

DOI: 10.11779/CJGE201609012

考虑土层非线性效应的四川地区场地放大系数模型

姜治军^{1, 2}, 胡进军^{*1, 2}, 张齐^{1, 2}, 谢礼立^{1, 2, 3}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 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;
3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究四川地区场地放大效应对地震动的影响, 选取了该地区 105 个场地的钻孔资料和 897 条强震记录, 结合强震数据分析和等效线性化计算结果讨论了地震动强度、场地条件对地震动场地放大的影响, 建立了考虑土层非线性反应的场地放大系数模型, 并探讨了模型在地震动估计中的应用效果。对模型结果的分析表明: 当地震动强度较小时, 场地放大系数随 V_{s30} 增大而减小, 减小的幅度与反应谱的周期相关, 当周期为 0.2 s 时, 减小得最为显著; 当当地震动强度较大时, 在同一场地上, 场地放大系数随地震动强度增大而减小, 减小的幅度与反应谱的周期相关, 当周期大于 1 s 时, 场地放大系数与地震动强度无关; 此外, 土层非线性反应对地震动的影响随场地变硬而不明显, 当 V_{s30} 大于 500 m/s 时, 可忽略这一影响。与只考虑线性场地反应影响的地震动衰减关系相比, 利用本文模型建立的地震动衰减关系可显著地减小估计四川地区地震动时的标准差, 尤其对于近场短周期地震动减小幅度可达 12%。

关键词: 地震动; 场地放大; 土层非线性; 衰减关系; 四川地区

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1650-10

作者简介: 姜治军(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事基岩衰减关系等方面的研究。E-mail: jzjiem@163.com。

Site amplification factor model for Sichuan region considering nonlinear soil effects

JIANG Zhi-jun^{1, 2}, HU Jin-jun^{1, 2}, ZHANG Qi^{1, 2}, XIE Li-li^{1, 2, 3}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the effect of site amplification on ground motion in Sichuan region, strong motion data and calculated equivalent-linear results are analyzed using 897 strong motion records and 105 shear-wave velocity profiles from the region. Based on the analysis results, the influence of the ground motion intensity and site conditions on site amplification is studied, and site amplification factor model considering nonlinear soil effects is established. Then the application effect of the model to evaluate ground motion is discussed. The results show that the decreasing extent of site amplification factor with the increasing V_{s30} is period-dependent at low shaking levels. The decrease is mostly significant at period of 0.2 s. Under high shaking levels the decreasing extent of site amplification factor with the increasing ground motion intensity is spectral period-dependent but the site amplification factor is independent of the ground motion intensity at periods larger than 1 s. In addition, the soil nonlinearity has less influence on ground motion with the increasing V_{s30} . When value of V_{s30} is larger than 500 m/s, the influence can be neglected. In conclusion, compared with attenuation relationship considering only linear soil effects, the standard deviation of ground motion estimates in Sichuan region using the proposed model can be reduced significantly. Especially for the near field and the short period ground motion, the reduction can reach 12%.

Key words: ground motion; site amplification; soil nonlinearity; attenuation relationship; Sichuan region

0 引言

场地条件对地震动的影响是衰减关系研究的关键问题。对于这一影响的考虑, 一些衰减关系通常采用宽泛的场地分类, 如基岩和土层, 对不同场地类别的数据分别回归^[1]。而这种考虑方式的不足体现在两方面, 其一是宽泛的分类无法反映同类场地内部的场地

特性之间的差异; 其二是无法考虑场地土的非线性特

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2011CB013601); 国家自然科学基金项目 (51578516, 51238012); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目 (2011B02, 2014B06)

收稿日期: 2015-07-29

*通讯作者 (E-mail: hujinjun@iem.ac.cn)

性对地震动的影响。美国下一代地震动衰减关系(next generation attenuation, NGA)计划开展了关于衰减关系的综合性研究, 其成果表明场地土的非线性反应显著影响衰减关系估计值的标准差^[2-3]。因此建立考虑土层非线性反应的场地放大模型, 并将其纳入衰减关系, 对于减小地震动估计结果的不确定性有重要意义。

对场地放大系数模型的研究, 国内外已取得众多成果。为了避免宽泛的场地分类引起的地震动估计值的误差, 美国NEHRP推荐规范首先提出以 V_{s30} (地表以下30 m深度内的剪切波速平均值)作为表征场地条件的参数^[4]。参数 V_{s30} 的提出极大地推进了衰减关系中场地反应的研究。众多学者通过经验数据统计或数值计算等手段开展非线性场地反应对地震动影响的研究^[5-9], 其成果已被NGA^[2-3, 10-15]计划所采用。这进一步证明了在衰减关系中考虑非线性场地反应的必要性。

目前国内对衰减关系中场地反应的研究也取得一些成果^[1, 16-18], 但是这些研究或只考虑土层线性反应的影响, 或直接采用基于国外数据得出的非线性场地放大特性的结果。对国内场地土的非线性反应对地震动的影响研究尚显欠缺。导致这一现状的原因是, 虽然四川、云南、甘肃等地区发生了数次破坏性地震, 积累了大量强震记录, 但是大量记录的幅值低于0.05g, 低强度的地震动无法使土层发生非线性反应, 大部分台站的土层都处于线性反应阶段^[16], 依靠回归经验数据建立非线性场地放大模型较为困难。对此, 本文基于四川地区的105个场地的钻孔资料, 利用土层反应分析方法研究场地非线性反应规律, 以辅助强震数据的回归进而建立适用于四川地区的、考虑土层非线性反应的场地放大系数模型。因此这一模型可有效地反映四川地区场地条件对地震动的影响规律, 尤其是在非线性影响方面。为四川地区建立考虑土层非线性反应的衰减关系提供基础。

