



## 地震动场地调整系数研究

闫静茹 张郁山 阚文亮

### Review on research of ground motion site adjustment coefficient

Yan Jingru, Zhang Yushan, Kan Wenliang

引用本文:

闫静茹, 张郁山, 阚文亮. 2022. 地震动场地调整系数研究. 地震学报[J], 44(5): 783–796. DOI: 10.11939/jass.20220086

Yan J R, Zhang Y S, Kan W L. 2022. Review on research of ground motion site adjustment coefficient. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 783–796. DOI: [10.11939/jass.20220086](https://doi.org/10.11939/jass.20220086)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220086>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于强震动数据的龙门山地区地震动预测模型参数反演

Parameter estimation of ground-motion prediction model in Longmenshan region based on strong motion data  
地震学报. 2018, 40(3): 374–386 <https://doi.org/10.11939/jass.20170215>

#### 浅壳与上地幔地震的水平加速度谱阻尼修正系数模型

Damping correction factor for horizontal acceleration response spectrum of shallow crustal and upper-mantle earthquakes  
地震学报. 2019, 41(6): 778–794 <https://doi.org/10.11939/jass.20190052>

#### 近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion  
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

#### 台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region  
地震学报. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

#### 2016年8月24日意大利 $M_W$ 6.2地震近场地震动方向性效应

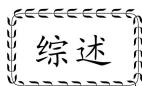
Rupture directivity effect of near-field ground motions in Italy  $M_W$ 6.2 earthquake on August 24, 2016  
地震学报. 2017, 39(1): 132–142 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.011>

#### 地震动参数对边坡地震响应的影响规律

Influence law of ground motion parameters on soil slope seismic response  
地震学报. 2017, 39(5): 798–805 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.013>

闫静茹, 张郁山, 阚文亮. 2022. 地震动场地调整系数研究. 地震学报, 44(5): 783–796. doi: [10.11939/jass.20220086](https://doi.org/10.11939/jass.20220086).

Yan J R, Zhang Y S, Kan W L. 2022. Review on research of ground motion site adjustment coefficient. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 783–796. doi: [10.11939/jass.20220086](https://doi.org/10.11939/jass.20220086).



# 地震动场地调整系数研究<sup>\*</sup>

闫静茹 张郁山<sup>†</sup> 阚文亮

(中国北京 100029 中国地震灾害防御中心)

**摘要** 回顾总结了近 20 年国内外关于地震动场地调整系数的主要研究成果, 重点分析强震动观测和数值理论方法在考虑场地条件对地震动参数影响方面的效果, 总结各类方法的适用性和优缺点, 结合国内外相关规范条文对比分析国内外的主要成果, 得出我国软土的场地调整系数值小于国际水平, 并进一步分析了造成这种差异的原因。最后基于目前国际地震区划工作的发展趋势以及各行业相关规范的新技术需求, 对新一代区划图的研究工作进行了展望。

**关键词** 场地效应 地震动参数 场地调整系数 强震动观测 数值理论计算

**doi:** [10.11939/jass.20220086](https://doi.org/10.11939/jass.20220086) **中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

## Review on research of ground motion site adjustment coefficient

Yan Jingru Zhang Yushan<sup>†</sup> Kan Wenliang

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

**Abstract:** This paper reviews and summarizes the main research results on the adjustment coefficients of ground motion field at home and abroad over the past 20 years, focusing on the effective means of considering the influence of filed conditions on ground motion parameters through strong ground motion observation and numerical theory methods. It summarizes the applicability along with the pros and cons of various methods, conducts a comparative analysis of the main results at home and abroad by combining relevant codes and provisions, and concludes that the coefficients of soft soil field in China are smaller than the international level. What's more, the reasons for this difference are further analyzed. Finally, based on the current development trend of international seismic zoning work and the new technical requirements of the relevant codes in various industries, it puts forward prospects for the research work of the new generation of zoning maps.

\* 基金项目 地震科技星火计划项目(XH2013YA)资助。

收稿日期 2022-06-06 收到初稿, 2022-08-10 决定采用修改稿。

作者简介 闫静茹, 硕士, 工程师, 主要从事地震工程方面的研究, e-mail:

[qiaoxiage@sina.com](mailto:qiaoxiage@sina.com); <sup>†</sup>张郁山, 博士, 研究员, 主要从事地震工程的科学研究及工程应用工作, e-mail: [hyszhang@163.com](mailto:hyszhang@163.com)



**Key words:** site effect; ground motion parameter; site adjustment coefficient; strong motion observation; numerical theoretical calculation

## 引言

各类震害研究发现, 地震发生时, 场地覆盖层会引起地震动强度和频谱特性的急剧变化, 覆盖土层结构不同所引起的场地地震动的振幅特性(如峰值加速度、峰值速度、峰值位移等)及频谱特性(如反应谱、傅里叶谱等)也不相同。各国学者通常采用地震动参数场地调整方法和地震动参数场地衰减关系来考虑场地地震效应的影响(李小军, 2013), 其中: 场地调整法是以硬土场地为参考场地, 通过场地系数给出其它类别场地相对硬土场地的一般性定量关系, 从而反映场地对地震动的放大强弱; 而场地地震动参数衰减关系则是通过强震观测数据建立经验数据函数(衰减关系)来模拟土壤行为, 推导特定的预测模型来模拟不同的场地条件, 使用场地放大因子来分析场地效应, 该因子通过场地衰减关系与参考基岩场地衰减关系归一化得到。我国多采用场地调整的方法考虑工程场地条件对设计地震动参数的影响。

国际上目前主要以强震动观测数据和数值理论计算的方式通过统计分析手段确定场地地震动参数的调整系数。其中, 以强震动观测手段进行基岩和土层的对比分析是场地调整系数研究的最直接的方式, 但各国均面临高幅值强震动观测记录匮乏、实际强震记录标准基岩面不易界定、地震波动在介质中传播具有随机性等问题, 导致这种基于统计意义的平均结果存在很大的离散性和不确定性(李瑞山, 袁晓铭, 2019), 因此数值计算方法常作为场地效应影响分析的重要手段, 用以进行现有记录之外更为强烈的地震运动模拟(Régnier et al., 2018)。

地震区划工作是各国抗震设防、规划选址、风险评估和应急备灾的基础性支撑工作, 其中场地地震动参数调整方案的建立是区划工作中考虑局部场地条件、科学合理评估场地条件对地震动放大效应影响的关键技术环节, 也是提升地震区划工作精细化水平、实现地震灾害韧性治理的关键工作。因此本文在收集整理大量国内外规范条文及相关研究成果的基础上, 对地震动场地调整系数的研究现状进行总结, 开展各国主要成果的对比分析, 梳理各类成果的差异性和优缺点, 并结合工程实践和行业需求, 对新一代区划图编制过程中有关场地调整系数的研究手段和研究内容进行展望。

