

2006 年屏東地震於台灣南部恆春半島強地動模擬預估分析

Strong ground motion prediction toward the Hengchun peninsula for the 2006 Pingtung earthquake

顏銀桐¹ 吳元傑² 鄭錦桐¹ 邵國士¹ 林柏伸¹ 張志偉²

¹ 中興工程顧問社防災科技研究中心

² 行政院原子能委員會核能研究所

ytyen@sinotech.org.tw (02-2758-0568 ext.266)

摘要

台灣地區位處環太平洋地震帶，每年不乏受災害性地震衝擊，評估關鍵設施受地震所可能引致直接及間接危害，可藉由強地動波形資訊，提供地震災損評估之先決參數。近三十年來，地震學界對於地震的科學面相，深入研究地震發生的震源、地震波傳遞介質，乃至特定場址的地下材料三面向，逐步了解如何考慮這些因素對於強地動歷時的影響，並以數值模擬方式求得強地動波形。本研究針對 2006 年發生規模 6.9 之屏東地震，探討台灣南部可能發生由隱沒帶構造產生之災害性地震，及強地動模擬技術應用於地震工程需求上的重要議題，以強地動模擬重現恆春半島區域特定位址的強地動情形，並以觀測資料檢驗之。

關鍵字： 2006 屏東地震、強地動模擬，強地動波形、地震災損評估

Abstract

Taiwan is located on the Circum-Pacific seismic zone where large disastrous earthquakes which may induce disasters and casualties occurred frequently. For the assessment of possible seismic hazard and risk to the National Critical Infrastructures, the ground acceleration time-history might provide information for seismic engineers to improve earthquake resistance for buildings and other structures and for engineering seismologist to estimate ground shaking, losses and casualties from the view of statistics. The research topics on seismology field have focused on earthquake source, propagation media of seismic wave and the media character beneath specific site to understand how those factors to lead to influences on strong ground motion. In this study, we simulate and verify the predicted strong ground motion at the region of Hengchun peninsula for the 2006 Pingtung earthquake.

Keywords: 2006 Pingtung Earthquake, strong motion simulation, seismic waveform, earthquake loss estimation

一、前言

準確預估地強地動為抗震評估及災損估計的前置重要工作，特別是針對國家級的關鍵設施。當地震震源的複雜錯動型態及破裂過程特性可以被清楚界定時，對於特定震源產生之強地動加速度歷時(ground acceleration time-history)即可適當的被估算出來。2006年12月26日規模6.9屏東地震發生同時，恆春半島南端遭受強烈的地震動襲擊，雖然當時馬鞍山核能發電廠並未在此次地震造成損害，但該區未來有可能受板塊隱沒持續作用所引發的大規模地震潛勢，其地震危害的風險仍然存在。為了降低未來因地震造成之核電廠可能災損，可經由過往地震事件的強地動模擬過程，在實際的地震動觀測記錄資料驗證之下，延伸推求鄰近無地震測站佈設的區域強地動情況。而驗證模擬過程的經驗將有助於提供未來境況虛擬災害地震之地震強地動評估工作。基於此，Kamae et al. (1998)[1]提出模擬寬頻地震波的方法，考慮斷層破裂錯動集中區(asperity)、地震矩(seismic moment)、應力降(stress drop)等一系列地震源參數，建構出適當的特徵震源模型(characterized source model)，並根據地震學理論中之經驗格林函數方法順推強地動加速度歷時。此方法中，個別計算高頻及低頻的地震波，在以週期1秒為配對頻率於時間域結合得到寬頻加速度歷時。Kamae and Irikura (1998)[2]以此方法經由1995年發生的阪神大地震(Hyogoken-Nambu Earthquake)驗證可行性。

本研究首先執行經驗格林函數方法，透過模擬地震波與實際地震波與頻譜的擬合比對，求取最佳的特徵震源模型(characterized source model)。再經由 Kamae and Irikura (1998)提出之寬頻地震波模擬方法流程，採行已求取之特徵震源模型，以混合合成法模擬寬頻地震波，進行恆春半島地震觀測記錄之實際地震波比對，驗證模擬寬頻強地動加速度歷時，驗證混合法於台灣地區之可行性。

