

16WCEE 地震动研究相关论文综述

陶正如¹,陶夏新^{2,1},纪林建¹

(1. 中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:本文从地震动工程特征、地震动衰减的经验性统计、基于地震学的地震动研究、地震动场的空间相关性、局部场地条件对地震动的影响和其他地震动研究等6个方面,综述了16WCEE上的相关论文从一个侧面反映的最近四年地震动研究的主要进展和发展趋势。地震动的工程特征依然是一个研究重点,采用多个指标综合表达地震动对工程结构的破坏作用是当前的趋势。基于观测数据的经验性统计,在NGA项目引起轰动之后,研究的重点多在区域数据的收集整理上,一些地区的研究不得不降低限制条件或补充模拟的大地震、近场强地震动“数据”。对强地震动观测数据不充分的地区,基于地震学的估计地震动方法研究成为主流,随机合成地震动的方法最受关注,格林函数的研究仍保持一定的热度。一些论文研究建立空间相关性模型以及在地震动估计中的应用。局部场地条件对地震动的影响是论文中讨论最多的话题,充分表明这个问题的复杂性。

关键词:16WCEE;地震动;衰减;场地影响

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Summary of the 16WCEE papers on ground motion study

TAO Zhengru¹,TAO Xiixin^{2,1},JI Linjian¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. College of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: From the aspects of ground motion characteristics, empirical ground motion attenuation, seismology based ground motion prediction, the spatial variability of strong ground motion field, local site effect on ground motion and others, the related 16WCEE papers are summarized. Thus, the progress and the trend in the last four years are reflected unilaterally. Engineering characteristics of ground motion is still an important point, and it is a trend to use multiple indices to express the destructive effect of ground motion on engineering structures. After the hot discussion on NGA projects, the focus of empirical attenuation relations is on collecting and processing regional data, in which the ranges of data selection have to be extended and near-fault numerical simulations of large earthquakes are supplied. For regions lack of strong motion records, seismology based ground motion prediction becomes predominant, the focus is stochastic simulation, and the study on Green's Function is still a topic. The spatial variability and its application in ground motion prediction are discussed in some papers. The most popular topic is the effect of local site condition, which shows the complexity.

Key words: 16WCEE; ground motion; attenuation; site effect

收稿日期:2017-03-20; 修订日期:2017-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51478443,51678540,51178435)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51478443,51678540, 51178435)

作者简介:陶正如(1978-),女,研究员,博士,主要从事工程地震研究. E-mail: taozr@iem.ac.cn

引言

笔者参加了2017年1月在智利圣地亚哥召开的第16届世界地震工程(16WCEE)大会。在会议的43个普通专题中有5个是与地震动直接相关的,9个主旨讲演和特邀讲演中有2个是关于地震动的,Kramer的“长持时地震动对土层液化危险性的影响”和Madariaga的“俯冲带地震及其谱的标定”;两场大会辩论中一场有关地震动,“防御地震的需求:概率的pk确定性的”。可见其在地震工程学科中的重要性,地震动IV分组的主持人Bozorgnia称该分组讨论是16WCEE“最重要的分组”,在某种意义上说,有一定的道理;也印证了笔者的一个认识,地震动研究是地震工程学的核心,至少是若干主要核心之一。会上,与地震动直接相关的口头交流的论文40篇,论文集中百余篇。这些论文在一个侧面反映了四年来地震动研究的进展和发展的趋势,笔者根据自己的理解,尽可能客观地归纳,从地震动工程特征、地震动衰减的经验性统计、基于地震学的地震动研究、地震动场的空间相关性、场地条件对地震动的影响以及其他地震动研究等6部分,总结成本文,以飨读者。

1 地震动的工程特性

地震动的哪些特性对工程结构的破坏、倒塌起控制作用,以及如何提取这些特征,依然是地震动研究的一个重点。目前尚无一个令人满意的地震动工程特征指标,许多论文建议采用多个指标综合表达地震动的破坏作用。对指标的选取,则涵盖各种定义的幅值、频谱特征以及持时等方面。

Marafi等^[1]提出一种新的强度指标,综合考虑谱加速度、地震动持时(积分最大值5%~95%间的时间间隔)和反应谱形状(在整个结构塑性周期范围的5%阻尼比反应谱积分),可有效地估计结构倒塌。Ohya等^[2]借用雷达图评价地震动的PGA、PGV、谱烈度、仪器烈度、功率谱强度、卓越周期和最大剪应变等7个指标。Ding等^[3]收集了中国28次、美国52次、伊朗9次和墨西哥8次地震的共793条强震记录,用加权最小二乘法,在高烈度区增加权重、低烈度区减小权重,建立宏观烈度(V-IX)和PGA、PGV的关系。统计结果显示,平均来看,PGA是中国烈度表(CSIS2008)中的1.3倍、PGV是1.24倍,但比ShakeMap的低。

Hisada等^[4]分析了2016年日本Kumamoto地震强震记录特征和近地表破裂附近结构破坏情况,在Mashiki和Nishihara卓越周期超过1~2s,出现由正/右滑断层上盘效应引起的滑冲效应,沿断层滑动方向上显著。相反,向前的方向性(近南北向)脉冲不明显,可能由复杂的破裂过程和/或地震波在复杂介质中传播引起。另一方面,Mashiki东西分量的记录在1s左右显示了大幅值,可能是向前方向性脉冲。Gallego和Saragoni^[5]分析了2016年智利Muisne地震中21个RENAC台站的加速度记录,得到最大水平和竖向加速度、阿里亚斯烈度(Ia)和破坏潜能因子等特征参数,指出Pedernales和Chone台站的加速度和破坏潜能因子最大。分析这两个台站的加速度反应谱。前一站距震中最近,加速度反应谱有两个峰值,一个在0.5~0.6s,是软土层的自振周期,另一个在0.1s附近,可能由于震源传出的波和更高阶响应的相互影响。这在智利一些板内逆冲地震中已经观测到。Chone台站南北向加速度记录显示,在5~35s出现土层自由振动,频率0.6~0.7Hz,在较高频率可以清楚看到能量到达。用H/V得到两个台站土层的卓越周期,分别为0.5s和1.6s。

2 地震动衰减的经验性统计

以大量强地震动观测数据为基础的统计是地震动特征研究的根基,也是有丰富观测数据地区地震动衰减研究的基本内容。在NGA项目引起轰动之后,地震动衰减是区域性的形成共识,许多经验性统计研究的重点放在区域数据的收集、整理上,一些地区的研究不得不降低限制条件或补充模拟的大地震、近场强地震动“数据”。统计方法也以减小不确定性为目的进行若干探讨。

