

基于 KiK-net 记录的 PGA 与 Sa 场地 影响因子分布研究

王祥祺¹, 王自法^{2,3}, 赵登科², 李兆焱²

(1. 河南大学 土木建筑学院 河南 开封 475000; 2. 中国地震局工程力学研究所 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 中震科建(广东)防灾减灾研究院, 广东 韶关 512000)

摘 要: 场地条件对地震动有着重要的影响,它一般通过地表峰值加速度 PGA 或者谱加速度 Sa 在不同场地条件下的放大系数表示。以往的相关研究中缺少大量的实测地震动数据分析;没有明确给出 PGA 和 Sa 在不同场景下的适用性;较少赋予其放大系数分布概率含义。选取 KiK-net 台网 1997—2019 年记录的 210 多万条地震动信息,通过 PGA 与 Sa 放大系数的分布分析了其不同场景下的适用性,然后基于控制变量法和回归方法对每个台站的 PGA 放大系数进行拟合分析,最后对不同场地类别的 PGA 放大系数进行了概率分布函数拟合。研究结果表明:场地条件不变情况下,地震动放大系数的分布有很好的规律性;Sa 较 PGA 放大系数分布离散程度更小,且随着 Sa 周期增加,其离散程度呈现逐渐减小趋势,在建筑物周期确定的情况下, Sa 具有更高的适用性; I、II 类场地且周期大于 1.0 s 的 Sa 放大系数具有较高的稳定性;相同场地条件下,PGA 放大系数呈非线性分布,随着基岩 PGA(PGA_R) 的增加逐渐减少;PGA 放大系数趋于指数正态分布。研究结果可用于未来更加准确地估计损失与描述场地条件对地震动的影响。

关键词: 场地条件; 地震动; 场地放大系数; 线性拟合; 概率分布

中图分类号: P65

文献标识码: A

Research on the distribution of site influence factors for PGA and Sa based on KiK-net records

WANG Xiangqi¹, WANG Zifa^{2,3}, ZHAO Dengke², LI Zhaoyan²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475000, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. CEAKJ ADPRHexa Inc, Shaoguan 512000, China)

Abstract: Site conditions have an important influence on ground motion, and the influence is generally expressed by the amplification factor of the Peak Ground Acceleration (PGA) or Spectral Acceleration (Sa). Previous related research results have shown the following shortcomings including without the support of analysis based on a large number of observed ground motion data, no explicit specification of the applicability of PGA and Sa in different scenarios, and lack of distribution probability of the amplification factor. This paper selects more than 2.1 million ground motion datasets recorded by the KiK-net network from 1997 to 2019, to analyze the amplification factor and its distribution for both PGA and Sa. Two regression methods are used to fit the PGA amplification factor of each station, and the probability distribution function for each site category is subsequently fitted using different functions. The results show that within the same site category, the distribution of ground motion amplification

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-09-03

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021B09); 国家自然科学基金面上项目(51978634)

Supported by: Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(2021B09); National Natural Science Foundation of China (51978634)

作者简介: 王祥祺(1996—),男,硕士研究生,主要从事地震工程方面的研究。E-mail: 1341088139@qq.com

通讯作者: 王自法(1965—),男,研究员,博士,主要从事巨灾风险及地震保险等方面的研究。E-mail: zifa@iem.ac.cn

coefficients has a good concentration around the mean value. Compared to PGA, the distribution of S_a amplification coefficients has a smaller degree of dispersion, and with the increase of the S_a period, the degree of dispersion decreases. When the natural period of building is determined, S_a has better applicability than PGA. The S_a amplification factor of I and II site categories is less disperse when the natural period is greater than 1.0 s. For the same site conditions, the PGA amplification factor is nonlinearly distributed and gradually decreases with the increase of bedrock PGA. The PGA amplification factor distribution tends to follow an exponential normal function. These results can be used to estimate the loss more accurately and quantify the impact of site conditions on ground motion in the future.

Key words: site condition; ground motion; site amplification factor; linear fitting; probability distribution

0 引言

地震是由于板块构造之间的运动引起的,是地壳岩石长时间积累的应变能量瞬间释放的结果^[1]。场地条件深刻影响着场地附近地震波的能量传递,国内外有多次记录证明场地条件导致地震波放大效应^[2-6],从而增加了损失。研究不同场地条件下地震动的分布规律不仅能为抗震设计与地震损伤估计提供更好的支持^[7],还能使目前的地震预警系统等减灾手段变得更加完善^[8]。

场地对地震动影响分析的方法可以分为数值理论法和实测分析。数值理论法指建立场地响应模型,利用振动或者波动原理进行理论计算分析场地的反应。如李小军等^[9]基于 188 个场地计算模型,采用等效线性化波动方法探讨了场地条件对地震动影响的特点;魏来等^[10]利用一维场地地震反应分析了输入地震动和土含水率对 PGA 放大的影响;梁建文等^[11]基于有限元软件,建立了基岩上覆盖深厚软土的三维凹陷地形响应模型,发现凹陷地形中心附近的非线性地震响应可能会大于其线性地震响应;WANG 等^[12]建立三维模型模拟香港岛西部地形上的地震波传播,发现地形放大与场地周期有密切关系;HAMIDREZA 等^[13]通过人工神经网络方法和二维有限元分析软件比较不同的土层和土壤特性对 PGA 放大系数的影响,发现剪切波速和土层厚度对 PGA 放大系数的正确预测有很大作用,且土壤的黏结度和摩擦角对 PGA 放大效应也具有影响。但由于建模难以反应真实的场地,且计算复杂,计算范围小,所以直接理论方法难以反映场地响应真实情况,有着一定的局限性。

实测分析方法则是根据台站的实测记录进行分析,所以较直接理论方法更具真实性。如章文波等^[14]根据唐山地区 9 个台站记录的 13 次近场地震,以基岩场地台站(-822 m)作为参考场地分析场地放大效应;闫静茹等^[15]搜集了山东省 278 个土层结构的详细数据对 II 类和 III 类场地的场地反应进行研究,发现场地土对输入地震动具有放大作用,且 II 类场地 PGA 多数情况高于 III 类场地;陈龙伟等^[16]基于 KiK-net 台网的 2 个台站记录信息分析了 S_{a_F} (谱加速度放大系数)与基岩处 S_a 的关系,发现场地周期 $T < 0.3$ s 时,软硬土场地 $\log 10(S_{a_F})$ 都随着 $\log 10(S_{a_R})$ 的增大而减小, $T > 0.3$ s 时硬土场地的 $\log 10(S_{a_F})$ 随着 $\log 10(S_{a_R})$ 的增大基本不变或稍微增大;徐扬等^[17]根据 08 年汶川地震远场记录对太原盆地进行研究,发现覆盖层厚度对长周期地震动有较强的放大作用。上述研究场地影响的研究方法中存在三个方面的问题:一是进行分析的实测研究数据相对较少,研究的精度和普适性有待进一步验证;二是没有发现对 PGA 与 S_a 的分布进行对比分析,无法给出 PGA 与 S_a 在不同场景下的适用性;三是没有考虑地震动放大系数的不确定性,即地震动放大系数分布概率的问题。

针对上述 3 个问题,本文基于日本的 KiK-net 强震监测网 1997—2019 年记录的 210 多万条实测地震动数据,计算了所有记录地震动的 S_a 和 PGA 及其放大系数,对其进行离散性分析并给出各自的适用范围,然后通过回归方法得到 PGA 放大系数,并使用 80 个常见的分布函数(<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated>)对 PGA 放大系数分布概率进行拟合得到其分布规律,为相关的研究与实践提供参考。

