0206花蓮地震強地動記錄與近斷層波形特徵

郭俊翔　黃雋彥　林哲民　趙書賢　林沛暘
國家地震工程研究中心

溫國樑
中央大學地球科學系

蕭乃祺　林金泉
交通部中央氣象局地震測報中心

摘　要

0206花蓮強震在花蓮市區造成嚴重災害，強震資料顯示PGA震度7級測站分布範圍大，但較為零散，而PGV震度7級區域則集中在米崙斷層中段至南段區域，為強烈的速度脈衝所致；微地動分析結果顯示本次地震PGV震度7級區域之地盤自然頻率約在0.8 Hz至1.2 Hz之間，而主震水平向反應譜顯示米崙斷層鄰近測站的譜加速度分別在1秒和2秒附近有顯著放大，本研究認為1秒譜加速度的放大是由場址效應所造成，而2秒譜加速度的放大皆出現在東西方向，故推測是由斷層破裂效應而導致；近斷層測站垂直向PGA接近或高於水平向PGA，可能是土壤非線性效應的影響。

關鍵字：強地動、微地動、速度脈衝、場址效應、土壤非線性。

Strong Ground Motions and Characteristics of Near－Fault Waveform of the 0206 Hualien Earthquake

Chun-Hsiang Kuo　Jyun-Yan Huang　Che-Min Lin　Shu-Hsien Chao　Pei-Yang Lin
National Center for Research on Earthquake Engineering

Kuo-Liang Wen
National Central University, Department of Earth Sciences

Nai-Chi Hsiao　Chin-Chuan Lin
Seismological Center, Central Weather Bureau

Abstract

The devastating 0206 Hualien Earthquake has caused severe damages in downtown Hualien City. Strong motion records showed that an intensity of VII in PGA scattered over a wide range, while an intensity of VII in PGV, due to velocity pulses, were observed around the central and southern portions of Milun Fault. Results of microtremor measurements indicated that the region, suffered from the intensity VII of PGV, showed a natural frequency of 0.8 to 1.2 Hz. The mainshock of the earthquake presented two significant peaks at 1 and 2 sec in period of the horizontal acceleration spectra. The results of this study summarized that the peak at 1 sec seemed to be due to local site effects, whereas the peak at 2 sec was attributed to the fault rupture observed in the fault-normal E-W components. Moreover, the strong soil nonlinearity in this area may be the cause of the greater vertical PGA as compared to the horizontal PGA at near-fault stations.

Key Words： strong motion, microtremor, velocity pulse, site effect, soil nonlinearity.

一、前　言

2018年2月6日晚間23時50分42秒，適逢20160206美濃強震的2週年，花蓮市區受到強烈的地震波侵襲，造成4棟建物嚴重倒塌與傾斜，2座橋梁嚴重損壞，並造成17人罹難，上述主要災害皆發生在米崙斷層沿線。雖然傷亡人數不若2年前的美濃地震，但此地震的地動值更強烈，而其強地動頻率特性相較之下也更具特殊性。

中央氣象局第一時間發布此地震震央在北緯24.14度、東經121.69度，位於花蓮市北偏東方近海，震源深度10公里，而其芮式規模為6.0，而經過重定位後，震央位置為北緯24.1007度，東經121.7297度，震源深度6.31公里，芮式規模為6.26，重定位後的震央稍偏向東南方，震源深度減少，而規模則提高。

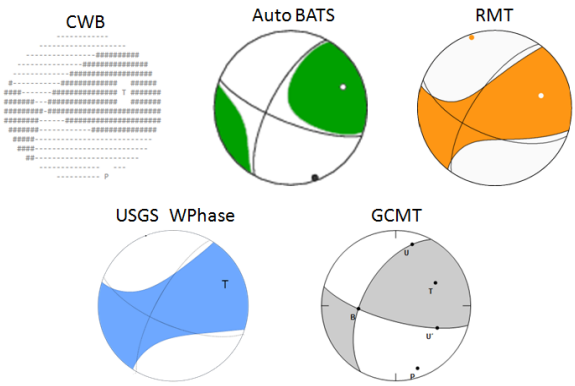
中央地質調查所於2月12日發布新聞稿(經濟部中央地質調查所，2018)，提到米崙斷層沿線有分布廣泛的地表破裂，部份地點有噴砂現象，根據初步地表調查與全球衛星定位系統測量結果指出，米崙斷層沿線有產生錯動，且地表破裂大多位於105年12月(經濟部中央地質調查所，2015)公布的米崙斷層活動斷層地質敏感區的範圍內(敏感區寬度約300公尺)。

中央氣象局於2月23日已先在地球物理資料管理系統(GDMS)釋出28個自由場測站的強震資料(Liu et al., 1999; Shin et al., 2013)，這些測站多位於米崙斷層兩側及速報站震度較大的區域；國研院國家地震工程研究中心設有一全臺地震網，共37個測站，另在全台設有地震預警系統(Lin et al., 2012)本研究結合兩個單位的強震記錄一起進行強地動記錄的分析，以探討0206花蓮地震的強震特性與近斷層地動特徵。

