

地震波與地動模擬進展介紹

顏銀桐

財團法人中興工程顧問社 副研究員

前言

我們身處於台灣這個美麗島嶼，緣起於數百萬年來持續不斷的板塊擠壓引致的造山運動所形成，這樣的體構造活動仍然持續靜默地進行著，在此同時，也造就台灣成為全世界地震活動相當活躍的地區之一。台灣本島內地表下方，地層間的擠壓與變動產生了大大小小的斷層，引起的地表錯動變形直接對建物結構造成破壞外，緊接著就是地震斷層破裂引發一系列以地震波形式向外傳播到地表的振動，致使居住在地球上的人們感受到持續的強烈晃動，而地上建築結構、橋梁、公共設施也同樣遭受地震波影響而有所搖晃並導致破壞。本文從實際觀測引介理論模擬，介紹幾個現階段美國、加拿大、日本與台灣相當重要科學研究與工程應用工作，以論述地表振動的地震波表現形式如何模擬與模擬所提供的資訊為何，進而讓讀者可以對地震波模擬的本質與發展趨勢有初步的瞭解。

從實際觀測到理論模擬

地震測報數位化進展邁向於 1990 年，從此使得地震觀測工作逐步成為台灣提供地震資訊工作中非常重要的一環。尤其對於有感地震的嚴密監測、地震資訊的快速

傳遞，以及地震情報提供防減災與應變策略上的運用，讓地震觀測成為自然災害之防減災方面重要的一環。然而，地震觀測工作的進行需要倚賴地震觀測儀器的廣泛設置，以便在地震發生時，地震儀器可以一五一十地記錄地震波傳遞到當下位置之振動歷時訊息。這也間接表示：在沒有設置觀測站的地點，即缺乏地震發生後的地震動訊息。因此，此刻就需要藉由理論方法，亦即地震波的模擬方法——經由計算得出模擬結果來提供特定地點的振動歷時資訊。而在準確的地震波模擬工作可以被付諸實現之前，則必須仰賴地震觀測網所蒐集之真實紀錄資料，並不斷的重複加以分析和驗證以往過去發生的地震震源模型，以及地震震源與特定紀錄站地點間之地震波傳遞的地下構造模型。如此一來，當震源模型與地下構造可以事先被合理地假設下，則特定地點的地震波模擬工作也得以順利進行計算。目前中央氣象局在台灣各都會區所建置了六百多個自由場強震站及六十幾座結構物強震監測系統（圖 1 左）、六十幾個短週期地震站、三十多個寬頻地震站及一百多個即時強震站（圖 1 右）；而觀測資料則可以直接提供地震工程及地震研究之應用[1]。

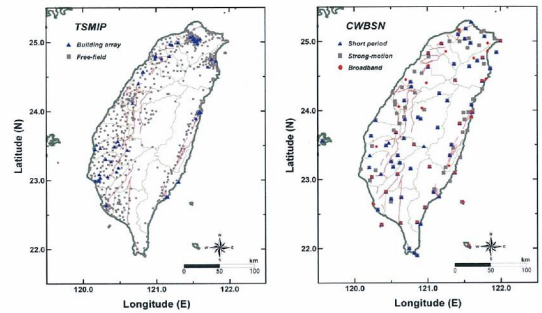


圖 1 中央氣象局地震觀測網測站分布圖

美國南加州地震中心之寬頻地震波計算平台

美國加州地區在遭受地震侵害的風險上，由於同樣存在板塊隱沒帶及地殼構造孕震帶活動斷層的問題，因此也飽受大規模地震災損的風險所威脅。隨之孕育而生的問題即為：是否可能在地震發生前，瞭解地震如何對於特定區域及其位置所在的重要結構物造成可能的災損。關於這問題的答案，就目前為止，仍持續用過去地震災損經驗及地動資料，進行各種地震工程評估的方法研究。結合地震經驗資料所迴歸分析的經驗公式分析工作，推估未來地震對於特定場址之可能造成的強地動之外，如能納入地震波模擬結果，便能為此問題提供一個更強而有力的評估工具。美國南加州地震中心 SCEC(Southern California Earthquake Center)於 2006 年前

