

地震來了，地為何這樣動？

台灣地區時時刻刻飽受地震威脅，地震一旦發生，除了地層擠壓變形直接對地表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，致使人們感受到持續的晃動，地上建築結構、橋樑、公共設施也遭受搖晃。本文藉由實際觀測及理論模擬，論述地震波的表現形式與地動的關係，以及地震模擬實際應用。

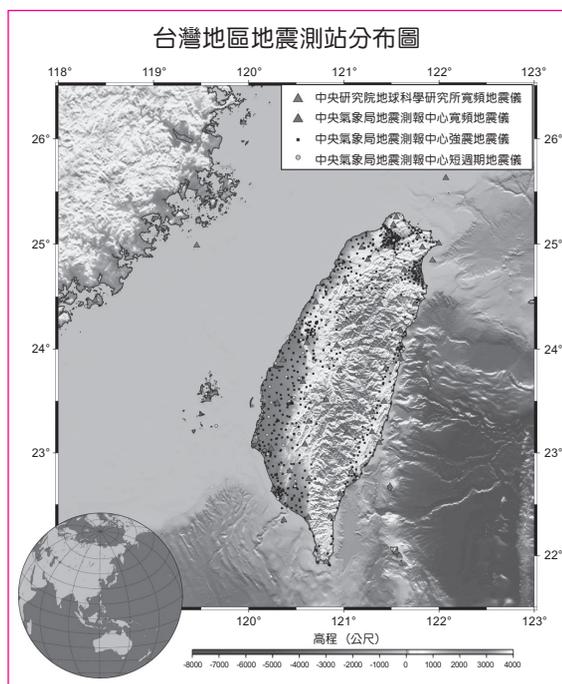
■ 顏銀桐、馬國鳳

從地震實際觀測到地震理論模擬

1. 地震動觀測

地震發生後，釋放的能量以波的方式傳遞於地表產生地震動。早期，無地震儀器時，經由人的直觀感覺以及建築物的倒塌受損判定地是怎麼動的，再透過震動最終情況調查描述各個地區搖晃大小及方向，而開始了最初的地震動觀測手寫紀錄。隨著科技日新月異，地震動開始被地震儀器量化成數位資訊，主要記錄東西、南北及垂直三個方向之地震動資料，不僅可以顯示地震搖晃的方向，也能知道不同方向的搖晃程度。

目前台灣地區的地震觀測主要以中央氣象局地震測報中心為主，擁有最大規模地震觀測網。全台灣除了山區外，平均每十公里內皆架設強震地震儀，可完整記錄地動加速度數值。此外，中央氣象局亦額外架設短週期及寬頻地震儀，提供不同頻率範圍的地震波資訊，圖一為台灣地震儀的架設位置分佈，記錄地震發生後全台各地的地震動情況及振幅大小。



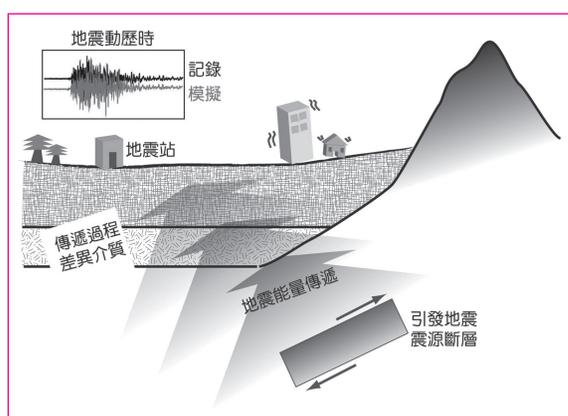
圖一 台灣地區主要地震觀測單位所屬地震觀測站分布圖

然而，在沒有架設地震儀器及未發生地震的地方，則是利用地震動模擬概念及技術模擬台灣地區未來或過去發生地震之影響範圍與可能地震動情況。

2. 地震動模擬

地震動模擬利用地震波傳理論，假設在

震源破裂模型及地震波傳遞介質下，透過數值計算方式推論地震發生後，特定地點的地震動表現，一般以地震波形式呈現地震動歷時序列，如圖二。台灣地區自二十世紀末已針對波傳介質進行深入研究。因此，地震模擬在所需要參數資料與工具技術皆逐步完備下，已具備工程及防災研究之應用潛力。