二、震源特性與前餘震分布

2.1 震源機制解

地震震源的破裂型態常使用震源機制解來表示，使用簡單的海灘球圖示即可迅速協助地震學家了解震源破裂面的幾何樣貌。圖一為中央氣象局(CWB)、中研院地球科學研究所(Auto BATS和RMT)、美國地質調查所(USGS WPhase)、以及全球地震矩張量(GCMT)等震源機制參數之結果(交通部中央氣象局網站，2018；台灣地區地震科學資訊系統，2018；美國地質調查所地震災害計畫，2018；全球地震矩張量震源解資料搜尋網站，2018)，雖然各單位所用的測站資料及計算方法有所不同，但結果相當接近。第一組斷層面解之走向216度、傾角56度、滑移角26度，是東北-西南走向，向西傾之破裂面；第二組斷層面解走向111度、傾角69度、滑移角144度，是一接近東西走向，高角度向南傾之破裂面。因0206花蓮地震中米崙斷層確實有多處錯動的證據，因此以第一組斷層面(216/56/26)較接近實際狀況，其為一走向北偏東36度，以56度向西下傾的左移斷層，略帶逆衝分量，而根據地質調查結果，米崙斷層應為向東傾之左移斷層兼具逆衝分量，屬於第一類活動斷層(經濟部中央地質調查所，2015)，與震源機制解顯示的向西傾不同，此差異仍待後續研究分析來釐清。

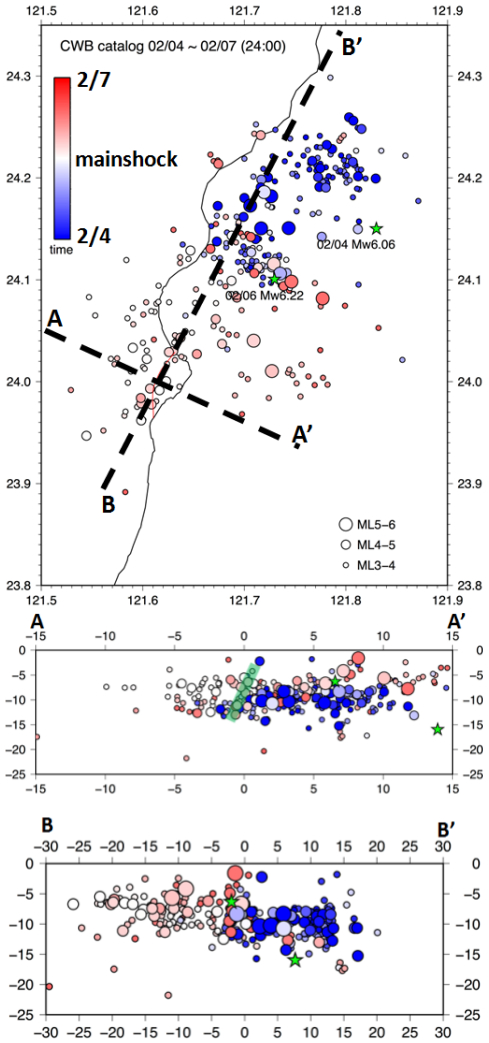


圖一　國內外各相關單位對0206花蓮地震的震源機制解算結果

2.2 前震、主震和餘震之空間分布

0206花蓮地震發生前，鄰近區域之地震活動度已連續數天顯著提高，在2月4日21時56分發生一起芮式規模M_L5.8(震矩規模M_w6.06)之強震，當時這起地震被認為應是主震，之後仍持續發生芮式規模3以上地震，直至2月6日芮式規模M_L6.26(震矩規模M_w6.22)主震發

生。本研究使用圖二分析2月4日至2月7日地震序列的空間分布(僅畫出芮式規模大於3.0的地震)，我們以主震發生時間為標準，前震按其與主震的時間差，以不同深淺的藍色代表其相對時間，餘震按同樣原理，但以紅色系代表其相對時間，前餘震時間和主震越接近則其顏色越接近白色，不同大小圓形代表不同規模的地震，主震(Mw6.22)及最大前震(Mw6.06)則分別以綠色星號標示其位置，圖二中、下圖分別代表圖二上圖中AA'和BB'兩組剖面圖。由圖二可看出大部分前震(藍色系列)分布在主震震央以北，深度多大於7公里，而餘震(紅色系列)多集中在主震震央以南，深度分布的範圍也較前震廣。從AA'剖面中點處的餘震分布大略可看出一高角度向西傾的趨勢(如綠色半透明條帶所標示)，和前述震源機制向西傾的特性一致，代表這個位置可能確實存在向西傾之破裂面。