二、特徵化震源模型及參數

目前對於屏東地震震源之逆推反演相關研究結果，有其 Lee et al. (2008)[3]使用強震波形資料及 Yen et al. (2008)[4]使用遠震波形資料逆推反演之有限斷層震源滑移模型。本研究透過經驗格林函數法估算特徵化震源模型，比較以往逆推反演之震源滑移模型，且參考 Somerville et al. (1999)[5]制訂標準數化有限斷層滑移震源模型規則所建立的經驗迴歸關係，以判定有限斷層震源滑移模型中主要的滑移集中區(asperity)，亦即強地動產生區域(strong motion generation area)之大小是否合理，建構屏東地震模擬最佳化之特徵震源模型。

為求準確的特徵化震源模型，採取四個鄰近核三廠且為中央氣象局強震站所收錄之加速度記錄，這些測站包括最鄰近核三廠之 KAU082 測站及額外三個 KAU046、KAU042、KAU043 測站，測站相關資訊列於表 1。採用一般存在記錄著較大強地動加速度最大值之南北及東西分量，透過篩選適合之小地震以經驗格林函數法驗證模擬波形與觀測波形之擬合情形，並進一步評估主要的強地動產生區域。圖 1 及圖 2 顯示其選取之四個強震站與核電廠之空間關係，圖中顯示四個記錄屏東地震三分量之加速度、速度及位移地震測站之波形。

表 1 強震觀測站位置及場址參數

地震站名稱	場址分類	緯度(°)	經度(°)
KAU082	D2	21.942	120.719
KAU046	D2	22.006	120.738
KAU042	C3	22.024	120.821
KAU043	C3	21.914	120.840