圖二 地震波能量傳遞示意圖。透過地震波傳遞理論，假設發生地震的震源斷層模型及傳遞介質特性，即可以模擬特定地點之地震動歷時，亦即模擬地震波

地震工程實施耐震設計時，有一定規範條件，必須預估強地動歷時之結果。強地動歷時主要依照純理論、半經驗及純觀測做估算。然而，採用半經驗及純觀測所得之強地動歷時，則無法反應結構物所在地點的實際地盤特性（即影響強地動歷時之基本因素，包含地震震源、波傳路徑及目標地點場址效應），在無法準確量化上述影響因素前，只能透過理論計算與觀測資料之比較，選定影響較大之強地動，作為保守估計之條件。

近年來開始考慮工程使用的需求，對於都會區高樓的低頻地震波也將列入考慮，因此，地震波模擬研究不僅針對週期低於 1 s

的高頻地震波，並結合以地震學理論地震波計算週期大於 1 秒的低頻地震波，逐步邁向寬頻地震波模擬，其結果可提供結構工程師評估並改善設計之強地動參數，有利於提升公共工程及建築結構物之耐震程度。

再者，模擬強地動分布結果可以直接評估災損，保障生命安全，減少國家人力財物的損失。

地震波模擬技術

地震波模擬主要由振幅、頻率及相位控制地震動的行為，主要是模擬在特有頻率下，地震動隨時間對應不同相位之振幅，其方法簡述如下。

1. 低頻地震波

地震波計算的演進，從最簡單的半空間均質介質彈性波傳遞，逐漸進步到多層水平均質介質反應 (Wang and Herrmann, 1980; Bouchon, 1981; Yao and Hardriker, 1983; Sasatani, 1985; Kohketsu, 1987)。由於計算快速，且針對低頻地震波之模擬，所以，可以得到與實際觀測波形相符之合理結果，至今仍為地震學界廣泛運用。此外，三維地下介質及地表上地形分布資訊，目前也已逐漸被考慮運用在有限差分法 (Finite-difference Method) 及頻譜元素法 (Spectral-element Method) 之地震波計算，使用這些方法計算的理論地震波，可以精準地模擬 1 秒週期低頻地震波 (Graves, 1996; Lee et al., 2008)。上述的地震波模擬研究，也可以應用於大於 1 s 之長週期（亦即頻率 1 Hz 以下）之特定目標。

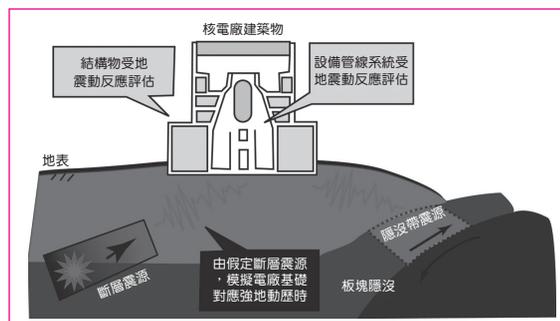
2. 高頻地震波

一般地震危害度分析所使用之強地動衰減經驗公式中，強地動歷時主要分析相對小於 1 s 週期 (> 1 Hz) 的低矮建築結構。卻無法有效解析地震學理論所計算之低頻地動歷時。而低於 1 s (> 1 Hz) 的高頻強地動歷時，現階段最常採用的兩種方法為經驗格林函數法 (Empirical Green's Function Method) (Irikura, 1983) 及隨機格林函數法 (Stochastic Green's Function Method) (Boore, 1983)。目前日本政府組織單位『地震調查研究推進本部』針對活動斷層模擬未來強地動狀況，主要以此兩種方法為實際執行的基礎概念，模擬計算高頻強地動歷時。此兩種方法主要差異來自於地震波推估的目標鄰近區域是否發生小地震，以及是否有實際觀測地震站存在。日本、美國西部及台灣地區均擁有豐富的地震資訊及測站分布，故可有效的採用經驗格林函數法，而對地震稀少且沒有擺設地震儀器的地區，隨機格林函數法將適時地提供協助，以完成該區的理論高頻地震波計算。