圖二　主震和其前、餘震之空間分布

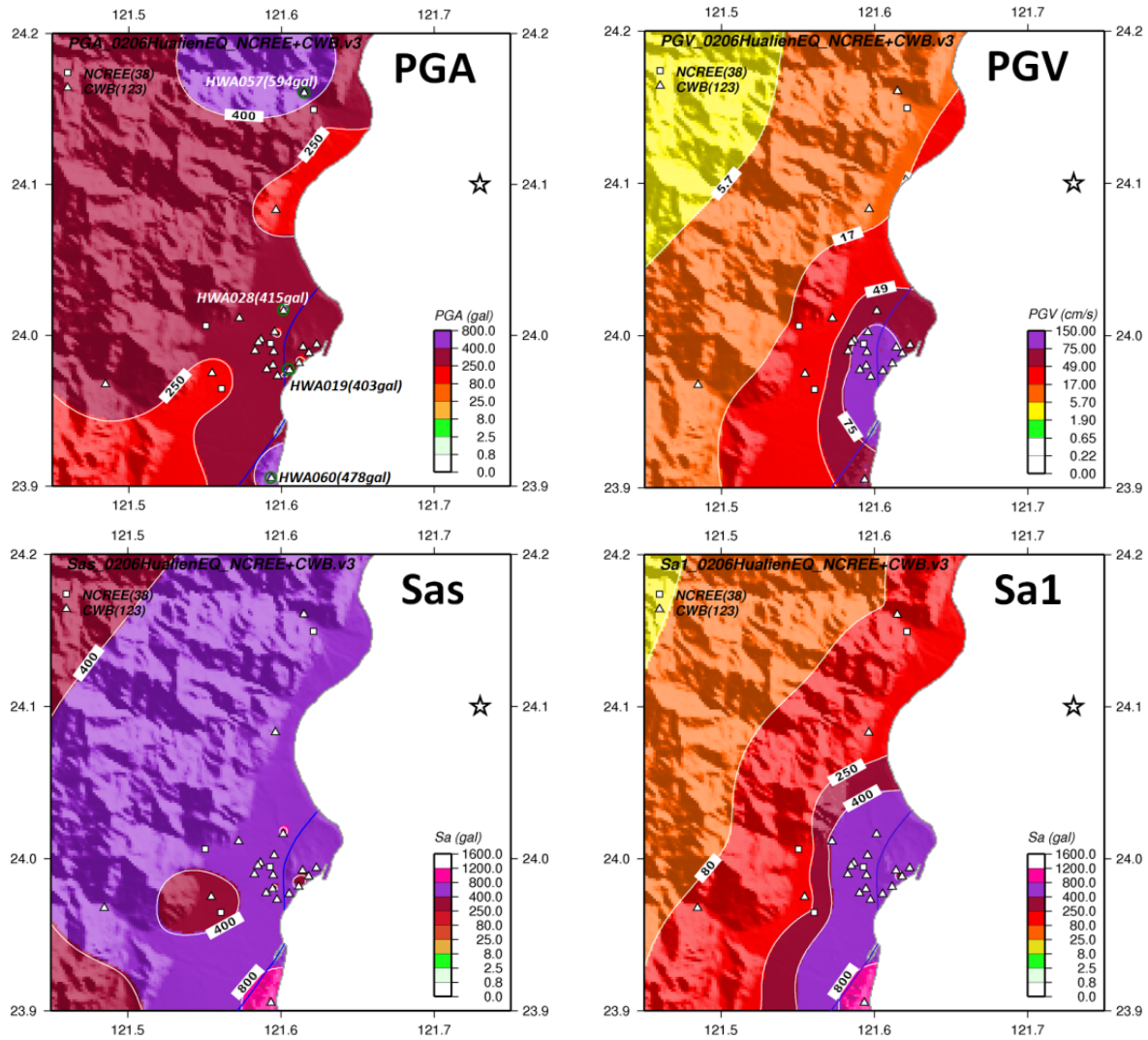
三、強地動特性分析

3.1 震度分布特性

氣象局除了地震速報所使用的110個即時站資料外，後續先公布了鄰近花蓮市共28個自由場強震站資料。國震中心設有一全臺地震網(SANTA)，共37個測站，每個測站都同時設有連續觀測的強震儀和寬頻地震儀，加速度和速度歷時資料即時傳輸回到國震中心，當有地震發生時，此系統會自動觸發，並計算各測站之最大地表加速度(PGA)、最大地表速度(PGV)、0.3秒譜加速度(Sa0.3)、1秒譜加速度(Sa1.0)等震度參數，寬頻地震儀對微小的振動相當敏銳，可監測臺灣境內小規模地震或山崩等現象(Chao et al., 2017)，並可記錄到臺灣鄰近國家所發生的大規模地震波形。此系統也已結合台灣大學地質系所開發的P-Alert系統，在地震時能發揮即時預警的功能(Wu et al., 2016)。國震中心另有一套現地型地震預警系統(Hsu et al., 2016)，有數個測站位於花蓮地區。本研究彙整氣象局和國震中心觀測網的強震資料，扣除部份斷訊無法使用的測站資料，分別有123個和38個測站可用，花蓮地區大部分測站的資料已取得，這些強震觀測資料所提供的第一手分析結果詳述如後。

0206花蓮地震中，PGA最大的測站為HWA057太魯閣站(南北向：594 gal)，此測站震央距僅12.7公里；PGV最大的測站為HWA014信義國小站(東西向：146 cm/s)，震央距為19.1公里；Sa0.3最大的測站為HWA060鹽寮站(南北向：1116.7 gal)，震央距為25.4公里；Sa1.0最大的測站一樣為HWA060鹽寮站(南北向：1161.6 gal)；Sa3.0最大的測站為HWA019花蓮站(東西向：742.6 gal)，震央距為18.2公里。本研究將PGA、PGV、Sa0.3、Sa1.0的空間分布繪於圖三，可幫助了解不同震度的空間分布情況，這也代表不同週期強地動的分布特性。

以PGA來說，觀測到七級震度(PGA >400 gal)的測站共有5個，分別為ILA050南澳站、HWA057太魯閣站、HWA028嘉里國小站、HWA019花蓮站、HWA014信義站、HWA060



圖三　花蓮地區震度及測站分布

鹽寮站，其範圍由北至南橫跨60公里，但分布零散，此現象頗為特別。若以PGV來看，觀測到七級震度(PGV >75 cm/s，Wu et al., 2003)的測站共有10個，集中於米崙斷層中至南段，也就是花蓮市區一帶。以Sa0.3來看，大部分區域的短週期譜加速度值都介於400 gal到800 gal之間，僅有嘉里國小和鹽寮兩個測站高於800 gal。以Sa1.0來看，譜加速度400 gal以上的區域集中在米崙斷層至嶺頂斷層一帶，花蓮市區也包含在此範圍中，數棟10層樓左右的樓房倒塌可能與1秒震波之關聯性較大。