## 1 国内外相关研究进展

### 1.1 国内研究现状

我国主要运用场地调整方法进行场地效应的定量分析, 该方法以强震动观测数据和数值模拟结果为基础运用统计分析手段确定地震动参数的场地调整系数。

采用强震动观测记录进行场地调整系数分析时, 主要利用美国西部(薄景山, 1998; 耿淑伟, 2005; 赵艳等, 2009; 栾极, 2012; 王金元, 2013; 李洪达, 2015)、日本(郭峰等, 2011; 史大成, 2013; 崔昊, 丁海平, 2016)和我国汶川地震(郭晓云等, 2012)的强震动记录资料进行场地类别和地震动强度的分档统计, 探讨不同场地类别的地震动参数调整关系, 给出场地调整系数的建议值。我国采用强震动观测记录进行场地效应分析时常用的最直观方法就是谱比法, 该方法通常选择一个距离土层场地台站很近的基岩台站作为参考(可认为两个场点的地震动不受震源特性和传播路径的影响), 通过比较土层台站强震记录与参考基岩台站强

震记录的谱比, 定量分析局部场地条件对地震动的影响。研究人员在采用强震动观测数据谱比法研究场地系数时普遍存在以下三点问题: ① 强震观测数据有限, IV类场地观测数据缺乏或较少, 结果较为离散, 规律性不好; ② 通常采用美国或日本强震观测记录开展研究, 缺少与我国场地分布特征相匹配的成果产出; ③ 高幅值(大于0.4g)强震动记录较少。图1给出了部分研究人员的III类场地调整系数对比图, 各研究成果大部分呈现场地系数随地震动强度的增大而减小的趋势, 体现出土壤的非线性特征, 但是由于强震动观测数据及其质量和完整性不同, 结果也呈现出较大的差异。

采用强震动观测数据进行场地条件对地震动影响的研究, 需要建立在大量的强震观测资料的基础上, 同时还要求所利用的强震观测资料具有代表性且满足广泛分布的原则, 而我国早期的强震动数据相对匮乏, 不足以支撑我国场地条件的场地系数研究, 同时强震动观测数据统计方法也存在参考基岩面不易选择的问题, 这些都会影响实际统计结果的真实有效性, 因此还需要采用理论方法和数值模拟等补充手段开展场地地震动参数影响的研究。

采用数值计算方法确定场地调整系数的难点在于建立充足广泛的场地模型样本, 以及考虑计算方法、模型参数的不确定性等的影响。我国最早通过数值模拟方法系统性地开展场地调整系数研究工作的学者是李小军教授(李小军, 彭青, 2001), 他采用等效线性化方法进行了188个实际工程场地模型的地震反应计算, 研究四类场地条件对地震动影响的特点及规律, 统计地表反应谱随场地条件变化的经验关系, 最终给出场地系数的建议值(表1); 同一时期, 窦立军(2001)开展了79个典型场地的地震反应计算, 按照卓越周期对场地进行分类(分为三类), 将地表加速度反应谱先平均再拟合, 给出了场地系数建议值; 为了支持第五代

表1 不同研究基于数值模拟方法给出的场地调整系数建议值  
Table 1 Proposed values of site coefficients given by different researches based on numerical simulation methods

场地类别	不同地震动峰值下的场地系数						来源
	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g	
I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	李小军和彭清(2001)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	吕悦军等(2008)
II	1.50	1.45	1.40	1.33	1.25	1.18	李小军和彭清(2001)
	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.11	吕悦军等(2008)
III	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	李小军和彭清(2001)
	1.22	1.18	1.13	1.08	0.99	0.90	吕悦军等(2008)
IV	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45	李小军和彭清(2001)
	1.14	1.07	1.00	0.93	0.75	0.65	吕悦军等(2008)

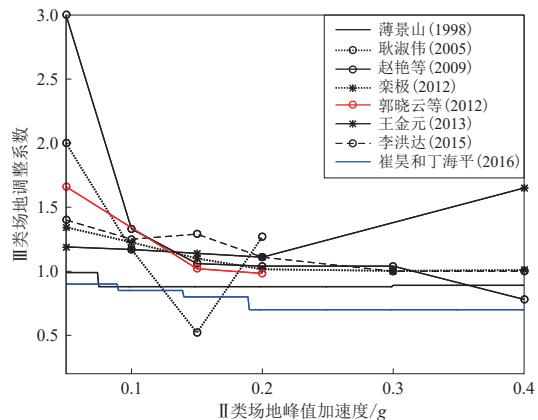


图1 不同研究人员基于统计方法给出的我国III类场地的调整系数结果对比

Fig. 1 Comparison of adjustment coefficient results of class III sites in China by different scholars based on statistical methods

区划图的研究工作,吕锐军等(2008)收集整理了北京地区、天津地区、济南周边地区、南京周边地区的地震安全性评价报告,重点对北京地区的场地基础资料进行分析总结,给出了场地调整系数取值建议(表1);闫静茹等(2020)梳理了山东省近300个较为完整的钻孔剖面,开展一维场地的等效线性化计算,给出Ⅱ类和Ⅲ类场地的放大系数值;丁海平和王康(2022)基于KiK-net台阵中的73个台站,采用反演基岩地震波和等效线性化方法,得到了各类场地短周期范围内的有效峰值加速度调整系数 $F_a$ ,发现Ⅱ类场地的土层放大效应大于其它类场地.

我国学者也通过其它方式开展了相关研究,得到了一些有意义的成果.例如:吕红山和赵凤新(2007)利用我国场地类别与美国场地类别的划分关系,得到我国抗震规范与美国抗震规范的等效剪切波速的对应关系,并通过场地系数( $F_a$ ,  $F_v$ )转换得到适合我国抗震规范的场地放大系数,这种转换的方式简单有效,但是由于我国与美国的场地分类标准相差较大,同时参考台站的钻孔资料也十分有限,因此以此为基础建立的中美场地对应关系有失全面性;李瑞山和袁晓铭(2019)采用土层-基岩理想场地模型,推导出土层场地与参考基岩场地地震动响应的定量关系解析表达式,提出了场地放大系数的一般规律,但由于其理论推导建立在假设理想土体的模型上,其结果的可靠性仍需要通过强震观测记录和数值模拟结果加以验证,不适宜以此确定场地调整系数建议值,但可作为检验国内外规范中场地系数合理性的一种方式.

