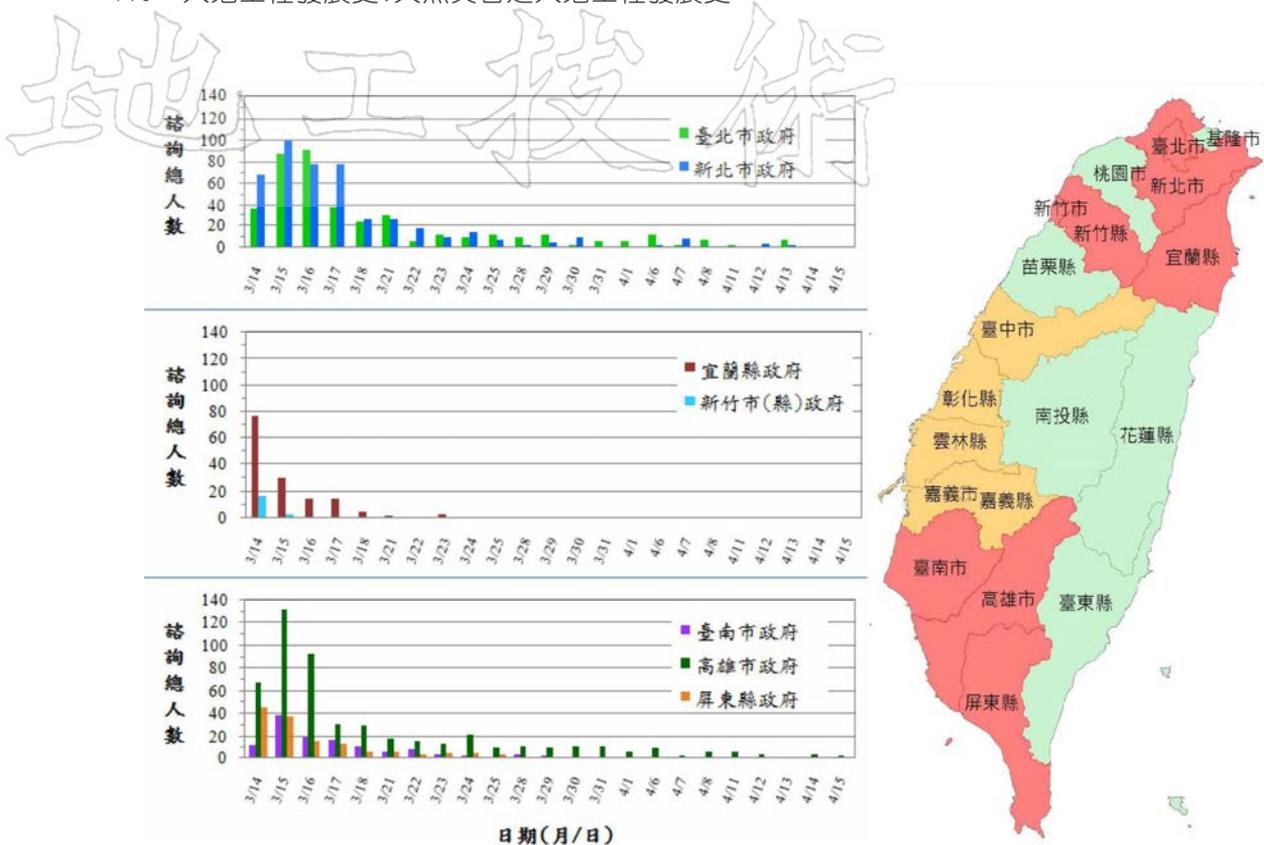
說明：1. 土壤液化潛勢區住宅輔助評估分為(1)住宅自主檢查；(2)土壤液化諮詢服務；(3)現場液化初評診斷等三個階段，本診斷書即為第(3)階段土壤液化初評診斷書。  
 2. 本診斷書完成後由大地工程師公會彙整後統一提送地方主管機關作為後續土壤液化潛勢區住宅輔助措施執行依據。

4月29日行政院核定安家固園計畫草案，主要補助地方進行中級精度土壤液化潛勢地圖及土壤地質改善示範計畫，前行政院張院長善政於5月5日期勉『...，也請內政部與經濟部全力協助地方政府執行中級精度的鑽探計畫，...，期盼該計畫執行數年後，能讓國內的鑽探產業達到國際水準。』，『...，請地方政府除了建置中級精度地質鑽探資料外，也落實督導工程建設，確保鑽探品質。』。2016年11月24日內政部核定已公開初級土壤液化潛勢圖資之臺北市、新北市、臺南市、高雄市、屏東縣及宜蘭縣等六個縣市安家固園計畫中有關土壤液化潛勢中級圖資之調查計畫，2017年開始第一年土壤液化中級圖資建置，以每平方公里配置4鑽探孔之原則進行全面地質鑽探與地下水量測，是國內第一次針對沖積地層進行土壤地層與性質的完整記錄；期間也針對鑽探品質進行要求及管控措施，包括全程攝影即時傳輸、能量檢測及全程採用自動落錘等。2018年第二年計畫除原有第一年計畫縣市外增加臺中市、彰化縣及雲林縣等三個縣市，此計畫預定自2019年起由內政部轉移至經濟部地質調查所持續推動進行。

