

DOI: 10.11779/CJGE20240557

基于计算地震动特征一致性的场地分类方法探讨

李 敏¹, 李小军^{*2}, 李东平¹, 石树中¹, 王玉石², 顾沛怡¹

(1. 浙江省地震局, 浙江 杭州 310013; 2. 北京工业大学, 北京 100124)

摘 要: 基于 1137 个钻孔资料的场地模型及相应的土层地震反应分析计算结果, 从场地地震动峰值加速度和特征周期两方面讨论分析了中国《建筑抗震设计规范: GB50011—2016》和美国规范 IBC (International Building Code) 中的场地分类方法。依据场地效应一致性分析得出: 在中硬土地地上, 美国的 C 类场地的离散性最小; 在中软土地地上, 中国的 III 类场地表现出一定的弱势性; 在软弱土地地上, 中国的 IV 类场地优势性明显。总体上中国的双指标分类方法体现了一定的优势性。因此, 提出了新的场地分类方法, 方法中按照覆盖层厚度和 30 m 两者较小值的土层计算等效剪切波速, 并将目前的 II 类场地划分为 II₁ 和 II₂, 将 III 类场地中覆盖层厚度大于 50 m 且等效剪切波速小于等于 170 m/s 的场地归类到 IV 类场地, 500 m/s 以下的等效剪切波速分界线提高 20 m/s。研究为建立更合理的场地分类方法提供新的解决方案。

关键词: 地震动; 场地分类方法; 场地效应; 覆盖层厚度; 等效剪切波速

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)09-1874-10

作者简介: 李 敏(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程地震、地震灾害风险等方面研究工作。E-mail: 1032576484@qq.com。

Discussion on site classification method based on consistency of characteristics of calculated seismic motion

LI Min¹, LI Xiaojun², LI Dongping¹, SHI Shuzhong¹, WANG Yushi², GU Luoyi¹

(1. Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310013, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on site models derived from 1137 drilling data and corresponding computing results of seismic response analysis of soil layers, this paper analyzes and discusses site classification methods in the Chinese Code for Seismic Design of Buildings (GB50011-2016) and the American Code IBC (International Building Code) from the perspectives of peak acceleration and characteristic period of the site ground motions. According to the consistency analysis of site seismic effects, it can be concluded that: in medium-to-hard soil sites, the dispersion of Class C sites in the United States is the smallest; in soft-to-medium soil sites, Class III sites in China exhibit certain weaknesses; in soft soil sites, China's Class IV sites have more obvious advantages. Overall, China's double index classification method demonstrates certain advantages. Therefore, a new site classification method is proposed, in which equivalent shear wave velocity is calculated based on the soil layers in the depth range of smaller values between the covering layer thickness and 30 m. In current Class II sites are divided into class II₁ and II₂ sites, and Class III sites with a soil layer thickness greater than 50m and equivalent shear wave velocity less than or equal to 170 m/s are classified as Class IV sites, the boundary limits of equivalent shear wave velocity below 500m/s are increased by 20 m/s. The study provides a new solution to establish a more reasonable site classification method.

Key words: ground motion; site classification method; site effect; thickness; equivalent shear wave velocity

0 引 言

工程场地的特征及其影响可采用场地分类的方法

来表征, 场地分类方法和指标的合理性不仅会影响对工程场地特征的表征, 更会影响场地上工程结构抗震设防地震动参数的确定^[1-3]。大量的学者对场地分类方

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003503); 浙江省地震局科技项目 (2023zjj04); 浙江省应急管理研发攻关科技项目 (2024YJ020) This work was supported by National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFC3003503), Science and Technology Project of Zhejiang Earthquake Administration (Grant No.2023zjj04), and Science and Technology Research Project for Emergency Management of Zhejiang Province (Grant No.2024YJ020).

收稿日期(Received): 2024-06-05 **修回日期(Revised):** 2024-12-09 **接受日期(Accepted):** 2025-01-08 **网络出版日期(Online):** 2025-01-09

***通信作者 (E-mail: beerli@vip.sina.com)**

法进行了探讨研究, 比如考虑地形地貌条件的场地分类方法^[4-7]; 综合考虑地质条件、剪切波速、地形地貌、沉积年代等条件的场地分类方法^[8-10]; 考虑场地地震动谱的场地分类方法^[1, 11-14]; 考虑场地周期的场地分类方法^[15-17]。这些分类方法中, 国内应用最广的还是以《建筑抗震设计规范: GB50011—2010》^[18]的双指标分类方法为主, 双指标分类方法主要是采用覆盖层厚度和等效剪切波速 V_{se} 作为判别的依据, V_{se} 的计算深度取覆盖层厚度和 20 m 的较小值, 将场地分为 I_0 、 I_1 、II、III 和 IV 共 5 类, 见表 1。在国外, 比如美国、日本、欧洲等一般采用 V_{S30} 作为场地分类的主要判别依据, V_{S30} 的计算深度采用地表下 30 m, 其中特别以美国规范 IBC^[19]为代表, 将场地分成 A、B、C、D、E 和 F 共 5 类, 详见表 2。

表 1 GB50011—2010 (2016) 场地分类标准

Table 1 Classification of sites in GB 50011—2010 (2016 section)

岩石的等效剪切 波速或土的等效 剪切波速/(m·s ⁻¹)	覆盖层厚度/m				
	I_0	I_1	II	III	IV
$V_s>800$	0				
$800\geq V_s>500$		0			
$500\geq V_{se}>250$		<5	≥ 5		
$250\geq V_{se}>150$		<3	3~50	>50	
$V_{se}\leq 150$		<3	3~15	15~80	>80

很多学者提出采用 V_{S30} 表达的土层信息更加丰富^[17, 20], 但同时又认知到对浅层地区特别是坚硬场地的适用性不强^[21]。而考虑覆盖层厚度的分类方法仍然具有一定的优势。那么, 是直接采用将计算深度延长至 30 m, 还是结合双方的优势, 给出新的解决途径, 成为值得研究的课题。本文基于 1137 个场地钻孔数据, 利用中国《建筑抗震设计规范: GB50011—2010》(简称中国场地分类标准)与美国规范 IBC (International Building Code) (简称美国场地分类标准)进行了场地分类方法对比分析, 同时也建立一维土层地震反应模

型, 采用两种类型地震动输入 (人工基岩加速度时程和强震动加速度时程), 从场地地表地震动的峰值加速度放大系数和特征周期两方面对比分析了中美场地分类标准的优劣。最后进一步对中国场地分类标准的 II、III 类场地进行细化研究, 拓展了 IV 类场地, 提出了按照覆盖层厚度和 30 m 两者较小值计算等效剪切波速的场地分类方法。