此地震的震央位於海上，因此缺乏儀器記錄可以了解震央周圍的強地動情況，其破裂特性可能相當特殊，才會造成PGA震度七級的測站分布如此廣泛而零散；而米崙斷層沿線有相當明顯的錯動，因此由斷層錯動引起的長週期震波(PGV和Sa1.0)集中在斷層兩側出現並造成災情。2016年美濃地震中，大部分的災情皆分布在PGV > 30 cm/s的範圍內(饒，2017)，這兩個地震案例都顯示出災損與PGV有較強的相關性。

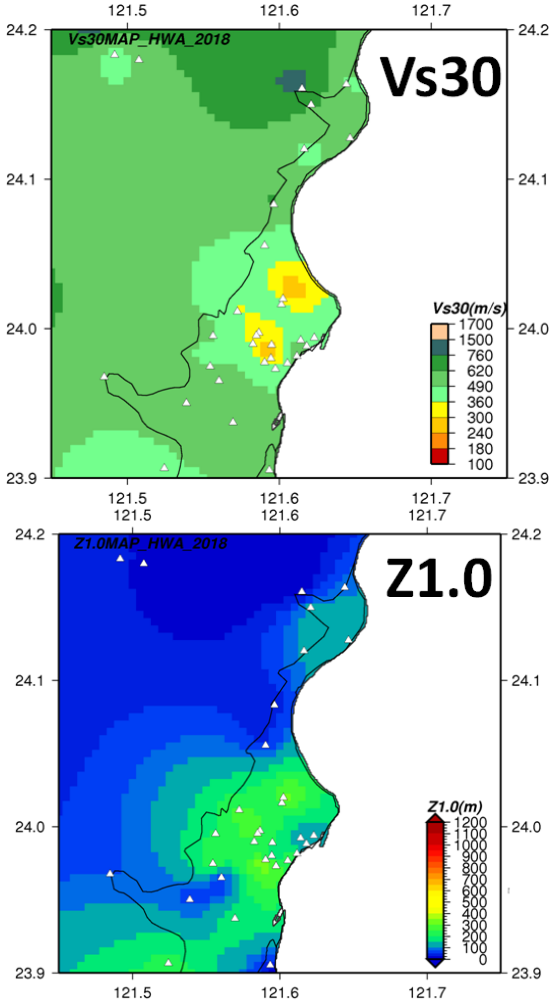
本研究所採用的強震資料中，共有10個位於花蓮市的測站其垂直向PGA高於另外兩個水平向PGA，且這些測站的PGV皆很高，然而其PGV仍以水平向較大，推測應是強震造成的土壤非線性效應，使得水平向高頻震波產生折減，但垂直向震波和頻率較低的PGV則沒有受到影響。國外的最新研究也指出(Bozorgnia and Campbell, 2016)，近斷層區域的短週期垂直向地動常會超過水平向地動，但長週期仍是水平向地動較大，而此現象的成因主要為土壤非線性效應。

3.2 區域場址特性

近地表地層的波速特性對地震波振幅影響甚鉅，不同的波速會對不同頻率的地震波造成不等的放大作用，美國學者為了統一定義地質條件，而使用Vs30(地表下30公尺的平均剪力波速)作為近地表地層波速高低的指標，它同時也反應地層的堅硬程度，鬆軟的土層波速低，堅硬的岩層波速高，且與地震波的放大特性有顯著的關聯性(Borcherdt, 1994)。因為Vs30的方便性和普遍性，逐漸被許多國家實際應用於耐震設計規範當中，近年來則是大量應用在強地動預估式(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)相關研究中。由於世界各國所在地理位置和地質條件不同，雖有許多國家使用Vs30作為震波放大效應的指標，但耐震設計規範中所採用的地盤分類標準卻依各國地質特性而略有不同，如美國常用的國家地震災害減災計畫(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)準則(BSSC, 1997)，其地盤分類標準和臺灣現行的耐震規範所使用的地盤分類標準(內政部營建署，2011)即有所不同。然而Vs30僅代表極淺層30公尺內的平均S波速度值，雖然使用上相當便利，卻也被認為無法完全反應沖積層較厚地區的場址特性，因此美國新一代地震動衰減律計畫中，開始提出使用深度參數如Z1.0 (從地表至S波速度大於等於1.0 km/s的地層之深度)的想法，並已實際將此參數納入GMPE當中使用(Abrahamson et al., 2014; Boore et al., 2014; Chiou and Youngs, 2014)。

郭等人(2017)基於鑽探井測波速剖面，提供自由場強震站實測Vs30，並對數種由代理參數(proxy)預估的Vs30進行評估，對於缺乏實測波速剖面的測站則建議使用準確性較高的預估結果作為其Vs30；Z1.0參數則是由波速井測剖面、微地動陣列、接收函數法和微地動單站頻譜比等結果所得。本研究擷取花蓮地區結果，從而繪出其分布圖於圖四。

圖四中白色三角型為測站分布，實際上僅測站位置具有Vs30和Z1.0之參數，其餘位置採用內插方式而得。花蓮地區的Vs30多在360 m/s到760 m/s之間，以NEHRP標準而言是C類地盤(360~760 m/s)，但在花蓮市區有部份區域Vs30較低，約在240 m/s到360 m/s之間，以NEHRP標準來說是D類地盤(180~360 m/s)，若以國內耐震設計規範標準來看，除了HWA010明義國小(Vs30=250 m/s)，其餘皆為第一類地盤(>270 m/s)，花蓮市淺層波速特性大致上來說在米崙斷層以西較為鬆軟，在米崙斷層以東較為堅硬，而根據鑽探資料顯示淺部地層主要為砂、黏土、礫石所組成。Z1.0分布圖中顯示剪力波速低於1 km/s的沖積層深度在米崙斷層以西較厚，最深約有200公尺以上，斷層以東則小於100公尺。



