

李宗超, 高孟潭, 陈学良, 吴清. 2019. 2016 年熊本 $M_j7.3$ 地震的工程地震动参数模拟及分布特征分析. 地震学报, 41(1): 100–110. doi: 10.11939/jass.20180070.
Li Z C, Gao M T, Chen X L, Wu Q. 2019. Engineering ground motion parameters simulation and distribution characteristics analysis of Kumamoto $M_j7.3$ earthquake in 2016. *Acta Seismologica Sinica*, 41(1): 100–110. doi: 10.11939/jass.20180070.

2016 年熊本 $M_j7.3$ 地震的工程地震动参数 模拟及分布特征分析*

李宗超[†] 高孟潭 陈学良 吴 清

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 本文选取 2016 年 4 月 16 日日本熊本县 $M_j7.3$ ($M_w7.0$) 地震近场区域内 K-net 地震台网的 47 个强震台站所记录的加速度数据, 运用经验格林函数法模拟分析此次地震主要的工程地震参数并给出了各工程参数的空间分布. 通过对比分析得到结论如下: ① 地震动时程的基本频谱的模拟结果较好, 尤其是 1–15 Hz 的高频段内; ② 在震源距小于 50 km 范围内, 峰值加速度和阿里亚斯强度的观测值与模拟值拟合较好, 二者在近场区域均以椭圆形向周围扩散衰减, 且阿里亚斯强度的模拟值整体大于观测值; ③ 卓越周期拟合整体较好, 但在局部区域存在较大差异, 模拟结果难以表征场地环境的复杂性.

关键词 数值模拟 经验格林函数 工程地震参数 基本频谱 熊本地震
doi: 10.11939/jass.20180070 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Engineering ground motion parameters simulation and distribution characteristics analysis of Kumamoto $M_j7.3$ earthquake in 2016

Li Zongchao[†] Gao Mengtan Chen Xueliang Wu Qing

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the empirical Green's function method is used to simulate and analyze the main engineering seismic parameters of 47 strong stations from K-net of the $M_j7.3$ ($M_w7.0$) earthquake in Kumamoto county, Japan. The main conclusions are as follows: ① The basic spectrum simulation results fitted better, especially in the high frequency band 1–15 Hz; ② The simulated values of both peak ground acceleration and Arias intensity at the focal distance less than 50 km have the better fitting with observed values, they are diffused attenuating around the ellipse in the near field, and the simulated values of Arias intensity are greater than the observed values; ③ The predominant period fitting is good, as a whole, but there are larger differences in the local area. The simulated results cannot indicate the complexity of site condition.

* 基金项目 国家重点研发计划(2017YFC1500205)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB18B20 和 DQJB17C08)共同资助.

收稿日期 2018–05–29 收到初稿, 2018–07–25 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: lizongchaoigo@163.com



Key words: numerical simulation; empirical Green's function; engineering seismic parameter; basic frequency spectrum; Kumamoto earthquake

引言

工程地震动参数是指在工程应用领域使用较多并具有较高参考价值的地震动参数,例如地震动的幅值、持时、反应谱、阿里亚斯(Arias)强度和卓越周期等。地震动参数是工程抗震设计的依据,通常普通工业与民用建筑需要重点参考地震动的峰值加速度(peak ground acceleration, 简称为 PGA),而重大基础设施则需要额外参考频谱和持时,边坡稳定以及滑坡体的安全性等需要重点参考阿里亚斯强度等参数。本文采用 Irikura (1986) 等改进了的经验格林函数方法,其可靠性已经过日本多次地震动数值模拟所验证(Miyake *et al*, 2003; Irikura, Miyake, 2011; Irikura *et al*, 2017),且被广泛认可。由于小震记录受震源的破裂过程及传播介质复杂性的影响(李启程, 2010),所以由小震记录合成的大地震记录自然也需考虑震源和传播介质的复杂性(李宗超等, 2016)。

Kanamori (1979) 尝试利用对大小地震地震矩的比值进行取整的方法来确定所需小震数目,并针对所用小震与大震记录并非取自同一地震和同一台站的情况提出了修正公式。Irikura 等(1986)考虑了大、小地震之间的相似性关系,将断层大小、平均位错量和上升时间等震源参数联系起来,通过理论推导,提出了大小地震满足一定相似条件下的经验格林函数方法,将其称为改进经验格林函数方法。Irikura (1986)从理论上证明,并结合实际震例验证了经验格林函数的有效性。Dan 等(1989)通过考虑大、小地震之间的应力降与平均位错的不同,采用布龙模型的小震远场傅里叶谱对大震子源进行了修正。