1 中美场地分类空间特征

本文收集了北京、山东、河南、湖北、浙江、天津等地共 1137 个钻孔场地资料, 资料主要来源于已通过评审的地震安全性评价报告, 收集了主要包括岩性、分层厚度、密度、剪切波速、动剪切模量和阻尼比等实测参数。按表 1 进行场地类别分类, 可分为 I_1 、II、III、IV 类场地, 数量分别为 7, 501, 580, 49 个。其中 501 个 II 类场地中有 140 个场地的钻孔深度均小于 30 m, 即波速钻孔勘测深度满足建筑场地覆盖层厚度的要求但未达到 30 m, 针对这类钻孔一般采用经验公式或外推公式来求取 V_{S30} 。通过比对分析, 本文选取 Markov1^[22]外推模型, 该模型通过条件独立性研究发现, 深度 z 处的瞬时速度与 $z\sim 30$ m 的有效速度相关性远大于 $0\sim z$ m 处等效速度, 见式 (1), (2)。最终按照表 2 进行场地分类, 得到 B 类场地 7 个, C 类场地 60 个, D 类场地 947 个, E 类场地 123 个。因 I_1 类场地在工程中可视为基岩场地, 因此在本文中不再对其进行后续讨论。

$$\lg V_{[z,30]} = b_0 + b_1 \lg V_s(z) \quad , \quad (1)$$

$$V_{S30} = \frac{30}{tt(0,z) + \frac{30-z}{V_{[z,30]}}} \quad . \quad (2)$$

式中: $V_{[z,30]}$ 为钻孔剖面中深度 z 到 30 m 的估计有效速度; $tt(0,z)$ 为钻孔剖面中表层深度处的等效时间。

对 II、III、IV 类场地钻孔资料整理, 绘制了覆盖层厚度 H 、等效剪切波速 V_{se} 和等效剪切波速 V_{S30} 的

表 2 美国规范 IBC 场地分类标准

Table 2 Classification of sites in IBC

场地类别	土的类型	$\overline{v_s}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	\overline{N} 或 $\overline{N_{ch}}$ (次/英尺)	$\overline{S_u}/\text{kPa}$
A	坚硬岩石	>1500	—	—
B	岩石	$>760\sim 1500$	—	—
C	坚硬土或软基岩	$>360\sim 760$	>50	≥ 100
D	中硬土	$\geq 180\sim 360$	15~50	50~100
		<180	<15	<50
E	软黏土	土壤覆盖层中含有超过 3.048 m (10 英尺) 的具有以下特点的软黏土: 塑性指数 $PI>20$, 含水率 $w\geq 40\%$, 不排水剪切强度 $\overline{s_u}<25$ kPa		
F	需场地反应具体分析	覆盖层中含有以下特征之一的或更多的土层: 在地震下有潜在塌陷和破坏可能的敏感性土, 例如: 液化性土、高敏感性土和弱黏结黏土; 泥质土或高有机黏土 (厚度大于 10 英尺); 高塑性黏土 ($PI>75$ 且厚度大于 25 英尺); 很厚的软/中硬度黏土 (厚度大于 120 英尺)		

直方图, 见图 1。场地钻孔中覆盖层厚度最小为 5 m, 最大为 160 m, 35~95 m 的钻孔数最多, 占比达 70%; 等效剪切波速 V_{se} 最小为 97 m/s, 最大为 471.5 m/s, 大部分分布于 180~290 m/s, 占比约为 71%; 等效剪切波速 V_{S30} 最小为 109 m/s, 最大为 519 m/s, 大部分分布于 190~310 m/s, 占比约为 73%。

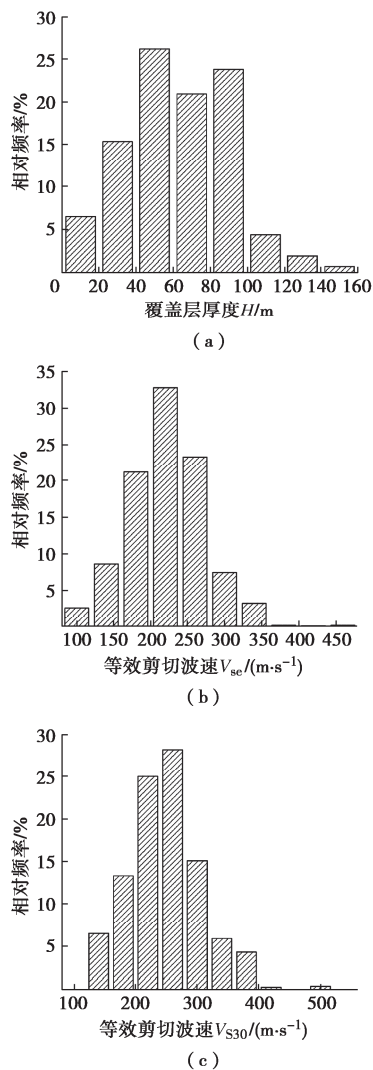


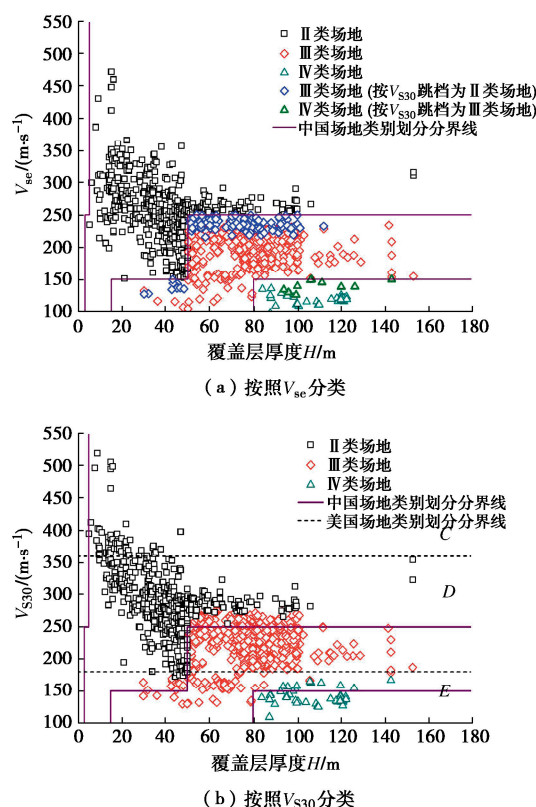
图 1 场地覆盖层厚度 H 、等效剪切波速 V_{se} 、等效剪切波速 V_{S30} 的直方图

Fig. 1 Histograms of site coverage H , equivalent shear wave velocity V_{se} , and equivalent shear wave velocity V_{S30}