Laouami和Slimani^[6]收集了阿尔及利亚和其他地中海区域1980年以来发生的面波震级(M_s)3.0~7.8级、震中距5~150km的1555条记录,根据H/V方法得到的卓越周期进行场地分类,采用震级和震中距相互独立的两步回归方法,得到适于 M_s 5.0~7.0级的谱加速度衰减关系。Hamada等^[7]收集日本1997~2011

年44次矩震级(M_w)5.1~6.9级地震、距破裂面最短距离(R_{rup}) ≤ 100 km的1703条K-NET台站记录,采用分层贝叶斯模型和两步回归方法,得到以 M_w 、 R_{rup} 和30 m平均剪切波速(V_{s30})为变量的JMA烈度衰减关系。Kubo等^[8]收集东日本弧前、弧后、西日本和Izu-Ogasawara区域在2005-2015年发生的深度340~680 km的12次5.7~7.9级地震的K-NET、KiK-net和F-net台站记录,用统计回归方法得到深源地震的体波衰减关系。Garcia-Fernandez等^[9]借助4组典型衰减关系模型和1967-2012年1814次地震的5882条多分量加速度记录,计算不同模型估计值的均值,分别附加认知不确定性和偶然不确定性,作为估计值的上下限,得到2组各3条的PGA、PGV和周期0.1~2 s谱加速度衰减关系,适用于 M_w 4.0~7.5、震中距1~200 km、震源深度0~20 km和 $V_{s30}=360\sim 800$ m/s的情况。Nithin等^[10]收集1999年集集地震93条主震记录和5.0级以上、震中距50 km内、满足信噪比要求的394条余震记录,用能量到达曲线得到PSV衰减关系的回归系数。Silva等^[11]用智利1985-2015年 M_w 6.0~8.8级、断层距30~250 km的33次地震的205条记录确定时间包络函数,随机合成地震动,用最小二乘法回归模型参数,建立衰减关系的变量包括 I_a 、包络线参数 T_1 和 T_2 、强震动持时 D_{5-95} 、50% I_a 的持时 t_{50} 、P波和面波的参考频率 ω_p 和 ω_s 、P波和面波的带宽参考值 a_p 和 a_s 。Rinaldis和Zini^[12]收集意大利1976-2015年4.6~6.8级、震中距2~200 km的234条记录,用地理加权回归得到EC8的A类场地地震动衰减关系。Rezaeian等^[13]用Dabaghi和Der Kiureghian的随机模拟模型,与给出的全球地震数据库、1994年北岭地震断层距5.43~8.44 km的6个台站12条记录拟合,建立相似性指数,突出近断层方向性脉冲,改进场地参数,得到 I_a 、强震动持时(D_{5-95} 、 D_{0-5} 、 D_{0-30})、强震动相位中间时刻 t_{mid} 、 t_{mid} 的滤波频率 f_{mid} 、随时间频率的变化率 f' 、滤波器阻尼比 ζ 、 I_a 为0的最大时间 t_0 后处理的拐角频率 f_c 、近断层脉冲幅值和周期 V_p 和 T_p 、脉冲速度时程中振动数 γ 、相位角 ν 、包络线峰值时间 $t_{max,p}$ 等15个参数的地震动预测公式(GMPE),模型变量包括断层类型F、 M_w 、地表到断层破裂面深度 Z_{tor} 、 R_{rup} 、沿断层从震中到场地的距离 d 、 V_{s30} 、竖直方向上破裂面和震源到场地的夹角。Lanzano等^[14]收集10~18°E、34~40°N范围内, $M_w \geq 3.5$ 或 $M_L \geq 3.5$ 、震中距 ≤ 200 km的1200条加速度时程、2000条速度时程,用数值模拟结果补充中大地震近断层观测数据,EXSIM的结果用于 M_w 5.0~7.0、SMSIM用于 M_w 3.5~5.0,使用这两类数据发展一组意大利南部Calabria和Sicily的PGA、PGV和周期0.04~4 s谱加速度衰减关系。

Bozorgnia和Campbell^[15]用NGA-West2数据库,发展了适于世界范围内构造活跃区 M_w 3.3~8.5级、断层距0~300 km浅层壳内地震的、周期0.01~10 s的5%阻尼比的弹性反应谱的竖向-水平谱比(V/H)模型,可根据谱比中值附加事件内和事件间残差估计竖向地震动。Tsai和Liu^[16]用5个井下台阵(台湾1个、加州4个)记录分析了水平和竖向地震波传播的差异,结果显示,与水平向相比,竖向地震动的放大不是很显著,而且与地震动强度的相关性(即土层非线性)较弱,对地下水位更敏感,在场地动力反应分析中应考虑。

Tao等^[17]提出了一个更一般的问题,地震动估计中的衰减项与确定震级过程中使用的衰减项不一致,会导致逻辑上的缺陷。用一台站地震动幅值确定震级,再据此震级反过来估计该台站的地震动幅值会有不同。通过日本东北地区的强震和测震数据的分析,说明两类数据的衰减特征大体上是可以协调的,随着周期增加,地震动幅值的衰减特征更趋一致,提出了改进的两个方向。

3 基于地震学的地震动研究

对没有足够强地震动观测数据的地区,基于地震学的地震动研究成为主流。随机合成地震动最受关注,震源、传播途径和场地条件的表达,都有一些新的成果。

Kawase和Nakan^[18]选择1996-2011年 M_{JMA} 4.5级以上、震源深度 ≤ 60 km、震源距 ≤ 200 km、PGA ≤ 2 m/s²的K-NET、KiK-net和JMA台站的地震记录,用广义谱反演方法得到应力降。结果显示,在0.3~20 Hz范围内与震级线性相关,应力降随震源深度有系统性增加的趋势。建议对不同类型的地震,可以采用平均应力降并用震源深度校正。依笔者的看法,其中应力降与震级相关的结果,还需要进一步考察。Derras等^[19]为了研究震级-应力降关系,用3个固定应力降2.5 MPa、5 MPa和10 MPa及2个基于震级相关应力降模型,随机合成地震动,建立模拟数据库,用人工神经网络得到预测模型,与NGA-West2数据库强地震动记录比较,指出 $d\log Y/dM$ 与应力降之间并不是线性关系,主震和余震地震动 $d\log Y/dM$ 相似。Anderson等^[20]提出了一套可用于缺少观测数据地区的强地震动合成方法,震源采用了复合震源模型,传播介质简化