註 場址分類參考 Lee and Tsai (2008)[6]發表文獻。

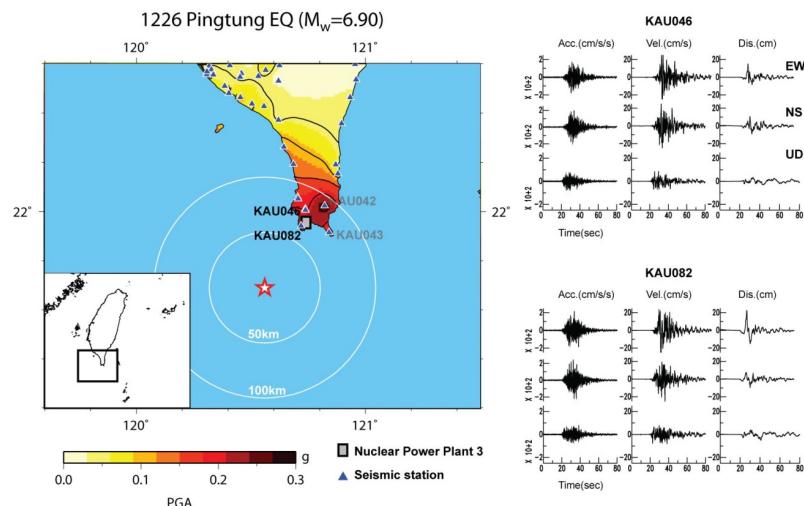


圖 1 KAU046 及 KAU082 兩個地震測站位置分布及個別展示中央氣象局地表強震站收錄之加速度、速度及位移相三分量地震波

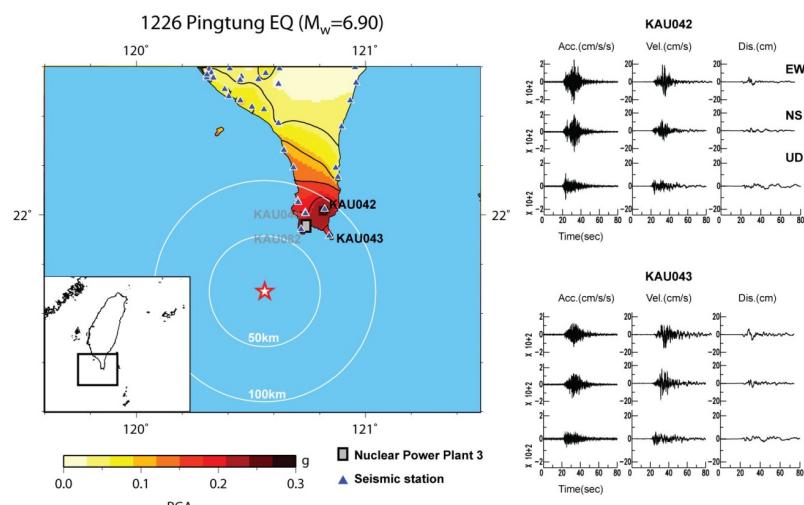


圖 2 KAU042 及 KAU043 兩個地震測站位置分布及個別展示中央氣象局地表強震站收錄之加速度、速度及位移相三分量地震波

選取震源機制與屏東地震類似而地震矩規模(M_w)約 4.0 之小地震，經由經驗格林函數法，透過調整相關震源參數後計算求得最佳之特徵化震源模型。過程中主要可被調整之震源參數，包含強地動產生區域之長及寬、屏東地震(1226 event)與選取小地震(em6)之應力降比值、震源時間函數揚起時間(rise time)及破裂速度(rupture velocity)。表 2 列出屏東地震及選取小地震相關參數，以及得到最佳特徵化震源模式所採用之震源參數值。其中屏東地震之震央、選取為經驗格林函數小地震震央、所選取之地震測站相關空間分布位置關係如圖 3。

表 2 特徵化震源模型相關參數

地震參數		
	1226 Event	em6
時間	2006/12/26 12:26(UT)	2009/10/11 06:42(UT)
位置	120.560E 21.69N	120.629E 21.928N
深度(公里)	41.11	42.00
地震矩規模(M_w)	6.9	4.4
地震矩(達因·公分)	2.7×10^{26}	5.05×10^{22}
震源機制(度)	335, 75, -98	336, 56, -99
(走向、傾角、滑移角)		
經驗格林函數使用參數		
強地動產生區域長度(公里)	20	
強地動產生區域寬度(公里)	20	
應力降比值	2.39	
破裂速度(公里/秒)	2.7	
揚起時間(秒)	0.9	

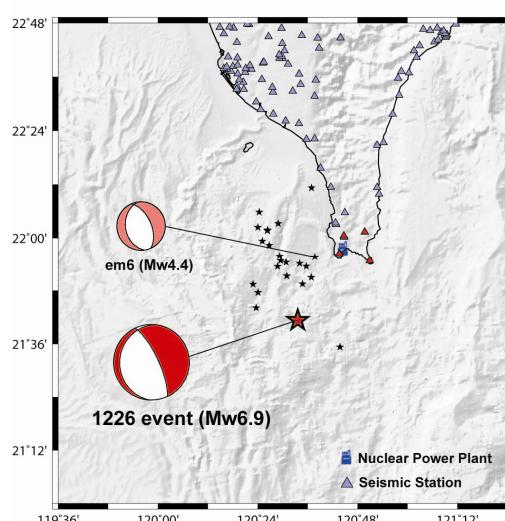


圖 3 模擬選取之地震測站及地震空間分布位置關係。黑色星號為 1990 至 2010 年規模大於 4.5 之餘震，四個紅色三角形對應圖 1 及圖 2 之四個選取地震觀測站，藍色三角形為中央氣象局強震站位置

特徵化震源模式的合理及可靠性，取決於所使用之經驗格林函數以小地震模擬大地震之合成波形及頻譜是否可被適度擬合。圖 4 顯示其透過經驗格林函數法計算於觀測地震站 KAU046、KAU082、KAU042 及 KAU043 之東西、南北分量模擬合成波形與實際觀測波形之比較情形。模擬地震波的頻率涵蓋範圍為 0.5-8 Hz。從結果顯示，不論從時間域上之波形比較，或者從頻率域上之加速度頻譜的比較來看，皆可看出適度的良好擬合程度，表示特徵化震源模型有其相當程度之合理及可靠性。