中美场地分类结果见图 2 (除去属于 I_1 的场地)。图 2 (a) 展示了按照中国场地分类标准进行的场地分类结果, 其中特别的划出保持分界线不变的情况下, 按照 V_{S30} 进行场地判别, II、III、IV 中的跳档场地, 即约 20% 的 III 类场地会跳档 II 类场地, 跳档的多为中国场地分类标准中等效剪切波速 V_{se} 处于 225~250 m/s 且覆盖层厚度大于 50 m 的或者等效剪切波速 V_{se} 处于 125~150 m/s 且覆盖层厚度为 15~50 m 的 III 类场地; 约 20% 的 IV 类场地会跳档 III 类场地, 跳档的多为原先等效剪切波速 V_{se} 处于 125~150 m/s 的 IV 类场

地; 当等效剪切波速 V_{se} 处于 250~500 m/s, 不论计算深度取值 20 m 和 30 m, 场地类别保持不变。综合可发现, 跳档现象一般发生在中国场地分类标准的分界线附近。由图 2 (b) 可知, 按照美国场地分类标准的分界线, 中国场地分类标准中 12.0% 的 II 类场地构成了 C 类场地; 86.6% 的 II 类场地和 88.4% 的 III 类场地构成了 D 类场地, 1.4% 的 II 类场地的、11.6% 的 III 类场和 100% 的 IV 类场地构成了 E 类场地。

对比分析 V_{S30} 与 V_{se} 的差异性, 作 V_{S30} 与 V_{se} 的差值图, 如图 2 (c) 所示。可明显发现, II 类场地剪切波速差值大部分位于 120 m/s 以下, 0 m/s 以上; 但最大的达 160.9 m/s, 这是由覆盖层较薄的 II 类场地其随深度增加较多导致 V_{S30} 增大剧烈造成的, 最小值为 -11.6 m/s, 主要是 30 m 深度范围内出现软夹层, 导致波速下降造成的影响; III 类场地和 IV 类场地的波速差值离散性远小于 II 类场地的, III 类场地的波速差值范围为 -1.0~47.9 m/s, IV 类场地的波速差值范围为 4.9~27.9 m/s。考虑到这种离散性大部分还是由于外推对波速界限的影响, 因此基于实际钻孔资料统计 V_{S30} 更具有说服力, 特别是统计覆盖层厚度大于 30 m 的差值, 见表 3。进一步发现当等效剪切波速计算深度由 20 m 增加到 30 m 时, II 类场地的等效剪切波速计算均值增加约 27.28 ± 8.99 m/s, III 类场地的约 20.54 ± 7.12 m/s, IV 类场地的约 17.46 ± 4.72 m/s, 如图 2 (d)。综合可知, 计算深度增厚 10 m, 等效剪切波速增大约 20 m/s 左右。



(b) 按照 V_{S30} 分类

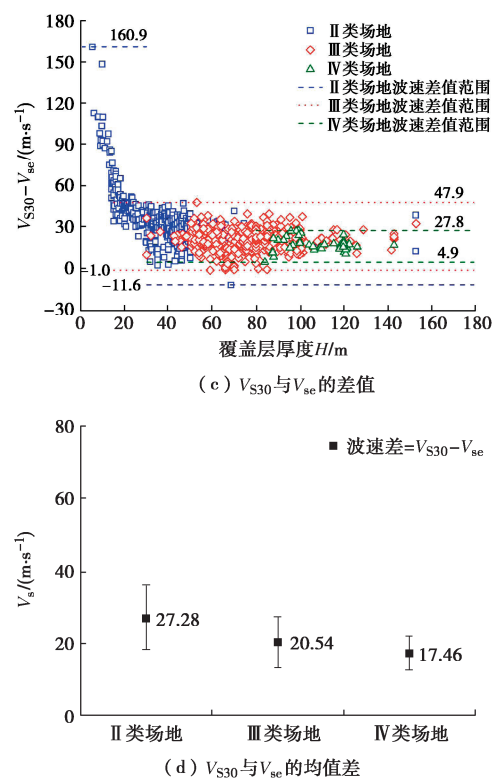


图 2 场地分类

Fig. 2 Site classifications

表 3 场地等效剪切波速差值 (覆盖层厚度 $H \geq 30$ m)

Table 3 Difference in equivalent shear wave velocity of the site (covering layer thickness $H \geq 30$ m)

等效剪切波/(m·s ⁻¹)	场地类别		
	II	III	IV
$V_s>800$			
$750\geq V_s>500$			
$500\geq V_{se}>250$	26.74±9.06		
$250\geq V_{se}>150$	27.86±8.79	20.63±7.13	
$V_{se}\leq 150$		18.79±6.79	17.46±4.72

2 中美场地分类下的场地效应分析

以《建筑抗震设计规范: GB50011—2010》(2016 版)地震影响系数曲线为反应谱曲线, 见式 (3), 其中, 阻尼比取为 0.05, α_{\max} 为 2.5 倍地震动峰值加速度, 地震动加速度峰值 A_{\max} 分别为 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600 gal, 第二特征周期 T_g 分别取 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.55, 0.65 s, 构建目标加速度反应谱, 人工合成 49 条加速度时程。同时以控制反应谱特征周期 T_g 的方式选取基岩强震动加速度记录, 每一特征周期下选取 3 条不同的强震动记录, 以便增加幅频特性的考虑, 最终采用缩放的方式对标人工基岩 A_{\max} , 选取了 49 条强震动记录加速度时程, 选取的强震动记录主要来自 2008 年汶川 8.0 级地震、2013 年芦山 7.0 级地震、1989 年洛马·普雷塔 Loma Prieta 地震、1994

年北岭 Northridge 地震, 1995 年 Kozani Greece 地震和 1999 年集集地震。

$S_a(T) =$

$$\begin{cases} A_{\max} & (T \leq 0.04 \text{ s}) \\ A_{\max} [1.0 + \frac{\alpha_{\max} / A_{\max} - 1.0}{0.1 - 0.04} (T - 0.04)] & (0.04 \text{ s} < T \leq 0.1 \text{ s}) \\ \alpha_{\max} & (0.1 \text{ s} < T \leq T_g) \\ \alpha_{\max} (T_g / T)^\gamma & (T_g < T \leq 5T_g) \\ \alpha_{\max} [0.2^\gamma - 0.02(T - 5T_g)] & (5T_g < T \leq 6.0 \text{ s}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_a(T)$ 为标准谱; A_{\max} 为地震动加速度峰值; α_{\max} 为地震影响系数最大值; T 为结构自振周期; T_g 为特征周期; γ 为衰减指数; γ 取 0.9。