为水平成层模型,假设 Q 值与频率无关,取用的 P 、 S 波速及 Q 值均随深度变化。合成 1857 年 San Andreas 断层破裂引起的 M_w 7.65 级地震的地震动实例中,借助 Lovejoy Butters 不稳定的石块为检验标准,结果证明了方法的可靠性。Dalguer 等^[21]认为深度 2 km 之内的浅层区域在破裂过程中,吸收能量机制加强,应力降为负或为零,指出这些浅层断裂带的错动速度是引起强烈速度脉冲的主要原因,后者导致近震源永久位移;在采用运动学简化模型、研究伴有地表破裂的地震引起的近场地震动时,需要认真考虑这些错动速度函数。Sonnemann 等^[22]使用北欧地震最活跃地区-冰岛南部 1987-2008 年 6 次 M_w 5.1~6.5 级地震的 77 条强震记录,用贝叶斯方法确定断层滑动的局部应力降分布,作为产生高频 (> 1 Hz) 地震波的特殊障碍物模型。Ohno^[23]收集日本 1996-2015 年 M_w 4.5~9.0、距离 300 km 内 K-NET 和 KiK-net 台站记录,通过傅氏谱和反应谱反演得到应力降和品质因子,统计回归得到场地放大因子、震源项和非线性场地放大因子的系数,建立适用于浅层内陆、太平洋板块俯冲带、菲律宾板块俯冲带巨大地震的衰减关系。

Nozu 提出用更小的网格表达矩形子震的震源,称为拟点源模型,合成地震动。Nagasaka 和 Nozu^[24]用拟点源模型合成 2005 年 7 月 23 日在日本 Chiba 发生的板内地震的强地震动,结果与观测记录符合较好,仅低估了震中西侧若干台站的地震动。尝试引入拐角频率模型表达方向性效应,结果没有改善;考虑地震波入射角或介质不均匀性引起的场地放大因子变化,校正放大因子后的结果得到改善。为进一步验证拟点源模型, Nakano 和 Sakai^[25]合成日本 3 次壳内地震和 1 次板块边界地震的地震动,使用已有的经验性场地放大因子表达场地条件的影响,结果显示,与各次地震观测的波形和傅氏谱符合得比较好。Wang 和 Li^[26]提出了基于等效距离的随机点源方法,由子断层距离和子断层滑动分布确定等效距离。Jeong 等^[27]借助韩国最近 10 年来 M_w 3.5~5.0 级地震的加速度记录标定 Brune 震源谱模型,采用韩国的几何扩散模型、北美东部的非弹性衰减和持时模型,随机方法合成大量场点的地震动,指出韩国现有抗震设计规范中地震作用的规定大体是合适的,仅 0.5 s 以上的周期段偏高。用指数函数表示高频衰减,扩展 Brune 点源模型,Ólafsson 和 Rupa-khety^[28-29]借助冰岛南部 1987-2008 年 4 次最大地震的加速度记录,给定持时和几何衰减函数,得到震源模型的参数;假设 Q 与频率无关,用加速度记录得到的 κ 和 $\Delta\sigma$,借助随机方法估计 PGA,与实际观测记录符合较好。Kumari 等^[30]建议在随机合成方法中,用震源距和破裂尺寸加权 Brune 的近场和远场震源谱,模拟喜马拉雅山西北部两次破坏性地震的近-中场地震动,与常用的远场点源模型结果比较,说明方法改进效果。Taborda 等^[31]用对地震学家和工程师都有意义的 11 个参数组成量化矩阵,评估点源模型和扩展点源模型模拟地震动的准确性,以及震源、破裂速度和衰减模型对模拟结果的影响。

Camata 等^[32]采用六面体网格表现地形、水深、海岸线和波速在深度上的差异,用随机场产生器修改局部介质参数值,借助波传播的谱元数值模拟地震波在高度异质介质中的传播。Tanaka 和 Sato^[33]用一个称为 Hurst 的指标表示全日本地壳波传播介质的不均匀性,发现其具有区域性,并与以前获得的弥散 Q 值分布一致。波传播途径上不均匀的地壳介质表现出自仿射相似性,所以假设地震动的相位特征有这一相似性,在合成地震动中可以据此估计相位特征。Deger 和 Drege^[34]借助在一个 M_w 5.1 级地震中 2 个台站记录的宽频带地震动波形数据,通过考察地壳模型对合成地震动的影响,建立 Isparta 地区地壳结构模型以及震源参数。地震动合成采用了频率-波速积分程序,可以合成三分量时程。

场地条件对地震动的影响,见本文第 3 节,本节只涉及基于地震学的地震动衰减关系中场地项的研究。Zendagui 等^[35]收集 14 个加速度时程 ($PGA = 0.08 \sim 0.42$ g) 和 858 个土层剖面,研究 6 个不同场地参数(深度、平均剪切波速、 V_{s30} 、下层剪切波速、速度比和基本频率)对场地放大因子的影响,在简洁性和精确性之间取得平衡,认为用两个参数(自振频率 f_0 和 V_{s30})表达场地特征是最合适的。Tsurugi 等^[36]分析 M_w 3.6~6.9 级的 65 次日本陆上地壳内地震,包括 4 次 5.9 级以上的大地震,分别用 f_{max} 滤波器和 κ 滤波器两种方法研究谱幅值在高频段的衰减特征,及其与地震矩的关系。结果显示了 f_{max} 滤波器的指数 s 与谱衰减参数 κ 间的相关关系,表达的高频段衰减特征大体一致。Kottke^[37]研究厚冲积层场地的 V_{s30} 与 κ_0 (距离等于 0 处的 κ 值)之间的关系,与以前发表的结果比较,大多数有相似的趋势,随着 V_{s30} 减小 κ_0 增加,而且土层非线性的影响不大, $V_{s30} \geq 400$ m/s 时 κ_0 不随 PGA 的增加而增加,只有 $V_{s30} = 200$ m/s (非常软的场地)时显示出 κ_0 随着地震动强度增加而增加。Magistrale 和 Binsalam^[38]用地形坡度和地质学方法按 NEHRP 的分类标准编制了欧洲场地分类图。在构造活跃的欧洲南部,根据地形坡度推算 V_{s30} ,估计场地分类;在缺少 V_{s30} 数据的欧洲北部构造稳定区,使用工程地质学方法估计场地分类。Ktenidou 和 Abrahamson^[39]借助 NGA-East 和 BCHydro 两个数据库中震中距 50 km 范围内硬基岩场地上的 229 条记录,考虑放大和衰减的共同影响,发展了硬基岩

($V_{s30} > 1\ 500\ \text{m/s}$)和工程基岩($V_{s30} = 760\ \text{m/s}$)间的调整因子。低频部分,采用 NGA-East 提供的放大因子,更稳定并不受震级影响;高频部分,用硬基岩 $\kappa_0 = 0.015 \sim 0.025\ \text{s}$ 的解析模型得到放大因子。