Irikura 和 Kamae (1994)为了扩展经验格林函数的应用范围,在大小地震长宽比相等但不等于位错比的假设下,提出合成地震动需考虑断层面上凹凸体的影响,第一次将凹凸体模型与经验格林函数方法结合起来。Somerville (1999)等通过回归分析得到了确定凹凸体各参数的公式,并基于断层中凹凸体特征的统计分析,提出了确定断层破裂面上凹凸体的标准,即凹凸体为滑动量大于断层上平均滑动量 1.5 倍或以上的区域,而确定凹凸体的方法是去掉断层中滑动量小于 0.3 倍断层平均滑动量的断层边界后,得到新的矩形断层,重复此过程直到得到所有断层的边界均大于或等于 0.3 倍的断层平均滑动量,再将断层上大于等于平均滑动 1.5 倍的区域视为凹凸体。鉴于凹凸体模型具有与经验格林函数法相结合的优点且模拟结果更加精确,本文拟采用 Irikura (1986)改进的经验格林函数法对 2016 年日本熊本 $M_j7.3$ 地震的地震动进行数值模拟,进行地震动模拟时同时将采用包含凹凸体的震源模型,以期获取熊本地震影响区域内诸如 PGA, 阿里亚斯强度,卓越周期等的地震动参数的空间分布特征。

1 基本地震信息及震源参数估计

2016 年 4 月 16 日,日本熊本县发生 $M_j7.3$ 地震,震中位置为(32.74°N, 130.76°E),位于熊本县城区,震源深度为 13.1 km,发震断层尺度为 40 km×16 km。该区域地形相对比较平缓(图 1),东部为九州山地,西部为日本海。而 $M_j5.4$ 余震的震中位置为(32.75°N, 130.76°E),距离主震位置较近,震源深度为 15 km,应力降为 0.9 MPa。主震和余震详细信息列于表 1。本文利用 $M_j5.4$ 余震记录作为格林函数,选取 K-net 地震台网中可同时记录到这两次地震的 47 个强震台站的地震记录来模拟地震动场(National Research Institute for Earth Science and

Disaster Resilience, 2016), 台站分布如图 1 所示.

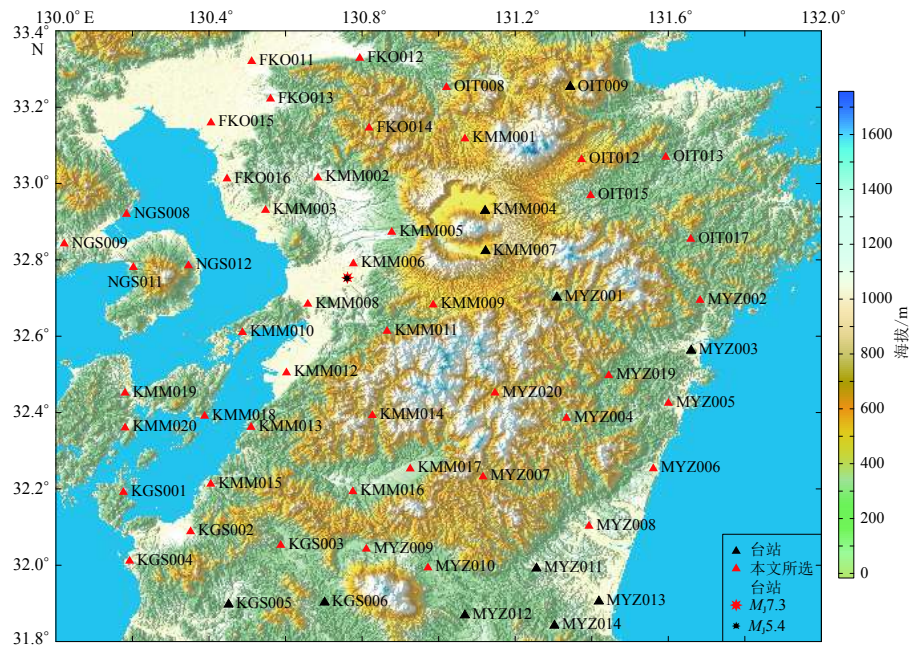


图 1 震源位置、近场区域地形及台站分布

Fig. 1 Source location and distribution of stations and terrains in the near field of 2016 Kumamoto earthquake

表 1 熊本 $M_{7.3}$ 地震和 $M_{5.3}$ 余震相关参数(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2016)

Table 1 The relevant parameters of Kumamoto $M_{7.3}$ earthquake and its aftershock $M_{5.3}$ (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2016)

震级	震中位置		发震断层			震源深度/km	地震矩/(10^{17} N·m)
	北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$		
$M_{7.3}$	32.74	130.76	235	88	-14	13.1	446
$M_{5.4}$	32.75	130.76	234	74	15	15.0	2

2 基本频谱分析

重大工程的抗震设计中,需要地震动时程作为地震输入来进行结构地震反应分析计算,而所输入地震动时程的质量和普适性与抗震分析结果的准确性直接相关(Dai *et al*, 2014).地震动时程的模拟结果则是衡量地震反演精准性的基本标准.本文所用程序为 Miyake 等(2003)修改后的 egfm v1.2e 程序.在此基础上, Li 等(2017, 2018)对该程序的输出模式和内容进行调整,使其可直接输出模拟的波形数据和频谱数据,包括加速度时程、傅里叶谱、反应谱等数据.本文在地震动加速度时程数据的基础上计算得到熊本地震的地震动参数,包括 47 个模拟台站的 PGA、阿里亚斯强度、卓越周期等参数,并将 47 个台站的数据进行拟合得到各个地震动参数的空间分布特征.将地震动基本频谱和参数的观测值与模拟值进行对比(图 2)可以看出,各台站的模拟时程与观测时程拟合较好,从地震动持时及加速度的幅值上看,模拟的数据与目标台站观测数据总体上较为匹配.换言之,模拟时程与观测时程作用在