圖四　花蓮地區Vs30和Z1.0之分布

3.3 微地動量測地盤頻率

主震發生後，國震中心強地動組協同中央大學溫國樑教授團隊立即至花蓮地區進行微地動量測，特別於主要災損點及重要強震站進行現地測量，經頻譜分析後，將單站頻譜比

(HVSR)之主要放大頻率和重要災損點的HVSR結果合併繪於圖五。

一般相信微地動HVSR所得主要共振頻率為地盤自然頻率，和地層波速與厚度之綜合效應有關(Kuo et al., 2015)，由主頻分布可見地盤自然頻率在花蓮市東側較低，約0.8 Hz～1.2 Hz(黃色區域)，向西逐漸增加到1.2 Hz～1.5 Hz(綠色區域)，到達中央山脈區域時達到1.5 Hz以上(藍色區域)。三處主要災損點(綠色三角形)的HVSR彼此間頗為相似，皆於1～2 Hz間有兩個峰值，而在0.3 Hz處另有一峰值，代表可能有一明顯速度界面存在此區域深處。

3.4 強震資料與地動預估式比較

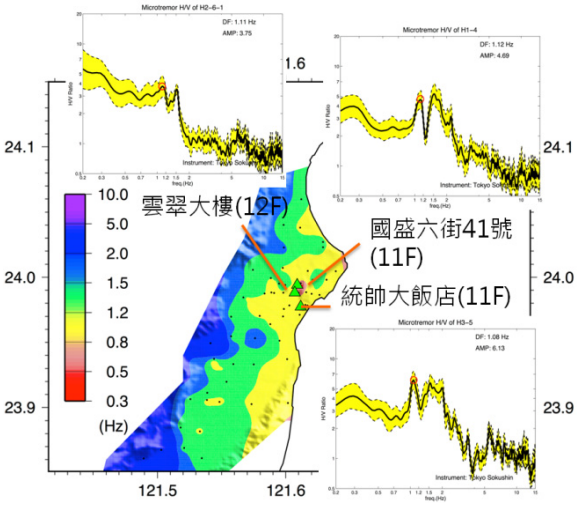
強地動實測資料與趙等人(2017)之GMPE比較結果如圖六所示，左圖為PGA而右圖為Sa1.0。此GMPE使用台灣本土的強震及場址資料庫，在回歸分析過程中考慮各種符合地震學之物理機制，如震源機制和型態、規模與距離飽和、幾何擴散、非彈性衰減、線性和非線性場址效應等，並以統計方式考慮自然與統計不確定性等。此GMPE適合用於臺灣，且其建立之方法與參數符合國際最新進展。

圖六中藍色資料點為使用震源距的資料分布，紅色則是依本研究初步估算之最短斷層距進行調整之後的資料分布，三條不同的曲線分別代表GMPE考慮不同Vs30的場址效應之結果，以此代表GMPE在此區域的可能變化範圍。在給予資料點適合的距離(最短斷層距)後，PGA實測值已相當接近GMPE曲線，但Sa1.0實測值普遍仍比GMPE偏高，因目前國內外的GMPE仍無法合理且有效地考慮到斷層破裂所造成的速度脈衝現象，因此對近距離的長週期譜加速度仍常有低估的情況。

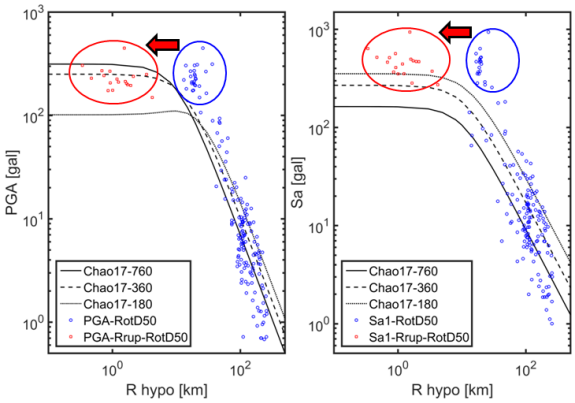
四、近斷層波形特徵

4.1 速度脈衝波形辨識

大規模地震發生時，鄰近斷層的測站所觀測到的速度歷時，常伴隨具有單一頻率、長週期且大振幅的速度脈衝，該脈衝在長週期有相當高的譜加速度值，且該特殊的速度歷時亦可能會造成結構非線性耐震需求的增加(Gillie