格林函数的研究仍保持一定的热度。Oana 等^[40]使用 5 个条件选择小地震记录,用经验格林函数方法模拟 2011 年 $M_w 7.1$ 级 Onagawa 地震的强地震动,结果说明可用于估计板内地震的地震动。根据弹性体的互易定理,表示震源处双力偶力引起场地位移的格林函数,与表示该场地上一个力引起震源处应变的格林函数相同,Hirai 和 Fukuwa^[41]将有限差分法和互易定理结合,计算假定震源引起的场地位移的格林函数,估计日本中部 Nagoya 附近内陆和南海海槽设定地震的地震动。Wu 等^[42]将随机格林函数和理论格林函数结合,合成的地震动含有动力位移和静力滑冲阶跃,为大跨桥梁提供近断裂地震动位移和速度多点输入。Fernández 等^[43]用 ω^2 模型校正震源项,借助 2015 年 9 月 16 日智利 $M_w 8.4$ 级 Illapel 地震主震后 3 个月内的余震记录确定格林函数的相位特征并估计场地放大,合成地震动的结果显示,在 $0.2 \sim 1.0\ \text{Hz}$ 频段内,速度波形和傅氏谱与观测记录有很好的—致性。

有的研究比较了若干基于地震学的地震动合成方法。Tsioulou 和 Galasso^[44]给出 5 个对应不同复杂结构地震反应的地震动强度指标,用统计假设检验和信息理论测度等两个定量方法检验 Graves 和 Pitarka 混合宽频带方法、确定性混合震源模型(CSM)方法和随机白噪声有限断层模型(EXSIM)等地震动合成方法。总体上说,EXSIM 方法优于其他两个,对谱形相关指标的预测效果最好。Zhong 等^[45]使用 3 个与时间相关的验证矩阵估计强度、卓越周期和带宽,用误差向量量化合成和实际记录验证矩阵间的均值和形状差异,提出验证方法。Pacor 等^[46]用 3 种方法,随机方法 EXSIM、混合确定性-随机近似格林函数(DSM)和宽频带混合积分合成方法(HIC),合成地震动,研究相应的变异性。结果显示,最简单合成方法 EXSIM 的总变异性最低;HIC 方法在长周期的事件间变异性最大,看来越复杂的方法合成的地震动对震源运动学参数变化越敏感;震源辐射路径带来的空间变异性系统性偏离均值;断层破裂过程是空间变异性的主要来源。

4 地震动场的空间相关性研究

地震动的空间相关性已经被密集台阵的实际观测记录证明,一些论文进一步研究建立空间相关性模型以及在地震动估计中表达的途径。Koufoudi 等^[47]在法国 Beaufort 山谷 69 m 的 Saint Guerin 双曲拱坝及附近区域设置了密集观测台网,台站间距 $13 \sim 160\ \text{m}$,获得 2015 年 6 月~2015 年 12 月间发生的 67 次 $1.5 \sim 4.1$ 级地震中 $1 \sim 10\ \text{Hz}$ 范围内信噪比大于 3 的记录,据其研究坝基基岩界面和周围区域地震动空间变化。Vaccareanu 等^[48]对 Vrancea 区域($70 \times 30\ \text{km}^2$)10 次中等深度($60 \sim 170\ \text{km}$) $M_w 5.2 \sim 7.4$ 级地震中得到的 431 条三分量加速度记录分析,得到 PGA 和谱加速度($0.1 \sim 3.0\ \text{s}$)的空间相关性模型。结果显示,随着台站间距离增加,事件内空间相关性降低;几何平均的相关系数高于任意方向的。Liu 和 Hong^[49]用空间加权方法估计 PGA、谱加速度和 I_a ,加权系数为台站间距的函数,建立空间变化的 GMPE,估计 1999 年集集地震和 2008 年汶川地震中的累积绝对速度 CAV。结果显示,事件内标准差降低 80%。AfifChaouch 等^[50-51]以阿尔及利亚 El-Asnam 区域为例,借助经验格林函数方法合成 1980 年 10 月 10 日 $M_s 7.2$ 级地震基岩和考虑沉积厚度随机性的土层强地震动场,研究其中的空间变化。估计的迟滞相干函数表明,随着频率和间隔距离增加,相干性显著降低,在仅 $40\ \text{m}$ 的间距上也发现了相干性显著的降低;震源影响是近震源区域基岩地震动非相干性的主要来源;土层均匀性可能显著影响地表地震动在场地卓越周期附近的迟滞相干性;土层阻尼比是影响土层场地相干性降低程度的关键参数。Wang 和 Fan^[52]用广义谐波小波估计空间变化地震动的时变互功率谱和时变延迟的一致性,分析了地震动时间变化非平稳特征,不同时间的延迟一致性的比较说明,地震动空间相关性与时间相关。Papadopoulos 等^[53]忽略波传播仅考虑相干性损失的影响,研究时间延迟和相干性损失两种情况对天然气管线的影响。

5 场地条件对地震动的影响

局部场地条件对地震动的影响是论文中讨论最多的话题,充分表明这个问题的复杂性,有的论文借助大地震远场记录分析大型沉积盆地或深厚覆盖层对长周期地震动的影响并努力解释其机理。

Nagano 等^[54]和 Kagawa^[55]研究了 2011 年东日本大地震中日本西部 Osaka 和 Isa 湾区域异常的长周期地

震动放大,前段的放大达10倍左右,可以用盆地沉积层对竖向入射体波的反应来解释,后段的放大增大至数十倍,也许可以用观测点面波驻波的波节和波腹解释。Hata等^[56]于2014年7月13日到8月10日在Yokohama市Kanagawa区冲积谷地的住宅区设置了33个流动地震观测台站,相当密集,既有挖方场地也有填方场地,共获得了3次中等地震($M_{JMA}=4.2, 4.3$ 和 3.6)引起的三分量地震动记录,数据表明地震动的空间变化很显著,填方场地的幅值比挖方或其他场地上的大。借助经验性的场地放大因子,对东京湾北部 $M_{JMA}7.3$ 级设定地震预测的强地震动速度功率谱强度亦有明显的差异。Régnier等^[57]用KiK-net台网174个台站记录的1996-2009年 $M_{JMA}3$ 级以上地震引起的地震动,通过比较强地震动(地表PGA为100、200和 300 cm/s^2 以上)和弱地震动(地表PGA在 $0.1\sim 25\text{ cm/s}^2$ 之间)的地表与井下傅氏谱比,计算非线性与线性场地反应比。平均谱比在低频段超过1.0,高频段一般低于1.0,中间是一个大约等于1.0的过渡段,与场地相关的频率 f_{NL} 对应。比值随PGA的增加从1.4、1.5和1.6降到0.6、0.5和0.5,而 f_{NL} 与PGA相关性较弱。结果说明,即使 100 cm/s^2 的中等PGA值,土层的非线性也会导致场地反应显著的变化。Terashimaa和Sato^[58]从11组109次 $M_{JMA}5.0$ 级以上的地震中3个基岩台站和3个盆地台站得到的日本关东盆地地震记录中,研究长周期地震动特性的变化,结果显示,每组地震动反应谱和群延迟时间都有不同特性;2~10s长周期反应谱形状与方向有关;全波的方差与体波的相似。