对 1130 个场地钻孔资料建立土层地震反应分析模型, 模型参数均来自收集的实测数据, 包括不同土类的非线性特性参数。计算基岩半空间的剪切波速取为 500 m/s, 分别输入人工基岩时程和强震动加速度记录, 利用等效线性化一维土层地震反应分析方法进行计算, 该方法为我国重大工程场地地震安全性评价工作中场地设计地震动确定所采用的方法, 采用该方法相应的计算软件 ESE 计算得到各场地模型的地表地震动峰值加速度放大系数 (地表与基岩峰值加速度比值, 简称 K_a), 反应谱特征周期 (按标准形式归准反应谱曲线的第二拐点周期, 简称 T_g), T_g 的标定方法选取的最小二乘法^[23], 并对结果进行了复核。考虑样本的差异性, 采用变异系数 α (标准差与均值的比值) 进行中美场地分类下 K_a 和 T_g 的差异性比较, 分别如图 3 和图 4 所示。图中横坐标表示输入的基岩地震动强度, 每一组下的 7 个均值点分别代表输入同一峰值强度下不同控制特征周期下所有该类别场地地震动参数的均值或变异性, 比如 II 类场地下, 输入基岩峰值加速度为 50 gal, 其组下的 7 个点即代表该输入的基岩时程控制特征周期分别为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.55, 0.65 s, 共 7 条基岩加速时程, 同时每个点又代表, 该组合下 II 类场地所有钻孔的 K_a 或 T_g 的地震动参数均值或变异性。

(1) 由图 3 (a), (b), 从场地放大系数 K_a 变异性可知, 不论人工地震动或强震动记录加速度时程输入, 地震动参数的变异性均随输入 PGA 的增大而变大, 这与随地震动强度增加, 土体非线性增强的认知相符。但两者的规律性很明显表现出: 中国 IV 类场地的 K_a 离散性小于美国的 E 类场地; 中国的 II、III 类场地的 K_a 离散性小于美国的 D 类场地, 但不是特别明显; 美国的 C 类场地的 K_a 变异性最小。这说明: 从 K_a 看, 美国 C 类场地的离散性最小, 在软弱场地上, 中国的 IV 类场地分类更具优势性。

(2) 由图 4(a), 从场地放大系数 T_g 变异性可知, 在输入人工地震动加速度时程时, 总体上中国 III 类场地的变异性最大, 美国 C 类的最小, 中国 IV 类场地的离散性小于美国的 E 类场地; 由图 4(b), 虽然输入强震动记录下的 T_g 变异性表现规律不如人工地震动的明显, 但总体上仍呈现出跟前者相同的规律性。这说明从 T_g 看, 中国的 III 类场地分类不具势性。

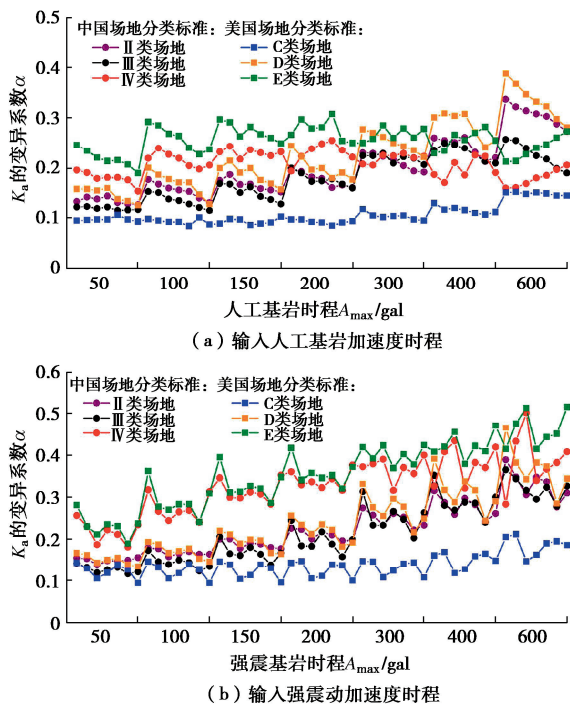


图 3 K_a 的变异性系数 α

Fig. 3 Coefficient of variation α of K_a

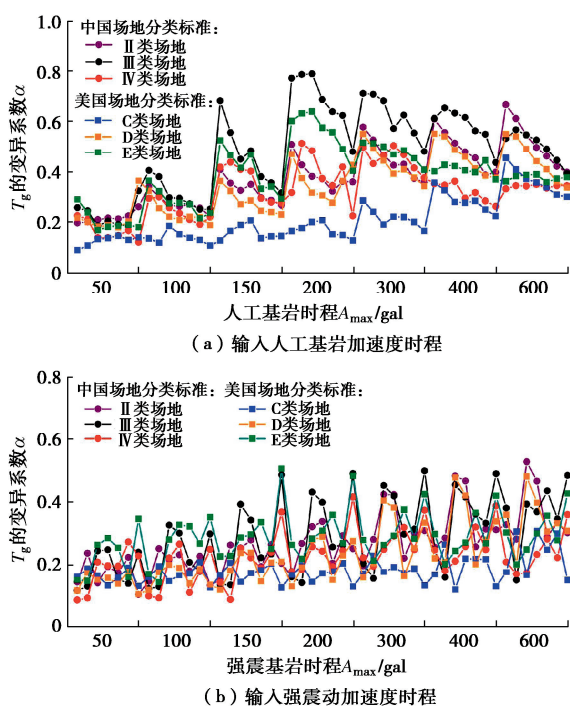


图 4 T_g 的变异性系数 α

Fig. 4 Coefficient of variation α of T_g

通过 (1), (2) 可发现, 在场地效应一致性上得出: 对于中硬土地, 美国的 C 类场地的离散性最小; 对于中软土地, 中国的 III 类场地表现出较差; 对于软弱场地, 中国的 IV 类场地优势性更明显。这与中美场地分类空间特征中将计算深度提高至 30 m 时, 中国场地分类标准中分界线附近跳档明显相对应。

3 新的场地分类方法

通过场地效应一致性比较发现, 美国场地分类标准下的 C 类场地优势较明显, 中国场地分类标准下的 II 类、III 类场地在地震动效应表现上具有较大的离散性, 而 IV 类场地的优势性更好, 同时考虑到 V_{S30} 包含更丰富的场地信息, 且与国际规范接轨, 笔者对中国场地分类标准下的 II 类、III 类场地进行了细化讨论。为更方便规律的发掘, 以人工地震动基岩输入下的计算场地地震动参数作为归纳分析的依据。