1 方法

1.1 场地放大系数的定义

研究场地放大系数的方法通常包括两类: 参考场地方法和非参考场地方法^[5, 13, 19]。与前者相比, 非参考场地方法不受基岩场地记录数量的限制^[5, 13, 19], 因此本文采用这一方法。场地放大系数用AMP表示, 其定义如下: 当周期为T时, 实际记录水平向加速度反应谱(5%阻尼)的几何平均值 $SA(T)$ 与基岩衰减关系估计值 $SA_{ref}(T)$ 的比值^[5, 9, 13, 19], 即

$$AMP = SA(T)/SA_{ref}(T), \quad (1)$$

研究表明, 场地放大系数由线性场地放大 F_{LIN} 和非线性放大 F_{NL} 两部分构成^[10], 其中非线性部分是对线性

部分的修正, 体现了地震动强度对场地放大系数的影响^[8], 即

$$\ln(AMP) = F_{LIN} + F_{NL}, \quad (2)$$

式中, F_{LIN} 依赖于场地条件, 而 F_{NL} 依赖于场地条件和地震动强度。本文以 V_{s30} 作为表征场地条件的参数, 以基岩衰减关系估计的峰值加速度PGA作为表征地震动强度的参数^[16], 记为 PGA_{ref} 。

1.2 场地放大系数模型的建立方法

在四川地区的地震中, 发生线性土层反应的台站占主要部分, 仅依靠强震数据无法得出非线性场地放大 F_{NL} , 因此本文通过土层反应分析方法予以研究。已有研究表明, 强震发生时等效线性化方法计算含软土层或软深场地的反应与实际情况存在一定偏差^[20-22], 而本文研究的场地不属于这两种范畴, 因此选择这一方法。利用等效线性化程序计算105个场地分别在10种强度水平的地震动输入下的地表反应, 具体包括PGA为0.03g, 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g^[7], 进而得出同周期的地表与输入地震动的加速度反应谱的比值F。通过分析输入地震动幅值与F之间的关系, 得出场地的非线性放大规律。藉此规律确定非线性放大项。因此本文场地放大模型的建立具体分为以下5步:

(1)选取适用于四川地区的基岩场地地震动衰减关系。

(2)利用基岩衰减关系估计与数据集中各观测记录相应的地震动参数 PGA_{ref} , SA_{ref} 和AMP。

(3)通过等效线性化方法, 研究105个场地的非线性特性, 进而确定非线性场地放大 F_{NL} 。

(4)除去场地放大系数中的非线性部分得出线性放大部分, 即 $F_{LIN} = \ln(AMP) - F_{NL}$ 。分析 V_{s30} 对线性放大部分的影响, 确定线性放大模型及其系数。

(5)合并非线性放大部分 F_{NL} 和线性放大部分 F_{LIN} 得出场地放大系数AMP的模型。

2 强震数据和场地资料

为了充分反映四川地区场地放大特征, 选取的地震均发生于四川及其相邻地区。此外, 本文利用等效线性化方法研究场地的非线性放大规律, 因此数据包括两部分: 其一用于研究场地非线性放大特性, 包括场地的计算剖面和基岩输入地震动; 其二用于回归场地放大模型系数, 包括强震记录和台站的 V_{s30} 。

2.1 地震数据

选取发生在四川、云南和甘肃地区的震级大于 $M_s 4.0$ 的76次地震, 表1给出地震序列^[17, 23]。对于具有可靠有限断层震源模型的地震, 通过计算断层距, 选

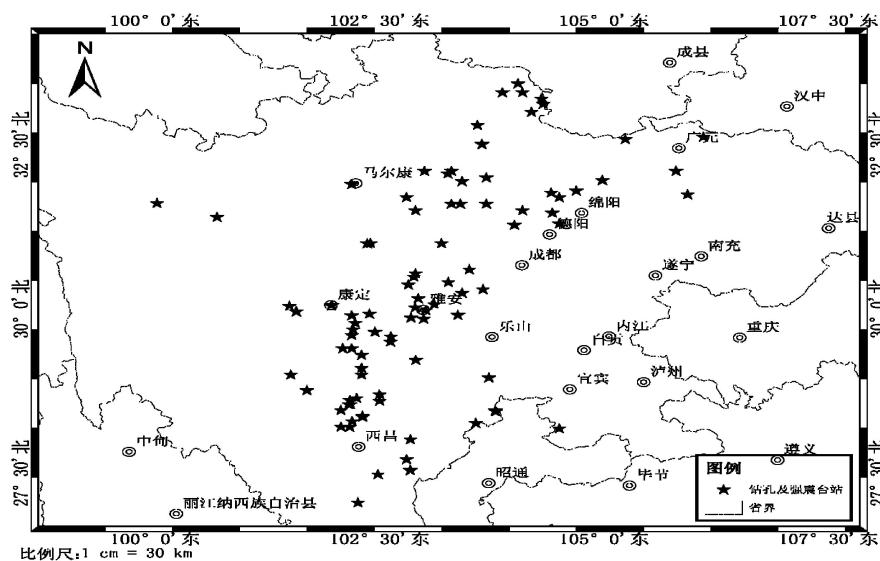


图 1 选取的钻孔及强震台站分布

Fig. 1 Distribution of strong motion stations and boreholes used in this study

取断层距小于200 km的记录；其它无法得到断层距的地震，选取震源距小于200 km的记录。此外台站的 V_{s30} 需已知，本文台站的 V_{s30} 值采用喻烟的研究结果^[17]。基于以上限制条件选取了105个台站的897条强震记录。图1给出所选强震台站及钻孔的位置分布图。

表 1 本文采用的地震

Table 1 Earthquakes selected in this study

发震时间	震中位置		震源深度/km	面波震级/ M_s	
	经度 (东经)	纬度 (北纬)			
20080512	103.400	31.000	14	8.0	20080512
20080525	105.480	32.549	14	6.0	20080513
20080512	103.669	31.260	14	6.1	20080512
20080512	103.819	31.270	14	6.3	20080513
20080513	104.059	31.430	21	5.5	20080513
20080513	103.419	30.950	14	5.6	20080515
20080512	104.279	31.530	11	5.3	20080512
20080512	104.489	31.450	13	5.5	20080516
20080513	104.550	31.729	20	5.2	20080513
20080516	103.449	31.309	14	5.4	20080513
20080518	105.080	32.200	13	5.6	20080512
20080512	103.580	31.270	10	5.8	20080515
20080514	103.629	31.340	16	5.4	20080512
20080527	105.699	32.779	15	5.2	20080513
20080724	105.610	32.759	10	5.4	20080527
20080801	104.849	32.020	14	5.6	20080512
20080805	105.610	32.720	13	6.0	20080512
20080513	103.629	31.280	10	4.9	20080512
20080724	105.629	32.720	10	5.2	20130420
20080512	103.650	31.020	9	5.0	20130420
20080512	104.129	31.479	14	5.3	20130420
20080512	105.639	32.720	10	4.7	20130420
20080513	103.580	31.340	13	5.0	20130420
20080512	103.589	31.260	13	5.8	20130420
20080512	103.769	31.290	13	5.7	20130420
20080514	104.120	31.409	10	5.1	20130420
20080512	103.730	31.389	10	4.8	20130421
20080512	103.589	31.100	10	4.5	20130421
20080512	103.540	30.899	11	4.7	20130421
20080512	103.599	31.139	10	5.3	20130722
20080512	103.690	31.159	10	5.1	20140803