圖五　花蓮地區微地動主頻分布與HVSR



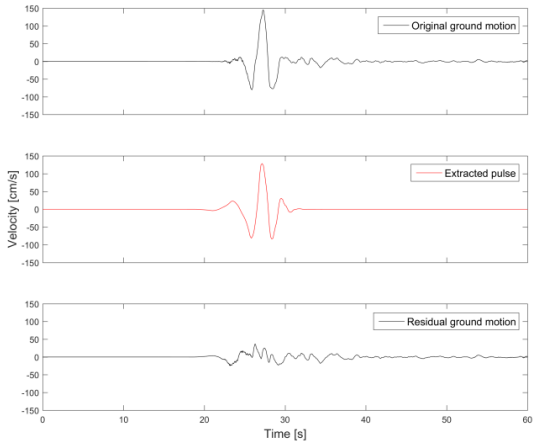
圖六　觀測資料與GMPE之比較

et al., 2010)，工程界將上述現象簡稱為近斷層效應。為了以一致性的量化方式識別地震歷時是否含有速度脈衝，Shahi and Baker(2014)提出基於小波方法的速度脈衝指標(Pulse Indicator, PI)分析方法，使用db4小波作為提取速度脈衝的依據，並分析原始波形和殘餘波形的PGV比與能量比，從而計算加速度歷時的PI值，若PI>0，則判定該波形具有速度脈衝，若PI<0，則判定該波形不具有速度脈衝。

本研究使用該方法，以HWA019為例，該測站速度波形判定為具有速度脈衝，而其原始速度波形(黑色實線)、所提取之速度脈衝波形(紅色實線)與殘餘波形皆繪於圖七中。

4.2 速度脈衝測站分布

本研究將花蓮市所有測站進行脈衝判別分析，共18個測站判定具有速度脈衝，分析過程中能一併得知速度脈衝之波形、峰值、方

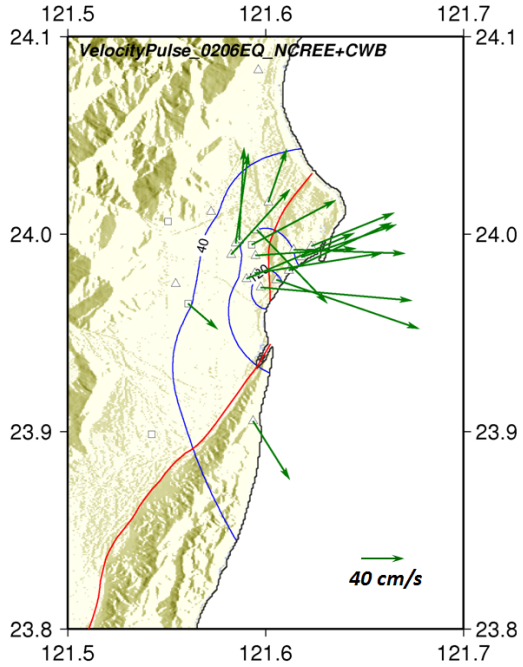


圖七　HWA019速度脈衝判別結果(PI=51)

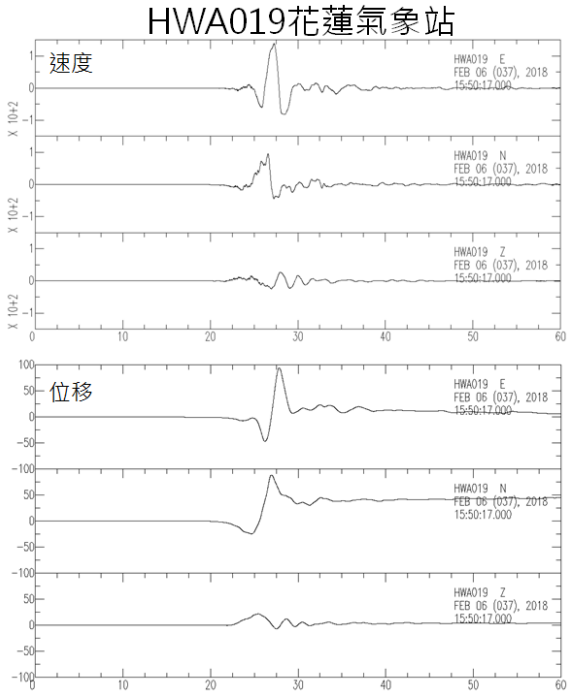
向、與脈衝週期(Tp)等相關資訊，初步分析結果發現許多測站帶有速度脈衝訊號，這些測站主要分布在米崙斷層兩側，而鹽寮站雖已位於花蓮市南方的海岸山脈，較靠近嶺頂斷層，仍然記錄到強烈的速度脈衝訊號，另外稻香國小測站也已位於米崙斷層南端尾段之西方，距離斷層超過4公里，也仍觀測到速度脈衝。圖八將測站的最大速度脈衝大小及方向以綠色箭頭表示，藍色曲線為PGV等值線(由內至外分別為120 cm/s、80 cm/s、40 cm/s)，米崙斷層兩側的測站皆判定為具有速度脈衝，且最大速度脈衝的方向多為垂直米崙斷層之東西向。

綜合評估具有速度脈衝特性的測站空間分布，初步判定斷層兩側4.2公里內都受到近斷層脈衝的衝擊，鹽寮站雖距米崙斷層已遠，但仍具有速度脈衝，因此本報告認為可將PGV分布等值線作為輔助判斷速度脈衝影響範圍之依據，由圖八可推估，以此案例而言，PGV為40 cm/s之等值線大概為近斷層速度脈衝的影響範圍。

近斷層測站常因受到強烈地震動因而造成基線偏移，但此效應卻不容易在加速度記錄中看出來，而必須積分到速度和位移時，其效應才會顯示出來，若加速度記錄經過適當的基線修正，則可顯示出斷層的同震位移(co-seismic displacement)，圖九以花蓮站為例，進行適當的基線修正後其速度和位移歷時如圖所示，南北向位移歷時可顯示出向北偏移約50公分同震位移，而東西向位移也顯示出略為向東的同震位移現象，位移歷時的同震位移符合米崙斷層左移錯動的特性。