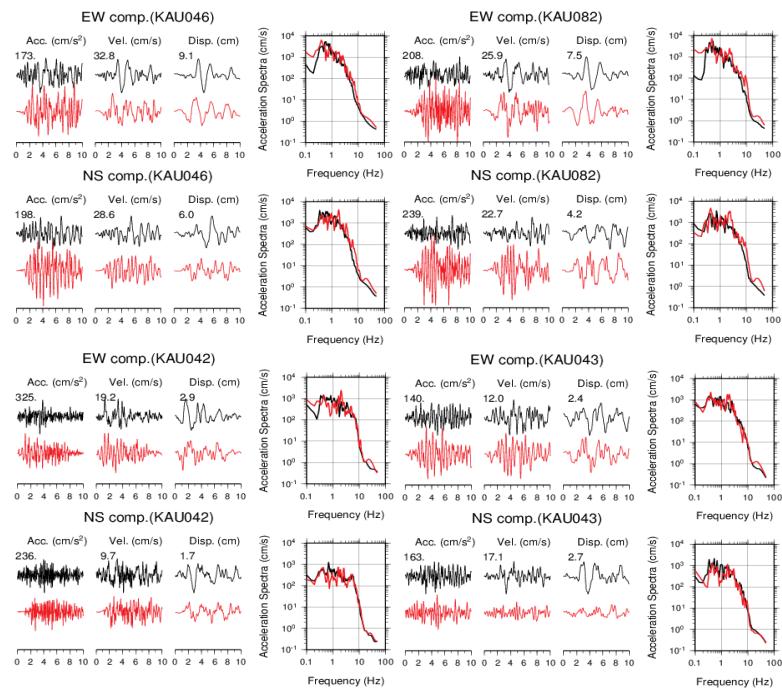


圖 4 以經驗格林函數法推估觀測地震站 KAU046、KAU082、KAU042 及 KAU043 東西、南北分量之加速度、速度及位移相合成波形及加速度譜

將推估之特徵化震源模型，與 Lee et al. (2008)[3]及 Yen et al. (2008)[4]個別使用強震波形資料及遠震波形資料逆推求取之震源滑移模型比較結果(如圖 5)。發現使用經驗格林函數法推估之強地動產生區域位置，主要對應於 Lee et al. (2008)[3]及 Yen et al. (2008)[4]滑移模型中鄰近震源附近之破裂滑移集中區。顯示主要反應頻率 0.5-8.0 Hz 之強地動，產生的來源主要集中於震源附近約 10 公里為半徑的區域範圍，其他滑移分布所表現的頻率範圍推斷應不在使用經驗格林函數法中 0.5-8.0 Hz 上。將特徵化震源模型中所包含對應斷層破裂錯動集中區(asperity)面積大小，與 Somerville et al. (1999)[5]制訂標準數化有限斷層滑移震源模型所推估之經驗規則比較(如圖 6)，資料點與其經驗迴歸線非常接近，再次驗證其強地動產生區域面積大小之合理性。

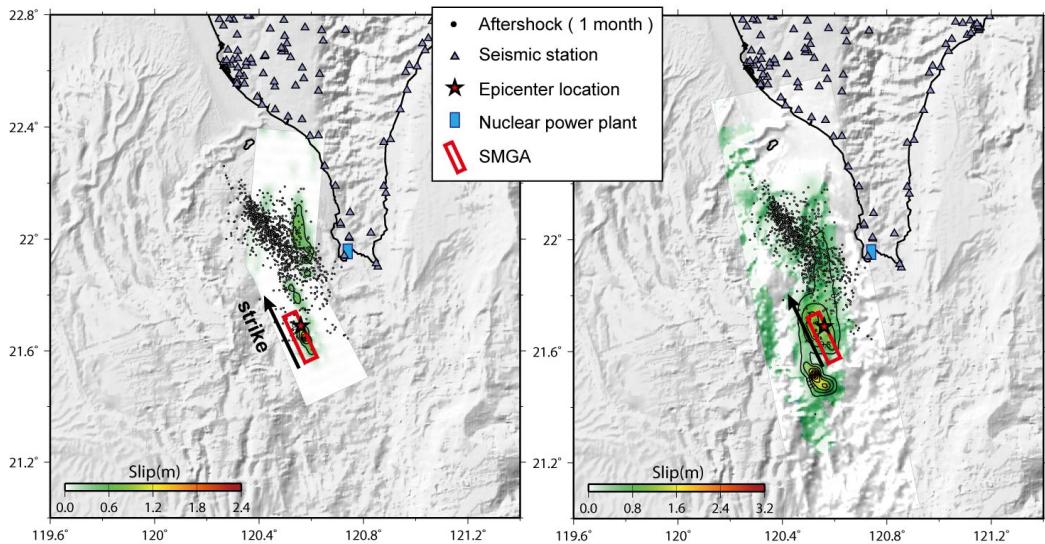


圖 5 紅色方框表示之強地動產生區域與 Yen et al. (2008)[4]震源逆推滑移模型(左圖)及 Lee et al. (2008)[3]震源逆推滑移模型(右圖))結果之比較