2.2 计算剖面及输入地震动

为研究四川地区场地非线性放大规律, 选取了该地区的105个场地的剪切波速剖面用于计算, 图2给出了各计算剖面的剪切波速随深度变化^[24]。各土层的非线性参数来自文献[25]给出的推荐值。为了避免输入地震动的频谱特征单一, 本文选取广泛应用于土层反应分析计算的30条基岩记录, 其发震的震级范围为Mw5.1~Mw7.9、距离范围为1~131 km, 以确保输入地震动的频谱特征全面。采用双参数标定法得出各条输入地震动的特征周期 T_g ^[26], 其特征周期的频数分布如图3所示。由图可知特征周期分布于0.1 s至0.9 s之间, 且主要集中在0.2 s至0.5 s之间, 符合已有研究得出的基岩记录特征周期的分布特征^[27]。

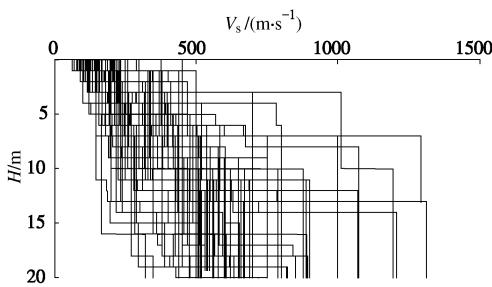


图2 计算剖面的剪切波速随深度变化

Fig. 2 Variation of shear wave velocity with depth

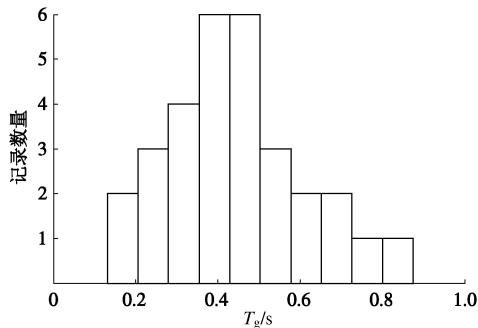


图3 输入地震动的特征周期 T_g 的频数分布图

Fig. 3 Histogram of T_g of input ground motions

3 场地放大系数模型的确定

3.1 非线性场地放大

关于非线性场地放大的研究已取得众多成果^[5-8], 考虑到模型既要形式简单又要物理意义明确, 参考已有研究^[8]本文选择如下模型:

$$F_{NL} = f_1 + f_2 \times \ln[(PGA_{ref} + f_3)/f_3] \quad (3)$$

式中, PGA_{ref} 表征地震动强度; f_1 , f_2 , f_3 为回归系数, 考虑到地震动强度很小时土层不发生非线性反应, 故令 f_1 为零。系数 f_2 是场地非线性的体现, 且依赖于场地的软硬程度。

为了研究参数 V_{s30} 对于 f_2 的影响, 将30条输入地

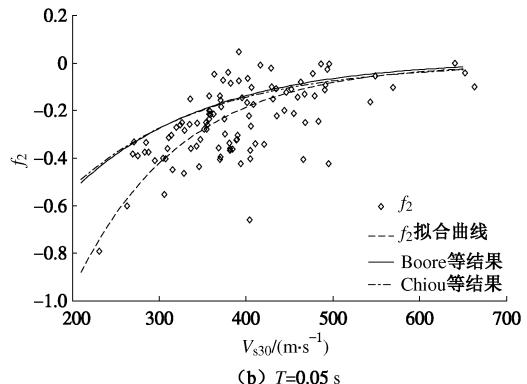
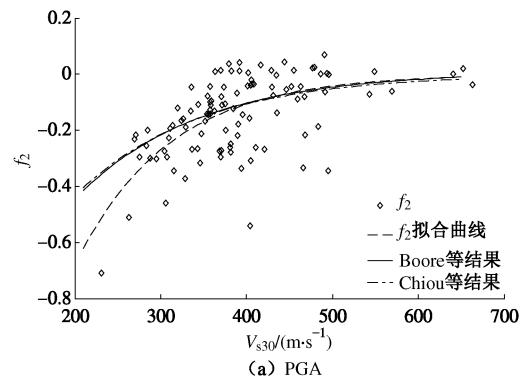
震动分别调整至10个PGA水平, 逐一对计算剖面进行地震反应分析, 同时得出比值 F 。研究表明运用等效线性化方法时, 当土层的最大剪应变不超过0.3%时, 计算结果与实际情况相符^[28-29]。而本文各剖面的最大剪应变均未超过这一限值, 因此结果可以真实地反映土层非线性特征。按照式(2)、(3)逐一拟合各剖面的 F 与输入地震动幅值之间的关系从而得出参数 f_2 , 并利用式(4)拟合参数 f_2 随 V_{s30} 的变化趋势。

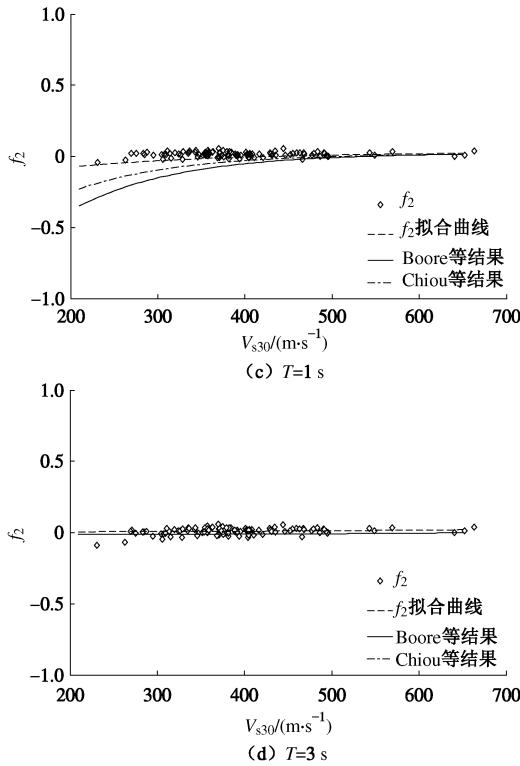
$$f_2 = a_1 \times e^{a_2 \times V_{s30}} \quad (4)$$