3. 混合法寬頻地震波

自 1998 年後，混合法模擬寬頻地震波技術陸續被提出，亦即結合計算低頻及高頻的地震波，以約 1 Hz 為調和頻率，採用濾波技術合成高頻及低頻地震波進而求取寬頻地震波，一般稱之為混合合成法 (Hybrid Method)。此法目前以地震活動頻繁且容易發生災害的美國及日本等為主，並以此新技術驗證歷史地震所記錄之強震波形 (Kamae et al, 1998 ; Pitaka et al., 2000 ; Graves and Pitarka, 2010 ; Irikura and Miyake, 2010 Mai

et al., 2010)，目前台灣地震科學界及工程地震學界正努力發展此新技術之研究及應用。



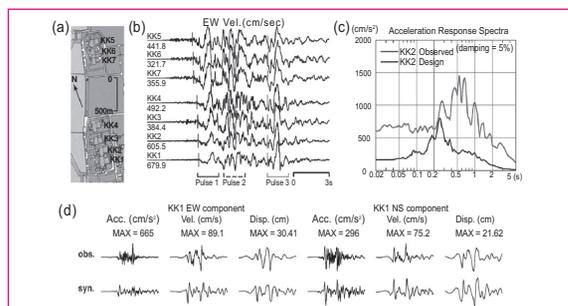
圖三 目前台灣地區可能影響核電廠之地震源有兩個，一為斷層震源，另一為隱沒板塊震源。透過模擬此兩種類型之地震源強地動資訊，可應用於核電廠耐震安全評估

現階段及未來重要應用領域

1. 核能電廠強地動預估應用

目前地震模擬實際應用案例，值得一提的是日本柏崎刈羽核電廠 (Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant, 簡稱 KK 電廠) 之強地動評估實例。柏崎刈羽核電廠為東京電力公司所有，位於日本新潟縣柏崎市，共有七部發電機組，緊鄰日本海如圖四。2007 年，KK 電廠遭受震矩規模 (Mw 6.6) ^[1] 之中越沖地震 (Chuetsu-oki Earthquake) 襲擊，此地震是全球少數震央離核電廠僅 20 km 以內且有破壞力的地震，當時的觀測記錄對於電廠安全性重新評估至為重要。因此，東京電力公司透過實際觀測波形的分析，發現廠址下方有較厚及傾斜的沈積層與背斜構造，此地質差異性成為場址強地動的增強因子。KK 電廠遭受此強地動之實測值，已超出電廠原本之設計值。因此，日本政府及東京電力公司對此地震的強地動影響狀況及未來可

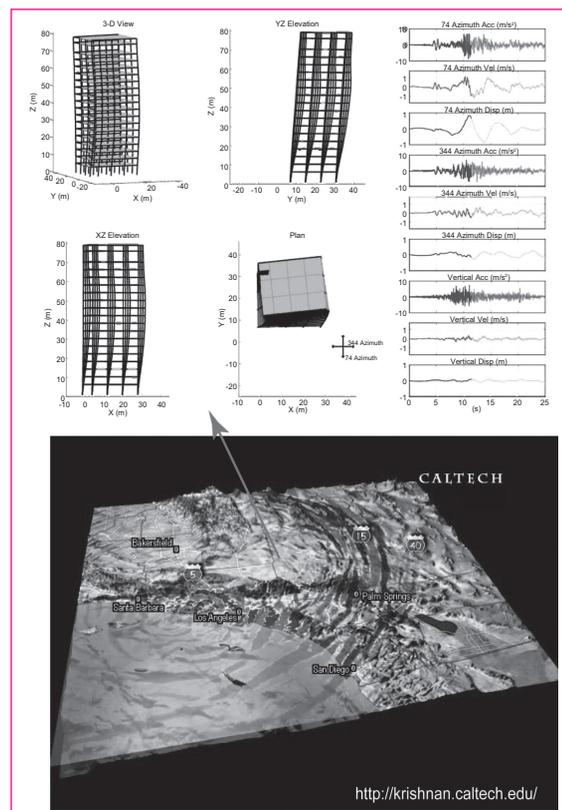
能災損均投入許多心力加強研究與評估，其中之一即是進行 KK 電廠地震波形模擬，以了解場址下方特殊地質構造對廠房結構的影響。為了模擬可能之寬頻強地動歷時，Miyake et al. (2010) 針對東北 - 西南及西北 - 東南向之兩個斷層共軛面，採用經驗格林函數法 (Empirical Green's Function Method) 推論主要強地動產生之區域破裂型態以及 KK 電廠內 KK1~7 等七個地震站所對應之強地動模擬歷時 (Strong-motion Time History) 如圖四，可看出實測波形與模擬波形相當一致。相較日本，台灣目前有三座營運及一座興建中之核電廠。三座位於台灣北端，一座位於最南端。有鑑於日本地震的經驗，目前核能研究所及中興工程顧問社已於 2011 年著手進行地震模擬方法評估，針對鄰近斷層震源模擬核電廠內強地動影響情況，以進行核電廠抗震評估。