(1) 中国场地分类标准下 II 类场地覆盖层厚度分界线的确定

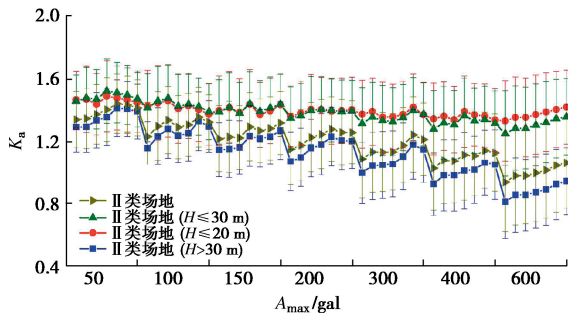
对中美场地分类地震动参数特征研究发现, 美国 C 类场地的表现优势性较好, 且部分计算深度增至 30 m 时, 中国场地分类的部分 II 类场地落入 C 类场地, 因此将 501 个 II 类场地按照覆盖层厚度分别为 20 m 和 30 m 重新进行归类, 分别讨论覆盖层厚度 $H \leq 20$ m、 $H \leq 30$ m、 $H > 30$ m 和原场地类别下的 K_a 和 T_g 的均值和变异性 α 。

如图 5(a) 所示, 从各组场地放大系数 K_a 均值来看, II 类场地总体的 K_a 与 II 类场地中覆盖层厚度 $H > 30$ m 的 K_a 统计值更接近, 且明显高于覆盖层厚度 $H \leq 20$ m 和 $H \leq 30$ m 的 K_a ; 覆盖层厚度 $H \leq 20$ m 与 $H \leq 30$ m 两者的 K_a 差距不是很明显, 总体 $H \leq 30$ m 的 K_a 略小于 $H \leq 20$ m 的。这与一般认为的场地土越硬对高频成分放大越强的规律符合。如图 5(b) 所示, 从特征周期 T_g 均值来看, 其规律性与 K_a 均值的相似, 即 II 类场地总体的 T_g 与 II 类场地中覆盖层厚度 $H > 30$ m 的 T_g 统计值更接近, 明显高于覆盖层厚度 $H \leq 20$ m 和 $H \leq 30$ m 的 T_g ; 覆盖层厚度 $H \leq 20$ m 与 $H \leq 30$ m 两者的 T_g 差距不是很明显。综合 K_a 和 T_g 的变化规律可知, 覆盖层厚度 20 m 或 30 m 是 II 类场地的场地效应表达分水岭。

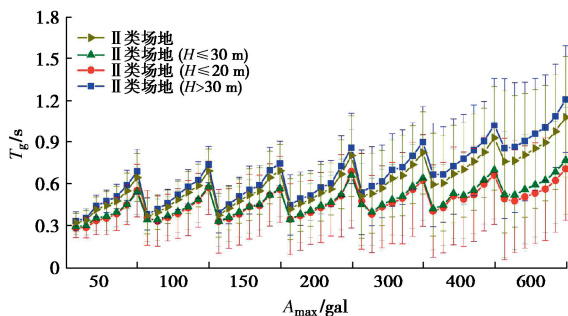
同时考虑样本数量的差异性, 做 K_a 和 T_g 的变异性, 通过图 5(c), (d) 可知, 不论是 K_a 还是 T_g , 细化分类的变异性均小于未细分类的, 且覆盖层厚度小于等于 20 m 与小于等于 30 m 的变异性差异不大, 但与大于 30 m 的差异性明显。

因此, 结合 V_{S30} 的计算深度取舍, 建议选取覆盖

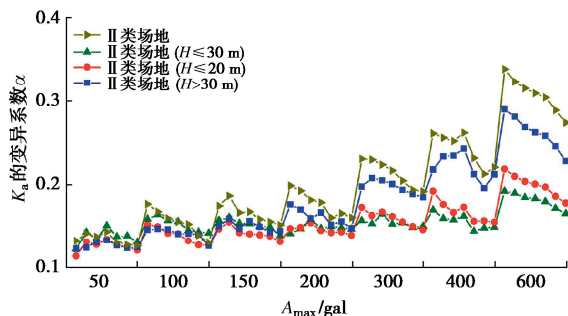
层厚度 30 m 作为 II 类场地的细化分界线。即可将原中国场地分类标准中的 II 类场地细化为 II₁ 和 II₂ 两类场地, 以更好地增强场地分类对场地效应的反映, 降低离散性。



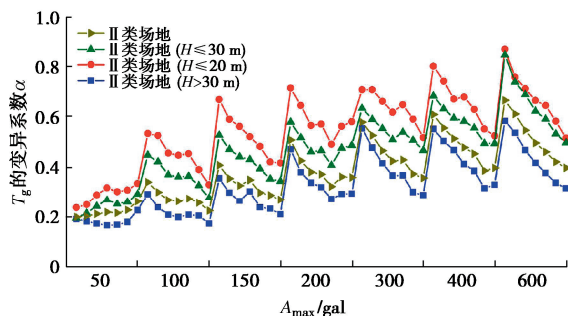
(a) 场地放大系数 K_a



(b) 场地特征周期 T_g



(c) K_a 的变异系数 α



(d) T_g 的变异系数 α

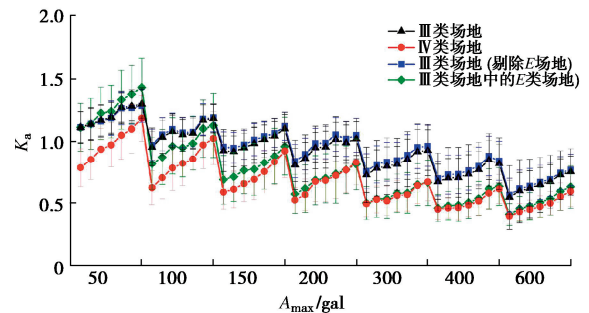
图 5 中国场地分类标准下 II 类场地的分类研究

Fig. 5 Classification study of class II sites under Chinese site classification standards

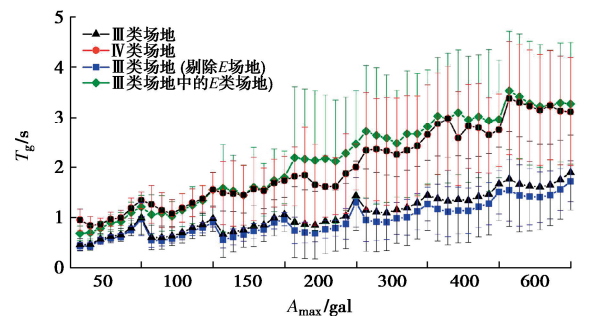
(2) 中国场地分类标准下 III 类场的细化分析

由中美场地分类空间特征可知, 当计算深度增加至 30 m 时, 部分 III 类场地会落入美国场地分类标准中的 E 类场地。这些场地多为原先 V_{sc} 小于 150 m/s,