1 数据准备

日本防灾科学技术研究所在日本国内建立的近 700 个强震观测台站组成 KiK-net 强震观测台网

(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp>) 每个台站有一对高敏感度的地震仪分别安装在地表和井底,地震传感器可以采集 3 个方向(EW、NS、UD) 的地震动数据。此外,日本防灾科学技术研究所还提供了每个台站的场地详细的钻孔信息,包括土层结构和土层剪切波速图。本文数据包含了 KiK-net 强震观测台网 698 个台站在 1997—2019 年由 1.1 万多次地震产生的 210 万多条地震记录数据。

1.1 数据计算

本文需要计算得到的基础特征数据有 V_{s30} 值、PGA、PGA 放大系数(PGA_F) 等。台站的 V_{s30} 值由日本防灾科学技术研究所提供的场地钻孔资料按照式(1) 计算:

$$V_{s30} = 30 / \sum_1^n \frac{d_i}{V_{s_i}} \tag{1}$$

式中: d_i 为第 i 层土厚度; V_{s_i} 为第 i 土层的剪切波速; i 为地下 30 m 内的土层数量。当钻孔深度不足 30 m 时,按照外推公式去计算 V_{s30} 值^[18]。

PGA 按照式(2) 计算:

$$PGA = \sqrt{PGA_{EW} \times PGA_{NS}} \tag{2}$$

式中: PGA_{EW} 为水平东西向加速度记录峰值; PGA_{NS} 为水平南北向加速度记录峰值。PGA 单位: cm/s^2 。PGA 放大系数按照式(3) 计算:

$$PGA_F = \frac{PGA_S}{PGA_R} \tag{3}$$

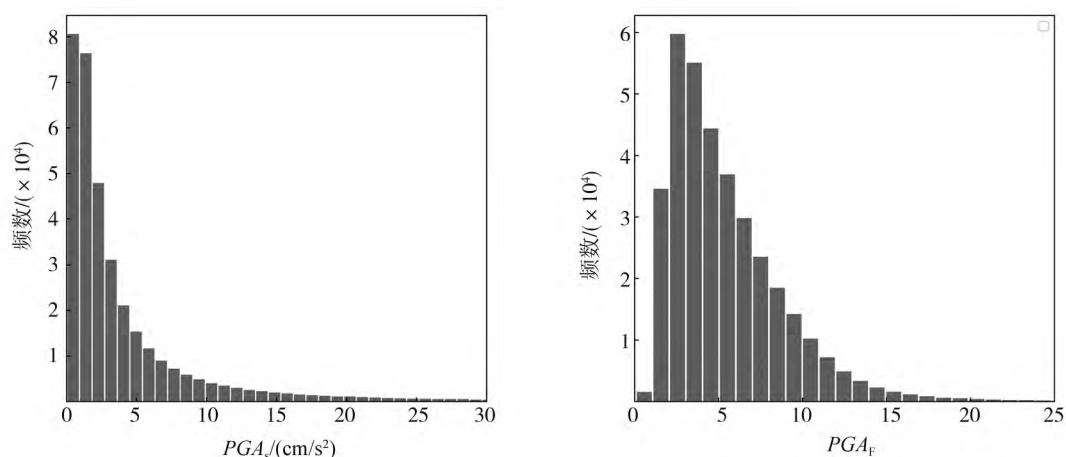
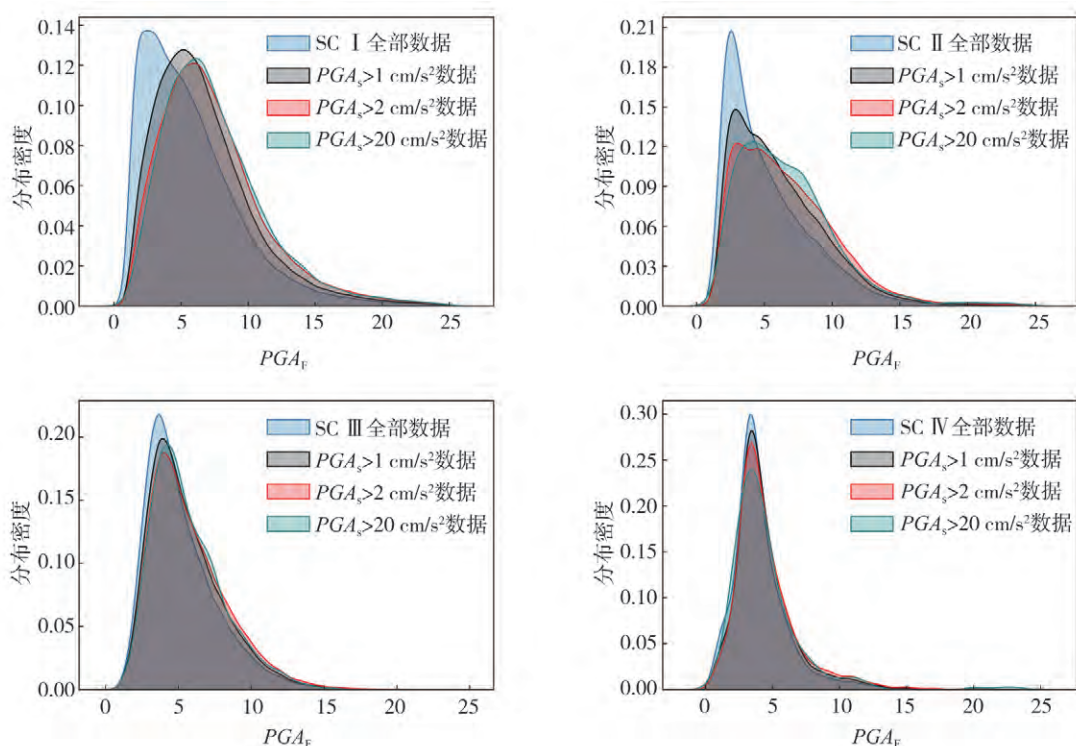
式中: PGA_S 为台站地表记录的峰值加速度值; PGA_R 为同一台站基岩记录的峰值加速度值。

1.2 数据筛选

部分强震观测数据计算结果如表 1 所示, PGA_S 和 PGA_F 分布如图 1 所示。图 1 可以看出 PGA_S 多数分布在较小的区间,基于大量较低的(小于 $20 \sim 30 \text{ cm/s}^2$) PGA_S 所得分析结果对工程结构抗震分析不具有实际意义,因此,本文先根据 ZHAO 等^[19-20] 用基本周期去对应 V_{s30} 范围及美国 NEHRP 规范中的场地类别标准分为 I、II、III、IV 类场地,分析研究了不同场地类别下的 PGA_S 分布,并根据不同筛选条件对 4 种场地类别下 PGA_F 分布密度进行对比如图 2 所示。图 2 不难发现在各类场地中 $PGA_S > 2 \text{ cm/s}^2$ 与 $PGA_S > 20 \text{ cm/s}^2$ 的 PGA_F 密度分布基本重合,故本文基于 $PGA_S > 2 \text{ cm/s}^2$ 条件对数据进行筛选,筛选后的数据占总数据的 52%,且筛选后的放大系数与 $PGA_S > 20 \text{ cm/s}^2$ 的放大系数分布规律也基本一致,基于此数据集进行分析,可以为实际工程提供参考。