## 1.2 国外研究现状

国际上引入场地系数概念的时间较早,相关研究也在不断地细化和深入.1992年美国国家地震工程研究中心(National Center for Earthquake Engineering Research, 缩写为NCEER)以编制修订场地类别、场地系数和场地相关反应谱为目标举办了地震反应研讨会,参会的工程师和地震学家为修订工作提供了最近和正在进行的研究成果,主要是基于计算机程序SHAKE和DESRA的数值分析,以及对1989年洛马·普雷塔(Loma Prieta)地震的实证分析结果.该研讨会所采纳的场地系数建议值被应用于美国国家地震减灾计划(National Earthquake Hazards Reduction Program, 缩写为NEHRP)的新版修订中,相比以前版本增加了场地分类数量及场地系数的量化标准(Crouse, McGuire, 1996).至此关于场地调整系数的规定迎来了重大调整,也更为规范,相关研究工作也丰富了起来.其中,会议重要成员Borcherdt基于1989年美国洛马·普雷塔地震记录数据进行了场地系数等方面的研究,并于1994年提出采用四步法原则估计场地反应谱,简单描述为:①确定输入的基岩地震动反应谱强度 $I_a$ 和 $I_v$ ;②利用平均剪切波速度 $v_{S30}$ (30 m深度)来描述场地条件;③推导与场地参数(剪切波速等)和地震强度相关的放大因子;④计算场地反应谱.Borcherdt四步法可以根据具体的场地要求和现有信息灵活地选择不同技术方法来估计场地的放大效应,形成一个框架,在新的数据积累和技术程序突破时,可以将其纳入其中,在此之后的研究人员采用强震动观测数据进行场地系数研究时也多采用这种框架.其后,于2002年对北岭(Northridge)地震数据进行整理,根据强震记录台站附近的场地剪切波速测量或估计结果进行场地相关放大因子的计算,在分析最小化震源辐射模式和地壳传播路径变化影响的基础上,得到了相关场地建议值;又于2005年在美国旧金山地震台站获取相关强震数据,进行D类和E类软土场地的研究(Borcherdt et al, 2005),并于2014年综合四位研究学者建立的隐含场地因素项(与剪切波速相关函数)的地面运动预测方程,得到短中期场地放大系数对比图.其中2005年成果与NEHRP2003进行了对比,指出D类和E类软场场地系数规范值明显偏小(图2),同时其2014年的成果也存在相同规律.

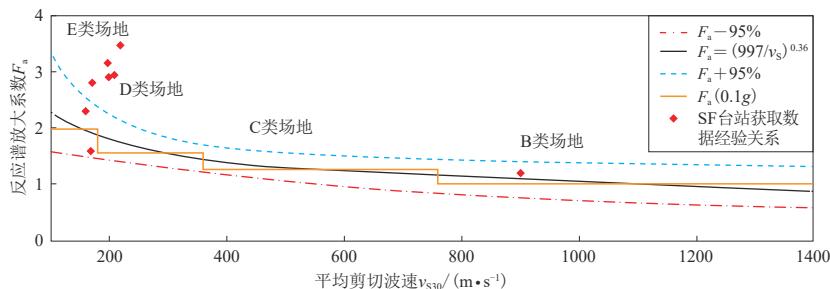


图 2 利用洛马·普雷塔强震记录基于美国规范预测的各类场地的场地调整系数(Borcherdt *et al.*, 2005)

Fig. 2 Predicted site adjustment coefficients from Loma Prieta strong earthquake records based on US code (Borcherdt *et al.*, 2005)

其他学者如 Dobry 等(1999)利用北岭强运动数据,采用谱比法推导震源附近土层与基岩场地地震反应谱的放大比,得到场地土层的放大特性;多项研究基于各类强震动数据集(如洛马·普雷塔地震、北岭地震、希腊、意大利和土耳其等地震台站采集信息)建立了可以处理线性和非线性的土壤行为的场地地震动放大模型,用以场地放大效应研究,给出了场地系数建议值(Crouse, McGuire, 1996; Rodriguez-Marek *et al.*, 1999; Joyner, Boore, 2000; Stewart *et al.*, 2003; Choi, Stewart, 2005; Sandikkaya *et al.*, 2013; Seyhan, Stewart, 2014; Pitilakis *et al.*, 2019).

纵观全球范围内布设的台站,高幅值(基岩峰值加速度大于  $0.2g$ )强震动记录数据非常有限,涉及D类和E类软土场地的记录结果离散性较大,规律性不强;同时,在某些低地震活动性地区也缺乏强地面运动数据的记录.为了克服这一限制,数值模拟方法被应用于较高运动水平的场地放大系数研究中,目前国内外多采用一维土层场地地震反应等效线性化方法并借助参考场地谱比法给出高震级软土场地放大系数的建议值.国外较早进行相关研究的学者是 Idriss (1990, 1991), 1985年墨西哥城和1989年洛马·普雷塔地震后,他通过强震记录和场地地震反应计算方法开始了场地相对于基岩放大系数的研究,由于强震记录只有  $0.2g$  以下的基岩结果,因此他以场地地震反应计算模拟结果为补充,得到更大能级场地地表相对于基岩的变化关系(图 3),结果显示,随着基岩加速度的增加,场地放大系数逐渐减小. Hwang 等(1997)使用概率性方法预测美国东部可能出现的地面运动,通过人为构造的15个场地和50个不同的土层波速模型并结合等效线性化方法,计算各类场地的反应谱与基岩反应谱的比值,以统计分析方法给出了一组场地系数  $F_a$  和  $F_v$  的建议值; Silva 等(2000)采用等效线性化方法进行加州地区的地质单元模型的计算,以估计放大因子作为频率的函数,并采用完全非线性分析法验证结果,发现C类、D类软土场地系数值高于NEHRP 规范值,认为规范值不够保守. Aboyne 等(2014)采用等效线性化(SHAKE2000 平台)和时域非线性(D-MOD2000 平台)方法进行一维土层的地震响应分析.在计算阶段,当

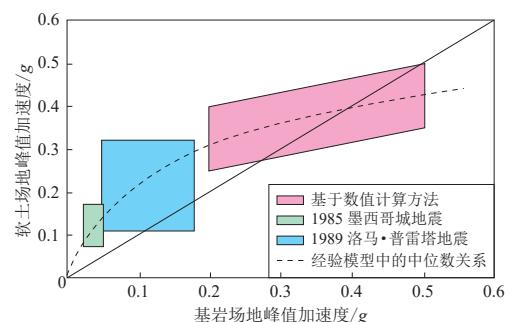


图 3 基岩场地与软土场地(E类)加速度关系  
(Idriss, 1990, 1991)

Fig. 3 Acceleration relationship between bedrock site and soft soil site (class E) (Idriss, 1990, 1991)

露头软岩  $\text{PGA} \leq 0.3\text{g}$  时采用 SHAKE2000 平台, 当  $\text{PGA} > 0.3\text{g}$  时采用 D-MOD2000 平台, 总计构建 4 万 8 000 组计算工况, 给出了南卡罗来纳州沿海平原的场地放大系数模型, 该结果与 NEHRP1994 规范所给的建议值之间存在明显的差别, 尤其是当基岩埋深较浅且覆盖土层平均剪切波速小于 180 m/s 时差别尤为显著; 同时指出除  $v_{S30}$  和震动强度之外, 场地系数还受到 100 m 深度范围内土体的刚度、覆盖层的厚度以及基岩输入地震动的频率等因素的影响。Moon 等(2017)采用综合了概率地震危险性算法和场地时域非线性算法的分析程序(2014 PSHA-NL)给出了上密西西比湾区高地和低地的 C, D, E 类场地的放大系数, 通过 32 万 4 000 个计算工况的统计分析结果表明, NEHRP 建议的场地系数仅适用于覆盖层厚度小于 50 m 的 D 类场地, 其大大低估了 C 类场地的短周期调整系数  $F_a$ , 但是又高估了覆盖层厚度超过 100 m 的 D 类和 E 类场地系数。