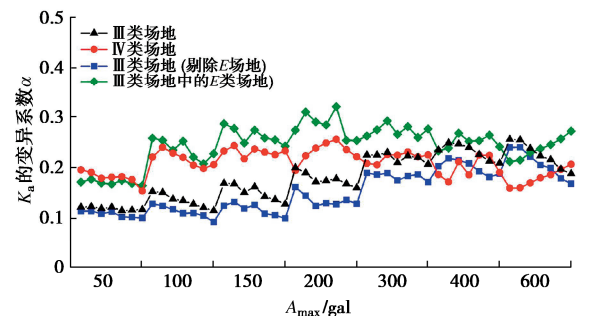
覆盖层厚度为 15~80 m 的 III 类场地。因此, 将本文中 580 个 III 类场地中的 67 个 E 类场地全部挑选出来与剩余的 513 个 III 类场地及 IV 类场地进行场地地震动参数的比较, 其均值和变异系数变化见图 6。



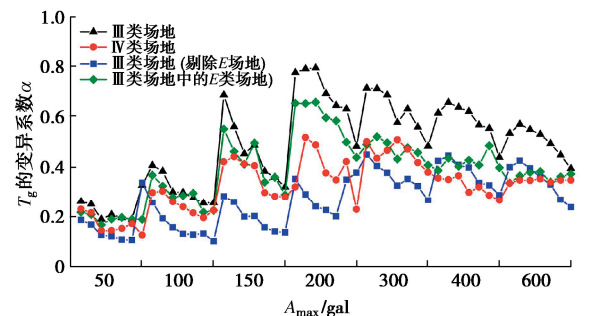
(a) 场地放大系数 K_a



(b) 场地特征周期 T_g



(c) K_a 的变异系数 α



(d) T_g 的变异系数 α

图 6 中国场地分类标准下 III 类场地的分类研究

Fig. 6 Classification study of class III sites under Chinese site classification standards

由图 6 (a), (b) 可知, 不论场地放大系数 K_a 还是场地特征周期 T_g , 剔除 E 类的 III 类场地的均值与原先 III 类场地的相差不是很明显, 虽然个别控制周期下的大小有所回荡, 但总体上呈现 K_a 略有增大, T_g 略有

降低的规律,同时可明显看出Ⅲ类场地中的 E 类场地的 K_a 和 T_g 均值更接近于Ⅳ类场地的,而从图 6 (c), (d) 也可明显发现,整体上,剔除 E 类场地的Ⅲ类场地不论 K_a 还是 T_g , 其变异性都显著变小,而Ⅲ类场地中的 E 类场地的变异性与Ⅳ类场地的相差不大。这说明,Ⅲ类场地中的 E 类场地导致Ⅲ类场地的场地震动参数离散性过大,而这些过大的参数却与Ⅳ类场地的一致性较好。因此建议可将Ⅲ类场地的 E 类场地划分给Ⅳ类场地,但划分的分界线还得结合覆盖层厚度。

(3) 新的场地分类方法

综合中美场地分类标准的各自优势,建议将新的场地分类方法计算深度增加至 30 m,同时又考虑覆盖层厚度较薄的场地,钻探深度继续加深势必增加经济成本,因此提出按照覆盖层厚度和 30 m 两者较小值计算等效剪切波速的场地分类方法,同时由中美场地分类空间特征可知,计算深度增至 30 m 时,剪切波速增大约 20 m/s,所以新的场地分类方法剪切波速分界线建议增加 20 m/s。并基于(1)中的分析,将中国场地分类标准中的Ⅱ类场地以覆盖层厚度 30 m 为界,分为Ⅱ₁ 和Ⅱ₂ 两类场地;基于(2)中的分析,将覆盖层厚度大于 50 m,等效剪切波速小于等于 170 m/s 的场地划分到Ⅳ类场地。最后提出新的场地分类标准如表 4,其中土层等效剪切波速计算公式如下:

$$v_{sq} = h_0 / t \quad , \quad (4)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (h_i / v_{si}) \quad . \quad (5)$$

式中: v_{sq} 为土层等效剪切波速 (m/s); h_0 为计算深度 (m),取覆盖层厚度和 30 m 两者的较小值; t 为剪切波在地面至计算深度之间的传播时间; h_i 为计算深度范围内第 i 土层的厚度 (m); v_{si} 为计算深度范围内第 i 土层的剪切波速 (m/s); n 为计算深度范围内土层的分层数。

4 讨论分析

按照新的场地分类方法,1130 个钻孔场地,新的分类结果如表 5。可以发现,原先在Ⅲ类场地附近的Ⅱ类场地直接被划为了Ⅲ类场地,Ⅲ类场地中有 13 个场地落入了Ⅱ₂类场地,522 个落入了Ⅲ类场地,45 个落入了Ⅳ类场地,而原先的Ⅳ类场地保持不变。具体的细分结果见图 7。

新场地分类标准下的Ⅱ₁与Ⅱ₂类场地约占原先Ⅱ类场地的 28.7%, 73.1%,Ⅲ类场地约为原先的 90.7%,Ⅳ类场地约为原先的 191.8%。对比新场地分类方法和

表 4 各类建筑场地的覆盖层厚度

Table 4 Thickness of covering layer for various construction sites
单位: m

等效剪切波速/(m·s ⁻¹)	场地类别					
	I ₀	I ₁	Ⅱ ₁	Ⅱ ₂	Ⅲ	Ⅳ
$V_s > 800$	0					
$800 \geq V_s > 500$		0				
$500 \geq V_{sq} > 270$		<5	5~30	>30		
$270 \geq V_{sq} > 170$		<3	3~30	30~50	>50	
$V_{sq} \leq 170$		<3	3~15		15~50	>50

表 5 场地类别划分结果表

Table 5 Results of site classification

中国场地分类标准	个数	新场地分类标准	个数
Ⅱ	501	Ⅱ ₁	144
		Ⅱ ₂	353
		Ⅲ	4
Ⅲ	580	Ⅱ ₂	13
		Ⅲ	522
		Ⅳ	45
Ⅳ	49	Ⅳ	49

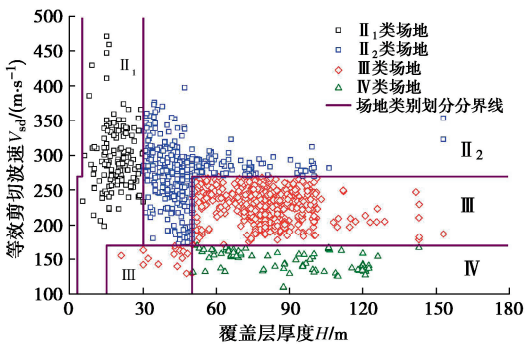


图 7 场地分类结果 (覆盖层厚度或 30 m 较小值)