表 1 部分基础特征数据
Table 1 Some basic characteristic data

地震发生时间	震源深度/km	震级 M	台站名称	震中距/km	V_{s30} /(m/s)	PGA_S /(cm/s^2)	PGA_R /(cm/s^2)	PGA_F
1997-10-21T19:55:00	33	4.3	AICH07	75.90	974	7.81	1.705	4.58
1997-10-11T14:44:00	36	4.9	AICH09	81.57	301	4.03	0.979	4.12
1997-12-14T05:34:00	43	3.9	AICH11	62.12	595	2.11	0.523	4.03
1997-12-14T05:34:00	43	3.9	AICH04	43.26	260	4.62	4.533	1.02
1997-10-08T19:06:00	20	3.4	AICH04	10.51	260	19.03	22.360	0.85
1997-10-08T19:06:00	20	3.4	AICH11	45.90	595	4.38	0.940	4.61
1997-10-08T19:06:00	20	3.4	AICH07	54.47	974	2.38	0.850	2.77
1997-12-14T05:34:00	43	3.9	AICH10	13.81	1 031	18.98	3.980	4.76
1997-10-21T19:55:00	33	4.3	AICH12	108.90	167	4.36	0.750	5.76
1997-12-14T05:34:00	43	3.9	AICH12	40.76	167	10.21	1.620	6.27
1997-12-19T22:07:00	12	4.4	AICH05	170.05	329	3.58	1.280	2.80
...

图1 PGA_s 与 PGA_F 分布Fig. 1 Distribution of PGA_s and PGA_F 图2 四类场地不同筛选条件下的 PGA_F 分布Fig. 2 Distribution of PGA_F of different filters under four types of sites

2 PGA 放大系数分布

PGA 作为地震动主要参数之一,在不同场地条件下其放大系数有着不同的分布^[21]。为探究 PGA 放大系数在相同场地条件下的分布规律,本文采用控制变量法确定场地条件,即每个台站的数据单独分析。首先画出了每个台站的 PGA_R — PGA_s 散点图,限于篇幅本文仅展示了 4 种场地类别中各随机选取的 2 个台站共计 8 个台站(TCGH09,FKSH12,MYGH08,NMRH02,AKTH17,KSRH04,CHBH12,NMRH04)的分析过程,如图 3 所示。从每个台站的散点图来看, PGA_R 和 PGA_s 具有很强的正相关特性,说明在相同场地条件下,PGA 放大系数有较好的分布规律。

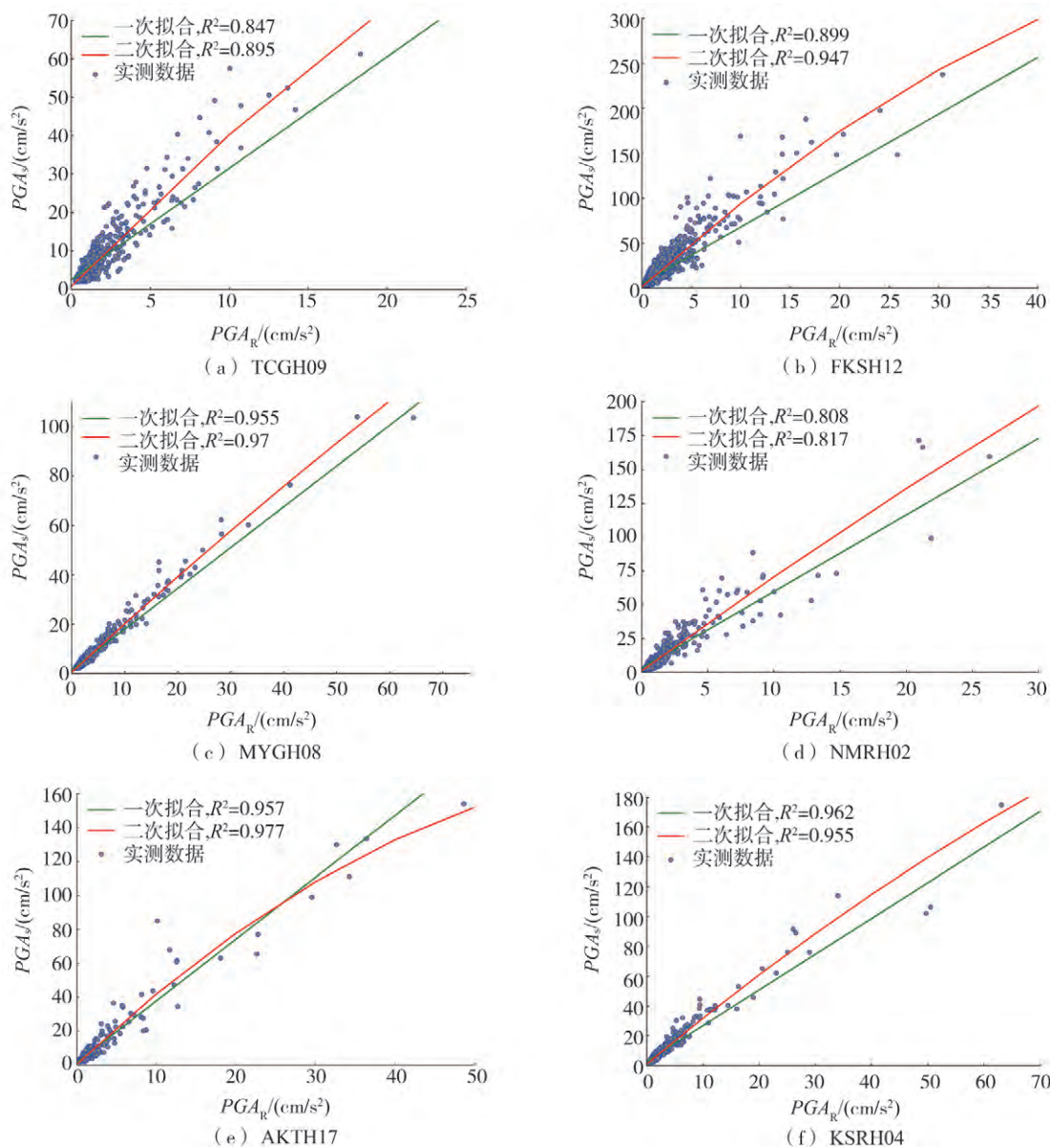
为进一步探究相同场地条件下放大系数变化规律,本文遍历 698 个台站,从每个台站随机选取 70% 的地震动记录数据作为训练集分别进行了 $PGA_s = a_1 PGA_R + b_1$ (一次拟合) 和 $PGA_s = c_1 PGA_R + c_2 PGA_R^2 + d_1$ (二次拟合) 的训练,剩下的 30% 数据作为测试集用来验算拟合结果的准确性。本文使用决定系数 R^2 来评价预

测准确度,因为它可以衡量观测值和预测值之间的依赖程度,决定系数 R^2 可以用数学形式表示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^M (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=0}^M (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (4)$$

式中: Y_i 为实际值; \hat{Y}_i 为预测值; \bar{Y}_i 为实测平均值; R^2 为数据总离差平方和中可以由预测数据平方和解释的比例,其越接近于 1 则说明模型预测的数据更接近真实数据。