Tropeano 等(2018)采用了三种方法, 即基于强震动观测数据的经验放大因子法、基于场地反演的半经验方法、场地等效线性化数值模拟方法, 得到土壤场地峰值加速度与岩石露头基岩峰值加速度之间的关系曲线, 以数据集拟合出的中位数曲线及 84% 置信区间为标准给出了各类场地相对于基岩的放大关系(图 4), 图 4 所示的对比结果表明 Eurocode 8 (European Committee for Standardization, 2003) 建议的场地系数在低震级地面运动下出现明显的低估, 而在高震级地面运动下出现高估。Paolucci 等(2021)利用 SHAKE91 平台(Sun, Idriss, 1992)构建 32 万 2 500 个分析工况, 通过一维场地等效线性化计算方法进行场地放大系数的研究, 结合

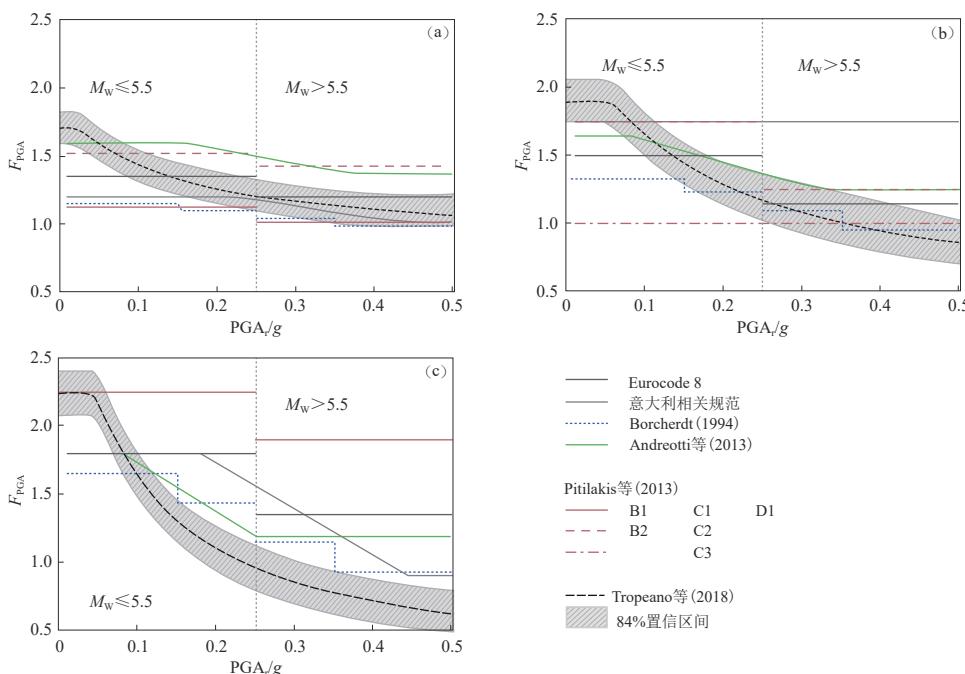


图 4 建议的场地放大系数  $F_{\text{PGA}}$  与欧洲规范及其它研究成果的对比(Tropeano *et al.*, 2018)

(a) B 类场地; (b) C 类场地; (c) D 类场地

Fig. 4 Comparison of the proposed site amplification coefficients  $F_{\text{PGA}}$  with European code and

other research achievements (Tropeano *et al.*, 2018)

(a) Site class B; (b) Site class C; (c) Site class D

场地非线性放大经验预测模型的研究成果, 建议在 2021 年 Eurocode 8 草案中引入场地放大非线性修正因子(表 2), 并通过 KiK-net 多个站点的地面响应实际记录对其进行校核。

表 2 2021 年欧洲规范草案建议的场地放大因子(Paolucci et al., 2021)

Table 2 Site amplification coefficients proposed in the 2021 European draft code (Paolucci et al., 2021)

场地分类	$F_a$		$F_\beta$	
	$H_{800}$ 和 $v_{S,H}$ 相关值	默认值	$H_{800}$ 和 $v_{S,H}$ 相关值	默认值
A	1.0	1.0	1.0	1.0
B	$\left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.40r_\alpha}$	$1.3 \times (1 - 0.1S_{\alpha,RP}/g)$	$\left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.70r_\beta}$	$1.6 \times (1 - 0.2S_{\beta,RP}/g)$
C		$1.6 \times (1 - 0.2S_{\alpha,RP}/g)$		$2.3 \times (1 - 0.3S_{\beta,RP}/g)$
D		$1.8 \times (1 - 0.3S_{\alpha,RP}/g)$		$3.2 \times (1 - S_{\beta,RP}/g)$
E	$\left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.40r_\alpha \frac{H}{30} (4 - \frac{H}{10})}$	$2.2 \times (1 - 0.5S_{\alpha,RP}/g)$	$\left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.70r_\beta \frac{H}{30}}$	$3.2 \times (1 - S_{\beta,RP}/g)$
F	$0.9 \left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.40r_\alpha}$	$1.7 \times (1 - 0.3S_{\alpha,RP}/g)$	$1.25 \left(\frac{v_{S,H}}{800}\right)^{-0.70r_\beta}$	$4.0 \times (1 - S_{\beta,RP}/g)$

注:  $r_\alpha = 1 - \frac{S_{\alpha,RP}/g}{v_{S,H}/150}$ ;  $r_\beta = 1 - \frac{S_{\beta,RP}/g}{v_{S,H}/150}$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  分别为地震活动性条件高和低;  $H$  为覆盖层厚度;  $S$  为反应谱;  $RP$  为相关性反应谱。

总体来说, 利用强震动观测数据直接建立非线性场地衰减关系的方法是能最直观地反映场地效应的方法, 这种方法是在基岩衰减关系的基础上, 加上场地表达项, 以剪切波速或地质年代为变量反映场地条件对地震的放大影响, 以这种方式进行场地放大系数研究的问题在于基岩衰减关系与场地衰减关系的放大比只能考虑均值的放大, 而无法考虑方差等因素的影响, 同时由于实际场地结构的复杂性以及强震记录无法满足广泛分布的条件, 会导致结果离散, 无法建立场地衰减关系的有效表达式; 而数值模拟分析法, 国际上还是多采用等效线性化方法, 时域非线性方法往往作为补充结果进行考虑, 例如, 在 Aboye 等(2014)的研究中按照峰值加速度分段采用两种计算方法得到场地系数结果, 这种处理方式依然未考虑对土体非线性的认知差异所带来的对结果不确定性的影响。

## 2 主要研究成果的比较

国内外场地系数的研究工作不断取得新的成果, 重点进行数据的积累和研究方法的更新迭代。为了总结近二十年的主要研究进展, 对场地效应影响中场地系数的给值有定量的认识, 本节给出了国内外主要研究成果中的场地系数值, 列于表 3 和 4。表 3 为中国各类场地调整系数的主要研究成果, 给出了不同场地相对于 I 类或 II 类场地的地震动峰值加速度调整系数; 表 4 为美国及欧洲不同类别场地调整系数的主要研究成果, 给出了 C, D, E 类场地相对于 B 类场地分别在周期 0.2 s 和 1.0 s 时的地震动峰值加速度调整系数  $F_a$  和  $F_v$ , 其中 Pitilakis 等(2019)由于 B 类和 C 类场地的分类标准不同, 仅给出 D 类和 E 类场地相对于 A 类场地的调整系数值。