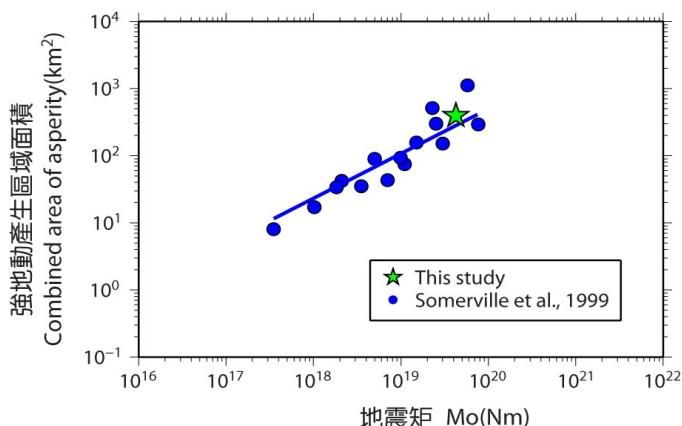


圖 6 強地動產生區域面積與 Somerville et al., (1999)[5]所推估其之隨地震矩大小之經驗關係式比較，綠色星號為對應本研究中所推求之特徵震源模型之強地動產生區域面積大小

三、地震波模擬方法

3.1 低頻地震波模擬

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到地表之地震動，逐漸進步到考慮多層水平均質介質反應。由於計算快速，且只針對低頻地震波進行模擬，故可得到與實際觀測波形相符之合理結果，以上提及的地震波模擬研究，可以提供大於 1 秒之長週期（亦即頻率 1 Hz 以下）之特定目標地點所反應的模擬地震波。本研究之低頻地震波採用 Zhu and Rivera 於 2002 年[7]提出之理論方法，簡稱 FK method，可於層狀速度構造中計算點震源於地表特定位置接受之合成強地動速度時間歷時。

3.2 高頻地震波模擬

低於 1 秒週期($> 1 \text{ Hz}$)的高頻強地動歷時，採用的方法為隨機格林函數法(Stochastic Green's Function Method) [8] (Boore, 1983)。對地震非常稀少的區域及尚未擺設地震儀器的地區將可適切地模擬計算高頻強地動歷時，如此可以完成該區的理論高頻地震波計算。本研究採用隨機格林函數法計算高頻地震波。其中，隨機格林函數法所使用之路徑修正衰減因子 $Q=117f^{0.77}$ (f 為頻率)。此外，幾何擴散衰減模型，則為 $1/R^b$ (b 參數設定條件為 $b = 1.0$ 當 $R < 50$ 公里; $b = 0$ 當 50 公里 $\leq R < 150$ 公里; $b=0.5$ 當 $R \geq 150$ 公里)， R 為震源距離，此為 Roumelioti and Beresnev (2003)[9]提出隨機格林函數法研究台灣地區地震所採行之設定。而場址放大因子函數則引用 Boore and Joyner (1997)[10]推估堅硬及軟弱地盤之平均場址放大值，並參考 Beresnev 2002[11]所提出軟弱地盤對於不同頻率所造成非線性放大之平均倍數，以修正不同場址放大數據。

3.3 合成地震波模擬

結合計算低頻及高頻的地震波，以 1 Hz 附近頻率為調和頻率，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，一般稱為混合合成法(Hybrid Method)。本研究採用 Kamae et al.(1998)之混合合成法技術，合成特定位置小地震之寬頻地震波，結合前節所推估之特徵化震源模型，以混合法技術求得小地震寬頻地震波作為經驗格林函數，採行 Irikura (1983)[12]之經驗格林函數法，順推模擬四個強震觀測站位置之寬頻地震波。

四、地震波模擬結果

經由經驗格林函數之小地震合成混合波形後，再以隨機格林函數法所模擬之小地震地震波當做經驗格林函數，重現於選定實際地震觀測站及核電廠內四個假定虛擬觀測站之強地動加速度歷時。圖 7 呈現推估強地動產生區域為寬 20 及長 20 平方公里正方形區域，圖中表示成傾角 70 度投影至地表結果，紅色星號為 1226 屏東地震震央位置，綠色為經驗格林函數法中之初始破裂開始點。選取之地震觀測站座落位於震央距 25 至 50 公里範圍內。