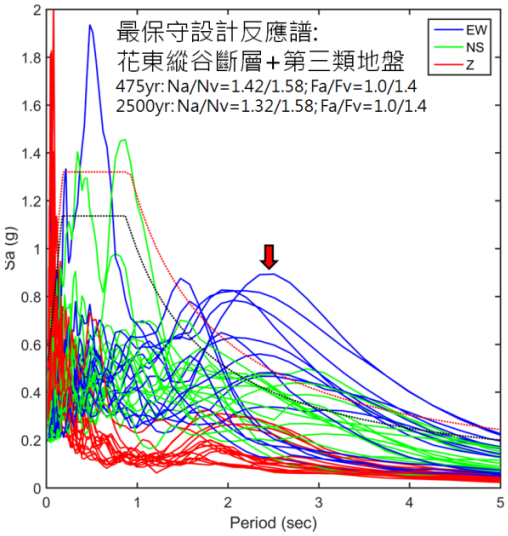
圖八　最大速度脈衝方向



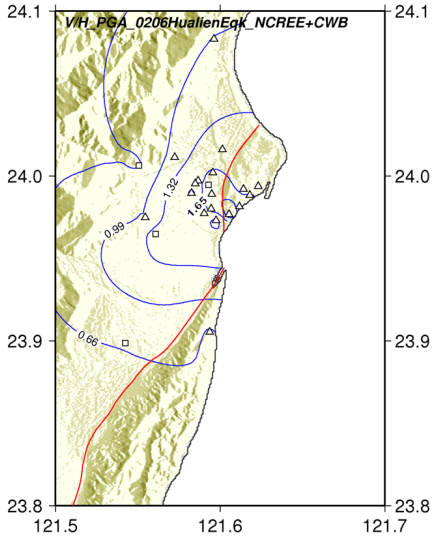
圖九　花蓮站速度與位移歷時

4.3 與設計反應譜之比較

為測試現行耐震規範的設計反應譜在0206花蓮地震近斷層速度脈衝下的表現，本報告將所有具速度脈衝測站的三分量加速度反應譜和花蓮地區設計反應譜重疊比較，結果如圖十。圖中設計反應譜採用花蓮縣475年和2500年回歸期的設計地震(S_S^D、S_S^D)和最大考量地震(S_S^M、S_1^M)的水平譜加速度係數，並考量距



圖十　含速度脈衝測站的加速度反應譜與設計反應譜之比較



圖十一　V/H ratio(藍線)與斷層(紅線)之空間分布

離花東地區斷層2公里內的近斷層放大因子(Na、Nv)，同時也考慮第三類地盤場址放大因子(Fa、Fv)，以作為保守估計(雖然依據此處Vs30的分布，多數測站皆為第一類地盤)。由比較結果可明顯發現，由於速度脈衝的影響，使得水平向加速度反應譜在週期1.5秒～4.5秒處超出設計地震和最大考量地震的反應譜，尤以東西向(藍線)更為明顯，即使圖中已進行保守估計而將設計反應譜提高，但許多測站的譜加速度仍超過長週期的設計值和最大考量值，可能對15層以上的高樓有重大的衝擊。由圖十中可發現，南北向反應譜(綠色)多在1秒~1.5秒間有一峰值存在，而東西向反應譜(藍色)除在1秒左右有一峰值之外，在2秒附近也常另有一相當明顯的峰值存在，因米崙斷層附近的地盤自然頻率約在0.8~1.2 Hz(圖五)，因此本研究認為1秒左右的反應譜峰值應是場址放大效應所引起，而週期2秒左右的反應譜峰值應是斷層破裂的震源效應所導致。

而3.1節中所述，花蓮市有10個測站的垂直向PGA超過水平向PGA，也明顯超過現行規範條文中，在近斷層區域將垂直地震力考慮為2/3水平地震力的規定。圖十一將各測站的垂直向和水平向PGA比值(V/H ratio)算出後畫成分布曲線圖，圖中之藍色曲線為V/H之分布，而紅色曲線為米崙斷層(北)和嶺頂斷層(南)，此分析中所用的水平向PGA是RotD50的值(Boore, 2010)，RotD50代表地動值在水平向所有角度的中位數(median)，類似傳統使用水平向幾何平均的概念。花蓮市區的V/H皆高於2/3(約0.66)，米崙斷層附近之V/H甚至大於1.3，幾乎為規範建議值的兩倍。

五、結論

所謂近斷層強地動效應意指，當大規模地震(約Mw5.5以上)發生時，在致震斷層鄰近的測站常會觀測到特殊強地動特性，常見的近斷層效應包括：上盤效應、破裂方向效應、同震位移等，這些效應綜合起來會產生較特殊現象，如速度脈衝就被認為是破裂方向效應和同震位移所造成的現象；大振幅的震波引起土壤非線性效應，加上距離震央近因而P波效應顯著，因此也常見到垂直向地動高於水平向地動的現象。1999年集集地震(Mw7.6)、2016年美濃地震(Mw6.5)及2018年花蓮地震(Mw6.3)的強震資料中都可觀測到顯著的近斷層效應。以2018年0206花蓮地震為例，就有相當明顯的速度脈衝(如圖七、圖八、圖十)，本研究認為此地震的速度脈衝是由斷層破裂、場址效應和同震位移所共同造成；而垂直向PGA大於水平向PGA的現象在此地震中也相當明顯，我們認為主要是土壤非線性效應造成水平向加速度振幅折減所造成。