圖四 日本柏崎刈羽電廠各機組之中越沖地震波觀測紀錄及模擬結果。(a) 柏崎刈羽電廠內 KK1~7 等七個地震站位置。(b) KK1~7 東西分量之速度地震波形。(c) KK2 地震站加速度反應譜比較，紅色線為觀測頻譜，黑色線為核電廠設計反應譜。(d) 核電廠內 KK1 測站東西及南北分量加速度、速度及位移相模擬地震波。(摘錄自 Miyake et al, 2010)

2. 地震模擬應用於高樓結構數值模型反應

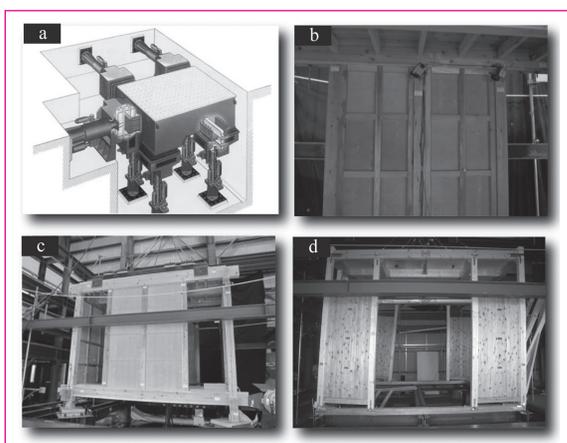
南加州地震研究中心 (Southern California Earthquake Center ; SCEC) 對於南加州地區之地下三度空間地層介質已經研究非常透徹，因此可準確地模擬特定活動斷層鄰近特定地點可能發生地震之強地動歷時。相關學者已開始研發低頻有限差分法之強地動歷時模擬應用於評估建築物的損毀情況 (Muto and Krishnan, 2011)。現階段模擬的地震波準確程度有頻率上限之考量，僅考慮小於 1 Hz 低頻地震波的強地動歷時，直接輸入高樓結構物模型，如圖五顯示其結構物之搖晃三維反應與最終破壞結果。



圖五 美國南加州區域低頻強地動模擬之地震波傳遞狀況及假定高樓結構物反應分析圖

3. 地震模擬應用於實體建築結構模型反應

日本京都大學防災研究所先端研究施設共用促進事業組織，擁有地震強地動反應模擬振動台 (Strong Earthquake Response Simulator) 設備，可建造仿真結構物，並於特定位置放置震動紀錄器，透過輸入強地動歷時，了解結構物於特定地點之實際晃動及損壞情形。圖六為該實驗室所使用設備及木造結構實際震動反應案例。



圖六 (a) 地震模擬振動台結構示意圖。(b) 實體結構上安裝感應器，記錄震動情形。(c) 實體結構外觀。(d) 實體結構於強地動歷時作用後損壞結果。(摘錄並修改自京都大學防災研究所先端研究施設共用促進事業)

台灣國家地震工程研究中心亦擁有六個自由度以模擬三軸向之地震模擬振動台，均能模擬重現世界上的主要地震。在地震模擬實驗中，振動台與地震運動之歷時一致性是相當重要的，因此，透過軟體計算補償強地動的實際反應，促使振動台之模擬運動更趨近於真實的地震動。

目前振動台實驗主要以地震站觀測實際發生地震之紀錄，輸入類似震源型態或大規

模地震紀錄，進而研究結構物受力情況，未來以特定地震震源機制模擬地震動歷時，運用在特定地區平均結構高層的模式，可以更清楚了解選定區域的結構受損狀況，提供補強建設的建議。隨著震源斷層或調查地層構造的研究發展，由地震模擬的方法求得耐震設計地點之鄰近震源真實地震動，作為耐震設計之參考，已成為未來高樓結構或評估國家建設耐震之必然趨勢。