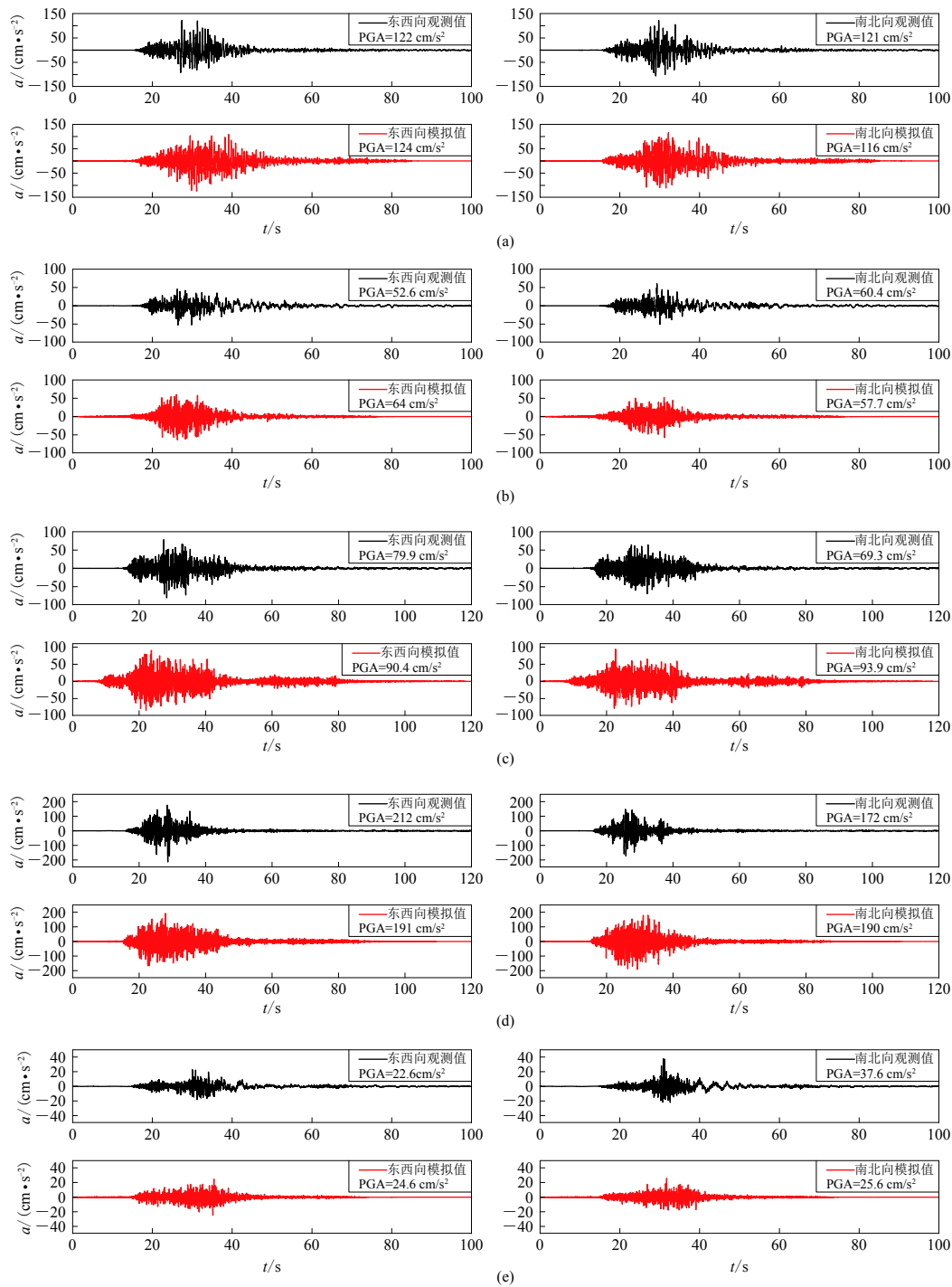


图 2 研究区内部分台站所记录的熊本地震观测值与模拟值的加速度时程图
(a) FKO011 台站; (b) FKO012 台站; (c) KGS003 台站; (d) KMM003 台站; (e) MYZ005 台站
Fig. 2 The acceleration time history of the observed and synthetic of the Kumamoto earthquake recorded at several stations in the research area
(a) Station FKO011; (b) Station FKO012; (c) Station KGS003; (d) Station KMM003; (e) Station MYZ005

建筑物上可产生相似甚至相同的破坏程度. 此外, 合成的地震动时程包络线与观测值的包络线具有较高的吻合度, 模拟的时程可以较好地再现真实的地震动时程特征.