本文对所有台站进行了拟合,限于篇幅只列出上述相同台站的拟合结果作为展示,如图 3 所示。从台站拟合结果来看,一次和二次拟合均有不错的效果。一次拟合直接地表现出了每个台站的 PGA 放大系数,拟合曲线与台站 PGA 放大系数的分布规律趋势相同;二次拟合中,拟合曲线均有不同程度尾部下倾的现象,PGA 放大系数随着 PGA_R 增大呈现出下降趋势,与庄海洋等^[22]研究结果相似,说明 PGA_R 对 PGA 放大系数造成了非线性影响。本文还尝试了三次拟合,结果出现了过度拟合的现象,说明了最优拟合在一次到二次拟合之间。为整体判断一次拟合和二次拟合结果优劣,本文提取了所有台站一次拟合和二次拟合结果的 R^2 ,并画出其的分布直方图作为图 4。从图 4 可以看出,一次和二次拟合的 R^2 基本分布在 0.7 以上,说明相同场地条件下,PGA 放大系数的一二次拟合结果均表现出不错的结果;在 $R^2 > 0.8$ 以上的分布中,二次拟合 R^2 频数均高于一次拟合,说明二次拟合结果较一次拟合更具代表。上述结果表明,相同场地条件下的 PGA_F 相对稳定,且随着 PGA_R 的增加, PGA_F 产生非线性变化,这些也从侧面说明了地震动放大系数在相同场地条件下有



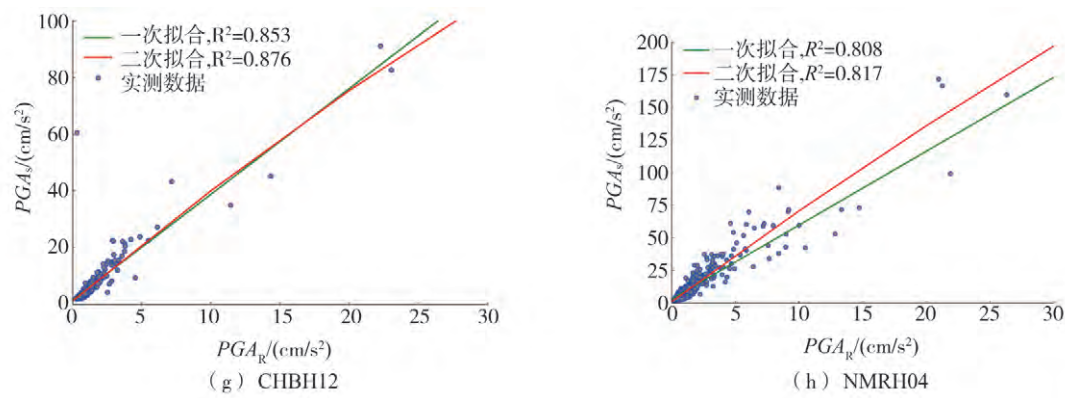


图 3 部分台站 PGA 分析图

Fig. 3 PGA analysis diagram of some stations

着相对规律的分布。在实践中,因为场地条件的不确定性,使得地震动的放大系数有较大的离散性,为研究地震动放大系数在不同场地下的离散性,本文画出了 4 种不同场地类别下 PGA_F 的密度分布图,如图 5 所示;不同场地类别下的实测 PGA 放大系数均值与标准差也计算出来汇总为表 2,为相关实践与研究提供参考。上述研究可以看出 PGA 放大系数在不同场地类别下离散程度较大,与台站的小离散程度产生鲜明对比,其中在 I 类场地离散程度最大,IV 类场地分布相对集中。这种现象在情理之中,因为仅仅用 V_{s30} 作为场地类别的划分,忽略了其他场地条件的影响,从而使 PGA 放大系数的不确定性大大增加。后续本文会收集相关资料信息,展开不同场地条件对 PGA 放大系数造成具体影响研究。

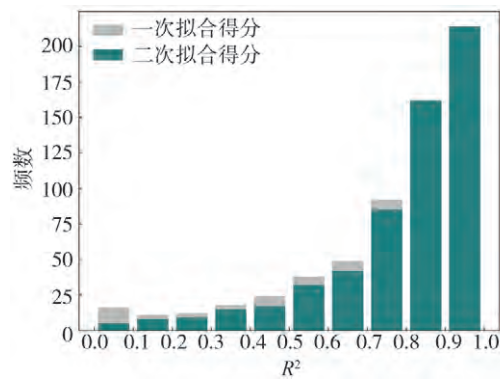


图 4 $PGA_R- PGA_s$ 不同次数拟合 R 分布

Fig. 4 R distribution of $PGA_R- PGA_s$ fitting at different times

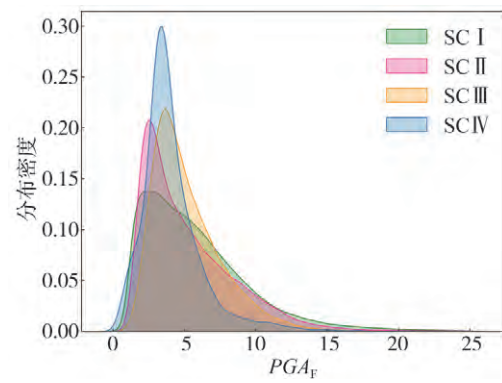


图 5 PGA 放大系数的密度分布

Fig. 5 Density distribution of the PGA amplification coefficient

表 2 不同场地类别下 PGA 放大系数均值与标准差

Table 2 Mean and standard deviation of the PGA amplification factor under different site categories					
场地类别	PGA 放大系数均值	标准差	场地类别	PGA 放大系数均值	标准差
I	7.44	4.07	III	5.76	2.67
II	6.76	4.08	IV	4.69	3.99

3 Sa 放大系数分布

Sa 作为主要的地震分析和抗震设防参数^[21],对相关研究有非常重要的影响,因为 KiK-net 数据库存在大量小地震记录,为减少震级较小的高频地震对 Sa 放大系数(Sa_F)分析造成的干扰,本文基于筛选条件(震级 $M>5.5$)对数据集进行第二次筛选,然后计算了井上井下 0~5 s 周期(500 个周期点)的 Sa,计算结果由同周期和 5%阻尼条件下水平方向 Sa 几何平均值决定,即:

$$Sa(T) = \sqrt{Sa_{EW}(T) \times Sa_{NS}(T)}$$
 (5)

基于计算结果绘制了上文相同台站常见周期($T=0.2, 0.6, 1.0$ s)的基岩反应谱加速度 Sa_R 与地表反应谱

加速度 Sa_s 散点图,并对局部($Sa_R < 60 \text{ cm/s}^2$)进行绘制,如图6所示。因每个台站的场地特征周期不同,同一台站不同周期的 Sa 放大规律有着不同的表现。图6总体来看, $T=0.2 \text{ s}$ 时的 Sa_F 离散程度较高, $T=0.6 \text{ s}$ 和 1.0 s 时的 Sa 放大系数分布离散程度相对较小;为进一步探究 Sa_F 在不同场地类别下的分布规律,与PGA放大系数分析类似,本文绘制了常见周期 Sa_F 在各类场地下的分布概率密度图,如图7所示。与图6结果相似, Sa_F 在周期为 0.2 s 时的离散程度较 0.6 s 与 1.0 s 的更高,随着周期增加,其分布的离散程度有逐渐减小的趋势。上述只探讨了常见周期的 Sa_F ,为了使研究更具真实性,本文根据台网记录地震动信息计算了从 $0 \sim 5 \text{ s}$ 周期(500个周期点)的 Sa_F ,并把不同场地类别与周期的 Sa_F 均值和标准差计算结果归纳为图8。图8可以看