从国内外研究成果可以看出, 由于场地类别划分标准不同, 国内外场地效应调整系数也有一定的差异性, 尤其是对于软土地场的放大系数的放大趋势而言, 我国与国外较为不同, 这不应仅归因于场地类别划分和参考场地不一致, 我们应进一步探究国外尤其是欧美等先进国家的研究手段, 找出差异数点, 在确定我国场地系数取值时作一定的修正。

表 3 中国不同类别场地调整系数主要研究成果

Table 3 Main research achievements of adjustment coefficients for different types of sites in China

场地类别	不同地震动峰值加速度下的场地调整系数						来源
	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g	
I	0.98	0.93	1.00	1.00	1.00	0.90	薄景山(1998)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	李小军和彭青(2001)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	吕锐军等(2008)
	1.00	1.00	1.00	1.00			郭峰等(2011)
	0.77	0.96	0.82	0.70	0.87		栾极(2012)
	0.50	0.64	0.69	0.50		0.51	郭晓云等(2012)
	1.33	0.87	0.86	0.80		1.02	王金元(2013)
			1.00	1.00	1.00	1.00	史大成(2013)
	0.99	0.88	0.86	0.78	0.92	0.94	李洪达(2015)
	0.70	0.75	0.80	0.90	0.90	0.90	崔昊和丁海平(2016)
II	0.58	0.61	0.70	0.60	0.60	0.63	丁海平和王康(2022)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	薄景山(1998)
	1.50	1.45	1.40	1.33	1.25	1.18	李小军和彭青(2001)
	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.11	吕锐军等(2008)
	1.80	1.63	1.57	1.46			郭峰等(2011)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	栾极(2012)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	郭晓云等(2012)
	1.00	1.00	1.00			1.00	王金元(2013)
			1.60	1.30	1.20	1.20	史大成(2013)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	李洪达(2015)
III	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	崔昊和丁海平(2016)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	丁海平和王康(2022)
	0.99	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	薄景山(1998)
	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	李小军和彭青(2001)
	1.22	1.18	1.13	1.08	0.99	0.90	吕锐军等(2008)
	1.29	1.25	1.20	1.24			郭峰等(2011)
	1.34	1.23	1.10	1.02	1.00	1.01	栾极(2012)
	1.66		1.02	0.98			郭晓云等(2012)
	1.19	1.17	1.14	1.11		1.65	王金元(2013)
			1.80	1.60	1.40	1.30	史大成(2013)
IV	1.40	1.25	1.29	1.11	1.00	1.00	李洪达(2015)
	0.90	0.85	0.80	0.70	0.70	0.70	崔昊和丁海平(2016)
	1.00	0.73	0.77	0.56	0.71	0.73	丁海平和王康(2022)
	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45	李小军和彭青(2001)
	1.14	1.07	1.00	0.93	0.75	0.65	吕锐军等(2008)
	1.10	1.21	1.24	1.11			郭峰等(2011)
			2.80	2.50	2.30	2.10	史大成(2013)
	2.00	1.50	1.21	0.89			李洪达(2015)
	0.41	0.47	0.45	0.52	0.53	0.40	丁海平和王康(2022)

图 5 在参考中国和欧美场地调整系数主要研究成果基础上, 给出了中国规范Ⅲ类和Ⅳ类以及参考美国、欧洲规范D类和E类软土场地峰值加速度(国外取短周期)放大系数对比图。为了易于对比分析, 中国和欧美的放大系数均以I类或B类硬岩场地为参考场地进行转换。图中分别给出了中国与欧美相应成果的平均值和拟合曲线, 并与我国规范GB 18306—

表 4 美国及欧洲不同类别场地调整系数主要研究成果

Table 4 Main research achievements of the adjustment coefficient of different types of sites in America and Europe

场地类别	地区	不同地震动峰值加速度下的场地调整系数										来源	
		$\leq 0.1g$		0.2g		0.3g		0.4g		$\geq 0.5g$			
		$F_a$	$F_v$	$F_a$	$F_v$	$F_a$	$F_v$	$F_a$	$F_v$	$F_a$	$F_v$		
C	美国	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	Hwang等(1997)	
	美国	1.46	1.32	1.31	1.28	1.23	1.25	1.17	1.24			Rodriguez-Marek等(1999)	
	美国	1.23	1.80	1.16	1.80	1.10	1.80	1.04	1.80	0.99	1.80	Joyner和Boore(2000)	
	美国	1.62	1.96	1.54	1.86	1.46	1.76	1.38	1.66	1.29	1.56	Borcherdt(2002)	
	美国	1.31	1.80	1.23	1.75	1.19	1.74	1.16	1.72	1.14	1.70	Stewart等(2003)	
	美国	1.36	1.62	1.29	1.56	1.24	1.54	1.22	1.52	1.20	1.51	Choi和Stewart(2005)	
	欧洲	1.21	1.39	1.17	1.34	1.14	1.32	1.12	1.31	1.10		Sandikkaya等(2013)	
	美国	1.37	1.57	1.33	1.56	1.31	1.56	1.29	1.55	1.27	1.48	Borcherdt(2014)	
D	美国	2.00	2.60	1.70	2.60	1.50	2.70	1.30	2.80	1.10	2.80	Hwang等(1997)	
	美国	1.81	2.04	1.61	1.94	1.50	1.89	1.42	1.85			Rodriguez-Marek等(1999)	
	美国	1.51	1.32	1.35	1.32	1.20	1.32	1.07	1.32	0.98	1.32	Joyner和Boore(2000)	
	美国	2.06	2.62	1.88	2.43	1.71	2.23	1.54	2.04	1.36	1.84	Borcherdt(2002)	
	美国	1.63	2.39	1.58	2.35	1.56	2.34	1.54	2.33	1.52	2.32	Stewart等(2003)	
	美国	1.81	2.60	1.47	2.14	1.27	1.92	1.19	1.74	1.13	1.66	Choi和Stewart(2005)	
	欧洲	1.37	2.22	1.13	1.88	1.01	1.81	0.94	1.74	0.89		Sandikkaya等(2013)	
	美国	1.68	2.35	1.47	2.25	1.34	2.19	1.24	2.14	1.16	1.97	Borcherdt(2014)	
E	欧洲	1.90	3.80	1.60	3.30	1.40	3.00	1.20	2.80	1.00	2.70	Pitilakis等(2019)	
	美国	2.60	3.00	2.20	3.10	1.90	3.30	1.70	3.40	1.50	3.60	Hwang等(1997)	
	欧洲	1.20	2.48	0.94	2.00	0.82	1.92	0.75	1.85	0.70		Sandikkaya等(2013)	
	美国	1.87	3.38	1.31	2.83	1.02	2.52	0.84	2.31	0.72	2.08	Borcherdt(2014)	
E	欧洲	1.60	1.30	1.60	1.20	1.50	1.20	1.50	1.20	1.50	1.20	Pitilakis等(2019)	