傅里叶谱的振幅描述了地震动过程的频谱特征, 包括各频率分量的相位及幅值信息. 本文中的傅里叶谱振幅的观测值和与模拟值整体上的相似性较好(图 3), 尤其当频率范围介于

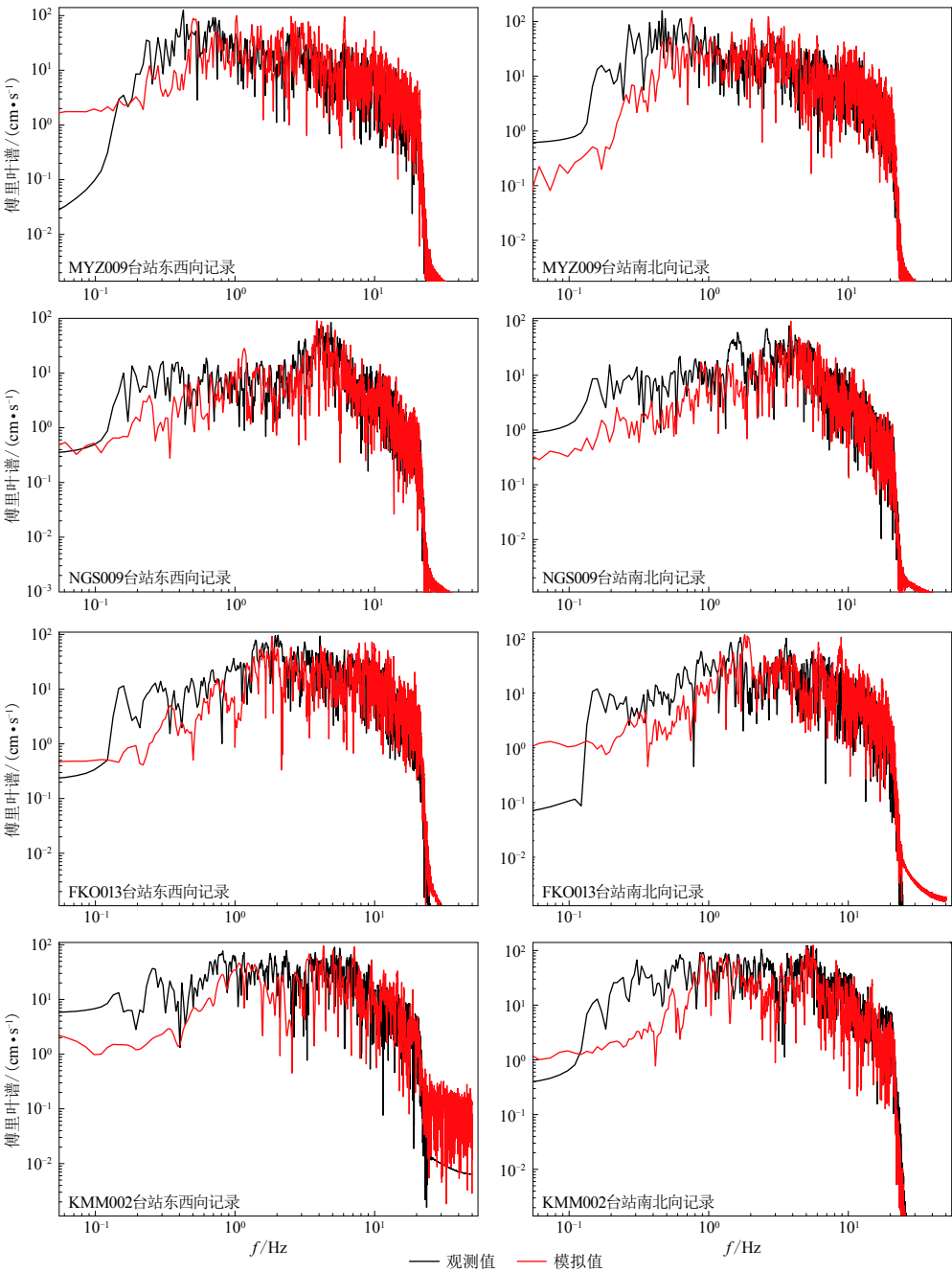


图 3 熊本地震 4 个台站点位置的傅里叶谱

Fig. 3 The Fourier spectrum of four stations in Kumamoto earthquake

1—15 Hz 之间时相似度极高; 当频率低于 0.5 Hz 时, 模拟的傅里叶谱的振幅一般较观测值的傅里叶谱的振幅低. 这种现象也反映出经验格林函数法在模拟时具有高频段结果较好、而在低频段的模拟结果较差的特点.

3 峰值加速度分布特征分析

峰值加速度是反映地震动特征的一个非常重要的参数, 能够为地震烈度评估、地震危险区确定、城市未来规划以及建筑物的抗震设计提供科学的参考信息. 本文通过对 47 个强震台站的 PGA 进行插值, 得到了熊本地震影响区域内的 PGA 的分布情况, 如图 4 所示.