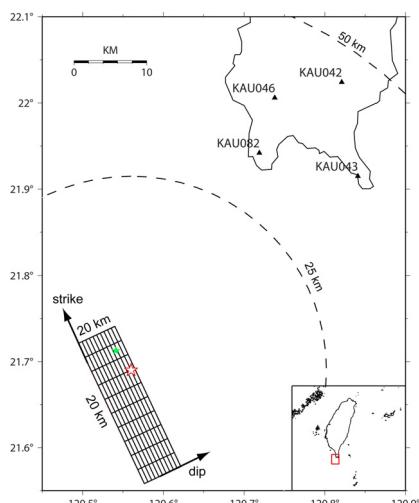


圖 7 屏東地震投影之地表特徵化震源模型(黑色網格表示區域)與模擬測站位置關係圖

混合合成地震波與實際觀測波形及頻譜擬和比較結果如圖 8 所示。時間域上加速度、速度及位移波形振幅可大致對應模擬結果，說明以混合合成法以實際發生地震資料驗證了於台灣直接運用的可行性，以此技術，我們期望未來可以運用來計算假定地震模擬任何特定位置之寬頻加速度強地動歷時，直接運用於後續的工程地震耐震評估上。雖然現階段研究模擬結果於能量以及時間延遲差異仍有些誤差，這些主要取決於隨機格林函數法中所設定之路徑及場址因子函數的準確性。此外，從加速度頻譜上，低頻的部份有振幅上的差異，推斷其差異來自於假定速度構造的解析為主要導致因素，然而目前使用之速度構造模型已為現階段此區域最新之研究結果，未來若有更新的路徑及場址只因子函數及速度構造模型，將有助於地震波模擬的準確度提升。

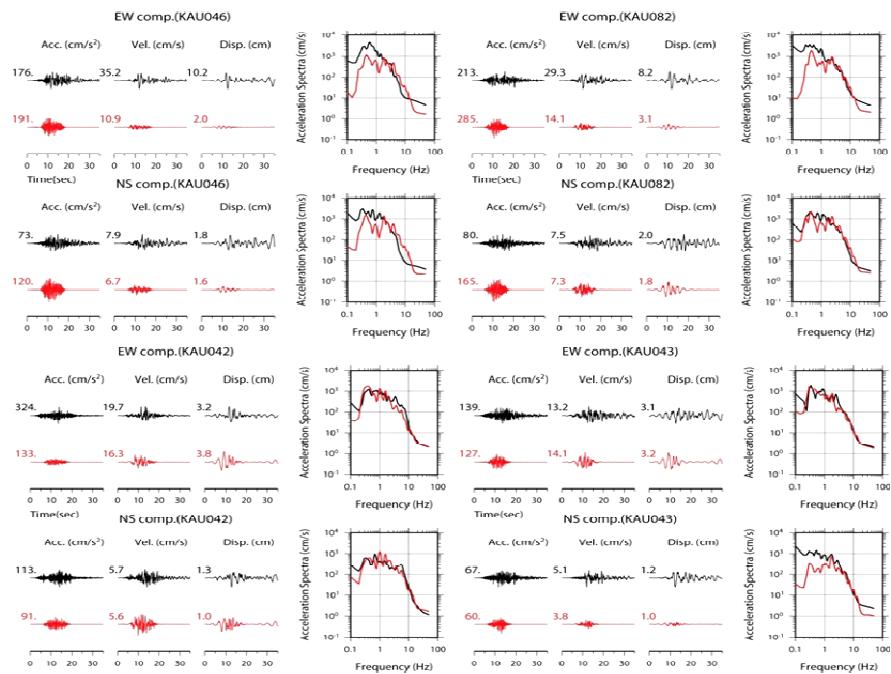


圖 8 使用混合法合成四個觀測站之觀測及模擬波形與頻譜比較圖

五、討論及建議

針對 2006 年 12 月 26 日的屏東地震主震，本研究運用前述混合合成法計算，再進行強地動模擬及結果檢驗後，可合理地求得地震歷時模擬結果。根據檢驗結果探討強地動模擬方法所模擬地震波與實際觀測波形上的差異性，可提升估計未來境況地震強地動反應方式的可靠性，建立合理且具代表性的加速度時間歷時模擬參數資訊，建立特定需求場址的強地動時間歷時資料，提供工程地震學界參考與應用。本研究採用之四個測站，其東西及南北分量之加速度、速度、位移波形與觀測值比較，相對於鄰近測站比較而言，場址及路徑反應即便存在差異，亦於合理差異範圍內。由於求取高頻地震波之隨機格林函數法所採用之模擬相關參數所參考的資訊，於研究區域未有相關研究，故無法取得更可靠的數據以供地震波模擬之用。對於局部場址