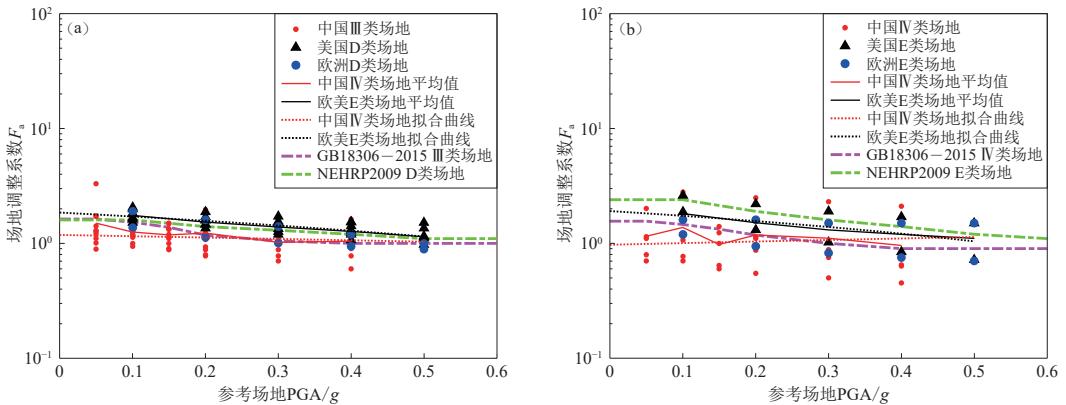


图 5 中国与欧美主要研究成果对比

(a) III类场地或 D 类场地; (b) IV类场地或 E 类场地

Fig. 5 Comparison of major achievements between China and Europe and America

(a) Site class III or D; (b) Site class IV or E

2015 和美国 NEHRP2014 规范进行对比。由该图可以明显看出, 对于软弱场地(尤其是 III类或 D 类场地), 美国场地放大系数普遍高于我国研究成果, 尤其中地震情况下这种差异更为明

显，同时我国在规范编制中也呈现出场地调整系数相对美国规范偏小的趋势。

### 3 国内外规范条文对比

场地系数研究的主流趋势是考虑多参数影响并给出具有概率意义的区域化结果，欧美国家在这方面的工作一直处于领先。美国抗震规范体系中的重要版本更新有 NEHRP2003, 2009 和 2015, 均明确给出了不同类别场地短周期( $T=0.2\text{ s}$ )和长周期( $T=1.0\text{ s}$ )加速度反应谱调整系数 $F_a$ 和 $F_v$ , 以及峰值加速度调整系数 $F_{PGA}$ 。欧洲结构抗震设计规范 Eurocode 8 对于不同类别场地推荐使用不同的弹性反应谱进行设计(图 6)。日本相关抗震设计规范(Society of Civil Engineering, 2000)考虑了远近场地影响, 给出不同场地类别的场地调整系数以指导场地设计地震动参数的取值(表 5), 其中, SL1 和 SL2 分别相当于我国的 50 年超越概率水平 63% 和 10% 的地震动(李小军, 2013)。

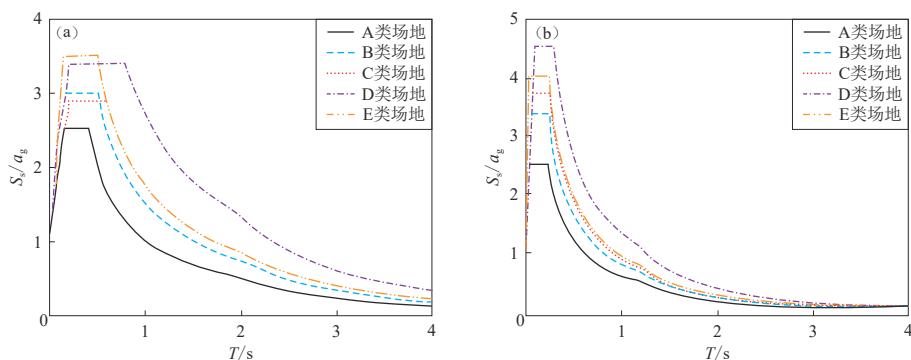


图 6 Eurocode 8 推荐的不同类别场地的弹性反应谱( $S_s$  为场地反应谱,  $a_g$  为基岩加速度)

Fig. 6 Recommended elastic response spectra for different types of sites in Eurocode 8

( $S_s$  is site response spectrum,  $a_g$  is ground acceleration)

(a)  $M > 5.5$ ; (b)  $M \leq 5.5$

表 5 日本相关抗震设计规范中场地调整系数 $F_a$ 与场地类别的关系

Table 5 The relationship between site influence factor  $F_a$  and site classification in Japanese railway code

场地类别	$G_0$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_5$	$G_6$	$G_7$
SL1	0.80	1.00	1.20	1.40	1.48	1.60	1.36	1.12
SL2 (远场)	0.80	1.00	1.27	1.36	1.45	1.27	1.09	0.91
SL2 (近场)	0.80	1.00	1.18	1.06	0.94	0.82	0.71	0.59

我国工程抗震设计时确定地震动参数的基础性规范是中国地震动参数区划图, 最新版第五代地震动参数区划图 GB 18306—2015(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2016)明确指出, “应根据场地类别调整地震动峰值加速度”, 并给出了不同类别场地的地震动峰值加速度调整系数。通过与欧美规范中软场地系数的对比发现, 我国规范中软土场地系数建议取值明显小于欧美规范的相关标准(图 7), 这种结果在第二节也给出了较为全面的对比, 结果显示不仅强非线性阶段显著偏小, 弹性放大阶段取值也明显偏小, 这种差异显然不能完全归于区域性的差别。由于我国学者以数值模拟手段进行场地系数确定时往往采用频率无关等效线性化方法, 而该方法在较大峰值加速度基岩输入

时会引起明显的“共振”效应，造成对地表地震反应(尤其是高频成分)的低估(卢滔, 2003). 频率相关等效线性化方法和时域非线性方法已多次被学者证明在强震软土情况下的计算结果较频率无关等效线性化方法更为合理(蒋通, 邢海灵, 2007; 齐鑫, 肖遥, 2012; 荣棉水等, 2013), 因此在新一代区划图编制过程中, 应考虑采用多种计算方法进行场地效应研究, 以给出合理的场地调整系数建议值.

#### 4 讨论与结论

目前, 场地影响的发展趋势是关注“多概率、多参数”的理念, 这也是国际地震区划工作的发展重点. 我国新一代地震区划工作也将引入“多概率、多参数”的编图理念, 这对场地效应调整的研究工作提出了新的技术需求.