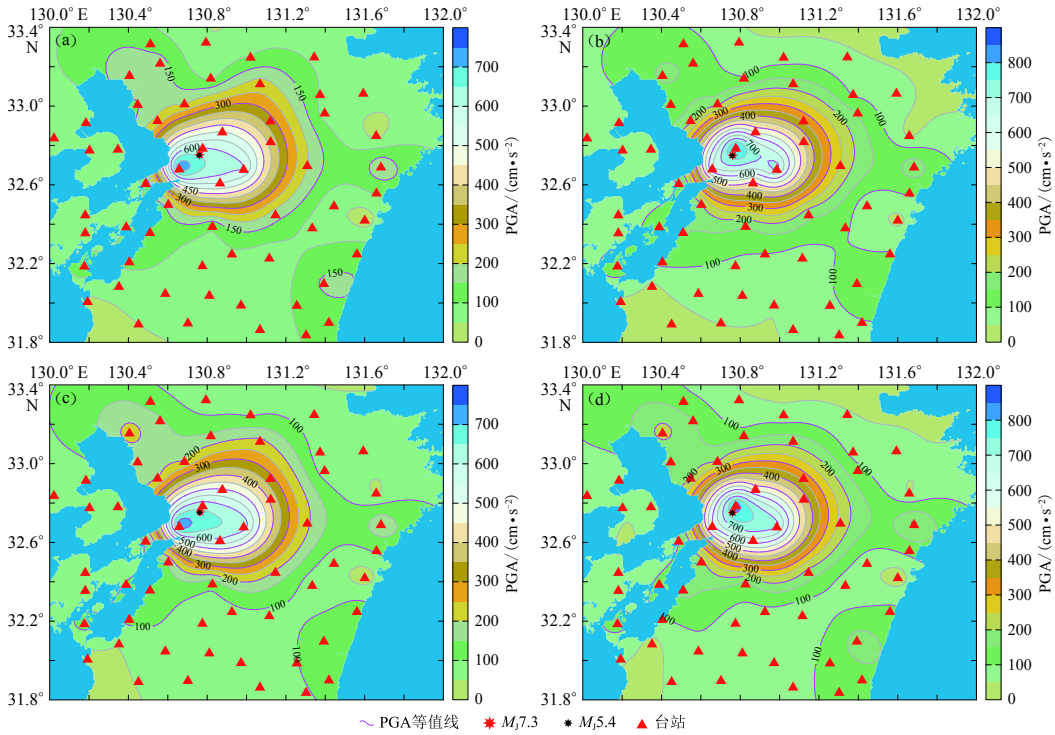


图 4 熊本地震的 PGA 观测值与模拟值的空间分布特征

(a) EW 向观测值; (b) NS 向观测值; (c) EW 向模拟值; (d) NS 向模拟值

Fig. 4 The distribution characteristics of observed and synthetic PGA record of Kumamoto earthquake

(a) Observed EW component; (b) Observed NS component; (c) Synthesized EW component; (d) Synthesized NS component

通过图 4 对比可以看出, 观测值与模拟值相似度较高; 近场水平向 PGA 整体呈椭圆形向四周衰减扩散, 长轴方向大致呈 EW 走向; EW 方向分量的 PGA 最大值出现在 KMM008 台站, 而 NS 方向分量 PGA 的最大值出现在 KMM006 台站. PGA 呈椭圆形向四周衰减扩散的现象可能与断层的方向性效应和近地表断层上下盘断层效应有关. 而在 FKO015 台站位置处, 存在一个 PGA 值异常的区域, 其模拟值比观测值要大, 可能是由于台站与震源之间复杂地形的影响, 但由于数值模拟时很难清晰地了解某些特殊地形对地震动的影响, 故其中存在较大的不确定性.

4 阿里亚斯强度分布特征分析

阿里亚斯强度是表示地震能量的一个重要参量,描述了地震动能量的释放特征,包括振幅变化、频率时程等信息(Arias, 1970),可以用于估计地震引起的滑坡、砂土液化以及结构破坏状态等(Arias, 1970; Del Gaudio, Wasowski, 2004),也可以应用于地震灾害预防以及震后地震快速救援等.

阿里亚斯强度可以量化地震发生过程中弹性系统的能量消耗,其表现形式为

$$I_a=\frac{\pi}{2g}\int_0^{T_d}a(t)^2dt, \tag{1}$$

式中, $a(t)$ 为强震仪记录到的地震动加速度; T_d 为记录的持时; g 为重力加速度(王秀英等, 2010; 李宗超, 2017). 由于阿里亚斯强度比受干扰因素影响较多的峰值加速度参数能更准确地反映真正的地震动水平, 因而其与地表破坏程度的关系也更为密切(王秀英等, 2010). 通过对 47 个强震台站的阿里亚斯强度值进行插值拟合, 得到整个研究区域的阿里亚斯强度分布情况, 如图 5 所示.