Fig. 7 Site classification results (smaller value between the covering layer thickness and 30 m)

中国场地分类标准,如图 8 (a),场地放大系数 K_a 均值总体上呈现出新场地分类方法Ⅱ₁类场地的大于中国场地分类标准Ⅱ类场地的大于新场地分类方法Ⅱ₂类场地的;如图 9 (a),场地放大系数 K_a 的变异性随基岩地震动峰值加速度的增大呈递增趋势,但明显呈现出Ⅱ₁类场地的变异性小于Ⅱ₂的,均远小于中国场地分类标准Ⅱ类场地的。如图 8 (b),从场地特征周期 T_g 均值看,Ⅱ₂类场地的大于中国场地分类标准Ⅱ类场地的大于Ⅱ₁类场地的;如图 9 (b),场地特征周期 T_g 的变异性总体上,Ⅱ₂类场地的大于中国场地分类标准下Ⅱ类场地的大于Ⅱ₁类场地的。综合场地放大系数 K_a 和场地特征周期 T_g 规律可得:新的Ⅱ类场地的划分方法降低了中国场地分类标准下Ⅱ场地划分对地震动参数造成的较大离散性。

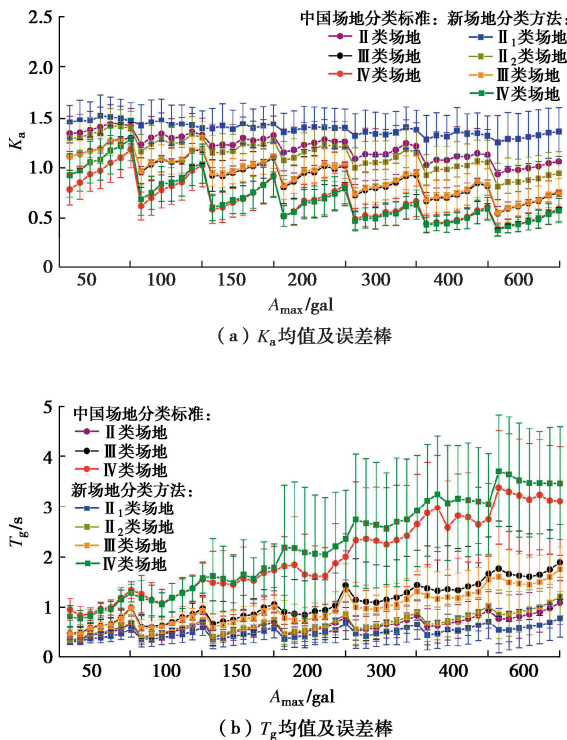


图8 中国场地分类标准和新场地分类方法下地震动参数的均值变化

Fig. 8 Mean variation of seismic motion parameters under Chinese site classification standards and new site classification methods

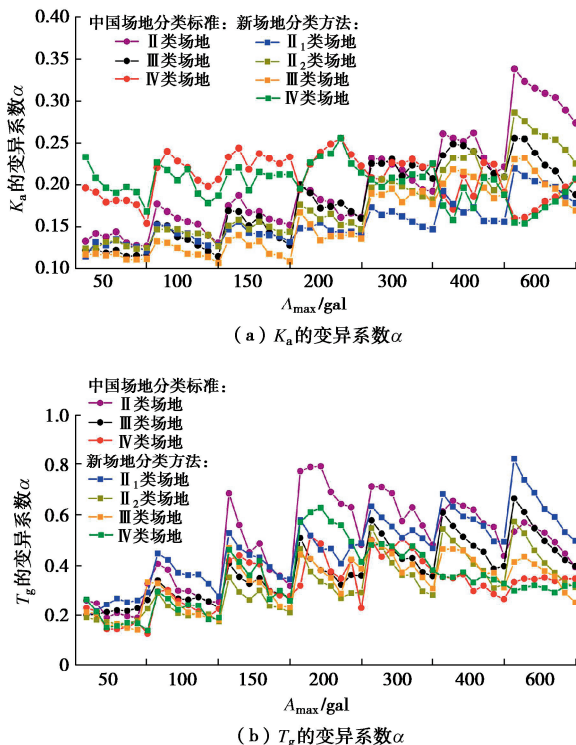


图9 中国场地分类标准和新场地分类方法下地震动参数的变异性

Fig. 9 Variability of seismic motion parameters under Chinese site classification standards and new site classification methods

III类场地划分上,从场地放大系数 K_a 均值看,新

场地分类下的略大于中国场地分类标准的,场地特征周期 T_g 均值则相反,如图8(a), (b); 而 K_a 变异性上,新场地分类下的明显小于中国场地分类标准的, T_g 变异性亦如此,如图9(a), (b); 即新的III类场地的划分方法降低了中国场地分类标准下III类场地划分对地震动参数造成的较大离散性。

IV类场地划分上,从场地放大系数 K_a 均值看,基岩地震动峰值加速度小于150 gal时,新场地分类下的略大于中国场地分类标准的,150 gal以后两者相差不大,场地特征周期 T_g 均值则是基岩地震动峰值加速度小于150 gal时,两者相差不大,而当基岩地震动峰值加速度大于150 gal时则表现出新场地分类下的大于中国场地分类标准的,如图8(a), (b); 而 K_a 变异性上,整体上新场地分类下的明显小于中国场地分类标准的,如图9(a); T_g 变异性出现了激荡情况,在输入地震动峰值加速度为200~400 gal时,新场地分类下的略大于中国场地分类标准的,其他均呈现出变异性变小的规律,如图9(b)。综合场地放大系数 K_a 和场地特征周期 T_g 的规律可知,新的IV类场地的划分方法与中国场地分类标准IV类场地划分整体上的离散性表现上略好,但基本上还是同频。

综合可知,新场地分类方法明显降低了中国场地分类标准下II、III类场地的离散性,保持了IV类场地的离散性,体现了更好的合理性。

5 结 论

本文通过大量的实际工程场地勘测资料,开展一维土层地震反应分析,并基于地震动的两个特征参数即峰值加速度放大系数 K_a 和特征周期 T_g ,从场地对地震动影响的一致性上讨论分析了中国场地分类标准中的II、III、IV类和对应美国分类标准下的C、D、E类的优劣,并通过细化研究提出新的场地分类方法。主要得到以下6点结论。

(1) 通过中美场地分类空间特征分析发现,当场分类等效剪切波速值分界线不变时,计算土层厚度增加导致部分场地发生跳档,跳档一般发生在中国场地分类标准的分界线附近,当计算土层厚度由20 m增加到30 m,即增厚10 m时,等效剪切波速增大20 m/s左右。并由此定义新场地分类方法的等效剪切波速值分界线提高为20 m/s。