本文对国内外场地系数的相关工作进行总览, 通过主要研究成果和相关规范的对比分析, 指出我国软土场地系数给值小于国际水平. 导致这种差异的原因一方面由于地域性差异, 场地系数确定过程中会考虑一定的政策修订; 另一方面我国以往地震动参数区划图中确定场地调整系数所采用的计算方法为等效线性化方法(频率无关等效线性化方法), 该方法概念简单、易于工程应用, 但只适用于小应变范围的计算, 当土体进入强非线性状态时, 该方法计算结果与观测结果相差较大. 新一代区划图关注多概率下不同场地条件对地震动参数幅值和频谱特性的影响, 极低概率(高强)地震作用时, 土体(尤其软土)容易进入强非线性状态, 因此采用传统等效线性化方法建立的场地调整系数, 无法合理地描述土体强非线性力学行为, 从而影响地震区划结果的科学性和合理性. 为了解决强非线性条件下场地地震反应的数值计算问题, 不同研究人员提出了各种改进方法, 包括频率相关等效线性和时域非线性等方法. 不同计算方法的差异从本质上反映了研究人员对土体非线性力学行为的认知不确定性, 单一地采用一种方法进行场地调整系数的研究难以反映这种不确定性, 也会带来结果的不合理, 需要综合国际上认可的其它类计算方法进行地震动参数场地调整系数的研究.

同时, 在“多参数”的编图背景下, 地下轨道交通和地下管道交通抗震规范以及地下管道区划工作已对 PGV 场地调整系数提出了明确的行业需求, 因此基于多参数(PGA, PGV, PGD)场地调整系数的区划研究工作将是进一步提升我国震害防御能力的基本保障. 而目前基于 PGV 和 PGD 的场地地震动参数调整系数的研究几乎空白, 这就要求我们在新一代区划图的编制工作全面启动过程中, 不断推进相关工作, 结合编图标准以及行业需求给出新的科学成果, 为基础规范建设提供数据支撑.

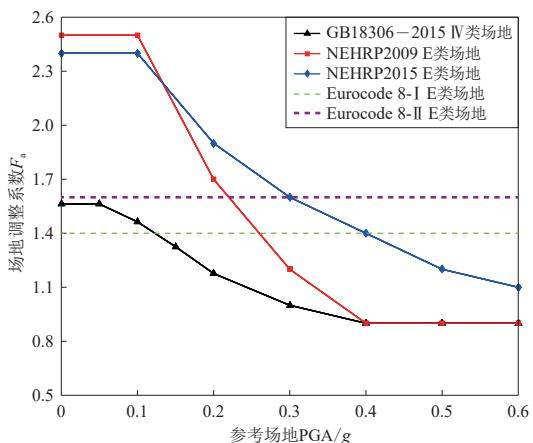


图 7 中国现行规范与美国、欧洲规范建议的软弱土层场地调整系数对比

Fig. 7 Comparison of site adjustment coefficient for soft soil layer suggested by current Chinese codes and American and European codes

## 参 考 文 献

- 薄景山. 1998. 场地分类和设计反应谱调整方法研究(博士后研究报告)[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 55–58.
- Bo J S. 1998. *Site Classification and Design Response Spectrum Adjustment Method (Postdoctoral Research Report)*[R]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 55–58 (in Chinese).
- 崔昊, 丁海平. 2016. 基于 KiK-net 强震记录的场地调整系数估计[J]. *地震工程与工程振动*, 36(4): 147–152.
- Cui H, Ding H P. 2016. Estimation of site coefficient based on KiK-net strong-motion seismograph network[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 36(4): 147–152 (in Chinese).
- 丁海平, 王康. 2022. 基于反演基岩地震波的场地调整系数估计[J]. *地震工程与工程振动*, 42(1): 25–33.
- Ding H P, Wang K. 2022. Estimation of site coefficient based on inversion of bedrock input[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 42(1): 25–33 (in Chinese).
- 窦立军. 2001. 场地条件与设计地震动[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 20–21.
- Dou L J. 2001. *Site Conditions and Design Ground Motion*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 20–21 (in Chinese).
- 耿淑伟. 2005. 抗震设计规范中地震作用的规定[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 67–68.
- Geng S W. 2005. *Regulation of Seismic Action in Earthquake Resistant Design Code*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 67–68 (in Chinese).
- 郭锋, 吴东明, 许国富, 何雨林. 2011. 场地条件对抗震设计反应谱最大值的影响[J]. *土木工程与管理学报*, 28(1): 69–72.
- Guo F, Wu D M, Xu G F, Ji Y L. 2011. Effect of site condition on the maximum value of seismic design response spectrum[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(1): 69–72 (in Chinese).
- 郭晓云, 薄景山, 巴文辉. 2012. 汶川地震不同场地反应谱平台值统计分析[J]. *地震工程与工程振动*, 32(4): 54–62.
- Guo X Y, Bo J S, Ba W H. 2012. Statistical analysis of peak flat values of response spectra in different site conditions based on Wenchuan strong ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 32(4): 54–62 (in Chinese).
- 蒋通, 邢海灵. 2007. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J]. *岩土工程学报*, 29(2): 218–223.
- Jiang T, Xing H L. 2007. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(2): 218–223 (in Chinese).
- 李洪达. 2015. 基于 NGA-West2 数据的场地系数研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 59–60.
- Li H D. 2015. *Site Coefficients From NGA-West2 Data*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 59–60 (in Chinese).
- 李瑞山, 袁晓铭. 2019. 场地放大系数的理论解答[J]. *岩土工程学报*, 41(6): 1066–1073.
- Li R S, Yuan X M. 2019. Theoretical solution of site amplification coefficient[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(6): 1066–1073 (in Chinese).
- 李小军, 彭青. 2001. 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*, 21(1): 29–36.
- Li X J, Peng Q. 2001. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 21(1): 29–36 (in Chinese).
- 李小军. 2013. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. *岩土工程学报*, 35(增刊): 21–29.
- Li X J. 2013. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(S2): 21–29 (in Chinese).
- 卢滔. 2003. 响堂台阵场地特征及其反应的分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 75–77.
- Lu T. 2003. *Analysis of Site Characteristics and Reaction of the Boomed Array in Xiangtang*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 75–77 (in Chinese).
- 荣极. 2012. 设计反应谱场地放大系数和动力放大系数的研究[D]. 武汉: 华中科技大学: 30–31.
- Luan J. 2012. *Study on Site Amplification Coefficient and Dynamic Amplification Coefficient of Seismic Design Response Spectrum*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology: 30–31 (in Chinese).
- 吕红山, 赵凤新. 2007. 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*, 29(1): 67–76.
- Lü H S, Zhao F X. 2007. Site coefficients suitable to China site category[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(1): 67–76 (in Chinese).
- 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 孟小红. 2008. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. *震灾防御技术*, 3(2): 126–135.