效應使高頻段振幅放大的影響單純使用平均放大倍數，因此計算之兩水平分量加速度及速度時間序列振幅，可能造成明顯的高估，因此造就可能誤差來源。此外，低頻地震波模擬部分，鄰近海域速度構造可合理描述，對於四個觀測點則並未考慮淺部地下速度構造，致使低於1 Hz以下模擬地震波出現誤差。地震發生後在地表造成的強地動受到諸多因素的影響，主要可分為三部分因素：震源效應(source effect)、路徑效應(path effect)及場址效應(site effect)三項。就未來提升並精進地震強地動模擬議題上，提出以下幾項建議：

(1)高頻隨機格林函數法之重要參數研究：於本研究高頻地震波計算中，衰減因子函數及幾何衰減函數兩大因子對於地震模擬結果影響甚鉅，可透過以往豐富的實際觀測地震記錄，逐步建構此項重要關鍵因子於特定重要設施區域的經驗模式。

(2)非線性場址放大效應研究：由 Lee and Tsai (2008)[6]年採用鑽井資料重新描繪台灣 Vs30 分布狀況，這樣的資訊提供特定地點可能場址放大效應。然而，資訊的空間解析上，以特定位置空間尺度可能只能假設為同一場址分類。然而，在研究區域地質構造的側向變化存在下，以同一個分類將無法有效提供特定地點的數據，進行研究地點之非線性場址放大效應函數之研究有其必要性。

六、致謝

本研究承蒙行政院原子能委員會核能研究所核能主軸計畫(NSC 101-3113-P-042A-004)部分經費補助，特此致謝。

七、參考文獻

- [1] Kamae, K., Irikura K., and Pitarka A., "A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function," Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 88, pp. 357-367 (1998).
- [2] Kamae, K. and Irikura K., "Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion," Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 88, pp. 400-412 (1998).
- [3] Lee, S.J., Liang, W.T. and Huang, B.S., "Source mechanisms and rupture processes of the 26 December 2006 Pingtung earthquake doublet as determined from the regional seismic records," Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 19, pp. 555-565, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.555(PT) (2008).
- [4] Yen, Y.T., Ma K.F. and Wen Y.Y., "Slip partition of the 26 December 2006 Pingtung, Taiwan (M 6.9,M6.8) earthquake doublet determined from teleseismic waveforms," Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 19, pp. 567-578, doi:10.3319/TAO.2008.19.6.567(PT) (2008).
- [5] Somerville, P., Irikura K., Graves R., Sawada S., Wald D., Abrahamson N., Iwasaki Y., Kagawa T., Smith N., and Kowada A., "Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion," Seism. Res. Lett., Vol. 70, pp. 59-80 (1999).

- [6] Lee, C.T. and Tsai, B.R., "Mapping Vs30 in Taiwan," *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* Vol. 19, pp. 671-682. (2008).
- [7] Zhu, L. and Rivera, L.A., "A note on the dynamic and static displacements from a point source in multi-layered media," *Geophys. J. Int.* Vol. 148, pp. 619-627 (2002).
- [8] Boore, D. M., "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.73, pp. 1865-1894 (1983).
- [9] Roumelioti, Z. and Beresnev, I.A., "Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1999 Chi-chi, Taiwan, earthquake: Application to rock and soil sites with implications for nonlinear site response," *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 93, pp. 1691-1702 (2003).
- [10] Boore, D.M., and Joyner W.B., "Site amplifications for generic rock sites," *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol. 87, pp. 327-341 (1997).
- [11] Irikura, K., "Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes," *Bull. Disast. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ. Vol. 33, pp. 63-104. (1983).
- [12] Beresnev, I.A., "Nonlinearity at California generic soil sites from modeling recent strong-motion data," *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 92, pp. 863-870 (2002).