式中, a_1 和 a_2 为回归系数, 反映了软硬程度不同的场地间非线性放大特性的差异。图4给出 f_2 及其关于 V_{s30} 的拟合曲线, 同时给出 Boore 等^[13] 和 Chiou 等^[14] 结果以便进行比较。

由图中 f_2 拟合曲线可以看出: 与长周期地震动相比, 短周期受非线性反应影响明显, 但是随着 V_{s30} 的增大其有减弱的趋势, 当 V_{s30} 大于500 m/s时参数 f_2 几乎为零。因此在建立场地放大系数模型时, 对于软土场地上短周期地震动需考虑非线性场地反应。除此之外可采用只包含线性放大项的场地放大系数模型。

本文结果是基于四川地区数据得出, 而对比模型是基于美国西部数据得出, 由图4可知两地区场地非线性放大特征的差异集中于较软场地上: 四川地区软土场地对短周期地震动的非线性放大较美国西部显著, 而对长周期地震动的放大趋势则相反。引起这一差别的原因可能为两地区的土层剪切波速剖面特征不同, 作为唯一的场地条件参数, V_{s30} 对于剖面特征差异的体现不够完备。



图 4 参数 f_2 与 V_{s30} 的关系Fig. 4 Dependence of parameter f_2 on V_{s30}

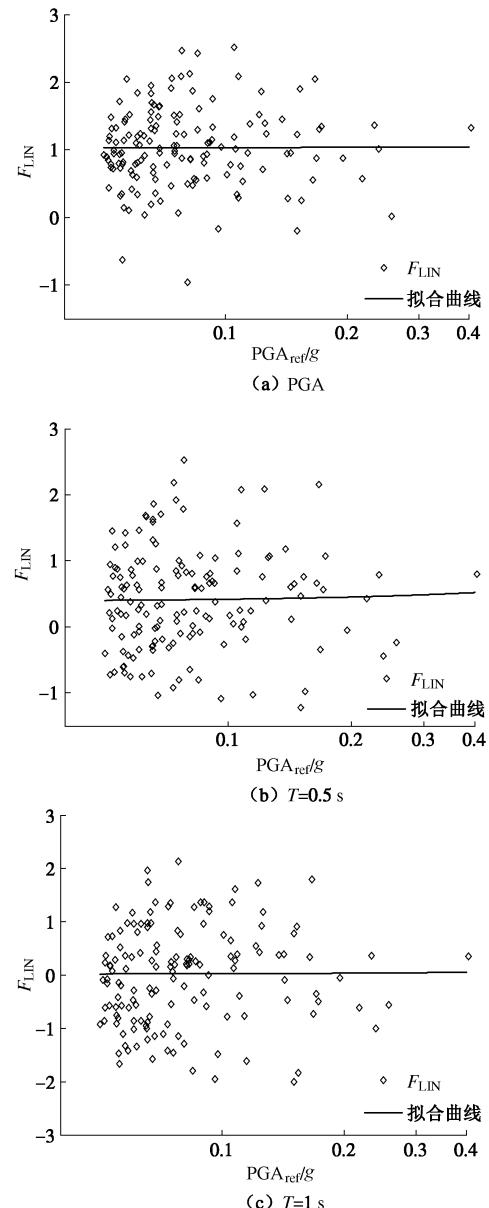
为了得出各场点的非线性放大系数, 需按照式(1)计算场地放大系数AMP。本文选取姜治军等给出的衰减关系^[16], 原因是建立该衰减关系时采用了汶川主、余震数据, 其能够体现四川地区地震的震源和传播路径特性, 利用其得到的场地放大系数可较真实地反映场地条件的影响。此外, 其对这一地区地震动的估计效果已被证实^[16]。通过此衰减关系, 根据震级和距离得出与数据集中897个观测记录相应的PGA_{ref}和SA_{ref}以及场地放大系数AMP。对已得出的AMP及PGA_{ref}按照式(2)和式(3)进行回归, 其中 a_1 和 a_2 采用土层反应分析结果, f_3 通过回归确定。由各台站的 V_{s30} , PGA_{ref}以及系数 a_1 , a_2 , f_3 根据式(3)确定所有台站的非线性场地放大系数 F_{NL} 。

3.2 线性场地放大

线性场地放大为场地放大系数中仅依赖场地条件的部分, 其可通过式(2)确定。为研究已得出的 F_{NL} 的合理性, 图5给出了各场点的线性放大系数 F_{LIN} 与PGA_{ref}的关系, 由于PGA_{ref}较小时土层不发生非线性反应, 因此图中仅包括PGA_{ref}大于0.05g的台站。

如图5所示, F_{LIN} 与PGA_{ref}无关, 这与已有研究结论^[10]和线性场地放大的物理特性是一致的, 也表明 F_{NL} 能准确地估计非线性场地放大部分, 从而证实其合理性。由于 F_{LIN} 与PGA_{ref}无关, 通过分析 F_{LIN} 与 V_{s30} 的关系即可确定线性场地放大模型。为了更为明显地体现规律, 本文对 V_{s30} 区间化并计算每个区间内的线性