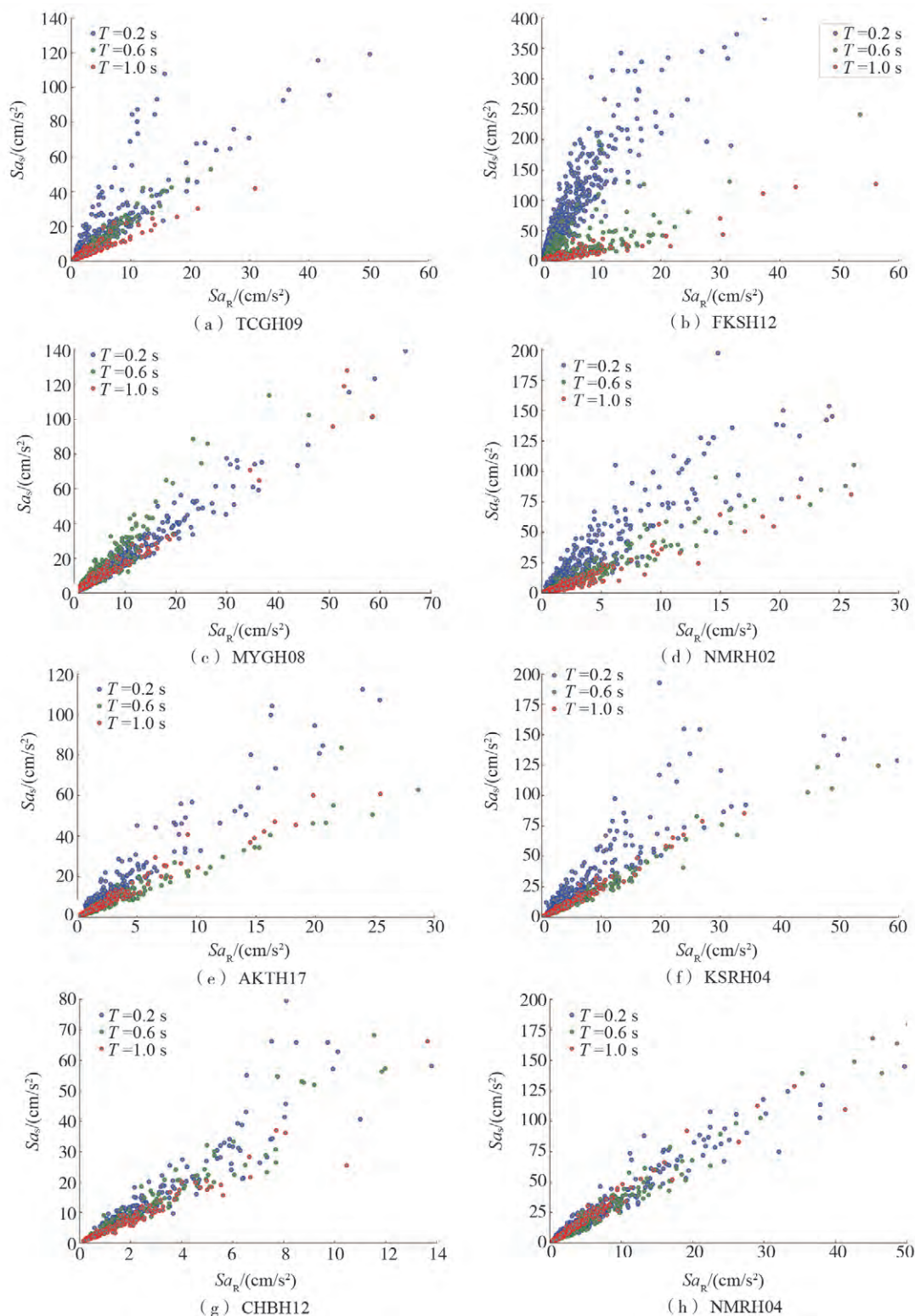
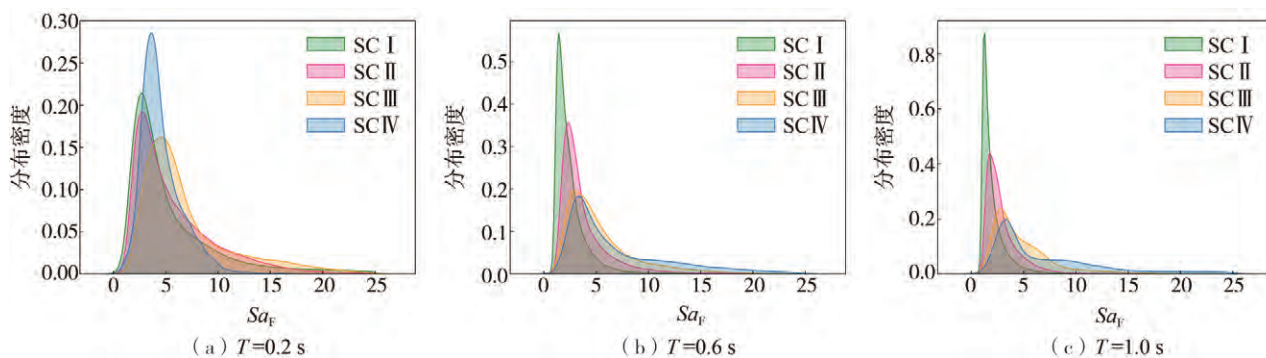
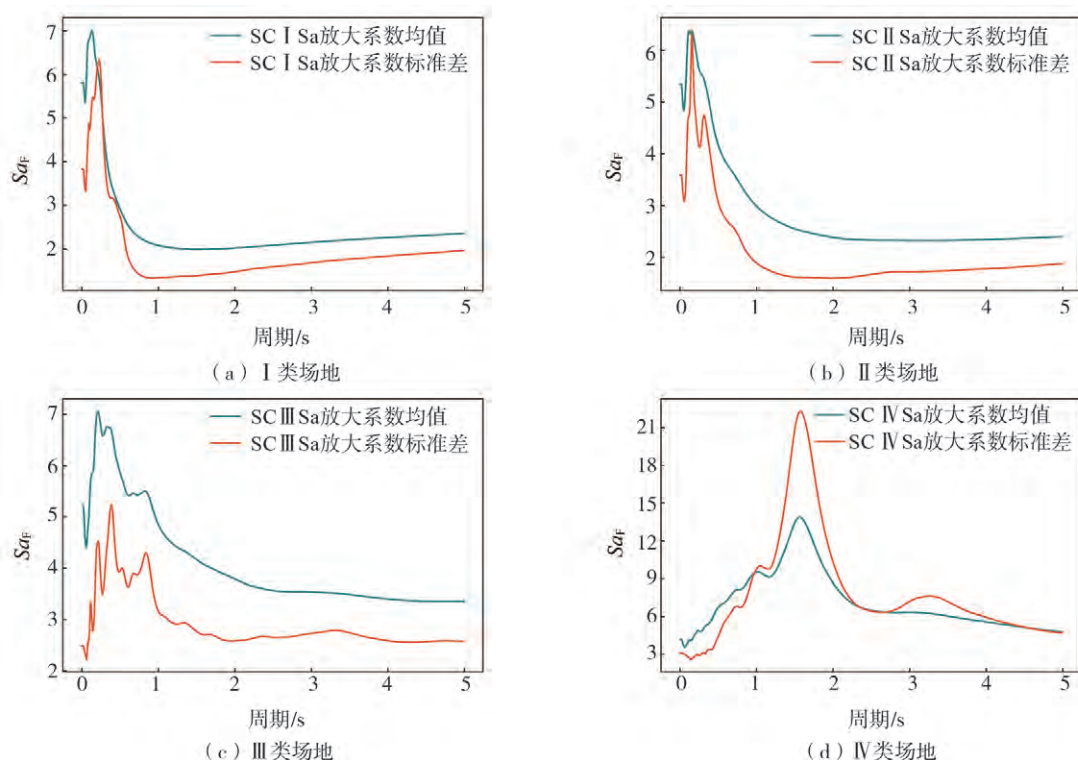