## 四、坡地災害

我國坍方頻繁，山區之道路每在颱風或豪雨侵襲時中斷。高速公路及新中橫公路建造期間，皆曾發生坍方。1959年之八七水災，其實是八卦山西麓之土石流，淹沒鐵、公路及農田、房舍，使國家經濟遭受重大損傷。1976年至1981年之間的坡地社區開發熱潮，尤其是1980年及1981年北部地區各山坡地之搶建，開發者為求在單位面積內，得到最多建築坪數，於是使用重型堆土機，極盡移山填谷之能事，剝盡地表植物，堵塞天然水系，造成人為坡地災害，尤其是在1981年之五三、七一、九及九三等颱風豪雨侵襲時達到高峰。1982年之八一水災，林口臺地土石流，在泰山、五股等地造成災害，重演1959年八卦山西麓八七水災之故事(洪，1984)。

在大型防災研究計畫推動之前，國內坡地災害的研究成果，散見於各種不同領域的期刊



圖四 液化潛勢初級圖資公開各縣市民眾諮詢人數統計圖

中。盛(1960)由水土保持觀點論臺灣八七水災，可能是對於土石流研究最早的文獻之一；張與林(1966)對半屏山崩山現象之研究，可能是對於山崩研究最早的文獻之一。林(1967)地下排水與路基邊坡的穩定，開始注意地下水的排除對公路邊坡穩定的重要性。耿文溥1970年九月臺灣苗栗縣珊瑚湖之岩層崩移一文，可能是工程地質關心坡地災害最早的文獻之一(耿，1970)。洪如江與翁作新(Hung and Ueng, 1975)對於豪雨引致山崩的四種類型(崩積層與崖錐堆積、紅土臺地、泥頁岩、順向坡)進行研究，可能是最早對山崩類型與機制進行討論的文章。莫若楫、洪如江、忻賢中、廖大牛、謝敬義等人(Moh et al., 1997)介紹了七個國內比較重大的坡地災害案例。李(1979、1984)臺灣的崩坍地一文，整理了當年農復會(現農委會前身)對臺灣各集水區崩坍地調查的成果，同時亦討論了臺灣的自然環境。中國工程師學會與中國土木水利工程學(1979)舉辦了邊坡穩定與塌方研討會，可以說是國內關於坡地災害問題最早舉辦的研討會，其中國內三篇文章說明了當年國內最具代表性的研究成果與地工技術，分別是林等人(1979)的臺灣公路坍方問

題、胡(1979)的砂岩與頁岩的邊坡穩定問題、洪(1979)的地工技術在臺灣山崩中之應用。

張石角(1988-1992)對臺灣過去二十年來重大崩山災害進行調查，五年內共調查了251個案例，強調案例研究與山崩種類區分在坡地災害研究的重要性，其結果如表六所示，其中有76個土石流案例，而東部地區(宜蘭、花蓮、臺東)占了42個(55%)，又東部地區的崩山災害共53個，土石流占了42個(79%)，因此東部地區可以說是臺灣土石流災害最頻繁的地區，土石流災害也是該地區最主要的崩山災害(林與謝，1997)。

地工技術自1983年創刊，除了前述在各重大颱風事件後，由大地工程專業同仁進行現勘與調查研究，並出版專刊。陳等人(2004)對國內近年來於坡地與土石流災害防治的努力，從開發流程、法規限制、災害潛勢分析與調查技術到坡地治理與監測預警技術予以彙整回顧，對於近年興起的坡地維護管理與防災系統的研發成果也加以說明介紹。地工基金會也請林美聆教授主編，將歷年來在地工技術發表的關於坡地災害的文章，擇其重要且具代表性者集結成專書-地工叢書10-邊坡工程，依內

