

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0154

场地类别分类方案研究

陈国兴^{1,2}, 丁杰发^{1,2}, 方 怡^{1,2}, 彭艳菊³, 李小军^{1,4}

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009;
3. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 4. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 基于性能的抗震设计, 要求工程师设计出具有预期抗震性能的结构, 一个关键因素是地震作用的确定, 这在很大程度上取决于局部场地条件。通过收集和分析北京、苏州和唐山城区 956 个钻孔资料, 建立地表 20 m 和 30 m 深土层走时平均剪切波速 V_{S20} 和 V_{S30} 的关系式; 现场钻探获取北京城区深 105 m 的典型钻孔原状土样, 试验给出各类土体动剪切模量和阻尼比曲线; 建立北京城区 170 个钻孔的场地反应计算模型, 采用 Nakamura 提出的 HVSR 法和陈国兴等提出的弱震法估算场地基本周期 T_s 值, 结合国内外现行抗震规范的场地分类及一些学者对场地分类的研究成果, 提出两种新的场地分类建议方案: 基于等效剪切波速 V_{SE} 和覆盖土层厚度 H (地表至剪切波速 $V_s \geq 500$ m/s 的基岩深度) 的双指标场地分类方案及基于 V_{SE} 、 H 和 T_s 的三指标场地分类方案。提出的场地分类方案对我国现行抗震规范场地分类方法的改进有参考价值。

关 键 词: 地震场地效应; 场地类别; 覆盖土层厚度; 走时平均剪切波速; 场地基本周期

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2020) 11—3509—15

Investigation of seismic site classification scheme

CHEN Guo-xing^{1,2}, DING Jie-fa^{1,2}, FANG Yi^{1,2}, PENG Yan-ju³, LI Xiao-jun^{1,4}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

3. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The performance-based seismic design requires engineers to design structures with desired seismic performance for a specific level of earthquake ground motions. One of the key factors is the determination of seismic effect, which depends on the local site condition. This paper collected 956 borehole profiles and shear-wave velocity profiles of soil lithology in Beijing, Suzhou and Tangshan urban areas, China. The correlations of the time-averaged shear-wave velocities V_{S20} and V_{S30} for the corresponding top 20 m and 30 m depths for sites are established. Cyclic triaxial tests were performed on typical samples of undisturbed soils at the depth of 105 m taken from Beijing urban area in this study, and the shear modulus reduction and damping increasing curves with increasing shear strain for various types of soils are given. Nonlinear site responses of soil column models for 170 borehole profiles in Beijing urban area were computed, and the site fundamental periods T_s for each soil column model were estimated through the Nakamura's HVSR method and the Chen's weak-motion method. Subsequently, combined with the site classifications of the current seismic design codes at home and abroad and the recent research results of some scholars on site classification, two alternative seismic site classification schemes were proposed, namely the two-proxy method based on the H (soil depth from the surface to bedrock with shear-wave velocity ≥ 500 m/s) and V_{SE} (time-averaged shear-wave velocity for the smaller value of both the upper 30 m and H), as well as the three-proxy method based on the H , V_{SE} and T_s . The two proposed site classification schemes in this study provide a beneficial reference to modify the site classification in the current seismic codes in China.

Keywords: seismic site effect; site classification; soil depth from the surface to seismic bedrock; travel time averaged shear wave-velocity; site fundamental period

收稿日期: 2020-02-09

修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFC1504301); 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项项目 (No. ZDJ2017-28). This work was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1504301) and the Research Grant from Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration (ZDJ2017-28).

第一作者简介: 陈国兴, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail: gxc6307@163.com

通讯作者: 李小军, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事地震工程与防灾减灾工程研究方面的研究工作。E-mail: beerli@vip.sina.com

1 引言

强震观测和理论研究表明,地表地震动强度与土的类型、性质及覆盖层厚度等密切相关。强震观测也表明:软到中硬的黏土和砂土地,其地表地震动放大效应比在较硬土地中观测到的地表地震动放大效应要小,且这类软到中硬场地涵盖较宽的场地基本周期 T_s 大致为 0.3~1.1 s;相反,硬土地地的加速度谱表现出某一周期的显著放大现象,且在较低周期频带表现出较大放大现象^[1]。 T_s 和地表 30 m 深土层的走时平均剪切波波速 V_{S30} 是目前强地震动预测方程中最普遍的场地参数。为此,各国抗震设计规范通过定义“场地类别”来考虑局部场地条件对场地效应的影响:对不同场地类别提出适当的场地相关的弹性设计反应谱。

美国规范 IBC^[2]和 NEHRP^[3],主要依据 V_{S30} 将场地类别分成 A~E 5 类,如图 1 所示。单列适用于特殊土壤条件的 F 类场地,如可液化土、高灵敏性黏土和湿陷性弱胶结土。对 F 类场地,需进行专门的场地地震反应分析。