(2) 从场地效应一致性上看:对于中硬土地,美国的C类场地的离散性最小;对于中软土地,中国的III类场地表现出一定的弱势;对于软弱场地,中国的IV类场地具有明显优势性。

(3) 基于场地地表地震动参数变化对比分析,对

中国场地分类标准下的Ⅱ类场地进行了细化研究,研究发现按照覆盖层厚度 30 m 再对Ⅱ类场地进行细分,可以降低同一类场地地震动参数的离散性。提出新场地分类中以 30 m 为界,将Ⅱ类场地划分为Ⅱ₁和Ⅱ₂两亚类。

(4) 基于场地地表地震动参数变化对比分析,对中国场地分类标准下的Ⅲ类场地进行了细化研究,发现跳档到 E 类场地的地震动参数与Ⅳ类场地具有较好的一致性,且划分为 E 类场地的大部分为覆盖层厚度大于 50 m 的。因此,建议将覆盖层厚度大于 50 m 且等效剪切波速小于等于 170 m/s 的场地划分到Ⅳ类场地。

(5) 考虑中美场地分类标准的优劣和经济性,提出了一种新场地分类方法,即按照覆盖层厚度和 30 m 两者较小值计算等效剪切波速,且将场地分为Ⅰ₀,Ⅰ₁,Ⅱ₁,Ⅱ₂,Ⅲ和Ⅳ的 4 类 6 亚类场地类型。

(6) 从场地地表地震动的峰值加速度放大系数 K_a 和特征周期 T_g 变化的分析发现:新场地分类方法下的场地地表地震动变化的离散性小于中国场地分类标准下的,体现了分类上的优势性。

新场地分类方法仅从覆盖层厚度和等效剪切波速方面进行了相应的归纳总结,对场地地震动影响效应在新场地分类上的研究尚待需要大量实际强震记录进行验证和归纳总结。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 李小军和李敏设计研究内容,李东平和石树中提供研究指导,李敏完成计算分析,李小军、李敏、王玉石和顾添怡参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by LI Xiaojun and LI Min and supervised by LI Dongping and SHI Shuzhong. The numerical analyses were conducted by LI Min. The manuscript was drafted and revised by LI Xiaojun, LI Min, WANG Yushi and GU Luoyi. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] LEE C T, CHENG C T, LIAO C W, et al. Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, **91**(5): 1283-1297.
- [2] 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 Xiaojun, PENG Qing, LIU Wenzhong. 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))
- [3] 陈国兴, 刘薛宁, 朱姣, 等. 深厚松软场地卓越周期与地面峰值加速度的空间变异特征: 以苏州为例[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 996-1004. (CHEN Guoxing, LIU Xuening, ZHU Jiao, et al. Spatial variation of predominant periods of site and amplifications of peak ground accelerations for deep sediment layers: case study of Suzhou City[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 996-1004. (in Chinese))
- [4] BORCHERDT R D. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)[J]. Earthquake Spectra, 1994, **10**(4): 617-653.
- [5] YAMAZAKI F, WAKAMATSU K, ONISHI J, et al. Relationship between geomorphological land classification and site amplification ratio based on JMA strong motion records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, **19**(1): 41-53.
- [6] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, **97**(5): 1379-1395.
- [7] 史大成. 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, 2013. (SHI Dacheng. Study on Ground Motion Amplification of Regional Site and Application[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [8] LI X J, JING B B, LIU C, et al. Site classification method based on geomorphological and geological characteristics and its application in China[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2019, **109**(5): 1843-1854.
- [9] FOSTER K M, BRADLEY B A, MCGANN C R, et al. A VS30 map for New Zealand based on geologic and terrain proxy variables and field measurements[J]. Earthquake Spectra, 2019, **35**(4): 1865-1897.
- [10] ZHOU J, LI X J, DAI Z J, et al. Parametrical model for estimating VS30 from shallow borehole profiles using a database for China[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2021, **111**(3): 1199-1220.
- [11] YAMAZAKI F, ANSARY M A. Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, **26**(7): 671-689.

- [12] 温瑞智, 冀 昆, 任叶飞, 等. 基于谱比法的我国强震台站场地分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1236-1241. (WEN Ruizhi, JI Kun, REN Yefei, et al. Site classification for strong earthquake stations in China using spectral ratio method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1236-1241. (in Chinese))
- [13] 王 竞. 考虑土层结构影响的场地分类方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018. (WANG Jing. Study on Site Classification Method Considering the Influence of Soil Structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese))
- [14] 卢本涛. 基于 H/V 谱比法的大盈江场地类别划分[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023. (LU Bentao. Classification of the Daying River Site Category Based on the H/V Spectral Ratio Method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese))
- [15] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 779-784. (QI Wenhao, BO Jingshan, LIU Hongshuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 779-784. (in Chinese))
- [16] 华永超. 基于场地周期的土体场地放大效应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020. (HUA Yongchao. Study on Soil Site Amplification Effect Based on Site Period[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020. (in Chinese))
- [17] 迟明杰, 李小军, 陈学良, 等. 场地划分中存在的问题及建议[J]. 地震学报, 2021, **43**(6): 787-803, 817. (CHI Mingjie, LI Xiaojun, CHEN Xueliang, et al. Problems and suggestions on site classification[J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, **43**(6): 787-803, 817. (in Chinese))
- [18] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [19] International Building Code. International Code Council[S]. Illinois: Country Club Hills, 2009.
- [20] 陈国兴, 丁杰发, 方 怡, 等. 场地类别分类方案研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3509-3522, 3582. (CHEN Guoxing, DING Jiefu, FANG Yi, et al. Investigation of seismic site classification scheme[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3509-3522, 3582. (in Chinese))
- [21] 王 竞, 王世元, 宴金旭, 等. 中外场地分类研究现状及其应用讨论[J]. 世界地震工程, 2022, **38**(3): 236-245. (WANG Jing, WANG Shiyuan, YAN Jinxu, et al. Research progress and application on site classification in the world[J]. World Earthquake Engineering, 2022, **38**(3): 236-245. (in Chinese))
- [22] DAI Z, LI X, HOU C. A shear-wave velocity model for VS30 estimation based on a conditional independence property[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, **103**(6): 3354-3361.
- [23] 郭晓云, 薄景山, 巴文辉, 等. 最小二乘法分段拟合标定反应谱方法[J]. 世界地震工程, 2012, **28**(3): 29-33. (GUO Xiaoyun, BO Jingshan, BA Wenhui, et al. Sectional least square fitting method for calibrating seismic design response spectrum[J]. World Earthquake Engineering, 2012, **28**(3): 29-33. (in Chinese))