容與課題分類為：概論、調查、災害及破壞機制、穩定分析、模型、特殊地質、工法、案例及監測等九章，提供大地工程從業人員進行邊坡工程之參據（林美聆主編，2015）。

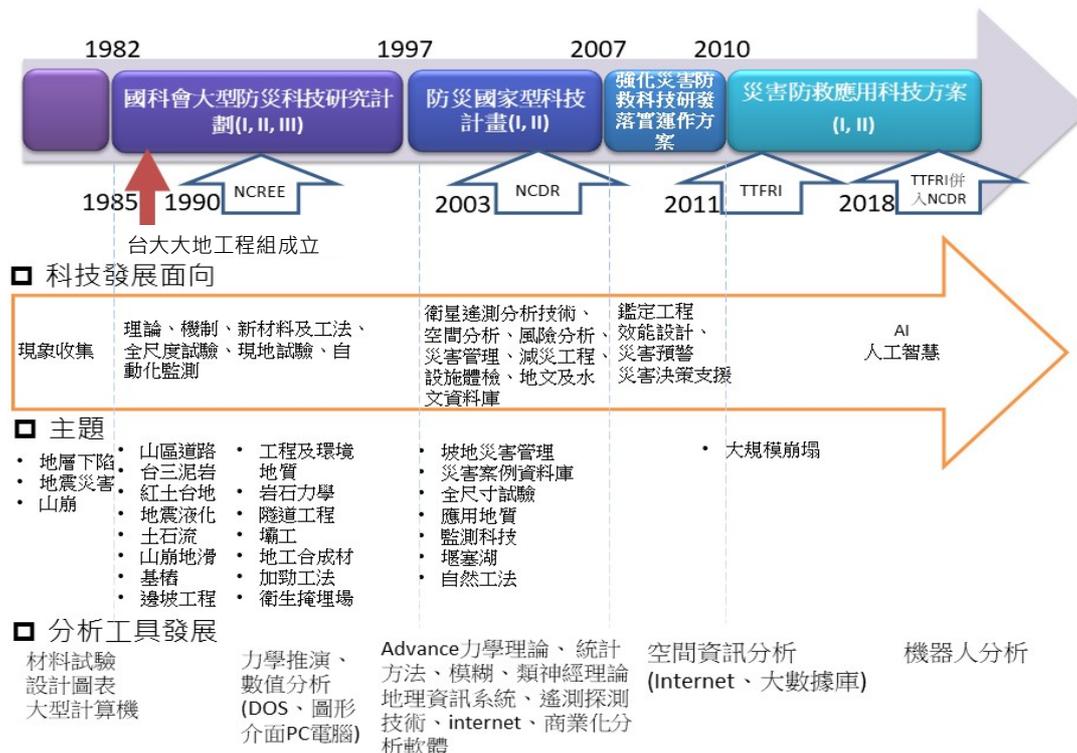
## 五、防災科技計畫與大地工程

談到大地工程於我國防災之貢獻，不能不提及始於1982年之國科會(目前之科技部)國家大型防災科技研究計畫之推動。國內大地工程於天然災害調查與防治研究與實務工作發展，與國科會推動「大型防災研究計畫」關係密切。當年推出大型防災計畫時，帶頭的是前行政院長劉兆玄先生，那時他是國科會企劃處處長，分洪災、氣象、地震工程、地震學、地變(地震、

火山爆發與坍方)、防浪(劉與胡，1983)。主要負責都是學校的幾位教授，從1982年至今，政府推動的防災研發計畫及方案，包括國科會大型防災研究計畫(1982-1997)、防災國家型科技計畫(1997-2006)、強化災害防救科技研發落實運作方案(簡稱強化方案, 2007-2010)及災害防救應用科技方案(簡稱應科方案, 2011-2018)。1997年成立之防災國家型計畫辦公室，該計畫設坡地組，大地工程領域參與山崩土石流相關研究開始增加。2003年成立國家災害防救科技中心(2013年改制行政法人)、2006年國家型計畫辦公室退場，2007年開始，科技部推動「強化災害防救科技研發與落實運作方案」以及「災害防救應用科技方案」，以強化應用研究與落實災害管理整合平臺為方向。圖五顯示

表六 臺灣過去二十年重大崩山災害崩坍類型統計表(張石角, 1988-1992)

研究範圍	年代	山崩 (含落石)	土石流	地滑 (含岩屑滑動)	潛移	洪水 (逕流集中、沖蝕)	總計
基隆、臺北縣、臺北市	1968-1986	5	18	52	2	10	87
桃園、新竹、苗栗、臺中	1969-1989	10	3	35	0	0	48
彰化、雲林、南投、臺南、高雄縣、高雄市	1969-1989	19	9	31	0	0	59
屏東、臺東	1970-1990	1	11 (4個在屏東)	3	3	0	18 (4個在屏東)
花蓮、宜蘭	1967-1992	1	35	2	0	1	39



圖五 我國防災計畫與科技發展演進圖(資料來源：GRB政府研究資訊系統(2020)及國家災害防救科技研究中心(2020)網站資料)

與科技部相關防災型科技計畫之演進歷史(與防災科技發展相關單位簡稱, NCREE: 國家地震工程研究中心; TTFRI: 臺灣颱風洪水研究中心; NCDR國家災害防救科技中心), 2018應科方案退場之後, 2019科技部開始執行「行政院災害防救科技創新服務方案」, 目標為打造智慧耐災生活圈。國科會「大型防災研究計畫」之啟動與沿革可以參考顏等人(2014)、坡地災害的負責教授是洪如江教授, 對於當年臺灣地區邊坡穩定的問題與坡地科技研究現況研究, 可以參考洪(1984)。

圖五亦顯示防災型科技計畫推動過程中, 與大地工程科技相關之項目及技術發展。相關資料主要綜整及歸類自1982年至2019年各相關研究計畫, 資料源自國家災害防救科技研究中心及GRB政府研究資訊系統。就大地工程研究主題面向上, 最早期多以我國民生經濟發展所衍生之地層下陷、地震與坡地災害為主, 以符政府及民生需求。於國科會大型防災科技研究計畫階段, 逐步開始關注山區道路及邊坡治理工程、臺三泥岩、紅土臺地、地震液化、土石流、山崩地滑、基樁等主題。同時, 因應我國重大建設及環境需求, 工程及環境地質、岩石力學、隧道工程、壩工、地工合成材、加勁工法、衛生掩埋場等防災及工程科技亦成為重點。1999年集集地震, 造成複雜且區域性之地工災害, 與防災相關之坡地災害管理、災害資料庫、堰塞湖、自然生態工法、應用地質、監測科技及全尺寸震動試驗等研究, 自此加速展開。2009年八八風災造成大規模坡地複合災害重創南部地區, 因而開啟了大規模崩塌及複合災害防治相關之地工技術研究, 目前仍處於發展階段。