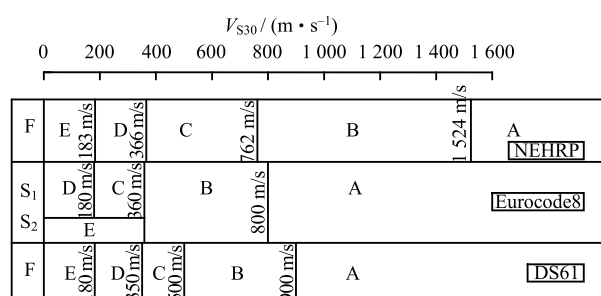


图 1 基于 V_{S30} 的场地分类方法^[2-5]

Fig.1 Site classifications according to V_{S30} ^[2-5]

类似的,欧洲规范 Eurocode 8^[4]也主要依据 V_{S30} 将场地类别分成 A~E 5 类(见图 1),但考虑了土层的一般描述和地表 30 m 深土层的标准贯入试验锤击数 N_{SPT} 和不排水剪切强度 S_u 。定义 E 类场地为地表冲积土且剪切波速 $V_s < 360$ m/s、地表到“地震基岩”($V_s \geq 800$ m/s)的覆盖层厚度 H 小于 20 m 的场地。类似 IBC 和 NEHRP 的 F 类场地, Eurocode 8 定义了两类需专门分析的场地类别: S_1 和 S_2 。

智利规范 DS61^[5]依据 V_{S30} 将场地类别分成 A~E 5 类(见图 1)。DS61 将所有被认为是特殊的土壤沉积物归类为 F 类,如可液化土、有机土、高塑性细粒土、高灵敏性土等,需进行专门的场地地震反应分析。定义 C 类的目的是实现从非常密实粗粒土到中等密实砂土和坚硬黏土地地的平稳过渡。

日本规范 BSLJ^[6]依据 T_s 和岩性描述,将场地分成 3 类:硬土、中硬土、软土。 T_s 采用等效均质场地的简化公式计算。

由此可知,国外抗震规范的场地相关弹性设计反应谱曲线是基于场地类别给出的,仅考虑地表 30 m 的土壤性质,与场地的实际沉积土厚度及深于 30 m 的土壤性质无关。这种简化方法在估计地表地震动的主要特征时可能会产生较大的误差。其实,不同沉积土层序的地表 30 m 深土层可以具有相同的剪切波传播时间,即 V_{S30} 与地表 30 m 深沉积土的层序无关;但场地反应是与沉积土层序(土层的阻抗比)密切相关的。因此,仅以 V_{S30} 作为表征场地效应的指数是有局限性的。近期的一些研究发现 V_{S30} 并非在所有场地条件下都可作为表征场地地震效应的指数,并提出了替代或补充的指标,例如: Verdugo 等^[7-8]提出表征地表 30 m 深土层等效剪切波速 V_{S30-E} 的概念: $V_{S30-E} = 120/T_{S-30}$, 其中, T_{S-30} 为刚性基岩上 30 m 土层的基本周期;以 V_{S30-E} 和 T_s 为指标,将场地类别分成 A~E 5 类,单列特殊土地地为 F 类。又如: Pitilakis 等^[9]依据希腊、意大利、日本、土耳其、美国的 536 个强震台站、3 666 个强震记录的分析结果,提出更详细的场地分类方案,以 T_s 、地表到“地震基岩”($V_s > 800$ m/s)的土层厚度 H 内的走时平均剪切波速 V_{sav} 及 H 为指标,将场地类别分为 A、B、C、D、E 和 X 6 类,且 B 类和 C 类有亚类;X 类为特殊土地地,包括可液化土、邻近断层土、陡坡松散土、松散粒状土或粉质黏土、高有机质松散的新近回填土及其他需专门评价的特殊土。

一些学者认为 T_s 是一个比 V_{S30} 能更好地表征场地效应的指标^[10-12]。Zhu 等^[12]研究了日本 KiK-net 强震记录数据库中选取的 1 840 个井下台阵场地放大效应,以 T_s 、覆盖层厚度 $H_{0.8}$ 和 $H_{1.0}$ (地表至地震基岩,相应于 $V_s \geq 800$ m/s 和 $V_s \geq 1\ 000$ m/s)、走时平均剪切波速 V_{sz} ($Z = 20$ 或 30 m) 作为场地分类指标,研究发现:如采用单一指标分类,则 T_s 为最佳指标;如采用双指标分类,则 (T_s, V_{S30}) 为最佳指标对, (T_s, V_{S20}) 为次佳的指标对。