Asimaki等^[59]、Rupakhety等^[60]、Takai等^[61]分析2015年尼泊尔Gorkha大地震主震和3次余震在5个台站的地震动记录,最显著的特点是面波幅值大和大幅高频能量衰减,并且观察到了强地震动中表现的土层非线性。主震水平向地震动含有非常不同以往的能量成分,在周期5s左右的谱幅值为0.5g,而PGA相当低,约0.16g。这意味着竖向地震动高频能量丰富,水平向长周期能量丰富,可能部分来自于山谷中软弱和深厚沉积层影响,抑制了高频地震动、放大了低频部分。Shigefuji等^[62]分析了4次余震所有台站的法向、切向和竖向的速度傅氏谱。除了 $M_w6.7$ 级余震外,其他3次余震中,包括一个基岩台站的所有8个台站三分量速度傅氏谱在0.1Hz附近显示了相同的谱峰值,说明周期10s的瑞利波在山谷中传播; $M_w7.3$ 和6.3级两次余震的结果,与基于一维速度结构的理论相速度比较,估计值在0.05~0.10Hz稍低。

Uetake等^[63]认为用远震研究局局部场地因子有若干优点,体波和面波在时域完全分离,从台站得到的反向方位角几乎相同,记录包含长周期成分。采用2015年尼泊尔地震中日本Niigata县Cheutsu区域(约距离震中5000km)高密度地震观测台网AN-net(东西向40km、南北向约60km)加速度记录研究了地震动特征。体波部分,山区台站波形非常简单,在平原区台站看到大量续至波,似由深厚沉积层结构激励;面波部分,许多低频波包从西至东通过AN-net,随着波包顺序到达,视频率增高。面波多次滤波分析,也证明了散射特性。Chen等^[64]用经验格林函数方法,模拟汶川地震近场和远场烈度异常区域的地震动特性,模拟结果显示,整体上模拟PGA与观测PGA拟合较好,在地形复杂区域,模拟PGA稍小于观测PGA,表现出地形等场地条件的影响。

Kuo等^[65]收集台湾地区地表-井下监测台网的15个台站记录到的、2012~2013年265次地震($M_L>4$)记录,用地表和井下地震动PGA之比计算放大因子,表明大地震中沉积土层导致地震动放大。地表记录得到的地方震级明显大于井下记录得到的,认为由地表和井下加速度计间沉积土层对地震动的放大引起,估计地方震级的平均差异为0.38。

Moschetti等^[66]借助三维模拟得到场地放大,用基岩场地($V_{330}=760\text{ m/s}$)的5%阻尼比谱加速度与场地放大相乘估计各类场地上的地震动;如果是多个破裂模型,则取加权平均。结果显示,沉积层较浅的场地($Z_{2.5}<1\text{ km}$),加权放大的地震动与经验性GMPE估计的地震动符合较好;沉积层较厚的场地($Z_{2.5}\geq 1\text{ km}$),平均来说,放大的地震动显著高于GMPE预测的值,差别随着自振周期增加而增加。Huda和Taborda^[67]初步建立孟加拉位于恒河三角洲三维盆地模型,用Hercules平行计算软件合成2010年 $M_w5.1$ 级地震的低频地震动($<0.5\text{ Hz}$),与有限观测记录比较,模拟结果衰减得更快。Kawabe等^[68]用三维有限差分方法,估计了南海设定地震中Kobe盆地的长周期($>2.5\text{ s}$)地震动,幅值与震源和观测点之间的几何关系及盆地沉积层厚度有关,较大PGV分布在盆地的北侧和南侧边缘,说明未来俯冲带地震的有可能造成大量高层建筑和石油管线的破坏。Laurendeau等^[69]建立新的具有基岩场地($1000\text{ m/s}<V_{330}<3000\text{ m/s}$)特征的自由地表加速度记录数据库,用Cadet等(2012)发展的深度校正因子修正井下记录,用波速剖面和一维模拟得到的放大因子,从土层地表场地记录推算基岩地表记录,平均谱加速度符合较好,最主要的差别来自高频部分较大的事件内残差。与传统目标区-参考区调整方法(H2T)结果比较,在短周期段($<0.1\text{ s}$)明显偏低。

H2T 方法没有正确考虑共振放大,将 κ_0 调整到较小值会增加高频幅值。Nozu^[70] 借助一个简化的方法,用沉积层中平均剪切波速的减小 v_1 (强地震动和弱地震动传播的剪切波速之比) 和沉积层中平均阻尼因子的增加 v_2 (强地震动和弱地震动阻尼之差),考虑土层多重非线性对地震动模拟的影响。以 2011 年东日本大地震为例,结果表明如果不考虑 v_2 ,会高估强地震动持时;使用这两个参数,模拟结果得到改进。

6 其他地震动研究

一些论文归纳为基于地震学的地震动研究略显勉强,单列这一节。Ding 等^[71] 引入了到达时间中值和强震动持时两个有明确物理含义的参数,通过定义波群相对到达时间和傅里叶幅值间的关系,得到模拟傅里叶相位谱,配上由随机函数模型得到的幅值谱,借助傅里叶逆变换得到模拟的地震动加速度时程。Crempien 和 Archuleta^[72] 通过选取散射脉冲响应函数,生成散射波时程,与确定性的格林函数卷积,得出散射格林函数。合成的地震动与实际记录相比,未考虑散射的地震动持时比实际记录的短很多,考虑散射后有明显改进。Archuleta 和 Crempien^[73] 用波数域中的 Von Karman 功率谱过滤白噪声,断层破裂面上每个点的滑动量函数由总滑动、到达最大滑动量的时间(峰值时间)、总滑动时间(上升时间)和滑动开始时间(决定局部破裂速度)决定,概率分布取截断的 Cauchy 分布,产生空间相关性;以 1.0 Hz 为界,高频地震动借助散射格林函数生成,再用详细的一维速度结构的传递函数修正,低频地震动用一维或三维速度模型中波的传播计算,在小波域将这两部分地震动拼接起来。

Igarashi 等^[74] 给出生成与设计谱匹配的两方向加速度时程的方法,法向分量用设计规范给定标准加速度时程的希尔伯特变换生成。生成的两个分量的反应谱形状与设计谱都是大体匹配的,谱的强度与设计谱相等。通过一个简化的桥梁模型的反应分析,说明与常规单方向输入相对对结构反应的影响与板间地震和近震源地震动标准时程的类型有关。Huang 和 Wang^[75] 以加州 3 次大地震记录为例,以模拟和观测记录在反应谱、 I_a 、时间累积和地震动持时等重要参数均符合较好为目标,通过迭代反复地在频域和时域修正地震动特征,发展随机地震动模拟方法。