就大地工程防災技術發展面向, 最早期著重於災害現象之調查, 隨著國內大地工程領域專家學者陸續回國任教, 力學理論與試驗、新材料及工法、全尺度試驗、現地試驗及監測等科技蓬勃發展。90年代計因算機及個人電腦的普及, 促使我國地工技術與國際並駕齊驅, 而綻放全盛榮景。1999年集集地震造成廣大區域性的災損, 得利於資訊與通訊科技發展, 衛星遙測分析技術、地文及水文資料庫、地工災害空間分析、風險分析、災害管理、減災工程、設施體

檢等, 迅速應用於政府部門坡地及地震災害管理作業, 有效減低我國天然災害死傷人數。21世紀初, 國內經濟發展趨緩及國際趨勢因素, 工程由新建工程逐漸趨向設施管理及維護, 鑑識工程及性能設計應蘊而起; 隨著新一代高速通訊技術及基礎網路建置完成後, 天然災害之及時監測預警及災害決策支援系統, 成為重要防災工具。近年, AI人工智慧科技興起, 有機會成為大地工程下世代新技術發展之濫觴。

大地工程分析工具, 亦隨著計算機、資訊及通訊科技的劃時代進展, 出現跳躍性發展。最早期地工分析多仰賴材料或模型試驗、設計圖表、大型計算機等工具, 隨著個人電腦(PC)普及與運算速度提升, 於DOS及圖形介面PC電腦產出後, 大地工程數值分析, 成為地工防災研究重要的工具。輔以非線性力學理論、統計方法、模糊及類神經理論、地理資訊系統、遙測探測技術、Internet等, 促使大地工程數值分析得以多面向及跨領域進行發展。

綜觀我國大地工程防災科技之演進, 早期於知識及技術提升的氛圍下, 曾發展出人定勝天的強大信心, 然經歷大地震及豪雨災害的衝擊後, 儘管科技仍不斷進步, 但順應自然與著重自然生態共舞的理念, 逐漸成為地工的核心價值。

## 六、地工災害重要雙邊會議～ 臺日ATC3會議歷史

大地工程防災史另外一項值得一提的重要發展, 為自1999年開始以ATC3平臺發展起來之臺日雙邊學術交流研討會。Asian Technical Committee No. 3 on Geotechnology for Natural Hazards (ATC3)為國際土壤力學學會(ISSMGE)亞洲分會之技術委員會, ATC3成立於1993年, 由其創始人日本東京大學名譽教授 K. Ishihara領導, 致力於處理亞洲地區由地震引發和豪雨引起的自然災害的大地工程方面研究。臺灣與日本同處環太平洋地震帶, 均為地震與颱風豪雨發生頻仍的國家, 大地工程災害與問題亦大多雷同, 因此具備共同合作研究之最佳環境與能量。

臺灣大地工程界於921集集大地震後即積極展開與日方之共同研究合作。2004年臺灣大地工

程學會 (Taiwanese Geotechnical Society) 與日本大地工程學會 (Japanese Geotechnical Society) 雙方共同發起「國際地工天然災害研討會—臺日大地震及豪雨引致大地工程災害研討會」(International Workshop on Geotechnical Natural Hazards- Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall)，針對大規模地震與豪雨引發之地工災害進行災害分析、防治技術、與預警等主題共同研究。研討會每二年召開一次，由臺日雙方輪流舉辦。自2004年首次於臺北舉辦，截至2018年業已舉辦8次交流研討會，獲致良好天然災

害防治經驗交流成果。

表七分列出臺日交流研討會會議地點、主辦及議題。第一屆臺日研討會，臺灣尚於集集地震重建期，研討主題訂為 landslide 與 Liquefaction，討論山區崩塌與土石流之防治，以及液化對策。第二屆研討會前，因兩國均遭受多次颱風豪雨及地震襲擊，災害損失嚴重，因此第二屆研討主題刻意加入颱風豪雨及地震引致邊坡不穩定以及地工性能設計相關主題。2009年臺灣遭受莫拉克颱風襲擊，重創南部地區，災害損失極為慘重；2011年日本亦遭受東北地方太平洋近海地震東北地震，引發海嘯重創東北地區。大地工程設施之設計標準及