我国现行的各行业抗震设计规范的场地分类方法与《建筑抗震设计规范》(GB5011—2010)^[13] 的场地分类方法是一致的,仅有细微的差异。《建筑抗震设计规范》采用“双指标”的覆盖层厚度 H (地表到地震基岩, $V_s > 500$ m/s) 和土层等效剪切波速 V_{SE} , 将场地类别分成 I、II、III 和 IV 类,且 I 类分成 I_0 和 I_1 两个亚类,如表 1 所示。

表 1 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 场地类别分类
Table 1 Site classification from code for seismic design of building (GB50011—2010)

V_{SE} 或 V_S /($m \cdot s^{-1}$)	场地类别						
	$H = 0$	$0 m < H < 3 m$	$3 m \leq H < 5 m$	$5 m \leq H < 15 m$	$15 m \leq H < 50 m$	$50 m \leq H < 80 m$	$H \geq 80 m$
$V_S > 800$	I_0	—	—	—	—	—	—
$800 \geq V_S > 500$	I_1	—	—	—	—	—	—
$500 \geq V_{SE} > 250$	—	I_1	I_1	II	II	II	II
$250 \geq V_{SE} > 150$	—	I_1	II	II	II	III	III
$V_{SE} \leq 150$	—	I_1	II	II	III	III	IV

注：土层平均剪切波速 V_{SE} 的计算深度取覆盖土层厚度和 20 m 两者的较小值； V_S 为岩石剪切波速（单位： $m \cdot s^{-1}$ ）。

近年国内有关学者认为，我国应借鉴欧美等国的场地分类方法，应考虑更厚覆盖土层的影响，以审视我国现行抗震规范中场地分类方法仅考虑地表 20 m 深土层等效剪切波速的合理性^[14-15]。地震动从基岩经土层滤波与放大而上传到地表时，地表地震动的强度和频谱特性是与场地基本周期 T_S 密切相关的。总体上，考虑覆盖层厚度的我国场地类别分类方法应优于不考虑覆盖层厚度的欧美场地类别方法。结合我国和欧美场地分类方法各自的优点，参考一些学者关于场地分类的最新研究成果，将计算走时平均（等效）剪切波速的覆盖层厚度增加到 30 m，应能更充分地反映对地表地震动特性有显著影响的场地信息特征；场地分类方法中引入参数 T_S 是发展趋势。也应指出：覆盖层厚度（地震基岩深度） H 的估计是模糊的，这取决于“地震基岩”标准的定义；而 T_S 是与覆盖层厚度 H 直接相关的。

综上，场地类别分类需考虑两方面问题：第一，采用什么指标分类场地类别？第二，场地类别分几类？不同场地类别的各个指标界限值怎么确定？国外规范 Eurocode 8^[4]、DS61^[5]及学者 Pitilakis^[9]、Verdugo^[8]等的最新研究成果：场地类别 A 类为硬岩，B 类为软岩或很密实坚硬土，C、D 和 E 类为土壤场地，单列需专门研究的特殊土场地类别。美国规范 IBC^[2]和 NEHRP^[2]的 A 类为裸露岩石、B 类为硬岩场地，C 类为软岩或很密实坚硬土场地，D 和 E 类为土壤场地，并单列需专门研究的特殊土类别。由此可知，对土壤的场地类别均划分为 3 个场地类别及 1 个特殊土类别。我国《建筑抗震设计规范》至今经历 7 个版本的修改^[15-16]，形成了目前版本的双指标场地类别分类方法，将场地分为 I、II、III 和 IV 类，且 I 类分为 I_0 （硬岩）和 I_1 （软岩）。因此，总体而言，我国现行的场地类别分成 I（含 I_0 和 I_1 ）、II、III 和 IV 类 4 类是可行的，但也需进一步完善。鉴于我国特殊土场地效应的强震观测数据与理论研究成果稀少，可借鉴国外规范的规定和我国的工程实践，单列特殊土场地的范围。

本文旨在提出我国现行场地类别分类方法的改进建议：①采用现行的双指标场地分类法，但等效剪切波速 V_{SE} （即 V_{S30} ）取覆盖土厚度和地表 30 m 两者之较小者的计算值，如何确定现有场地类别分类的界限值 V_{SE} ？②采用三指标场地分类法：补充场地基本周期 T_S 作为场地分类指标，如何确定不同场地类别的 T_S 界限值？