據記載，米崙斷層前一次活動為1951年10月22日的花蓮地震序列(經濟部中央地質調

查所，2015)，當時同一天內連續兩起地震的芮式規模皆超過7，依此估算此斷層最近兩次活動僅相隔67年，台灣地震模型近年的相關研究也指出米崙斷層的地震回歸期僅有約70年，而預估規模可能為Mw6.4(Wang et al., 2016; Shyu et al., 2016)。目前此地區所採用的50年內超越機率10%的設計地震和50年內超越機率2%的最大考量地震標準，在此地震下，靠近米崙斷層區域的設計係數在長週期部份明顯不足(圖十)。因此本研究建議，花蓮市的水平譜加速度係數與近斷層修正因子應根據國內最新地震動震源分區結果、活動斷層參數、強地動資料和GMPE重新進行檢討評估，尤其是在長週期(1秒)的部份，應審慎評估如何確保建築物能承受近斷層速度脈衝，或在近斷層區域內限制建物高度以避開長週期速度脈衝的影響。

參考文獻

內政部營建署 (2011)，「建築物耐震設計規範及解說」。

台灣地區地震科學資訊系統(TEC-Thesis) (2018)，http://tesis.earth.sinica.edu.tw/showDetail.php?date=%222018-02-06%22&time=%2223:50:42%22 (2018年4月25日)。

交通部中央氣象局 (2018)，「地震活動彙整」http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm (2018年4月25日)。

全球地震矩張量震源解資料搜尋網站(GCMT) (2018)，「Global CMT Catalog Search」 http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html(2018年4月25日)。

美國地質調查所地震災害計畫網站(USGS) (2018)，https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000chhc#moment-tensor(2018年4月25日)。

郭俊翔、林哲民、章順強、溫國樑、謝宏灝 (2017)，「臺灣強震測站場址資料庫」，國家地震工程研究中心，臺灣。

經濟部中央地質調查所 (2015)，「活動斷層地質敏感區劃地計畫書(F0011米崙斷層)」。

經濟部中央地質調查所 (2018)，「107年0206花蓮地震地質調查初步結果」。

趙書賢、程毅豪、許喬筑、林柏伸 (2017)，「發展適用於台灣地區地殼地震與隱沒帶地震的水平向地震動模型」，國家地震工程研究中心，臺灣。

饒瑞鈞 (2017)，「2016高雄美濃地震 - 震後科學調查」，中華民國科技部，臺灣。

Abrahamson, N. A., Silva, W. J., and Kamai, R. (2014). "Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions." *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. A. (2014). "NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes." *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085.

Borcherdt, R. D. (1994). "Estimation of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)." *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-653.

Bozorgnia, Y., and Campbell, K.W. (2016). "Ground Motion Model for the Vertical-to-Horizontal (V/H) Ratios of PGA, PGV, and Response Spectra." *Earthquake Spectra*, 32(2), 951-978.

BSSC (1997). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, 1997 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary.", Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency, Report No. FEMA 302 and 303, Washington, D.C.

Chao, W. A., Wu, Y. M., Chen, Hongey, Chen, Y. G., Chang, J. M., and Lin, C. M. (2017). "A first near real-time seismology-based landquake monitoring system." *Scientific Reports*, 7, 43510.

Chiou, B. S. J. and Youngs, R. R. (2014). "Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra." *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.

Gillie, J. L., Rodriguez-Marek, A., and McDaniel, C. (2010). "Strength reduction factors for near-fault forward-directivity ground motions." Engineering Structures, 32(1), 273-285.

Hsu, T. Y., Wang, H. H., Lin, P. Y., Lin, C. M., Kuo, C. H., and Wen, K. L. (2016). "Performance of the NCREE's on-site warning system during the February 5 2016 Mw 6.53 Meinong earthquake." *Geophysical Research Letters*, 43, 8954-8959.

Kuo, C. H., Wen, K. L., Lin, C. M., Wen, S., and Huang, J. Y. (2015). "Investigating Near Surface S-wave Velocity Properties Using Ambient Noise in Southwestern Taiwan." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26(2), 205-211.

Lin, P. Y., Huang, S. K., Chiang, H. W., and Shen, Z. P. (2012). "Development of the on-site earthquake early warning system in Taiwan." Proceeding of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.

Liu, K. S., Shin, T. C., and Tsai, Y. B. (1999). "A free-field strong motion network in Taiwan: TSMIP." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 10(2), 377-396.

Shahi, S.K. and Baker, J.W. (2014). "An efficient algorithm to identify strong-velocity pulse in multicomponent ground motions." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2456-2466.

Shin, T. C., Chang, C. H., Pu, H. C., Lin, H. W., and Leu P. L. (2013). "The geophysical database management system in Taiwan." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(1), 11-18.

Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R., and Cheng, C. T. (2016). "A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(3), 311-323.

Wang, Y. J., Chan, C. H., Lee, Y. T., Ma, K. F., Shyu, J. B. H., Rau, R. J., and Cheng, C. T. (2016). "Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Taiwan." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(3), 325-340.

Wu, Y. M., Liang, W. T., Mittal, H., Chao, W. A., Lin, C. H., Huang, B.S., and Lin, C.M. (2016). "Performance of a Low-Cost Earthquake Early Warning System (P-Alert) during the 2016 M_L 6.4 Meinong (Taiwan) Earthquake." *Seismological Research Letters*, 87(5), 1050-1059.

Wu, Y. M., Teng, T. L., Shin, T. C., and Hsiao, N. C. (2003). "Relationship between peak ground acceleration, Peak ground velocity, and intensity in Taiwan." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1218-1228.