表七 歷屆臺日大規模地震與豪雨引致地工災害共同研究會之會議地點、主辦及議題

屆次	年度/會議地點/主辦人及會議議題
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2004，臺北/臺灣，陳正興，國立臺灣大學、李維峰博士，Prof. K. Ishihara, Chuo University.</li> <li>1. Landslide</li> <li>2. Liquefaction</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2006，湯沢市/日本，Prof. T. Kokusho, Chuo University.</li> <li>1. Earthquake induced slope instability</li> <li>2. Rainfall induced slope instability</li> <li>3. Liquefaction associated phenomena</li> <li>4. Soil liquefaction and remediation</li> <li>5. Performance based design and other related topics</li> <li>6. Damages during recent earthquakes</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2008，基隆/臺灣，林三賢教授，國立海洋大學</li> <li>1. Dynamic Soil Properties and Soil Liquefaction</li> <li>2. Advanced Instrumentation and Geo-Hazard Analysis。</li> <li>3. Rainfall Induced Landslides and Their Mitigation。</li> <li>4. Seismic Performance of Geotechnical Structures and Geotechnical Earthquake Engineering</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2010仙臺/日本，Dr. N. Yoshida, Tohoku Gakuin University, and Dr. M. Kazama, Tohoku University,</li> <li>1. Case studies of structure damages and landslides induced by rainfall and earthquakes.</li> <li>2. Recent investigation results on liquefaction soil behaviors and damage caused by the earthquake including damages by soil liquefaction, active fault movements, and landslides.</li> <li>3. State of the art on evaluation and mitigation of liquefaction-related damage based on recent experiences earthquakes.</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2012，臺南/臺灣，陳景文教授，國立成功大學</li> <li>1. State of the art on evaluation and mitigation of earthquake and heavy rainfall induced damage.</li> <li>2. Development of geotechnical design codes and specifications in consideration of extreme natural hazard including large earthquakes and heavy rainfall.</li> <li>3. Advance in geotechnical laboratory and modeling works related to natural hazards.</li> <li>4. Reconnaissance works of recent geotechnical natural hazards.</li> <li>5. Case studies of performance analysis of geotechnical structures during natural hazards</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2014，北九州市/日本，Prof. Hemanta Hazarika, Kyushu University</li> <li>1. Earthquake, tsunami and rainfall induced geohazards – Evaluation and Mitigation Strategy</li> <li>2. Liquefaction resistance of various types of soils</li> <li>3. Scouring and erosion due to tsunami or flooding</li> <li>4. Rainfall-induced slope failures</li> <li>5. Post-earthquake rainfall-induced slope failures and debris flow</li> <li>6. Advances in physical and numerical modeling related to natural hazards</li> <li>7. Reconstruction works of recent geotechnical natural hazards</li> <li>8. Resilient issues in Geotechnical Engineering</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2016，屏東/臺灣，陳天健，國立屏東科技大學</li> <li>1. State of the art on evaluation and mitigation of earthquake and heavy rainfall induced damage.</li> <li>2. Risk management and advance monitoring technology on large landslide and debris flow.</li> <li>3. Development of design codes and specifications on geotechnical seismic and extreme weather design.</li> <li>4. Advance in numerical modeling and experimental work in geotechnical structures.</li> <li>5. Case studies of performance analysis of geotechnical structures during natural hazards</li> </ul>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2018，京都/日本，Prof. R. Uzuoka, DPRI, Kyoto University</li> <li>1. State of the art on evaluation and mitigation of earthquake and heavy rainfall induced damage.</li> <li>2. Risk management and advance monitoring technology on large landslide and debris flow.</li> <li>3. Development of design codes and specifications on geotechnical seismic and extreme weather design.</li> <li>4. Advance in numerical modeling and experimental work in geotechnical structures.</li> <li>5. Case studies of performance analysis of geotechnical structures during natural hazards.</li> </ul>

超大天然災害之大地工程對策，乃成第五及第六屆之討論重點。因應全球氣候變遷議題，第七及第八屆主題納入因劇烈天氣災害及災害風險管理等議題，思考氣候變遷及大地震頻仍發生狀況下，大地工程及設施之設計及維護對策。

圖六則是列出臺日交流研討會歷程與雙邊遭遇之颱風、地震災害性事件。自1999至2018之二十多年間，臺灣出現20餘次之豪雨災害，而日本則遭受了50餘次淹水及雪災。此間，包括2009年的莫拉克颱風造成臺灣超過700名民眾死亡與2000億以上之損失。2018年七月第7號巴比倫颱風登陸日本四國地區後，又夾帶了尾隨其後的一股梅雨鋒面，以超過1,000毫米之累積雨量，讓日本廣島、岡山地區遭受1989年以來最嚴重的災害事件，造成232人的失蹤及

死亡。在地震方面，二十年間臺灣發生4次災害性地震，而日本則有10次之地震或火山災害。其中，臺灣921集集地震造成2,415人死亡，29人失蹤，11,305人受傷，51,711間房屋全倒，53,768間房屋半倒，估計全國經濟損失達新臺幣3,647億元。日本於2011年發生日本東北地震與隨之而來之海嘯，造成169兆日圓之損失與超過1萬千名民眾死亡或失蹤，災害損失極為慘重。臺日雙方經歷這麼多地震與颱風豪雨災害，對於地震災害及豪雨致生坡地災害，其成因研究、災害型式、導致的影響及處理方式等，學術界與工程界均透過此一雙邊會議進行交流與研討，以提升雙方天然災害防治學術與實務專業知識、開創技術合作契機並促進雙方國際情誼。