後開始，即致力投入於加州地區孕震帶活動斷層境況地震波模擬研究議題，並於 2011 年開發出適用加州地區工程地震及地震工程界人士使用之地震波計算軟體平台 [2]。透過該平台不僅能計算出寬頻強地動歷時，其目的更希冀可以延伸應用於各種工程結構實務分析上。寬頻地震波模擬的完整架構流程如圖 2 所示。使用此流程及技術，該平台已針對美國加州地區以往已造成災害之地震，包括帝王谷(Imperial Valley)、洛馬普利塔(Loma Prieta)、郎特(Landers)以及北嶺(Northridge)地震，進行與實際觀測波形比較的驗證工作。其驗證結果不僅在模擬地震波波形，且於頻譜上也能有相當一致的結果。地震波模擬可呈現對應地表地震動之時空分布圖，而圖 3

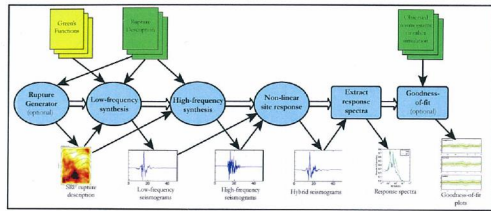


圖 2 美國南加州地震中心地震寬頻地震波模擬流程

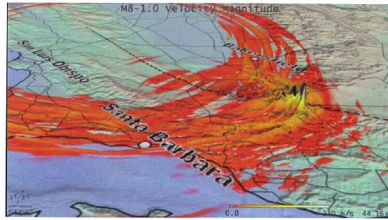


圖 3 加州地區模擬規模 8 地震之單一時間點之地動速度值分布圖

為模擬一大規模地震發生後，於某一個時間點，地表遭受地震動的三維示意圖，可清楚地提供地震發生後，鄰近區域遭受地震動侵襲的情形。這樣的視覺化資訊不僅能為地震教育提供非常鮮明的圖說，更能經由動畫，以故事性表現出人民居住的環境遭受強烈地動的視覺震撼。

加拿大西安大略大學之工程地震工具庫

加拿大西安大略大學艾金森 (Gail Atkinson) 教授團隊蒐集觀測資料建立了龐

大的資料庫，其中更針對缺乏的地震觀測記錄，執行地震波模擬且建立了模擬地震波資料庫。豐富的資料庫平台，有利於提升準確的、一致的與有效的地震危害度分析，為防減災的前置工作加分。另一方面為了強化地震危害度分析的應用工作，加拿大西安大略大學地球科學便建立工程地震工具庫 The Engineering Seismology Toolbox [3] (www.seismentoolbox.ca) (圖 4)，提供加拿大區域之地震災害議題之研究學者與工程實務單位使用。

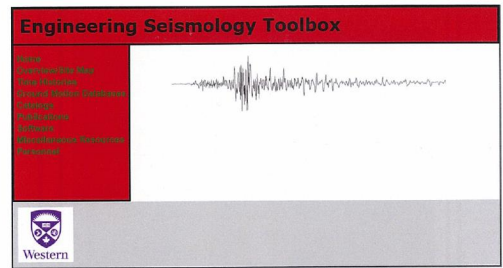


圖 4 工程地震工具庫入口網站

日本當前應用於核電廠之地震波模擬方法準則

日本政府成立的地震調查委員會強地動模擬部會 [4]，從 2002 年起即逐步地推動「特定孕震斷層之地震強震動模擬方法準則 (Recipe) [5]」。其中，關於地震調查委員會實施強地動模擬的程序方面，可以將強地動 (地震波) 模擬方法折成幾個構成要素：(1) 地震震源特性；(2) 地下構造模型；(3) 強地動計算；(4) 預測結果的驗證方法及 (5) 有關震源特性參數設定時的建議。地震調查委員會不斷地實施並公佈強地動模擬案例，不僅考慮了活動斷層發生之地震，也同時考慮隱沒帶發生之地震 (即在板塊邊界發生的地震)，目的是為了讓地震波模擬的技術被有效地驗證本身的可靠性。「Recipe」是為高精度地預測評估特定孕震構造地震的強地動情形，確立「不論誰做皆能得到同樣答案的標準作業程式」為