同 PGA 的拟合结果相似, 阿里亚斯强度的观测值与模拟值同样具备较高的吻合度, 近场水平向整体呈椭圆形向四周衰减扩散, 长轴方向大致呈 EW 走向. EW 方向分量的阿里亚

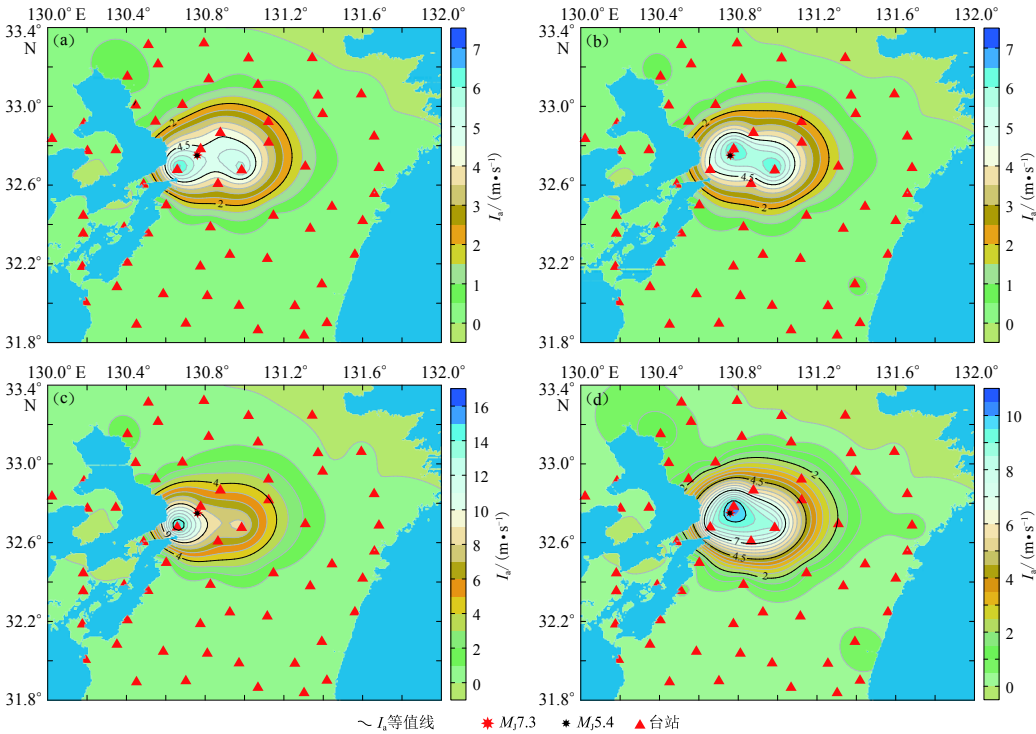


图 5 熊本地震阿里亚斯强度观测值与模拟值空间分布特征

(a) EW 向观测值; (b) NS 向观测值; (c) EW 向模拟值; (d) NS 向模拟值

Fig. 5 The distribution characteristics of Arias intensity of observed record and synthetic records for Kumamoto earthquake

(a) Observed EW component; (b) Observed NS component; (c) Synthesized EW component; (d) Synthesized NS component

斯强度的最大值出现在 KMM008 台站, 而 NS 方向分量的阿里亚斯强度的最大值出现在 KMM006 台站以及 KMM009 台站附近. 阿里亚斯强度呈椭圆形向四周衰减扩散的现象可能与断层的方向性效应和近地表断层上下盘断层效应有关.

熊本地震的阿里亚斯强度的模拟值整体上要大于其观测值. EW 方向分量差异较大, 最大观测值为 6.9 m/s, 而最大模拟值为 16.28 m/s; NS 方向分量同样差异较大, 最大观测值为 6.87 m/s, 而最大模拟值为 10.54 m/s. 阿里亚斯强度是与地震能量关联性较大的地震动参量, 模拟值与观测值出现较大差异, 可能是传播路径以及地形复杂因素所致, 虽然经验格林函数法具有不考虑传播路径和场地条件影响的优势, 但其只是个大致的假定, 真实情况下, 大、小地震的传播路径并非完全一致, 存在较大的不确定性.

5 卓越周期分布特征分析

卓越周期的本质是波形的共振, 也就是说当地震波振动周期与岩石或土体的自然振动周期一致时, 共振效应所引起的表面振动会加强(李宗超, 2017). 当然如果某一周期(与场地卓越周期不一致)的地震动成分很高, 即使在复杂传播路径及场地环境的影响下, 这一成分的地震动反应仍会比较强烈, 但是在当前工程应用领域中, 对建筑物抗震设防影响较大的地震动周期成分和场地的卓越周期是一致的.

卓越周期是通过地震记录统计得到的, 地基土硬度不同则所对应的卓越周期不同. 根据卓越周期的不同, 地基土可以分为 4 个级别, 如表 2 所示. 土越软越深, 频谱中的长周期成分就越多. 根据熊本地震的地震动数据可以得出该地震中 S 波的卓越周期, 同时与模拟值进行对比, 结果如图 6 所示.