圖六 臺日大規模地震與豪雨引致地工災害研討會歷程與雙邊遭遇之災害性事件

# 地工技術

## 參考文獻

- 七二水災專案小組、中國土木水利工程學會及各大學 (2004), 「敏督利致災原因與復建策略探討」, 中國土木水利工程學會。
- 中國工程師學會、中國土木水利工程學 (1979), 「邊坡穩定與塌方研討會論文集」。
- 中華民國大地工程技師公會 (2016), 「液化區基礎修復補強工法對策說明書」, 中華民國大地工程技師公會。
- 尹承遠、翁勳政、吳仁明、歐陽湘 (1993), 「臺灣土石流之特性」, 工程地質技術應用研討會(V)論文集, 工研院能資所, 新竹, 第70-90頁。
- 田永銘主編 (1998), 「林肯大郡災變專輯」, *地工技術*, 第68期。
- 江永哲、林啟源 (1991), 「土石流之發生雨量特性分析」, *中華水土保持學報*, 第22卷第2期, 第21-37頁。
- 何憲禎 (1985), 「以動力三軸試驗決定粘性土壤之動態性質」, 碩士論文, 中央大學土木工程研究所。
- 何樹根 (1986), 「以飽和砂土之導電度對飽和砂土之結構及液化之初步探討」, 碩士論文, 中央大學土木工程研究所。
- 余明山、鍾毓東、陳福成、王傳奇 (1992), 「新生地震動夯實砂樁改良案例探討」, *地工技術*, 第38期, 第30-46頁。
- 余榮山 (1987), 「砂質土壤剪力模數之研究」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 吳正雄、江永哲 (1985), 「林口臺地林地之地形因素與土石流發生之關係研究」, *中華水土保持學報*, 第16卷第2期, 第48-58頁。
- 吳岱堯 (1987), 「應力歷史對飽和砂土動力強度影響之研究」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 吳偉特 (1983), 「土壤動力特性於大地工程之應用」, *地工技術*, 第2期, 第82-96頁。
- 吳偉特 (1985), 「土壤動力學與大地工程」, *地工技術*, 第9期, 第5-19頁。
- 李三畏 (1979), 「臺灣的崩坍地」, *中華農學會報*, 第105期, 43-56頁。
- 李三畏 (1984), 「臺灣的崩坍地」, *地工技術*, 第7期, 第43-49頁。
- 李咸亨、吳志明 (1990), 「震度微區劃分法與地震防災」, *地工技術*, 第30期, 第60-71頁。
- 李健宏 (2019), 「跨活動斷層橋樑基礎互制行為研究」, 臺灣大學土木工程學系, 博士論文。
- 李錫堤 (1993), 「活斷層工程評估的新發展」, *地工技術*, 第44期, 第5-18頁。
- 沈耀珍 (1984), 「地震與活斷層」, *地工技術*, 第6期, 第47-57頁。
- 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。
- 林中平 (1985), 「黏土含量對福隆砂動態剪力模數與阻尼比之影響」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程研究所。
- 林少思 (1987), 「臺北盆地粉質土壤之動態性質」, 碩士論文, 中央大學土木工程研究所。
- 林永德 (1967), 「地下排水與路基邊坡的穩定」, 臺灣公路工程, XV (V), 第1-15頁。
- 林永德、陳炳燦、陳淮松 (1979), 「臺灣公路坍方問題」, 邊坡穩定與塌方研討會論文集, 第83-116頁。
- 林美聆 (1999), 「九二一集集大地震全面防災報告-大地工程震災調查」, 國家地震工程研究中心。
- 林美聆(主編) (1997) 「山坡地建築開發工程研討會論文集」, 內政部營建署建築研究所、中華民國大地工程學會、財團法人臺灣營建研究院聯合主辦。
- 林美聆(主編) (2015) 「邊坡工程」, 財團法人地工技術研究發展基金會, 臺北。
- 林晉祥 (1983), 「耐震工程四部曲」, *地工技術*, 第3期, 第75-80頁。
- 林晉祥、趙炳焜 (1985), 「地盤受震反應分析」, *地工技術*, 第9期, 第67-80頁。
- 林銘郎、李崇正、黃文正、黃文昭 (2014), 「重要活動斷層構造特性調查研究活動斷層近地表變形特性研究(總報告)」, 經濟部中央地質調查所。
- 林銘郎、鄭富書、王鴻基、王景平、鍾春富、張芳銘、蔡維哲、許永欣、黃俊傑(2004), 臺北斷層引致之上覆土層變形及其對潛盾隧道之影響, 慶齡工業研究中心研究報告, 亞新工程顧問公司委託。
- 林銘郎、鄭富書、洪如江、翁作新 (2000), 「斷層泥力學性質研究」, 交通部臺灣區國道新建工程局, 研究報告編號124。
- 林銘郎、鄭富書、翁作新、洪如江 (2000), 「臺灣斷層泥之特性及斷層泥力學評估的新發展」, *地工技術*, 第79期, 第35-44頁。
- 林銘郎、謝正倫 (1997), 「臺灣土石流災害特性與研究回顧」, 海峽兩岸地形與環境教育研討會, 成功大學, 臺南, 第213-217頁。
- 林銘郎主編 (2009), 「莫拉克颱風之地工災害」, *地工技術*, 第122期。
- 林銘郎主編 (2013), 「莫拉克風災災害調查與重建」, *地工技術*, 第137期。
- 林寬柔 (1981), 「安平海砂之初期液化現象研究」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 政府研究資訊系統(GRB) (2020), <https://www.grb.gov.tw/>。(2020年2月21日)
- 施陽東 (1992), 「臺北盆地內以地表反應為主之震度微分區」, 碩士論文, 中央大學土木工程研究所。
- 洪如江 (1979), 「地工技術在臺灣山崩中之應用」, 邊坡穩定與塌方研討會論文集, 第147-168頁。
- 洪如江 (1984), 「我國臺灣地區邊坡穩定的問題與坡地科技研究現況」, *地工技術*, 第7期, 第4-6頁。
- 洪如江 (1992a), 「四十年來大地工程技術之回顧」, *土木水利*, 第19卷, 第1期, 第3-9頁。
- 洪如江 (1992b), 「坡地災害防治(一) 重點科技叢書第六輯」, 行政院國科會編印, 32頁。
- 洪如江 (1999), 「坡地災害防治」, 防災國家型科技計畫辦公室。
- 洪如江 (2004), 「坡地災害防治光碟」, 財團法人地工技術研究發展基金會出版隨初等工程地質學大綱贈送。
- 洪如江 (2017), 「初等工程地質學大綱」, 財團法人地工技術研究發展基金會, 臺北。
- 胡邵敏 (1979), 「砂岩與頁岩的邊坡穩定問題」, 邊坡穩定與塌方研討會論文集, 第117-145頁。
- 胡德欽 (1981), 「擾動因素對現場飽和砂性土壤液化潛能之影響」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程研究所。
- 翁作新 (1985), 「動態土壓之設計與應用」, *地工技術*, 第9期, 第55-60頁。
- 耿文溥 (1970), 「民國五十九年九月臺灣苗栗縣珊瑚湖之岩層崩移」, *臺灣省地質調查所彙刊*, 第21期, 第53-54頁。
- 馬國倫 (2000), 「臺北盆地震度微區圖指標研究」, 碩士論文, 臺灣科技大學營建工程系。
- 國家災害防救科技研究中心 (2020), [https://www.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/DataService/BookDatabase\(2020年2月21日\)](https://www.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/DataService/BookDatabase(2020年2月21日))
- 張石角、林武男 (1966), 「半屏山崩山現象之研究」, *礦業技術*, 第4卷, 第8期, 第2-6頁。