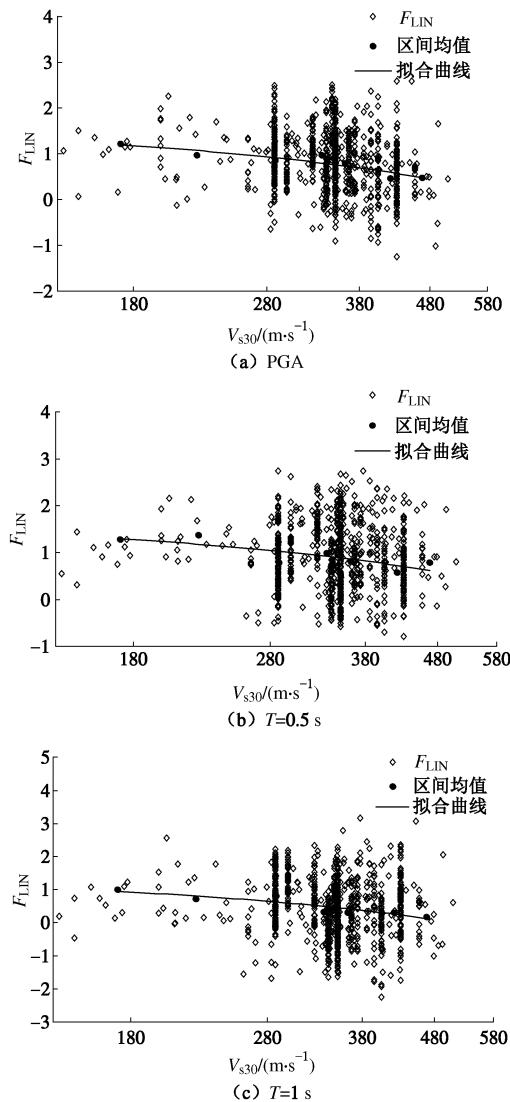
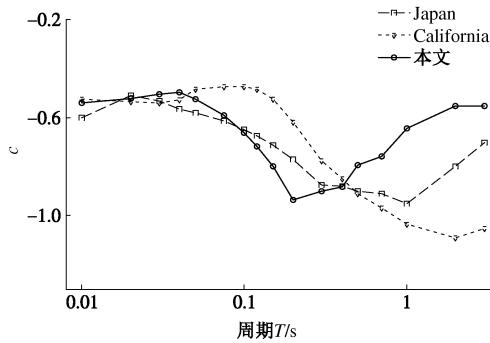
放大系数平均值, 图6给出了 F_{LIN} 与 V_{s30} 的关系。

图 5 线性场地放大系数 F_{LIN} 与 PGA_{ref} 的关系Fig. 5 PGA_{ref} dependence of linear site amplification factor F_{LIN}

根据图6可知, 对于不同周期的地震动, 线性场地放大的区间平均值与 $\ln(V_{s30})$ 都呈显著的线性关系, 因此采用如下函数表示线性场地放大:

$$F_{LIN} = c \times \ln(V_{s30}/V_1) \quad , \quad (5)$$

其中, c 和 V_1 为回归系数。图7给出了对应不同周期地震动的系数 c , 同时给出Steward等^[19]统计日本和美国加州数据的结果。由图7可知: ①随着场地变硬, 不同周期的线性放大系数均减小, 但是减小的幅度不同: 对于四川地区, 周期为0.2 s地震动的场地放大系数减小得最为显著; ②当周期小于0.5 s时, 本文系数 c 与Steward等结果差异不大, 当周期大于0.5 s时则差异较为显著。

图 6 线性场地放大系数 F_{LIN} 与 $V_{\text{s}30}$ 的关系Fig. 6 Dependence of linear site amplification factor F_{LIN} on $V_{\text{s}30}$ 图 7 参数 c 随周期的变化Fig. 7 Variation of parameter c with spectral periods

4 模型结果及讨论

4.1 模型形式及结果

通过以上分析可得出考虑非线性场地反应的四川地区的场地放大系数模型如下:

$$\ln(\text{AMP}) = F_{\text{LIN}} + F_{\text{NL}} \quad , \quad (6)$$

其中 $F_{\text{LIN}} = c \times \ln(V_{\text{s}30}/V_1) \quad , \quad (7)$

$$F_{\text{NL}} = (a_1 \times e^{a_2 \times V_{\text{s}30}}) \times \ln[(\text{PGA}_{\text{ref}} + f_3)/f_3] \quad , \quad (8)$$

式中, V_1 , c , a_1 , a_2 , f_3 为回归系数, 其中系数 a_1 和 a_2 是由数值计算结果得出, V_1 , c 和 f_3 通过回归强震数据得出。表2给出了模型系数结果, 其中 σ 为标准差。

表 2 模型系数

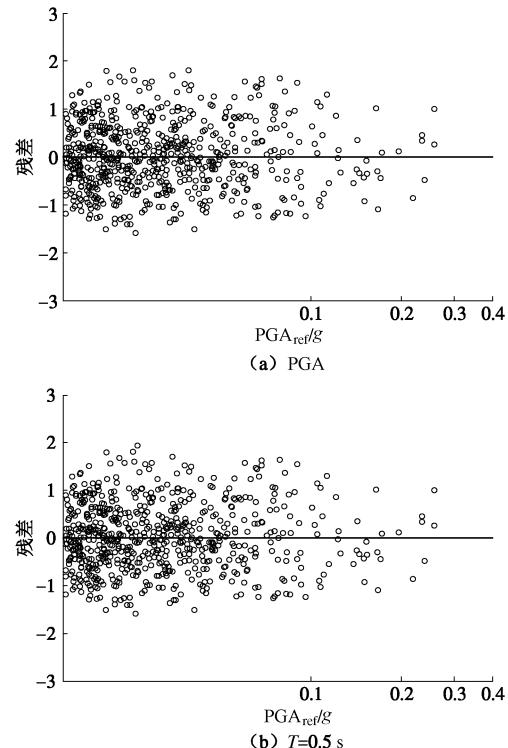
Table 2 Regression results of model parameters