目標，而現階段仍對各方學術研究與工程實務界的建議進行檢討及持續修訂。

「Recipe」的強地動預測的流程，由 (1) 特徵化地震震源模型的設定 (圖 5 與圖 6)、(2) 地下構造模型的建構、(3) 強地動計算 (圖 7)、(4) 預測結果的驗證四個過程所組成。要做到準確的強地動模擬，事前的地質與地球物理調查工作是非常重要的關鍵；經由調查的結果綜合整理出一系列斷層相關的參數，有利於建構更為準確的斷層模型。最終的產物就如同圖 7 所看到的一斷層周圍的地震動分布圖，顯示了當此斷層錯動，亦即地震發生，則鄰近區域的地震動即可被預測。這樣的事先資訊，可被用來使用在工程結構補強、防災策略與避難路線規劃、國土開發利用考量等重要議題上。

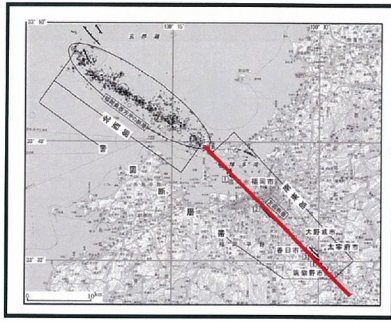


圖 5 地質調查之斷層震源地表線形

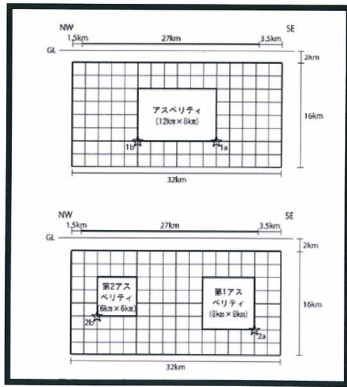


圖 6 特徵震源假設模型

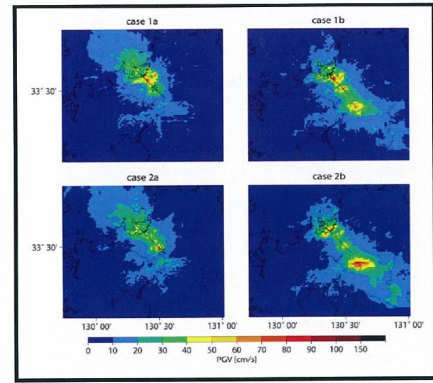


圖 7 地震動速度空間分布資訊

台灣地區境況地震數值模擬

台灣現階段則以地震學理論的背景進行地震波模擬的工作，主要還是以科學研究為主。除了直接以地震震源假設出發，模擬地震波傳遞的過程，以及地表面上的振動時空分布，地震波模擬亦可以探求詳細的地下三維構造，並提供地震數值模擬之地震波傳遞路徑構造模型，進而讓未來可能發生大地震所引起的地面運動預測更為精確可靠。而所謂地震波模擬，也就是地震動歷時模擬；簡言之，即是由地震波模擬的理論、地震發生的震源模型及地震波傳遞的路徑介質組成。在不遠的未來，地震波的模擬有相當的機會可以達到更高

的準確性，進而能在工程實務上更有信心地被直接應用。但前提是，就上述三方面議題而言——理論計算方法必須被嚴謹地驗證；而地震震源必須能被清楚定義；且地震波傳遞的路徑介質構造模型，必須再不斷透過地震、地質與地球物理研究的資料以重複建構與修正成高解析模型。如此，上述之願景將得以成功實現。

而台灣最高學術研究機構——中央研究院地球科學所，也同樣投諸心力於地震波模擬技術發展研究議題[6][7]。台北地區為台灣首都圈，人口、經濟與產業極度密集的城市，盆地地形幾何效應則會導致地震動放大，因此使得地震災害議題備受重視，而三維地震波模擬即可呈現地震波於

臺北盆地的傳遞情形，同時也可以探討特定地點的地動放大效應情形。圖 8 是為 2004 年 10 月 23 日的臺北地震（芮氏規模 3.8）境況數值模擬的例子。在此提供中央研究院的研究團隊提供兩個入口網站：其一，在台灣地區地震發生後，可以即時提供地震震源機制外，以及模擬的地動分布