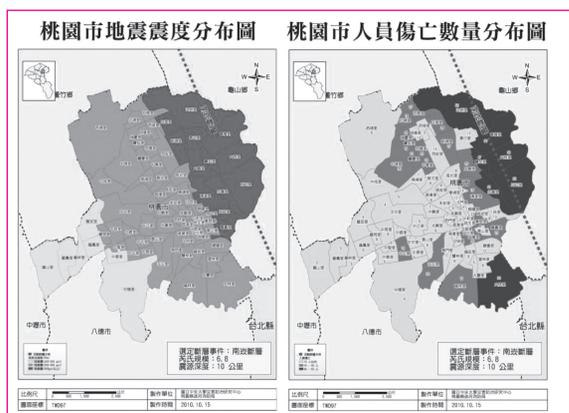
同樣地，其他地震工程建築結構，如水壩、橋樑、發電廠、地下結構物（車站、機場）等耐震分析，進行動態應力分析時需要地震設計，依舊有分析顯示，因為設計時不符合目標地點之震源機制型態及規模大小，造成地震動歷時輸入錯誤。對此，可對鄰近活動斷層及孕震構造加以調查了解，假設可能之震源模型，推估目標地點的地震動歷時，如此才可明確及真實的反應當地未來可能發生地震動情況，以提升耐震設計評估的可靠度。

4. 地震模擬之地震動分布圖應用於地震防災及地震風險

地震災損評估可提供政府防災決策之直接資訊，此資訊由模擬地震的規模大小及震源型態，考慮地震災害潛勢分析模式的因子（如地盤分、強地動衰減、場址效應修正等），根據經驗公式推估鄰近震源之地震動分布。為了評估不同類型之工程結構物損害，地表震動強度需以不同型式呈現，一般常以地震動參數表示，如地表最大加速 (Peak Ground Acceleration)、地表最大速 (Peak Ground Velocity)、愛氏震 (Arias Intensity) 或長、短週期之結構反應譜值 (Response Spectrum)。

由經驗評估計算的地震動分布圖，可由災害損失模式評估地震可能造成的災損，如人員傷亡、建築倒塌等，圖七為桃園地區的实际案例。災損資訊可提供地震防災的政策制定及保險業者評估地震風險。

經驗公式簡化了實際地震引致地震動的變異因素，其中並未考慮實際斷層震源詳細的破裂模型、地底下介質材料分布、目標場址非線性反應。未來地震模擬應用將以實際活動斷層震源為案例，模擬計算強地動分布，提供後續災損評估之用，此可更精確的描述實際地震動，也能提高空間災損解析。



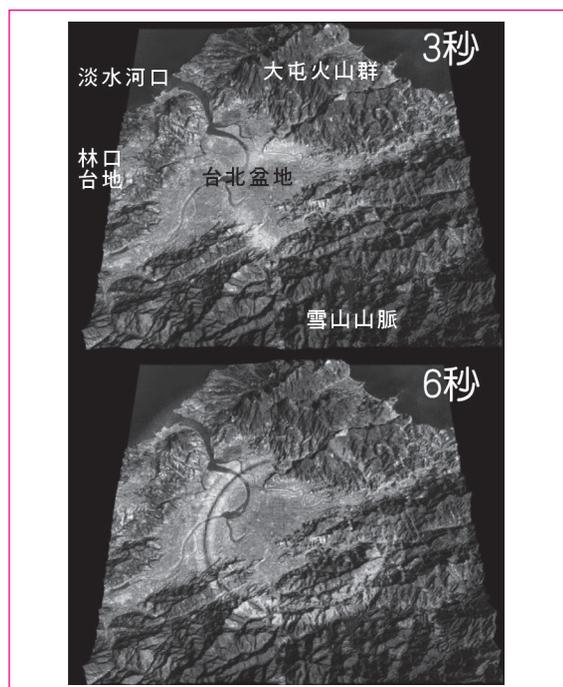
圖七 由經驗公式推估地震動分布(左)及對應推估之人員傷亡數量分布。
(摘錄自桃園市災害潛勢分析報告書)

討論及結論

現今地震模擬的研究，雖然對於地震震源已深入了解，也藉由地震學理論合理地闡述地震波模擬。然而，地震發生後，除了地震源效應外，地震動在頻率及振幅的表現，仍需得知地震波在地底傳遞整體的變化，否則，僅能得到較低頻地震波的模擬，故目前仍需以實際觀測地震動紀錄為輔，搭配推