- 張吉佐 (1985a), 「地震對土石壩之影響」, *土工技術*, 第9期, 第104-115頁。
- 張清秀 (1981), 「黏土含量對福隆砂液化潛能之影響」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程研究所。
- 張惠文、廖新興、鄭清江 (1992), 「砂質地盤液化之防治方法探討」, *土工技術*, 第38期, 第17-29頁。
- 張陸雄 (1985b), 「反覆應力對飽和砂質土壤體積應變之研究」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 張達德 (1985c), 「砂土液化行為與防治方法之探討」, *土工技術*, 第10期, 第86-94頁。
- 盛志澄 (1960), 「由水土保持觀點論臺灣八七水災」, *臺灣銀行季刊*, 第十一卷, 第二期, 第86頁-111頁。
- 莊長賢(林三賢譯) (2000), 「或然率法評估液化潛能之評價」, *土工技術*, 第82期, 第57-64頁。
- 郭俊良、歐晉德 (1983), 「振動揚實法」, *土工技術*, 第1期, 第43-48頁。
- 陳斗生 (1985), 「公路橋墩及樁基礎之地震設計初步探討」, *土工技術*, 第9期, 第47-54頁。
- 陳斗生, 1985, 「公路橋墩及樁基礎之地震設計初步探討」, *土工技術*, 第9期, 第47-54頁。
- 陳正改 (2013a), 「我國近一甲子以來重大天然災害案例之回顧及探討(1951~2010年)」, 第一篇: 危機就是轉機!(1951~1980年)», *中華防災學刊*, 第五卷, 第1期, 第5-19頁。
- 陳正改 (2013b), 「我國近一甲子以來重大天然災害案例之回顧及探討(1951~2010年)」, 第二篇: 推動氣象防災! 祈求風調雨順! 國泰民安!(1981~1990年)», *中華防災學刊*, 第五卷, 第2期, 第137-162頁。
- 陳正改 (2014a), 「我國近一甲子以來重大天然災害案例之回顧及探討(1951~2010年)」, 第三篇: 百年地動! 山河變色!(1991~2000年)», *中華防災學刊*, 第六卷, 第1期, 第5-24頁。
- 陳正改 (2014b), 「我國近一甲子以來重大天然災害案例之回顧及探討(1951~2010年)」, 第四篇: 天佑臺灣! 臺灣加油!», *中華防災學刊*, 第六卷, 第2期, 第161-208頁。
- 陳正興 (1990a), 「未固結土壤對地震波放大效應之實例研究」, *土工技術*, 第30期, 第32-59頁。
- 陳淑季 (1992), 「土壤液化潛能之風險評估」, *土工技術*, 第38期, 第5-16頁。
- 陳家漢、翁作新 (2010), 「可能液化地盤中模型樁振動臺試驗」, *土工技術*, 第125期, 第35-44頁。
- 陳國章、楊萬全 (1983), 「西仕颱風過境時五股的山洪災害」, *地理學研究*, 第七期, 1-16頁。
- 陳景文、林宏翰 (2000), 「高雄都會區土壤液化潛能微分區」, *土工技術*, 第82期, 第35-42頁。
- 陳榮河、林美聆、陳宏宇 (1993), 「銅門土石流材特性之初步研究」, *中華水土保持學報*, 第24卷, 第1期, 65-73頁。
- 陳榮河、林美聆、廖洪鈞、林三賢、廖瑞堂、周南山、李維峰 (2004), 「臺灣坡地與土石災害防治之回顧與展望」, *土工技術*, 第100期, 107-126頁。
- 陳慧慈 (1990b), 「基礎的動態勁度」, *土工技術*, 第30期, 第92-103頁。
- 黃俊鴻 (2000), 「液化地盤中樁基礎之耐震設計」, *土工技術*, 第82期, 第65-78頁。
- 黃俊鴻、陳正興 (1998), 「土壤液化評估規範之回顧與前瞻」, *土工技術*, 第70期, 第23-44頁。
- 黃建順、鍾毓東 (1983), 「土壤改良—動力壓密法」, *土工技術*, 第4期, 第73-87頁。
- 黃富國、陳正興 (2000), 「液化地盤中樁基礎之耐震設計」, *土工技術*, 第82期, 第43-56頁。
- 熊雲暉、梁敬順 (1985), 「覆土地層之地震修飾作用與高樓震災」, *土工技術*, 第9期, 第81-90頁。
- 臺灣省大地工程技師公會 (2000), 「液化區基礎修復補強工法」, 臺灣省大地工程技師公會。