- Lü Y J, Peng Y J, Lan J Y, Meng X H. 2008. Some key problems about site effects on seismic ground motion parameters[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 3(2): 126–135 (in Chinese).
- 齐鑫, 肖遥. 2012. 下辽河地区典型土层地震反应时域和频域方法对比[J]. *地震工程与工程振动*, 32(1): 23–29.
- Qi X, Xiao Y. 2012. Comparison of seismic responses of typical soil layers in Liaohe River plain by using time domain method and frequency domain method[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 32(1): 23–29 (in Chinese).
- 荣棉水, 李小军, 卢滔, 黄雅虹, 吕悦军. 2013. 对含厚软表层海域工程场地设计地震动参数确定的一点建议 [J]. *地震学报*, 35(2): 262–271.
- Rong M S, Li X J, Lu T, Huang Y H, Lü Y J. 2013. Suggestion on determination of design ground motion parameters for off-shore engineering sites with deep soft surface layers[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(2): 262–271 (in Chinese).
- 史大成. 2013. 区域性场地地震动放大研究及应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 86–87.
- Shi D C. 2013. *Study on Ground Motion Amplification of Regional Site and Application*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 86–87 (in Chinese).
- 王金元. 2013. 抗震设计规范中竖向地震作用规定的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 35–36.
- Wang J Y. 2013. *Study on Vertical Earthquake Action Stipulated in Seismic Design Specification*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 35–36 (in Chinese).
- 闫静茹, 张郁山, 郝明辉. 2020. 山东省不同场地 PGA 放大影响研究 [J]. *地震研究*, 43(3): 569–575.
- Yan J R, Zhang Y S, Hao M H. 2020. Study on amplification effect of peak ground acceleration based on different sites in Shandong Province[J]. *Journal of Seismological Research*, 43(3): 569–575 (in Chinese).
- 赵艳, 郭明珠, 李化明, 王文仲. 2009. 对比分析中国有关场地条件对设计反应谱最大值的影响 [J]. *地震地质*, 31(1): 186–196.
- Zhao Y, Guo M Z, Li H M, Wang W Z. 2009. Contrast analysis of effect of site condition on the maximum of design response spectra[J]. *Seismology and Geology*, 31(1): 186–196 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2016. GB18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社: 240.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. 2016. *Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China*[S]. Beijing: Standards Press of China: 240 (in Chinese).
- Aboyde S A, Andrus R D, Ravichandran N, Bhuiyan A H, Martin J R, Harman N E. 2014. A new seismic site coefficient model based on conditions in the South Carolina coastal plain[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 104(6): 2866–2883.
- Andreotti G, Lai C G, Francesca B, Scandella L. 2013. New soil factors for the Italian Building Code (NTC08) derived from 1D fully stochastic ground response analyses[C]//*Proceedings XV Symp*. Roma: Italian National Association of Earthquake Engineering: 1–12.
- Borcherdt R D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design: Methodology and justification[J]. *Earthq Spectra*, 10(4): 617–653.
- Borcherdt R D. 2002. Empirical evidence for site coefficients in building code provisions[J]. *Earthq Spectra*, 18(2): 189–217.
- Borcherdt R D, Glassmoyer G, Dietel C, Westerlund R E. 2005. Integrated surface and borehole strong-motion, soil-response arrays in San Francisco, California: Empirical measurements of low-strain site coefficients at site class E and D soil sites[G]// *Directions in Strong Motion Instrumentation*. Dordrecht: Springer: 55.
- Borcherdt R D. 2014. Implications of next generation attenuation ground motion prediction equations for site coefficients used in earthquake resistant design[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, 43(9): 1343–1360.
- Choi Y, Stewart J P. 2005. Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity[J]. *Earthq Spectra*, 21(1): 1–30.
- Crouse C B, McGuire J W. 1996. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions[J]. *Earthq Spectra*, 12(3): 407–439.
- Dobry R, Ramos R, Power M S. 1999. *Site Factors and Site Categories in Seismic Codes: Technical Report MCEER-99-0010*[R]. New York: Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute: 1–81.

- European Committee for Standardization. 2003. *CEN-EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*[S]. Brussels: European Committee for Standardization: 19–30.
- Hwang H M, Lin H J, Huo J R. 1997. Site coefficients for design of buildings in eastern United States[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **16**(1): 29–40.
- Idriss H M. 1990. Response of soft soil sites during earthquakes[C]//*Proceedings Memorial Symposium to Honor Professor H B Seed*. Berkeley: BiTech Publisher: 273–289.
- Idriss H M. 1991. Earthquake ground motions at soft sites[C]//*Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. St. Louis: University of Missouri-Rolla: 2265–2273.
- Joyner W B, Boore D M. 2000. Recent developments in earthquake ground-motion estimation[C]//*Proc. of Sixth International Conference on Seismic Zonation*. California: Earthquake Engineering Research Institute: 3–4.
- Moon S W, Hashash Y M A, Park D. 2017. USGS hazard map compatible depth-dependent seismic site coefficients for the Upper Mississippi Embayment[J]. *KSCE J Civil Eng*, **21**(1): 220–231.
- Paolucci R, Aimar M, Ciancimino A, Dotti M, Foti S, Lanzano G, Mattevi P, Pacor F, Vanini M. 2021. Checking the site categorization criteria and amplification factors of the 2021 draft of Eurocode 8 Part 1-1[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **19**(11): 4199–4234.
- Pitilakis K, Riga E, Anastasiadis A, Fotopoulou S, Karafagka S. 2019. Towards the revision of EC8: Proposal for an alternative site classification scheme and associated intensity dependent spectral amplification factors[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **126**: 105137.
- Régnier J, Bonilla L F, Bard P Y, Bertrand E, Hollender F, Kawase H, Sicilia D, Arduino P, Amorosi A, Asimaki D, Boldini D, Chen L, Chiaradonna A, Demartin F, Elgamal A, Falcone G, Foerster E, Foti S, Garini E, Gazetas G, Gélis C, Ghofrani A, Giannakou A, Gingery J, Glinsky N, Harmon J, Hashash Y, Iai S, Kramer S, Kontoe S, Kristek J, Lanzo G, Lernia A D, Lopez-caballero F, Marot M, McAllister G, Mercerat E D, Moczo P, Montoya-Noguera S, Musgrove M, Nieto-ferro A, Pagliaroli A, Passeri F, Richterova A, Sajana S, D'avila M P S, Shi J, Silvestri F, Taiebat M, Tropeano G, Vandepitte D, Verrucci L. 2018. PRENOLIN: International benchmark on 1D nonlinear site-response analysis: Validation phase exercise[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **108**(2): 876–900.
- Rodriguez-Marek A, Bray J D, Abrahamson N. 1999. *Characterization of Site Response General Categories, Pacific Earthquake Engineering Research Center Report*[R]. Berkeley: Pacific Gas and Electric Company: 75–84.
- Sandikkaya M A, Akkar S, Bard P Y. 2013. A nonlinear site-amplification model for the next Pan-European ground-motion prediction equations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(1): 19–32.
- Seyhan E, Stewart J P. 2014. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1241–1256.
- Silva W, Darragh R, Gregor N, Martin G, Abrahamson N, Kircher C. 2000. Reassessment of Site Coefficients and Near-fault Factors for Building Code Provisions[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey (USGS).
- Society of Civil Engineering. 2000. *Earthquake Resistance Design Codes in Japan*[S]. Tokyo: The Publication Committee of Earthquake Resistant Design Codes of Civil Engineering Structures in Japan: 57.
- Stewart J P, Liu A H, Choi Y. 2003. Amplification factors for spectral acceleration in tectonically active regions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(1): 332–352.
- Sun J, Idriss I M. 1992. *User's Manual for SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits*[M]. California: University of California: 1–2.
- Tropeano G, Soccodato F M, Silvestri F. 2018. Re-evaluation of code-specified stratigraphic amplification factors based on Italian experimental records and numerical seismic response analyses[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **110**: 262–275.