在 GEM-SARA 项目框架下,Drouet 等^[76] 收集玻利维亚、巴西、哥伦比亚、智利、厄瓜多尔和委内瑞拉发生的 M_w 2~9、震源深度 50~250 km、 $V_{s30} = 250 \sim 1\ 350$ m/s、信噪比大于 3、PGA = 0.0~0.7 g 的记录,采用相同的处理方法,建立统一数据库。对活跃浅地壳地震、俯冲带板间地震、俯冲带板内地震和稳定大陆地震四种情况,用对数似然法得到不同模型的权重,用于南美概率地震危险性分析。

Cao 和 Tao^[77] 研究随机方法中辐射路径、 κ 和场地放大的方向性,考虑竖向和水平向 κ 和场地放大的差异,得到震源辐射波的能量分布,用来模拟竖向地震动。Nagashima 等^[78] 假设强弱震间 S 波竖向传递函数没有变化,强震水平向基岩地震动等于地表弱震竖向地震动除以竖向分量的平均传递函数,以基岩场地 S 波与 P 波速度比的平方根为系数。

Hidalgo-Leiva 等^[79] 认为用两个水平分量几何平均统计 GMPE,存在两个不确定性的来源,一个是与传感器方向性和信号极性有关,另一个来自计算几何平均的过程,建议用 3 分量加速度时程计算方向无量纲。

Zembaty 等^[80] 在波兰 Ziemowit 煤矿地表和附近房子地基上各放置了一组 R-1 三向转动速度地震计和 EA-120 三向平动加速度计,获得岩爆引起相当于 1.7~2.7 级地震的 51 组记录,震中距 520~1 320 m。在地震动大约 IV 度的地点观测到的最大转动速度达 $0.03^\circ/\text{s}$,最大转动加速度 $2.53^\circ/\text{s}^2$,持时与平动分量的相似。Falarz-Sheikhabadi^[81] 得到对应于 PGA、Nau 和 Hall 指数、一阶拟加速度谱和 Housner 谱烈度的作用于结构的转动(扭转和摇摆)分量,发展了考虑延时和一致性损失影响的估计转动分量的方法。

Montalva 等^[82] 将智利俯冲带的震源、传播介质和场地引起的 GMPE 残差的不确定性与其他构造区域的比较,评估预测变量不确定性带来的离散性,结果显示,用地方震级折算得到 M_w 引起的离散性不大,与场地相关的离散很显著,事件内总的变异性与事件校正单台的变异性之间的差别说明,更好地限制场地参数可以降低场地相关的不确定性,与世界上其他地区的结果更接近。Somala^[83] 研究印度 1505 年 1 月~2014 年 2 月 M_w 5 以上地震震源深度分布、断层走向、倾向和滑动角与震源深度的关系,结果显示,参数分布范围很大,在建立 GMPE 的过程中,可以通过缩小参数取值范围和考虑 V_{s30} 降低不确定性。Thompson 和 Worden^[84] 用与 2008 版美国地震危险性模型相似的方法,对倾角未知的倾斜破裂提出了一个修正因子,考虑不同倾角、破裂类型和破裂面积,推导了一个事件间和事件内标准差调整的系数,以反映用点源距离代替有限断层距会带

来的不确定性增加。

仍有几篇论文研究将美国西部、日本的衰减关系换算,用于本地。Graizer^[85]借助 NGA-East 数据库中 $M_w \geq 3.75$ 、 $R_{rup} \leq 1\ 000\text{ km}$ 的 5 026 条记录,当 $M_w \geq 6.0$,综合考虑以下 3 个因素从美国西部衰减关系换算:1) NGA-East 和 NGA-West 数据库中地震动总体的幅值之比;2) 两个数据库中地震平均应力降之比;3) 最近进行的地震动模拟结果间的差别。衰减关系适用于 $4.0 < M_w < 8.5$ 、 $0 < R_{rup} < 1\ 000\text{ km}$ 、 $450\text{ m/s} < V_{s30} < 2\ 800\text{ m/s}$ 和 $0.1\text{ Hz} < f < 100\text{ Hz}$ 。Dimas 和 Venkatesan^[86]用 Campbell 提出的转换方法和随机方法模拟中低地震活动区地震的地震动,与澳大利亚观测数据比较,结果显示高估了衰减,两个方法得到的距离 10 ~ 100 km 范围内和周期 0.3 s、0.5 s 和 1 s 的、阻尼比 5% 加速度谱不一致。Miura 等^[87]收集波哥大 2008 年 Quetame 地震 3 个基岩台站和 20 个土层台站记录,用基于 V_{s30} 的土层放大系数修正日本基岩场地 5% 阻尼比谱加速度衰减关系。

7 结语

本文从地震动工程特征、地震动衰减的经验性统计、基于地震学的地震动研究、地震动场的空间相关性、场地条件对地震动的影响以及其他地震动研究等 6 个方面,综述了 16WCEE 展现的与地震动特征分析和地震动估计相关的研究内容。从中可见,研究内容多样化,对同一现象,有从不同角度的解释。

地震动的哪些特性对工程结构的破坏、倒塌起控制作用,以及如何提取这些特征,依然是地震动研究的一个重点,依旧没有发现一个新的指标能够更好地表达地震动对工程结构的破坏作用,采用多个指标综合表达,有一些新的探索,值得注意。基于观测数据的经验性统计,仍是地震动研究的一个热点。在 NGA 项目引起轰动之后,地震动衰减是区域性的已经形成共识,许多经验性统计研究的重点放在区域数据的收集、整理上,由于缺乏足够的强震数据,一些地区的研究不得不降低限制条件或补充模拟的大地震、近场强地震动“数据”。统计方法也以减小不确定性为目的进行探讨。笔者提出地震动估计中的衰减项与确定震级过程中使用的衰减项不一致会导致逻辑上的缺陷,受到关注。对强地震动观测数据不充分的地区,基于地震学的估计地震动方法研究成为主流。随机合成地震动的方法最受关注,震源、传播途径和场地条件的表达,都有一些新的成果。格林函数的研究仍保持一定的热度。有的研究比较了若干基于地震学的地震动合成方法。一些论文进一步研究建立空间相关性模型以及在地震动估计中表达的途径。局部场地条件对地震动的影响是论文中讨论最多的话题,充分表明这个问题的复杂性。其他的研究还涉及傅里叶相位谱的估计、考虑散射的格林函数、地震动时程的合成、不同地震构造区衰减关系的加权、竖向地震动的合成、地震动转动分量的估计、与地震动估计有关的不确定性以及借助转换的方法建立强地震动衰减关系等。