表 2 根据卓越周期进行的地基土分类
Table 2 Foundation soil classification based on predominant period

序号	类别	卓越周期/s	平均周期/s
1	稳定基岩层	0.1—0.2	0.15
2	普通土层	0.21—0.4	0.27
3	软土层	介于第 2 类土与第 4 类土之间	介于第 2 类土与第 4 类土之间
4	异常土层	0.3—0.7	0.5

卓越周期整体上拟合较好, 但不同方向分量上存在差异. 在 EW 方向分量上, 地震动观测值的卓越周期最大值为 0.78 s, 出现在 KMM013 台站, 模拟值卓越周期最大值为 0.54 s, 出现在 KGS004 台站. 卓越周期在近场、震源西北部、东部等区域拟合较好, 而在震源南部区域拟合欠佳, 地震动模拟值的卓越周期明显比观测值的卓越周期大, 且在台站 MYZ010 和台站 MYZ012 的模拟结果明显比周围台站的大, 与观测值的分布特征存在明显差异.

对于 NS 方向分量, 观测值卓越周期最大值为 0.72 s, 出现在 KMM010 台站, 模拟值卓越周期最大值为 0.66 s, 出现在 KMM010 台站, 最大观测值与模拟值在同一位置出现. 但在震源东部, 例如 MYZ001, MYZ019 和 OIT015 台站, 模拟值的卓越周期明显小于观测值的卓越周期, 观测值在这些台站处的卓越周期异常值并未体现出来. 在震源南部区域, 模拟值的卓越周期与观测值的卓越周期也存在较大差异.

卓越周期是与场地条件相关性很大的参数, 与场地土层类型以及场地周边地形特征等都有关系. 经验格林函数方法重点考虑了震源环节的参数选取, 对于场地则假定大小地震的

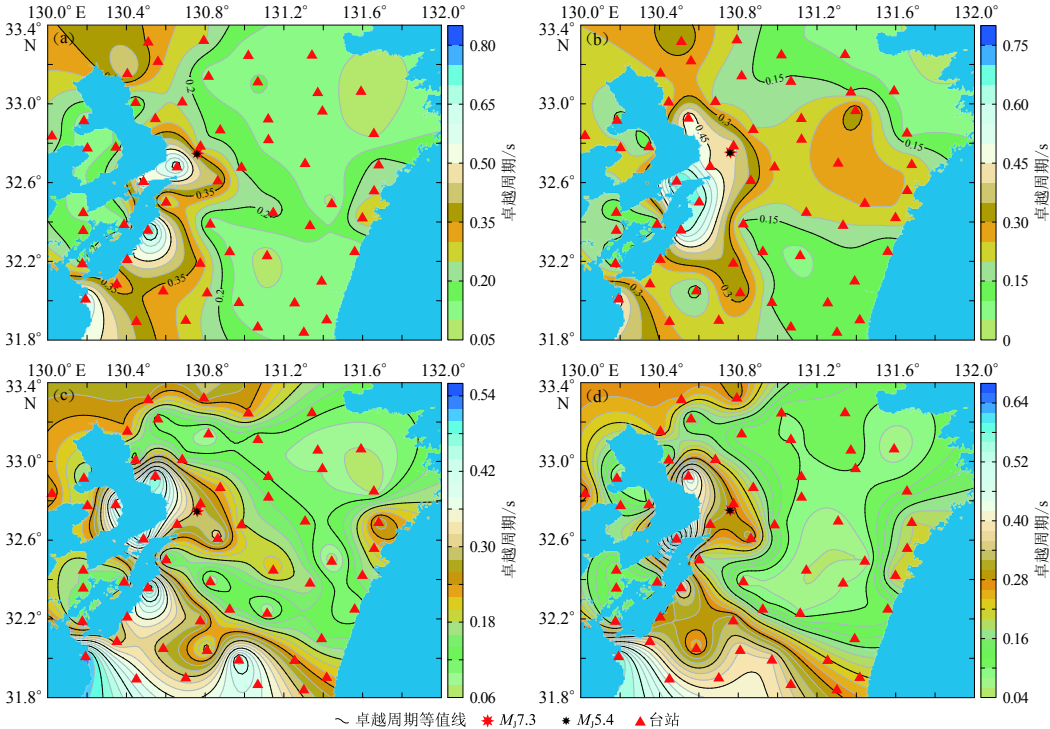


图 6 熊本地震的卓越周期观测值与模拟值的空间分布特征

(a) EW 向观测值; (b) NS 向观测值; (c) EW 向模拟值; (d) NS 向模拟值

Fig. 6 The distribution characteristics of predominant period for observed record and synthetic record

(a) Observed EW component; (b) Observed NS component; (c) Synthesized EW component; (d) Synthesized NS component

场地具有相似性,此假设存在不确定性,这是导致卓越周期在某些区域的拟合结果差异较大,因此,后期在用经验格林函数法模拟卓越周期时,尤其是在地形以及场地条件复杂的区域,需要补充考虑场地条件的影响。

6 讨论与结论

本文比较了地震动时程的观测值与模拟值的基本频谱,结果显示:模拟的地震动持时以及加速度幅值与目标台站总体上较为匹配;模拟的地震动时程包络线与观测值的包络线有较高的吻合度,模拟的时程可以较好地再现真实的地震动时程特征;振幅谱的观测值与模拟值整体上的相似性非常好,尤其是频率范围介于 1—15 Hz 之间的频段,相似度极高,但是,在频率低于 0.5 Hz 时,模拟的振幅谱一般比观测值的振幅谱低,这也反映出经验格林函数法对于高频段的模拟较好,在低频段的模拟结果不是很好。