图6 部分台站 Sa 分析图

Fig. 6 Sa analysis diagram of some stations

出, I 类场地下 S_{a_F} 均值在周期为 0.1~0.2 s 之间达到最大; II 类场地的 S_{a_F} 最大均值所在周期与 I 类场地相似,但短周期下 S_{a_F} 均值小于 I 类场地,长周期下放大系数均值大于 I 类场地。不过在 I、II 类场地下, 1 s 以上周期的 S_{a_F} 标准差均较小; III 类场地整体 S_{a_F} 均值较 I、II 类场地更大,标准差在短周期小于 I、II 类场地,长周期时大于 II 类场地; IV 类场地在周期为 1.5 s 左右达到最大 S_{a_F} 均值,且有非常高的标准差,这种现象主要有 2 个原因: ①在软弱地基上的场地效应远远大于硬土地地效应,且具有更大的离散性; ②KiK-net 强震台网记录的 IV 类场地地震动记录数量较少,只占总数据的 1/36,这也会带来较大的离散性。

图7 常见周期 S_a 放大系数密度分布Fig. 7 Common periodic S_a amplification coefficient density distribution图8 4种场地类别下 S_a 放大系数标准差与均值Fig. 8 S_a amplification coefficient standard deviation and mean under four types of sites

4 离散性概率分析

4.1 地震动放大系数离散性分析

上文对 PGA 和 S_a 放大系数在台站、场地级别分别进行了分布分析,图3和图6对比了在台站级别下其放大系数分布的离散程度,可以看出:在场地条件一定的情况时,地震动放大系数呈现出规律的分布,且 PGA 放大系数的离散程度高于 S_a 放大系数;图5和图7对比了场地级别下其放大系数分布的离散程度,可以看出 PGA_F 的分布范围较宽, S_{a_F} 随着周期增加分布范围逐渐变窄,说明 S_{a_F} 随着周期的增加其离散程度

呈现出逐渐减小趋势,在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类场地尤其明显;且在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类场地类别下 PGA_F 离散性较大,而 Sa_F 的离散性相对较小。图 8 可以看出 Sa_F 在Ⅰ、Ⅱ类场地下有较小的离散性,且集中在短周期达到最大值,集中在短周期达到卓越周期;随着场地类别的改变(渐变为软土地地), Sa_F 的均值和离散性逐渐增加。

整体看来,PGA 放大系数较 Sa 放大系数离散型更大,在确定建筑物周期的情况下后者的适用优先性更高,但是在实际的地震破坏分析中,建筑物周期往往为未知量,且目前对建筑物周期的测定方法具有较高的不确定性,这导致在实际应用中 Sa 放大系数的离散性较大^[23-24]。所以在不确定建筑物周期的情况下,有必要去分析 PGA 放大系数的分布规律为实践提供参考与理论支持。

4.2 PGA 放大系数拟合分析

地震波传播过程中具有复杂特性,工程应用过程中,必须考虑场地放大系数中的不确定性。为进一步探究 PGA 放大系数分布概率规律,本文把各类场地的 PGA 放大系数通过 python 与 80 种常见的分布函数进行拟合,根据拟合结果选取 5 个最好的拟合函数,拟合的结果根据 PGA 放大系数与拟合分布之间的平方误差 S 确定,其可以用数学形式表达为:

$$S = \sum_i (Y_i - pdf(X_i))^2 \tag{6}$$

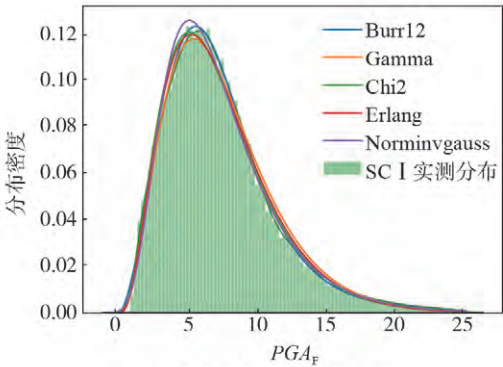
式中: Y_i 为被拟合的数据; pdf 为待拟合的概率分布函数(probability distribution function, pdf)。

各类场地 PGA 放大系数概率分布拟合结果如图 9 所示,最优的 5 个拟合概率分布函数与拟合误差信息汇总在表 3。表 3 可以看出虽各类场地拟合出了不同最优的分布概率函数,但正态逆高斯分布在各类场地都有较好拟合结果。各类场地下最优分布函数与正态逆高斯分布函数的最优参数、拟合误差和函数公式汇总在表 4。表 4 说明各类场地下正态逆高斯分布函数拟合误差较最优拟合分布函数拟合误差相差很少,然后本文根据拟合出的正态逆高斯分布函数对实测 PGA 放大系数分布进行对比如图 10 所示。综合来看,拟合的正态逆高斯概率分布与各场地的 PGA 放大系数分布的契合度很高,可较准确的代表各类场地的 PGA 放大系数概率密度分布。

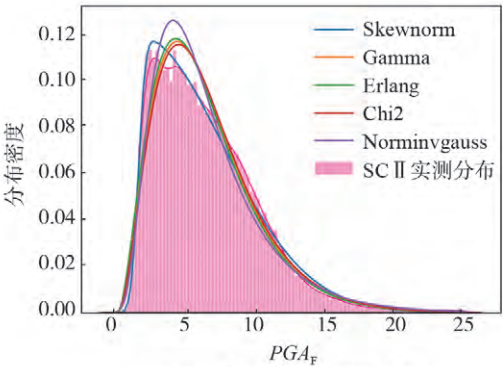
表 3 不同场地类别 PGA 放大系数分布拟合结果

Table 3 PGA amplification factor fitting results for different site categories

场地	拟合分布函数(前 5)	误差 S	场地	拟合分布函数(前 5)	误差 S
Ⅰ类场地	Burr12(Burr12 分布)	0.000 914	Ⅲ类场地	Moyal(Moyal 分布)	0.002 408
	Gamma(伽马分布)	0.001 432		Skewnorm(偏正态分布)	0.002 445
	Chi2(卡方分布)	0.001 432		Norminvgauss(正态逆高斯分布)	0.002 983
	Erlang(爱尔朗分布)	0.001 432		Fatiguelife(疲劳寿命概率分布)	0.003 153
	Norminvgauss(正态逆高斯分布)	0.002 089		Invgauss(逆高斯分布)	0.003 167
Ⅱ类场地	Skewnorm(偏正态分布)	0.001 589	Ⅳ类场地	laplace_asymmetric(非对称拉普拉斯分布)	0.005 486
	Gamma(伽马分布)	0.007 819		Norminvgauss(正态逆高斯分布)	0.006 347
	Erlang(爱尔朗分布)	0.007 819		Johnsons(无界约翰逊分布)	0.007 302
	Chi2(卡方分布)	0.007 819		Burr12(Burr12 分布)	0.011 011
	Norminvgauss(正态逆高斯分布)	0.010 299		Nct(Nct 分布)	0.011 557