成果的来源也呈现多样化,有传统优势的美国和日本仍是地震动研究的大国,随着观测台网和数据不断增加,中国、欧洲和南美洲学者的成果不断增加。

参考文献:

- [1] Marafi N A, Berman J W, Eberhard M O. A new intensity measure that accounts for the effects of spectral acceleration, duration, and spectral shape[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2637.
- [2] Ohya Y, Nozu A, Yoshida N, et al. Evaluation of accuracy of seismic response analysis of ground using radar chart[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1413.
- [3] Ding B R, Du K, Sun J J, Luo H. Study on relationships between macroseismic intensity and peak ground acceleration, peak ground velocity in China[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2738.
- [4] Hisada Y, Kaneda J, Teramoto A, et al. Strong ground motions and damage investigation of buildings near the surface faulting of the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 5001.
- [5] Gallegos M F, Saragoni G R. Analysis of strong-motion accelerograph records of the 16 April 2016 M_w 7.8 Muisne, Ecuador Earthquake[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 5013.
- [6] Laouami N, Slimani A. Spectral ground-motion predictive model for Algeria considering site effect based HVSR[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 127.
- [7] Hamada T, Itoi T, Sekimura N. Statistical analysis of seismic motion based on Hierarchical Bayesian Models[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 389.
- [8] Kubo H, Suzuki W, Kunugi T, et al. An attenuation relationship for deep-focus earthquakes around the Ogasawara Islands, Japan[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1119.

- [9] Garcia Fernandez M, Gehl P, Jimenez M J, et al. Pan-European representative GMPE model[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No.2056.
- [10] Nithin V L, Das S, Kaushik H B. Seismic scenario specific ground motion simulations consistent with ground motion prediction equation[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 2143.
- [11] Silva R, Taflanidis A A, Mavroeidis G P, et al. Development of a record-based stochastic ground motion model for Chile[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4290.
- [12] Rinaldis D, Zini A. The role of errors and uncertainties, in strong ground motion parameters, in the achievements of the European strong motion database and databank[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 340.
- [13] Rezaeian S, Lenon C, Pei S, et al. Validation of near-fault ground motion simulations with directivity pulses for use in engineering applications [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 1020.
- [14] Lanzano G, D'Amico M, Puglia R, et al. Hypsther project: hybrid ground motion prediction equations for PSHA purposes[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 1688.
- [15] Bozorgnia Y, Campbell K. NGA-West2 ground motion model for V/H response spectra[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4228.
- [16] Tsai C C, Lui H W. Amplification behavior of vertical motion observed from downhole arrays[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 24.
- [17] Tao Z R, Tao X X, Ma B L, et al. Is there a logical shortcoming in ground motion attenuation study[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 1177.
- [18] Kawase H, Nakano K. Modelling of source terms separated from observed response spectra to reduce variability in GMPE[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 3471.
- [19] Derras B, Cotton F, Drouet S, et al. Magnitude dependence of stress drop: what does the observed magnitude scaling of ground-motions tell us [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4505.
- [20] Anderson J G, Brune R J, Brune J N, et al. Wave propagation and source models for synthetic seismograms compatible with strong motion applications[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4023.
- [21] Dalguer L A, Irikura K, Wu H. Permanent displacement from surface-rupturing earthquakes: insights from dynamic rupture of $M_w 7.6$ 1999 Chi-Chi Earthquake[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017,Paper No. 1004.
- [22] Sonnemann T, Halldorsson B, Hrafinkelsson B, et al. Local stress drop estimates of strong earthquakes in the south Iceland seismic zone[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 2771.
- [23] Ohno S. Ground motion prediction equation applicable to mega earthquakes considering strong-motion generation areas[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 2685.
- [24] Nagasaka Y, Nozu A. Strong ground motion simulation of the 2005 Central Chiba intraslab earthquake with the pseudo point-source model[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 2855.
- [25] Nakano K, Sakai S. The verification of the pseudo point-source model through simulations of past earthquakes in Japan[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 375.
- [26] Wang G X, Li Y N. Strong ground motion simulation for recent earthquakes[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017,Paper No. 3036.
- [27] Jeong G H, Lee H S, Hwang K R. Generation of synthetic earthquake accelerograms using seismological modeling of Korean Peninsula[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4570.
- [28] Ólafsson S, Rupakhety R. Ground motion prediction equation for PGA and SA based on Brune's extended source model[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4553.
- [29] Ólafsson S, Rupakhety R. Source parameters from acceleration records for earthquakes from 1987-2008 in south Iceland[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4572.
- [30] Kumari N, Sharma M L, Gupta I D. Stochastic simulation of strong ground motions for Western Himalaya region[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 2286.
- [31] Taborda R, Khoshnevis N, Azzizadeh-Roodpish S, et al. Influence of the source, seismic velocity, and attenuation models on the validation of ground motion simulations[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 4574.
- [32] Camata J J, Corrêa L A, Paludo L C, et al. Wave propagation in highly heterogeneous media: scalability of the mesh and random properties generator[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 789.
- [33] Tanaka K, Sato T. Evaluation of inhomogeneous structures in seismic propagation path in Japan based on the fractal characteristic of observed earthquake motion phase[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 1420.
- [34] Deger T T, Dreger D S. One dimensional crustal structure of Isparta region from broadband modelling[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 1680.
- [35] Zendagui D, Stambouli Boudghene A, Bard P Y, et al. New insight in the derivation of amplification factor by taking into account soil parameters [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017,Paper No. 3821.
- [36] Tsurugi M, Kagawa T, Irikura K. Spectral decay characteristics f_{max} and κ for strong ground motion prediction[C]// 16th World Conference on

- Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1232.
- [37] Kottke A R. VS30- κ relationship implied by ground motion models[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3089.
- [38] Magistrale H, Binselam S A. A site response map of Europe[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 286.
- [39] Ktenidou O J, Abrahamson N A. Estimation of kappa (κ) for rock sites in the NGA-EAST database and implications on design motions[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3841.
- [40] Oana A, Dan K, Miyakoshi J, et al. Simulation of strong ground motions at Onagawa, Japan, during the 2011 off Miyagi, intra-slab earthquake by empirical Green's Function method[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 377.
- [41] Hirai T, Fukuwa N. Green's function database and detailed ground motion prediction for Central Japan based on the Reciprocity Theorem[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 221.
- [42] Wu S L, Charatpangoon B, Kiyono J, et al. Near-fault ground displacement for seismic design of bridge structures[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1490.
- [43] Fernández C, Aguirre P, De la Llera J C, et al. Strong ground motion simulation of the 2015 Illapel Earthquake using corrected Empirical Green's Functions[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4425.
- [44] Tsioulou A, Galasso C. Intensity measures and statistical approaches for the engineering validation of ground motion simulations[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2476.
- [45] Zhong P, Rezaeian S, Hartzell S, et al. Validation of simulated earthquake ground motions based on evolution of intensity and frequency content [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3127.
- [46] Pacor F, Ameri G, Galovic F, et al. Ground motion variability from finite fault simulations[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2062.
- [47] Koufoudi E, Chaljub E, Dufour F, et al. Experimental investigation of spatial variability of ground motions-monitoring of an arch dam[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1737.
- [48] Vacareanu R, Pavel F, Craciun I, et al. Correlation models for strong ground motions from Vrancea intermediate-depth seismic source[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2026.
- [49] Liu T J, Hong H P. Geographically varying ground motion predictions: case study for two historical events[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4519.
- [50] AfifChaouch K, Tiliouine B, Hammoutene M, et al. The October 1980 El-Asnam Earthquake in N. W. Algeria: modelling incoherence of ground motion[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3631.
- [51] AfifChaouch K, Tiliouine B, Hammoutene M, et al. Effects of stochastic soil layers on ground-motion incoherence: a case study in NW Algeria [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3633.
- [52] Wang D, Fan Z L. Cross evolutionary power spectra estimation of spatially variable seismic ground motions via harmonic wavelets[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 701.
- [53] Papadopoulos S, Sextos A, Kwon O, et al. Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic demand to natural gas transmission pipelines[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4318.
- [54] Nagano N, Tendo J, Uebayashi H. Constructive interference of long-period seismic waves in horizontal plane in urbanized area during 2011 Tohoku Earthquake in Japan[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 782.
- [55] Kagawa T. A study on the long period ground motions observed in Osaka Bay area[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2725.
- [56] Hata Y, Minato F, Ikeda T, et al. Evaluation of velocity power spectrum intensity with very high dense spatial location in residential valley-filling area during a future large-scale earthquake[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 282.
- [57] Régnier J, Cadet H, Bard P Y. Impact of non-linear soil behavior on site response amplitude[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 126.
- [58] Terashima Y, Sato Y. Variation of response spectra and group delay time of ground motions in the Kanto Basin, Japan[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1159.
- [59] Asimaki D, Thompson E M, Rajaure S, et al. Martin. Source, basin, and site effects in strong motion records of the 2015 Gorkha Earthquake [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 609.
- [60] Rupakhety R, Ólafsson S, Halldorsson B. The 2015 Gorkha Earthquake sequence: strong ground motion features[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4273.
- [61] Takai N, Shigefuji M, Bijukchhen S, et al. Characteristics of strong ground motion in the Kathmandu valley during the 2015 Gorkha, Nepal Earthquake[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4590.
- [62] Shigefuji M, Takai N, Bijukchhen S, et al. Features of long-period ground motion in the Kathmandu valley during the 2015 Gorkha Nepal Earthquake sequence[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4566.
- [63] Uetake T, Hikima K, Sekine S, et al. Long-period ground motion characteristics in Niigata-ken Chuetsu area, Japan, estimated from acceleration data of teleseismic event[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3630.

- [64] Chen X L, Li Z C, Gao M T, et al. Simulation on near-field high-frequency, far-field abnormal intensity ground motions of M_w 8.0 Wenchuan Earthquake by empirical Green Function method[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3127.
- [65] Kuo C H, Wen K L, Lin C M. Site effect study in Taiwan using the surface-downhole seismic stations[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1535.
- [66] Moschetti M P, Luco N, Baltay A S, et al. Incorporating long-period ($t > 1$ s) earthquake ground motions from 3-D simulations in the U. S. National Seismic Hazard Model[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4423.
- [67] Huda M, Taborda R. A three-dimensional regional-scale earthquake ground motion simulation for the Bengal Basin[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4606.
- [68] Kawabe H, Miyamoto Y, Tanaka S. Long period ground motion prediction in the Osaka Basin for future Nankai Trough Earthquake[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1555.
- [69] Laurendeau A, Bard P Y, Hollender F, et al. Towards the definition of reference motions ($1000 < v_s < 3000$ m/s): analysis of the KiK-net data and correction of the local site effects[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4936.
- [70] Nozu A. Simulation of strong motion time history for the 2011 Tohoku Earthquake with considerations of multiple nonlinear effects[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2772.
- [71] Ding Y, Peng Y, Li J. Physically based phase spectrum and simulation of strong earthquake ground motion[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 531.
- [72] Crempien J G F, Archuleta R J. Inclusion of scattering impulse response functions in ground motion calculations[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4331.
- [73] Archuleta R J, Crempien J G F. The UCSB method for simulating broadband ground motion using correlated rupture parameters on a finite fault [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 4433.
- [74] Igarashi A, Furukawa A, Uno H, et al. Generation of spectrum-compatible bi-directional ground motion accelerograms for seismic design of bridges[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 785.
- [75] Huang D, Wang G. Stochastic modeling of ground motions matching spectral acceleration, cumulative arias intensity and duration[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 1387.
- [76] Drouet S, Montalva G, Dimat  M C, et al. Building a ground-motion logic tree for South America within the GEM-SARA project framework [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 2759.
- [77] Cao Z L, Tao X X. Direction-dependent analysis of parameters for stochastic synthesis of vertical ground motion[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 658.
- [78] Nagashima F, Kawase H, Matsushima S. Estimation of horizontal seismic bedrock motion from vertical surface motion based on horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3685.
- [79] Hidalgo Leiva D A, Pujades L G, D az S A, et al. Orientation-independent measures of ground motion for a database of Central America [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 342.
- [80] Zembaty Z, Mutke G, Bobra P, et al. Acquiring rotational ground motion from triggered seismic events[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 239.
- [81] Falamarz-Sheikhabadi M R. New seismic intensity parameters for rotational components[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 518.
- [82] Montalva G, Bast as N, Rodr guez Marek A. Single station sigma in Chile[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 2799.
- [83] Somala S N. Towards next generation attenuation models for India[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 3348.
- [84] Thompson E M, Worden C B. Estimating fault distances without a fault[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 950.
- [85] Graizer V. G-16 Ground motion prediction equations for the Central and Eastern North America[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago,2017, Paper No. 128.
- [86] Dimas V A, Venkatesan S. New perspectives in developing a GMPE for low to moderate seismicity of Australia using a hybrid approach[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 1144.
- [87] Miura H, Matsuoka M, Eraso J. Estimation of ground shaking distribution based on empirical models and V_s30 map in Bogota, Colombia[C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 4706.