- 鄧子軒 (2011), 「考慮不同類型地震震源之臺北盆地震度微分區」, 碩士論文, 中央大學應用地質研究所。
- 劉兆玄(主講)、胡鋼(整理) (1983), 「國科會大型防災研究計畫規劃」, *工程環境會刊*, 第4期, 5-11頁。
- 劉東京 (1999), 「臺北盆地震度微分區研究及其地理資訊系統之建立」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程學研究所。
- 潘臺生 (1987), 「雙面模數在粘性土壤之應用」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 潘國樑主編 (1996), 「土工技術57期-賀伯颱風特刊~編者的話」, *土工技術*, 第57期。
- 鄭文隆、吳偉康 (1985), 「土壤液化之災害型態與現地研判」, *土工技術*, 第9期, 第91-103頁。
- 鄭世楠、葉永田 (2004), 「臺灣百年來的大地震」, *科學發展*, 第373期, 第68-75頁。
- 鄭世楠、葉永田、溫國樑 (2012), 「由歷史地震探討臺灣地區土壤液化的分布」, 中華民國第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會, 臺中, 臺灣。
- 鄭富書、林銘郎、李順敏、周坤賢 (2005), 「臺灣廣域水土勘災經驗與省思」, *土工技術*, 第104期, 第19-32頁。
- 蕭江碧、李秉乾、周天穎 (2001), 「九二一震災重傷者受傷因素與建築特性關係研究」, 研究成果報告, 中華民國內政部建築研究所。
- 蕭海南、黃榮堂 (1990), 「羅東大比例尺模型震測試驗之介紹」, *土工技術*, 第30期, 第82-91頁。
- 蕭達鴻 (1983), 「砂土添加水泥熟料液化穩定研究」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所。
- 謝曼彥 (2001), 「臺北盆地震度微分區之研究」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程學研究所。
- 顏清連(口述)、林翠儀(整理)、李文正(校正) (2014), 「淺談臺灣防災科技發展與挑戰」, *土木水利*, 第41卷, 第4期, 第24-31頁。
- 羅俊雄 (1990), 「地面震動特性」, *土工技術*, 第30期, 第72-81頁。
- 蘇福來 (1987), 「粘性土層動態性質與地震反應譜之研究」, 碩士論文, 交通大學土木工程研究所。
- 鐘瑞敏 (1981), 「砂土中粘土含量對液化潛能之影響」, 碩士論文, 臺灣大學土木工程研究所。
- Allen, C. (1975). "Geological criteria for evaluating seismicity." *Geological Society of America Bulletin*, 86, 1041-1057.
- Hung, J. J., and Ueng, T. S. (1975). "The control of landslide caused by heavy rain in Taiwan," *Engineering Journal*, 48(9), 82-89.
- Moh, Z. C., Hung, J. J., Hsin, S. C., Liao, D. T. L., and Hsieh, C. I. (1977). "Landslides In Taiwan Some Case Reports," Proceedings, Advisory Meeting on Earthquake Engineering and Landslides, Taipei, R.O.C., 199-218.
- Sieh, K., Stuiver, M., and Brillinger, D., 1989. A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B1), 603-623.
- Vita-Finzi, C. (1990). "Neotectonics and seismic hazard." *土工技術*, 第30期, 第5-17頁。