(a) Ⅰ类场地 PGA_F 拟合结果



(b) Ⅱ类场地 PGA_F 拟合结果

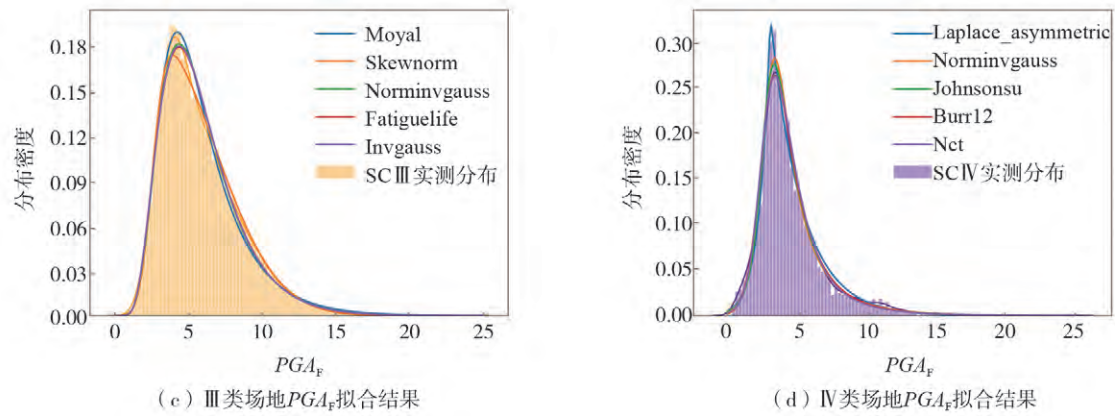


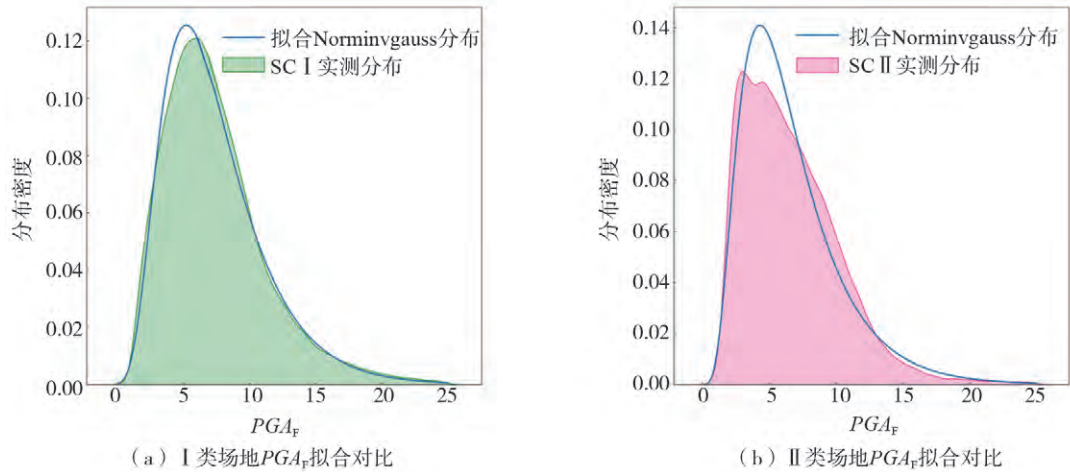
图 9 不同场地类别 PGA 放大系数拟合结果

Fig. 9 PGA amplification factor fitting results for different site categories

表 4 不同场地类别 PGA 放大系数分布最优参数拟合结果

Table 4 Fitting results of optimal parameters of PGA amplification factor distribution in different site categories

SC	分布函数	公式	参数	误差
I 类场地	Burr12(Burr12 分布)	$f(x, \mu, b) = \frac{abx^{\mu-1}}{(1+x^{\mu})^{b+1}}$	$a = 2.49$ $b = 2.48$	0.000914
	Norminvgauss (正态逆高斯分布)	$f(x, \mu, b) = \frac{aK_1(a\sqrt{1+x^2})}{\pi\sqrt{1+x^2}} \exp(\sqrt{a^2-b^2} + bx)$	$a = 26.00$ $b = 25.48$	0.002089
II 类场地	Skewnorm (指数正态分布)	$f(x, a) = 2 \times \text{norm}(x) \times \text{norm}(ax)$	$a = 14.49$	0.001589
	Norminvgauss (正态逆高斯分布)	$f(x, \mu, b) = \frac{aK_1(a\sqrt{1+x^2})}{\pi\sqrt{1+x^2}} \exp(\sqrt{a^2-b^2} + bx)$	$a = 32.78$ $b = 32.55$	0.010299
III 类场地	Moyal (Moyal 分布)	$f(x) = \exp\left(-\frac{x + \exp(-x)}{2}\right) / \sqrt{2\pi}$	—	0.002408
	Norminvgauss (正态逆高斯分布)	$f(x, \mu, b) = \frac{aK_1(a\sqrt{1+x^2})}{\pi\sqrt{1+x^2}} \exp(\sqrt{a^2-b^2} + bx)$	$a = 23.78$ $b = 23.20$	0.002983
IV 类场地	Laplace_asymmetric (非对称拉普拉斯分布)	$f(x, k) = \begin{cases} \frac{1}{K+K^{-1}} \exp(-xK) & X \geq 0 \\ \frac{1}{K+K^{-1}} \exp\left(\frac{x}{K}\right) & X < 0 \end{cases}$	$k = 0.58$	0.005486
	Norminvgauss (正态逆高斯分布)	$f(x, \mu, b) = \frac{aK_1(a\sqrt{1+x^2})}{\pi\sqrt{1+x^2}} \exp(\sqrt{a^2-b^2} + bx)$	$a = 1.03$ $b = 0.76$	0.006347



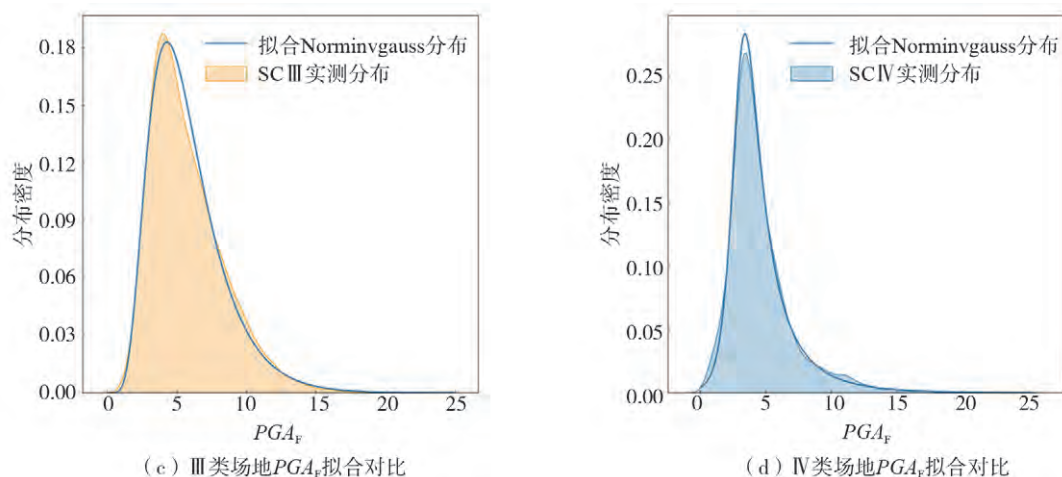


图 10 不同场地类别下实测 PGA_F 与拟合正态逆高斯分布对比

Fig. 10 Comparison of measured PGA_F measured distribution and fitted norminvgauss distribution under different site categories

5 结论

本文选取日本 KiK-net 台网 1997—2019 年记录的地震数据,计算了相关特征数据并对数据进行筛选,然后分析了 PGA 和 S_a 放大系数分布离散程度,确定了各自的使用范围,并计算了不同场地类别的 S_a 0~5 s 周期的均值和标准差;通过回归方法拟合了 KiK-net 所有台站的 PGA 放大系数,然后对各类场地的 PGA 放大系数分布概率进行拟合,得到 PGA 放大系数的分布规律,并计算了各类场地的均值与标准差,为相关研究提供参考,主要结论如下:

1) 因为场地条件和地震波传播的复杂特性,地震动放大系数有很大的离散性。对此本文利用控制变量法和回归方法对每个台站的 PGA_R 和 PGA_S 分析,拟合出每个台站的 PGA 放大系数,决定系数 R^2 大部分在 0.7 以上,场地条件一定时 PGA 放大系数呈现出规律分布。

2) 从台站 PGA 放大系数拟合结果来看,PGA 放大系数不仅和场地条件有关,也与输入的地震动有关;PGA 放大系数随着 PGA_R 增加产生非线性变化逐渐减小。因相同场地条件下 PGA_R 多存在 10 cm/s^2 内,强震数据较少,未来会搜集更多强震数据去进一步分析 PGA 放大系数随 PGA_R 变化的非线性规律。

3) 计算了 0~5 s 周期(500 个周期点) S_a 放大系数的均值和标准差,绘制了其在不同场地类别下的分布图,为相关研究与实践提供参考。结果表明,在 I、II 类场地下 1 s 周期以上的 S_a 放大系数离散程度小,有较稳定的分布。

4) 绘制了 PGA 与常见周期的 S_a 放大系数的密度分布图并进行了对比与离散性分析,发现 PGA 较 S_a 放大系数离散程度较大,且随着周期的增加, S_a 放大系数离散程度呈逐渐缩小趋势。总体来说, S_a 放大系数的离散性较 PGA 放大系数更小,在确定建筑物周期的情况下, S_a 放大系数有更高的适用性。

5) 本文通过大量实测地震记录,计算了不同场地类别下的 PGA 放大系数的均值与标准差,并拟合了各类场地下 PGA 放大系数分布概率,拟合结果如下: I 类场地下为 Burr 分布($a=2.49$, $b=2.48$), II 类场地为 Skewnorm 分布($a=14.49$), III 类场地为 moyal 分布, IV 类场地为 Laplace_asymmetric 分布($k=0.58$);且发现正态逆高斯分布在 4 种场地类别下都有很好拟合结果,能够代表整体 PGA 放大系数的分布概率,可以为相关研究与实践提供参考。

参考文献:

- [1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 2 版. 北京: 地震出版社, 2006: 13-14.
HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006: 13-14. (in Chinese)
- [2] SEED H B, ROMO M P, SUN J I, et al. The Mexico earthquake of September 19, 1985—Relationships between soil conditions and earthquake ground motions[J]. Earthquake Spectra, 1988, 4(4): 687-729.
- [3] DOBRY R, BORCHERDT R D, CROUSE C B, et al. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(1): 41-67.

- [4] BORCHERDT R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 29–61.
- [5] BORCHERDT R D, GIBBS J F. Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(2): 467–500.
- [6] 李平, 刘红帅, 薄景山, 等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 174–184.
LI Ping, LIU Hongshuai, BO Jingshan, et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 174–184. (in Chinese)
- [7] 戴君武, 张令心, 窦爱霞. 高烈度区易损性模型与特大地震风险评估技术研究 [R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013: 10–14.
DAI Junwu, ZHANG Lingxin, DOU Aixia. Research of vulnerability model in high-intensity zone and devastating earthquake risk assessment technology [R]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013: 10–14. (in Chinese)
- [8] 吴晓阳, 陈龙伟, 袁晓铭. 场地条件校正的地震动快速评估方法研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 193–198.
WU Xiaoyang, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming. Fast assessment method for ground motion considering site condition correction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 193–198. (in Chinese)
- [9] 李小军, 彭青. 不同类别场地地震动参数的计算分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 29–36.
LI Xiaojun, PENG Qing. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2001, 21(1): 29–36. (in Chinese)
- [10] 魏来, 卢育霞, 周正华, 等. 非饱和黄土动力特性及其对场地地震动参数的影响 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 145–148.
WEI Lai, LU Yuxia, ZHOU Zhenghua, et al. Dynamic characteristics of unsaturated loess and their influences on ground vibration parameters of sites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 145–148. (in Chinese)
- [11] 梁建文, 梁佳利, 张季, 等. 深厚软土地中三维凹陷地形非线性地震响应分析 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1196–1205.
LIANG Jianwen, LIANG Jiali, ZHANG Ji, et al. Nonlinear seismic response of 3D canyon in deep soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1196–1205. (in Chinese)
- [12] WANG G, DU C Y, HUANG D R, et al. Parametric models for 3D topographic amplification of ground motions considering subsurface soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 41–54.
- [13] TAVAKOLI H, KUTANAEI S S. Evaluation of effect of soil characteristics on the seismic amplification factor using the neural network and reliability concept [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(6): 3881–3891.
- [14] 章文波, 周雍年, 谢礼立. 场地放大效应的估计 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 1–9.
ZHANG Wenbo, ZHOU Yongnian, XIE Lili. Estimation of absolute site amplification [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2001, 21(4): 1–9. (in Chinese)
- [15] 闫静茹, 张郁山, 郝明辉. 山东省不同场地 PGA 放大影响研究 [J]. 地震研究, 2020, 43(3): 569–575, 603.
YAN Jingru, ZHANG Yushan, HAO Minghui. Study on amplification effect of peak ground acceleration based on different sites in Shandong Province [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 569–575, 603. (in Chinese)
- [16] 陈龙伟, 陈卓识, 袁晓铭. 基于 KiK-Net 单场强震记录场地放大函数估计及标准差分析 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 2): 141–145.
CHEN Longwei, CHEN Zhuoshi, YUAN Xiaoming. Site-specific amplification function assessment and variability analysis using KiK-Net single-station strong motion data [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S2): 141–145. (in Chinese)
- [17] 徐扬, 赵晋泉, 李小军, 等. 基于汶川地震远场强震记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析 [J]. 震灾防御技术, 2008, 3(4): 345–351.
XU Yang, ZHAO Jinquan, LI Xiaojun, et al. Study on effect of thick sedimentary layers on long-period ground motion from far-field strong motion records of Wenchuan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4): 345–351. (in Chinese)
- [18] 江志杰, 彭艳菊, 方怡, 等. 北京平原地区 V_{S30} 估算模型适用性研究 [J]. 震灾防御技术, 2018, 13(1): 75–86.
JIANG Zhijie, PENG Yanju, FANG Yi, et al. Applicability of V_{S30} estimation models for the Beijing plain area [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(1): 75–86. (in Chinese)
- [19] ZHAO J X. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 914–925.
- [20] ZHAO J X, XU H A. A comparison of V_{S30} and site period as site-effect parameters in response spectral ground-motion prediction equations [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 1–18.
- [21] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [22] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1267–1272.
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, ZHU Dinghua. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1267–1272. (in Chinese)
- [23] 徐培福, 肖从真, 李建辉. 高层建筑结构自振周期与结构高度关系及合理范围研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 1–11.
XU Peifu, XIAO Congzhen, LI Jianhui. Study on relationship between natural vibration periods and heights of structures for high-rise buildings and its reference range [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 1–11. (in Chinese)
- [24] 刘坚, 李开禧, 黄襄云. 柔性连接多高层钢框架结构的基本自振周期近似计算方法 [J]. 钢结构, 2002, 17(6): 16–18.
LIU Jian, LI Kaixi, HUANG Xiangyun. The approximate calculation method on fundamental natural period of vibration for multistorey and high-rise steel frame structure of flexible connection [J]. Steel Construction, 2002, 17(6): 16–18. (in Chinese)