圖結果(<http://tecdc.earth.sinica.edu.tw/gcap>) [9](圖 9)；其二，可以針對自定虛擬的地震，進行地震波模擬計算，提供地震波傳地圖檔及模擬地動分布圖 (<http://ros.earth.sinica.edu.tw/>) [10](圖 10)。有興趣的讀者可以前往，直接體驗如何進行一個地震波模擬的案例。

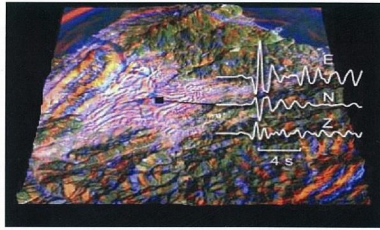


圖 8 2004 年 10 月 23 日的臺北地震模擬對象所呈現之地震波傳特性。

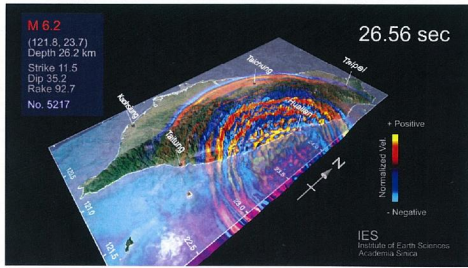


圖 9 境況模擬一東部外海規模 6.2 地震之地震波傳遞過程圖

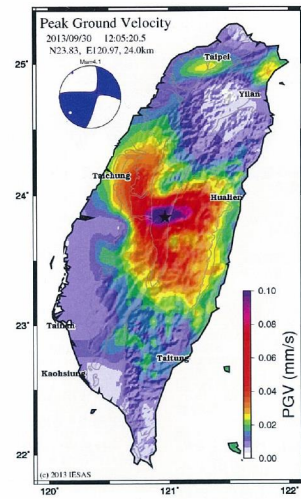


圖 10 2013/9/30 規模 6.2 南投地震之地動速度模擬分布圖

結語與未來展望

目前地震波模擬研究雖然大部分仍在學術研究的進展階段，而工程應用的面向，不僅需考慮結構設計的搭配，仍需要在現行的法規與規範下運作，因此，地震波模擬與工程實務的接軌還有相當大的思考空間。然而，地震波模擬的科學研究發展也隨著電腦計算速度提升與日俱進，相信假以時日，地震波模擬所獲得的地震動會更趨於實際發生地震的結果，結合實務工程應用的願景將得以實現。

參考文獻

1. 中央氣象局地球物理資料管理系統 <http://gdms.cwb.gov.tw/20/chapters/ch3.html>
2. The SCEC Broadband Simulation Platform http://sccc.usc.edu/scccmedia/Broadband_Platform
3. Engineering Seismology Toolbox <http://www.seismotoolbox.ca/index.html>



結語

環境工程師的任務，是利用工程的方法解決環境問題，而工程的方法，是要使生活環境與自然環境有最好的結合，使得生活水準及整體社會發展向上提升。因此在解決土壤及地下水污染問題，應開始引進「綠色及永續導向型整治」之觀點，從環境、社會及經濟的需求進行整治之規劃，選取最適合當前及未來需求的整治策略。

參考資料

1. 行政院環保署，「污染場址綠色及永續整治策略研擬計畫」期末報告，2013。



文接第 19 頁

2. CL:AIRE, A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation. 2010.
3. Holland et al, Framework for Integrating Sustainability into Remediation Projects. Remediation Journal, 21(3), pp. 7-38 (2011)
4. ITRC, Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework. 2011.
5. U.S. EPA, Green Remediation: Incorporation sustainable environmental practices into remediation of contamination sites. (2008).
4. 地震調查研究推進本部
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>.
5. The Headquarters for Earthquake Research Promotion, Strong ground motion prediction method (“Recipe”) for earthquakes with specified source faults, http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf, 2008.
6. 日本地震危害資訊所
<http://www.j-shis.bosai.go.jp>.
7. 李憲忠，三維地震波模擬：談臺北都會區的地形與盆地效應，中央研究院週報，140 期，2007.
8. 趙里，全波場波形分析：地震學研究的新方向，中央研究院週報，110 期，2007.
9. gCAP SOLUTIONS
<http://tecde.earth.sinica.edu.tw/gcap>.
10. Real-time Online earthquake Simulation system (ROS)
<http://ros.earth.sinica.edu.tw/>.