算之經驗公式，方能提供初步地震動分布結果。

目前地球物理及地質學家正透過地球物理探勘、鑽井等方式調查及描述地震波傳遞過程中的地下淺部介質特性。地震學家則採用大量地震觀測紀錄，經由理論計算研究更精細的深部地震波傳遞介質的速度特性。相互驗證的結果，推論出以精密三維方式建構地下介質構造之實際狀況，考慮地表淺層及地形效應的影響，作為地震模擬發展之主要進程，圖八是地震震波在台北盆地周圍傳遞之模擬圖，得知地下沈積地層及地形效應均會影響地震波。一旦建立地表高程及地底介質的精密數值資料，地震模擬將可更真實的呈現地震地點真實地震動的情況，以提供各種地震工程應用。



圖八 台北都會區之地震模擬案例。假設位於台北盆地東側之地震震源引發之地震，地震波往外傳遞之情形。
(中央研究院李憲忠博士提供)

未來，地震模擬的發展建立於地震震源破裂機制、波傳介質解析、模擬技術提升等研究。其民生及工程應用包含結構震動損害分析、引發山崩、液化之次生災害分析、管線系統易損性分析等，也涵蓋防災策略應變研擬、人員及房屋災損風險、次生災害風險等分析，與實際應用相呼應，有助於提升地震評估之準確性。

參考文獻

- 國家地震工程研究中心地震模擬實驗室 <http://www.ncee.org/ZH/Lab.aspx#shaketable>
- 日本地震調查研究推進本部 <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 京都大學防災研究所先端研究施設共用促進事業 <http://zeisei5.dpri.kyoto-u.ac.jp/kyoyo/index.html>
- 桃園市災害潛勢分析報告書，桃園縣災害防救深耕計畫，2010
- 建築物耐震設計規範及解說，內政部營建署，營建雜誌社，2005
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, 1865–1894.
- Graves, R. W. (1996). Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered grid finite differences, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, 1091–1106.
- Graves, R. W. and A. Pitarka (2010). Broadband Ground-Motion Simulation Using a Hybrid Approach, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 100, pp. 2095-2123.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* 33, 63–104.
- Irikura, K., and H. Miyake (2010). Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-010-0150-9.
- Kamae, K., K. Irikura, and A. Pitarka (1998). A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 357-367.
- Koketsu K. (1987). Synthetic seismograms in realistic media: a wave- theoretical approach, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo* 62, 201-245.
- Lee, S. J., H. W. Chen, Q. Liu, D. Komatitsch, B. S. Huang, and J. Tromp (2008). Three-dimensional simulations of seismic-wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, 253-264, doi 10.1785/0120070033.
- Mai, P. M., W. Imperatori, and K. B. Olsen (2010). Hybrid broadband ground motion simulations: combining long-period deterministic synthetics with high frequency multiple S-to-S back-scattering, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2124-2142.
- Miyake, H., K. Koketsu, K. Hikima, M. Shinohara, and T. Kanazawa (2010). Source fault of the 2007 Chuetsu-oki, Japan, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(1), 384–391, doi:10.1785/0120090126.
- Muto, M. and Krishnan, S. (2011). Hope for the Best, Prepare for the Worst: Response of Tall Steel Buildings to the ShakeOut Scenario Earthquake", *ShakeOut Special Issue, Earthquake Spectra*, 27(2), 375-398.
- Pitarka, A., P. Somerville, Y. Fukushima, T. Uetake, and K. Irikura, (2000). Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid green's function. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90, 566– 586.
- Sasatani T. (1985). Seismic Wave Propagation in a stratified half-space, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, 7,401-420.
- Wang, C. Y. and R. B. Herrmann (1980). A numerical study of P-, SV-, and SH-wave generation in a plane layered medium, *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 1015-1036.
- Bouchon, M. 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 959–971.
- Yao, Z. X. and D. G. Harkrider (1983). A generalized reflection-transmission coefficient matrix and discrete wavenumber method for synthetic seismograms, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, 1685-1699.

作者簡介

顏銀桐

中興工程顧問社 / 副研究員

馬國鳳

中央大學地球物理研究所 / 教授