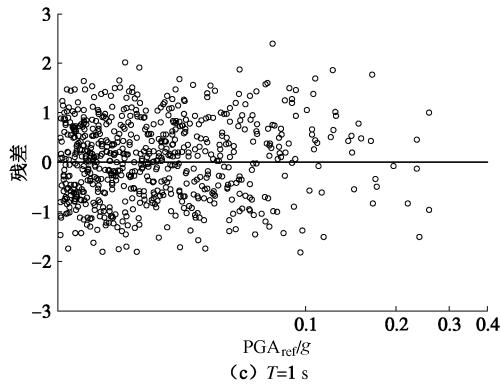
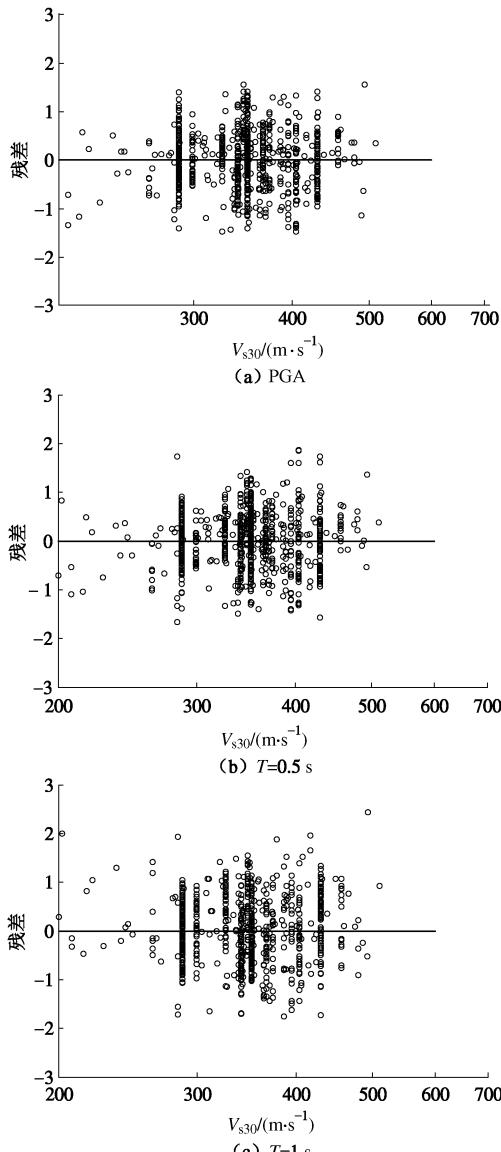
周期/s	a_1	a_2	f_3	c	V_1	σ
0.01	-4.337	-0.00925	0.1083	-0.542	1503	0.59
0.02	-3.514	-0.00841	0.1083	-0.522	1612	0.58
0.03	-2.638	-0.00712	0.1083	-0.504	1792	0.58
0.05	-2.202	-0.00585	0.1083	-0.523	1824	0.64
0.10	-4.945	-0.00821	0.1083	-0.662	1971	0.66
0.15	-2.819	-0.00711	0.1083	-0.797	1193	0.71
0.20	-7.196	-0.01063	0.1083	-0.906	857	0.73
0.40	-0.051	0.00121	0.1083	-0.881	745	0.75
0.50	-0.081	-0.00017	0.1083	-0.793	721	0.74
1.00	-0.307	-0.0054	0.1083	-0.644	658	0.83
2.00	0.013	0.00034	0.1083	-0.554	623	0.81
3.00	0.003	0.00265	0.1083	-0.555	611	0.81

4.2 模型的检验及结果分析

(1) 残差检验

本文场地放大模型包含PGA_{ref}和 $V_{\text{s}30}$ 两变量, 为了检验本模型的合理性, 图8和图9分别给出场地放大系数残差随两变量的分布, 图中实线为零线。根据图8可知残差在零线上下随机分布, 未表现出关于PGA_{ref}的系统性偏态; 当PGA_{ref}较大时, 残差仍较好地分布于零线上下, 这表明通过数值方法得出的参数 a_1 和 a_2 可以较为合理地反映场地土的非线性放大特性。同样图9中残差的良好分布也表明本模型可合理地反映 $V_{\text{s}30}$ 对场地放大系数的影响规律。

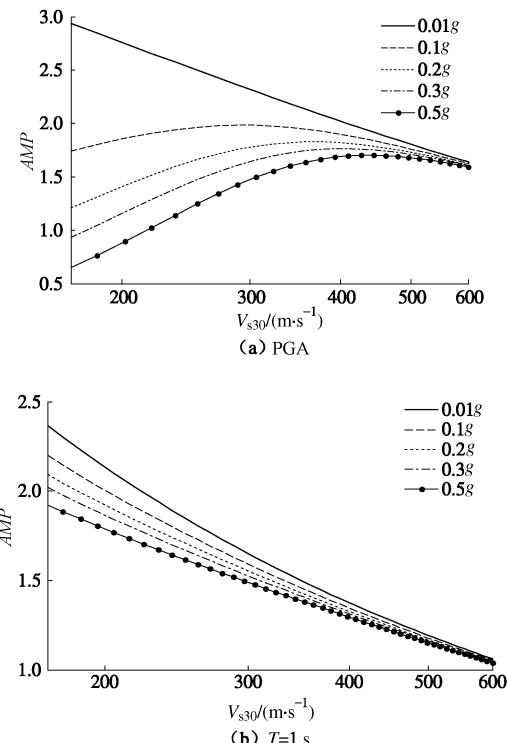


图 8 残差与 PGA_{ref} 的关系Fig. 8 Dependence of residuals on PGA_{ref} 图 9 残差与 V_{s30} 的关系Fig. 9 Dependence of residuals on V_{s30}

(2) 结果分析

为了研究本文场地放大系数随其变量的变化规律, 图10给出 PGA_{ref} 分别为 $0.01g$, $0.1g$, $0.2g$, $0.3g$, $0.5g$ 时, PGA和周期为1 s的加速度反应谱的场地放大

系数随 V_{s30} 的变化曲线。由图10可看出, 对于PGA而言, 随着地震动强度增大, 场地放大系数减小, 体现了土层非线性特征。与硬场地相比, 软场地减小得更为显著。当地震动强度较大时, 软土场地的放大系数小于1, 表明软场地对高频地震动具有一定抑制作用。对于周期为1 s的加速度反应谱, 场地放大系数随 V_{s30} , PGA_{ref} 的变化趋势与PGA相同, 差别在于其随地震动强度变化的幅度较小。此外, 周期为1 s加速度反应谱的放大系数均大于1, 表明本文研究的场地对长周期地震动均具有放大作用。

图 10 场地放大系数与 V_{s30} 的关系Fig. 10 Dependence of site amplification factor on V_{s30}

4.3 场地放大系数模型的应用

由于本文模型反映了四川地区场地非线性效应对地震动的影响规律, 为了探讨在衰减关系中考虑这一影响的必要性, 需将其纳入衰减关系, 与仅考虑土层线性反应的衰减关系对同一组实际地震动进行估计, 并比较估计结果的差异。根据式(1)可知, 场地放大系数表征了场地对于基岩地震动的放大效应, 而基岩地震动由基岩衰减关系确定, 因此结合场地放大系数模型和基岩衰减关系可确定各种场地条件的地震动。选取张齐等^[1]建立的衰减关系(文献[1])估计基岩地震动, 进一步结合场地放大系数模型即可构成一组新的衰减关系。两组衰减关系的函数形式如表3所示, 其中 $f_B(M, R_{\text{rup}})$ 为衰减关系的基本模型, 体现震级和距离的影响, V_{ref} 为基岩场地的 V_{s30} 。