通过对熊本地震地震动工程应用参数的观测值与模拟值的比较和分析得到如下结论:

- 1) PGA 与阿里亚斯强度的观测值与模拟值在震源距小于 50 km 范围内的拟合结果较好,阿里亚斯强度的模拟值整体大于观测值,且二者均在近场区域以椭圆形向周围衰减扩散;
- 2) 卓越周期整体拟合较好,但在局部区域存在较大差异,模拟结果难以再现场地环境的复杂性。

本文也再次验证了使用经验格林函数模拟地震动是可行的, 但也不否认, 一些参数在一些地区的观测值与模拟值存在差异, 甚至是较大的差异, 并非所有参数都拟合得很好. 造成这种差异的原因很多, 例如传播路径和传播介质的不均匀特性, 复杂地形引起的地震波的反射和折射, 模拟的过程还包括其它很多不确定性. 考虑不确定性因素进行地震动模拟将是我们下一步需要重点探索的问题.

参 考 文 献

- 李宗超, 陈学良, 高孟潭, 王建龙, 鄢兆伦, 李铁飞. 2016. 经验格林函数方法模拟强地面运动的研究进展[J]. 世界地震工程, **32**(2): 209–216.
- Li Z C, Chen X L, Gao M T, Wang J L, Yan Z L, Li T F. 2016. Research progress of empirical Green function method simulation strong ground motion[J]. *World Earthquake Engineering*, **32**(2): 209–216 (in Chinese).
- 李宗超. 2017. 大震近场地震动数值模拟不确定性研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 1–126.
- Li Z C. 2017. *The Uncertainty Factors Research of Near-Field Ground Motion Numerical Simulation*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 1–126 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 张玲. 2010. 汶川地震触发崩滑与 Arias 强度关系研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, **18**(4): 645–656.
- Wang X Y, Nie G Z, Zhang L. 2010. Relationship between landslides induced by the Wenchuan earthquake and Arias intensity[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, **18**(4): 645–656 (in Chinese).
- 李启成. 2010. 经验格林函数方法模拟地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 1–119.
- Li Q C. 2010. *Research on Ground Motion Simulation with Empirical Green Function Method*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 1–119 (in Chinese).
- 王海云. 2004. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 1–135.
- Wang H Y. 2004. *Finite Fault Source Model for Predicating Near-Field Strong Ground Motion* [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 1–135 (in Chinese).
- Arias A. 1970. A measure of earthquake intensity[G]//*Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: MIT Press: 438–483.
- Dai Z J, Li X J, Hou C L. 2014. An optimization method for the generation of ground motions compatible with multi-damping design spectra[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **66**: 199–205.
- Dan K, Watanabe T, Tanaka T. 1989. A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement[G]//*Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. Tokyo: Structural and Construction Engineering: 27–36.
- Del Gaudio V, Wasowski J. 2004. Time probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard in Irpinia (Southern Italy)[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **24**(12): 915–928.
- Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. 2016. Kumamoto earthquake[EB/OL]. [2017–12–18]. http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_report/#6806.
- Irikura K. 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquake[J]. *Bull Disas Prev Res*, **33**: 151–156.
- Irikura K. 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function[C]//*Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*. Tokyo: Architectural Institute of Japan: 151–156.
- Irikura K, Kamae K. 1994. Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique[J]. *Ann Geophys*, **37**(6): 1721–1743.
- Irikura K, Miyake H. 2011. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios[J]. *Pure Appl Geophys*, **168**(1/2): 85–104.
- Irikura K, Miyakoshi K, Kamae K, Yoshida K, Somei K, Kurahashi S, Miyake H. 2017. Applicability of source scaling relations for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake[J]. *Earth Planets Space*, **69**: 10.
- Kanamori H. 1979. A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquake[J]. *Bull Seis-*

mol Soc Am, **69**(6): 1654–1670.

- Li Z C, Chen X L, Gao M T, Jiang H, Li T F. 2017. Simulating and analyzing engineering parameters of Kyushu Earthquake, Japan, 1997, by empirical Green function method[J]. *J Seismol*, **21**(2): 367–384.
- Li Z C, Gao M T, Jiang H, Chen X L, Li T F, Zhao X F. 2018. Sensitivity analysis study of the source parameter uncertainty factors for predicting near-field strong ground motion[J]. *Acta Geophys*, **66**(4): 523–540.
- Miyake H, Iwata T, Irikura K. 2003. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(6): 2531–2545.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2016. Strong-motion seismograph networks (K-NET, KIK-NET)[EB/OL]. [2017-12-18]. http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/data/index_en.html.
- Somerville P, Irikura K, Graves R, Sawada S, Wald D, Abrahamson N, Iwasaki Y, Kagawa T, Smith N, Kowada A. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seismol Res Lett*, **70**(1): 59–80.