表3 衰减关系的函数形式

类别	基岩场地衰减关系	场地放大项
文献[1]	$f_B(M, R_{rup}) + \ln(V_{ref}) + d$	$\ln(V_{30}/V_{ref})$
本文	$f_B(M, R_{rup}) + \ln(V_{ref}) + d$	$\ln(\text{AMP})$

与文献[1]衰减关系比较的原因包括:①考虑到衰减关系适用区域的限制;②该衰减关系对基岩地震动的估计值与姜治军等^[16]结果接近,适合估计基岩地震动;③该衰减关系仅考虑了土层线性反应的影响,当两组衰减关系的基本模型一致时,对实际地震动估计结果的不同可反映场地放大项之间的差异;④建立文献[1]衰减关系时同样也采用了表1中震级大于 M_{s5} 的记录,通过比较两组衰减关系对这部分数据的估计效果,可确定与四川地区场地条件对地震动影响规律更为相符的模型;图11给出了通过两组衰减关系得出的残差随距离的分布。

观察图11可知,残差的差异主要在于近场短周期地震动。其原因是:①当距离小于30 km时,相对大的地震动幅值更容易使土层发生非线性反应进而显著影响短周期地震动,而文献[1]衰减关系未考虑这一影响致使估计值较实际观测值偏大;相反,本文场地放大项考虑了这一影响,得出的结果更为接近实际观测值;②当距离大于30 km时,相对更小的地震动水平减弱了非线性场地放大的影响,此外地震动水平较小时,本文模型的非线性放大项接近于零,因此两模型估计值都接近于实际观测值;③由于长周期地震动不容易受土层非线性影响,且此时本模型的非线性场地放大项接近于零,致使两个衰减关系的估计值都接近于实际观测值。

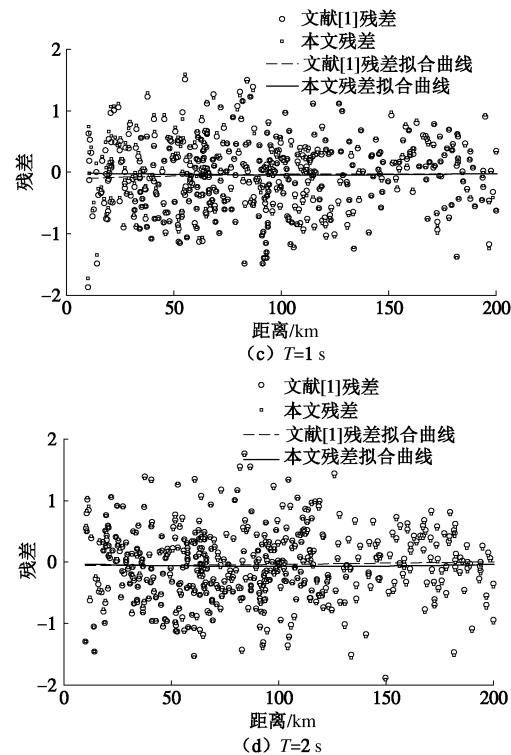
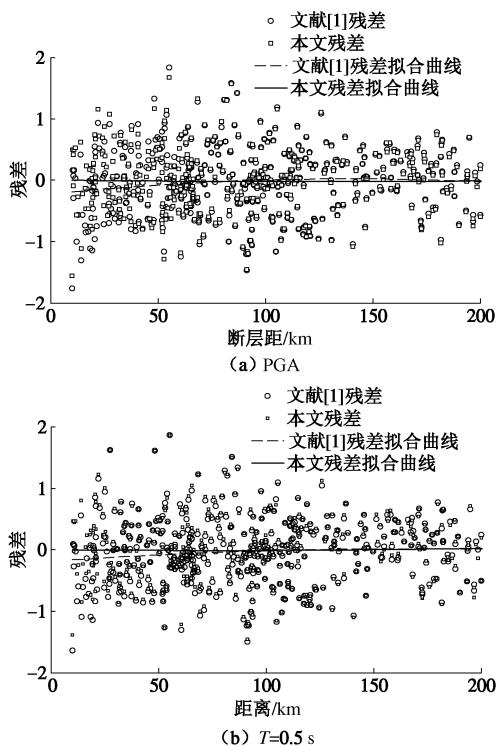


图11 通过两组衰减关系得出的残差的比较

Fig. 11 Comparison of residuals obtained by two models

为了进一步研究衰减关系中考虑土层非线性效应的意义,本文对距离进行区间化,并计算各区间内通过两组衰减关系得出的残差标准差,如表4所示。根据计算结果可知,与文献[1]模型相比,通过包含本模型的衰减关系估计近场短周期地震动时的标准差较小,相差最大幅度可达12%。这表明估计四川地区的地震动时,在衰减关系中引入考虑土层非线性效应的场地放大系数模型可有效地降低估计结果的不确定性,尤其对于近场短周期地震动的效果更为显著。

表4 两组衰减关系得出的标准差

Table 4 Standard deviations obtained by two models

周期 T/s	类别	区间内的距离平均值/km							
		15	25	35	50	75	100	125	175
PGA	本文	0.61	0.46	0.49	0.58	0.55	0.56	0.51	0.42
	文献[1]	0.68	0.54	0.53	0.58	0.55	0.56	0.51	0.42
0.5	本文	0.61	0.51	0.56	0.54	0.53	0.57	0.50	0.41
	文献[1]	0.66	0.56	0.58	0.54	0.52	0.56	0.50	0.41
1.0	本文	0.8	0.52	0.50	0.64	0.59	0.60	0.53	0.50
	文献[1]	0.8	0.52	0.50	0.64	0.59	0.60	0.53	0.50
2.0	本文	0.92	0.50	0.40	0.64	0.60	0.58	0.60	0.45
	文献[1]	0.92	0.50	0.40	0.64	0.60	0.58	0.60	0.45

5 结 论

本文以四川地区强震数据和场地资料为基础,结合等效线性化方法和经验数据分析,建立了适用于四川地区的、考虑非线性场地反应的场地放大模型,通

通过对本模型的分析和其他结果的比较, 可得出以下结论:

(1) 当地震强度较小时, 场地放大系数只依赖于 V_{s30} , 且随着 V_{s30} 增大而减小, 减小的幅度与反应谱的周期相关, 对于四川地区, 当周期为 0.2 s 时, 减小得最为显著。

(2) 当地震动强度较大时, 场地放大系数依赖于 V_{s30} 和地震动强度。对于同一场地而言, 随着地震动强度增大, 场地放大系数减小, 减小的幅度与反应谱的周期相关。当周期大于 1 s 时, 场地放大系数与地震动强度无关, 此时可忽略土层非线性反应的影响。

(3) 土层非线性反应对地震动的影响随着场地变硬而不明显, 当 V_{s30} 大于 500 m/s 时, 场地放大系数与地震动强度无关, 此时可忽略土层非线性反应的影响。

(4) 与只考虑线性场地反应影响的衰减关系相比, 采用包含本文场地放大系数模型的衰减关系可显著地减小估计四川地区地震动时的标准差, 尤其对于近场短周期地震动的效果更为显著。

致 谢: 感谢中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”提供的相关数据, 以及喻烟博士为本研究提供数据支持。

参 考 文 献:

- [1] 张 齐, 胡进军, 谢礼立, 等. 中国西部地区新一代地震动衰减模型[J]. 天津大学学报, 2013, 46(12): 1079 – 1088.
(ZHANG Qi, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. New generation ground motion attenuation model for western China[J]. Journal of Tianjin university, 2013, 46(12):1079 – 1088. (in Chinese))
- [2] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Summary of the abrahamson & silva nga ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 67 – 97.
- [3] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 139 – 171.
- [4] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67 – 76. (LU Hong-shan, ZHAO Feng-xin. Amplification factors for spectral acceleration appropriate for site category of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67 – 76. (in Chinese))
- [5] CHOI Y, STEWART J P. Nonlinear site amplification as function of 30,m shear wave velocity[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(1): 1 – 30.
- [6] WALLING M, SILVA W, ABRAHAMSON N. Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 243 – 255.
- [7] KAMAI R, ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Nonlinear horizontal site amplification for constraining the NGA-West2 GMPEs[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1223 – 1240.
- [8] SEYHAN E, STEWART J P. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1241 – 1256.
- [9] SANDIKKAYA M A, AKKAR S, BARD P Y. A nonlinear site-amplification model for the next Pan-European[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 19 – 32.
- [10] BOORE D M, ATKINSON G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 99 – 138.
- [11] CHIOU B S J, YOUNGS R R. NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 173 – 215.
- [12] ABRAHAMSON N A, SILVA W J, KAMAI R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1025 – 1055.
- [13] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, et al. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1057 – 1085.
- [14] CHIOU B S J, YOUNGS R R. Update of the chiou and youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1117 – 1153.
- [15] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1087 – 1115.
- [16] 姜治军, 胡进军, 谢礼立, 等. 中国西部地区场地放大模型 [J]. 天津大学学报, 2013, 46(12): 1071 – 1078. (JIANG Zhi-jun, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. Model of site amplification factor for western China[J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(12): 1071 – 1078. (in Chinese))
- [17] 喻 烟. 汶川地震区地震动估计经验模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012. (YU Tian. Empirical estimate model for ground motion of Wenchuan earthquake

- zone[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)).
- [18] 卢大伟, 李小军, 崔建文. 汶川中强余震地震动峰值衰减关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, **18**(增刊1): 138 - 151. (LU Da-wei, LI Xiao-jun, CUI Jian-wen. Ground motion attenuation of the Wenchuan aftershocks[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, **18**(S1): 138 - 151. (in Chinese))
- [19] STEWART J P, SEYHAN E. Semi-empirical nonlinear site amplification and its application in NEHRP site factors[R]. Berkeley: College of Engineering University of California, 2013.
- [20] 李小军, 彭青, 刘文忠. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程, 2001, **17**(4): 34 - 41. (LI Xiao-jun, PENG Qing, LIU Wen-zhong. Consideration of site effects for determination of design earthquake ground motion parameters[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, **17**(4): 34 - 41. (in Chinese))
- [21] 戚承志, 钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(3): 76 - 86. (QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Overview of seismic research for nuclear power plant[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(3): 76 - 86. (in Chinese))
- [22] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, **19**(2): 11 - 15. (BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LI Shan-you. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2003, **19**(2): 11 - 15. (in Chinese))
- [23] 孙茁, 吴建平, 房立华, 等. 利用 sPn 震相测定芦山 Ms7.0 级地震余震的震源深度[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(2): 431 - 440. (SUN Zhuo, WU Jian-ping, FANG Li-hua, et al. Focal depth determination of aftershocks of Lushan Ms7.0 earthquake from sPn phase[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, **57**(2): 431 - 440. (in Chinese))
- [24] 喻烟, 李小军. 汶川地震余震震源参数及地震动衰减与场地影响参数反演分析[J]. 地震学报, 2012, **34**(5): 621 - 632. (YU Tian, LI Xiao-jun. Inversion of strong data source parameters of aftershocks, attenuation function and average site effect[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, **34**(5): 624 - 632. (in Chinese))
- [25] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 133 - 139. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 - 139. (in Chinese))
- [26] 廖振鹏, 李大华. 设计地震反应谱的双参数标定模型[M]// 地震小区划—理论与实践. 北京: 地震出版社, 1989: 196 - 206. (LIAO Zhen-peng, LI Da-hua. Theoretics and practice of the study on Seismic Microzonation[M]// Two-parameter Calibration Model for Seismic Response Spectrum. Beijing: Earthquake Publish Company, 1989: 196 - 206. (in Chinese))
- [27] 郭晓云, 薄景山, 巴文辉. 汶川地震反应谱特征周期统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, **33**(2): 55 - 59. (GUO Xiao-yun, BO Jing-shan, BA Wen-hui. Statistical analysis of characteristic period of response spectrum based on Wenchuan strong ground motion[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, **33**(2): 55 - 59. (in Chinese))
- [28] KAKLAMANOS J, BRADLEY B A, THOMPSON E M, et al. Critical parameters affecting bias and variability in site-response analyses using KiK-net Downhole array data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, **103**: 1733 - 1749.
- [29] KIM B, HASHASH Y M A. Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2013, **29**(S): 37 - 54.