2 钻孔资料与波速空间分布特征

本次研究收集了北京、苏州、唐山城区共 956 个钻孔的土层剖面及剪切波速测试资料，不同场地类别的钻孔信息如表 2 所示。鉴于我国现行的场地类别分类中“基岩”定义为 $V_S > 500 m/s$ 的岩石，本文的地震基岩定义为 $V_S > 500 m/s$ 的岩石。图 2 给出了波速测试钻孔在 3 个城市中的空间分布情况，图 3 给出以北京、苏州城区钻孔剪切波速数据为依据绘制的基岩等值线图（唐山的钻孔数量偏少，未绘制基岩等值线），以期望读者对波速测试钻孔的信息及其代表性有更充分的了解。

北京城区西部以丘陵、山地为主，中部及东南部主要以冲积扇平原为主。苏州城区大部分区域的基岩深度超过 100 m，西部以山丘为主，中、东部以深厚沉积平原为主。3 个城市的覆盖层厚度 $H < 30 m$ 及 $H \geq 30 m$ 的钻孔数见表 2。可以看出，在收集的 956 个钻孔资料中，仅 61 个钻孔的覆盖层厚度小于 30 m（含 26 个钻孔的覆盖层厚度小于 20 m），其余 895 个钻孔的覆盖层厚度皆大于 30 m。

表 2 北京、苏州和唐山城区的钻孔资料
Table 2 Borehole data of Beijing, Suzhou and Tangshan urban areas

覆盖层 厚度 H	场地 类别	钻孔数量/个		
		北京	苏州	唐山
$< 20 m$	II	13	0	13
$20 \sim 30 m$	II	20	4	11
$\geq 30 m$	II	168	10	25
$\geq 30 m$	III	209	415	59
$\geq 30 m$	IV	2	7	0

我国规范的等效剪切波速 V_{SE} (即 V_{S20}) 公式为

$$V_{SE} = d_0 / \sum_{i=1}^n (d_i / V_{Si}) \quad (1)$$

式中: d_0 为覆盖层厚度和 20 m 两者的较小值; d_i 为计算深度内第 i 层土的厚度; V_{Si} 为计算深度内第 i 层土的剪切波速; n 为计算深度内土层的分层数。

美国规范的等效剪切波速 V_{SE} (即 V_{S30}) 公式为

$$V_{SE} = 30 / \sum_{i=1}^n (d_i / V_{Si}) \quad (2)$$

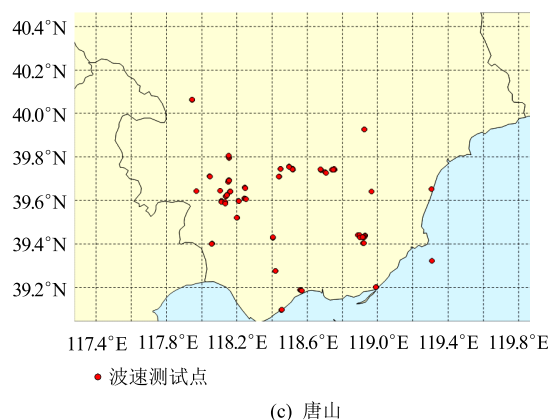
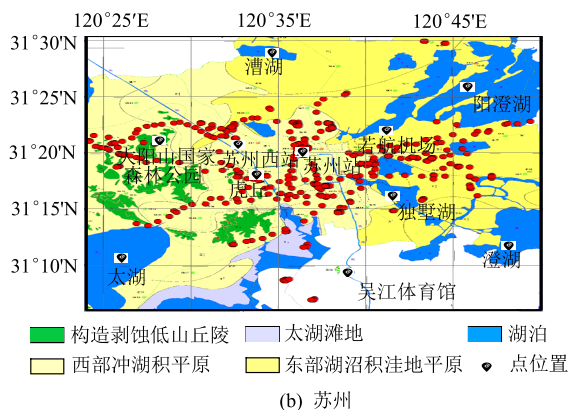
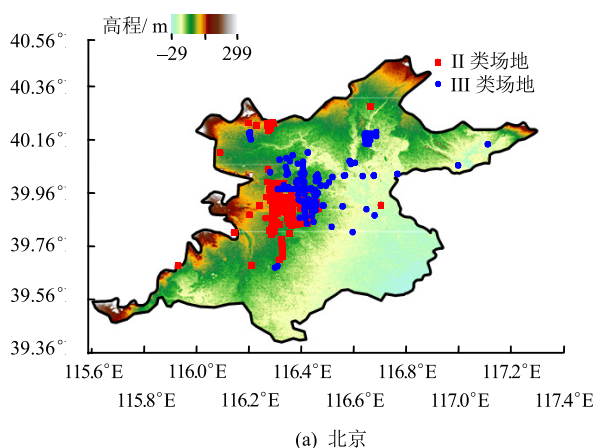


图2 北京、苏州和唐山城区钻孔位置的空间分布
Fig.2 Spatial distributions of the borehole locations in Beijing, Suzhou and Tangshan urban areas

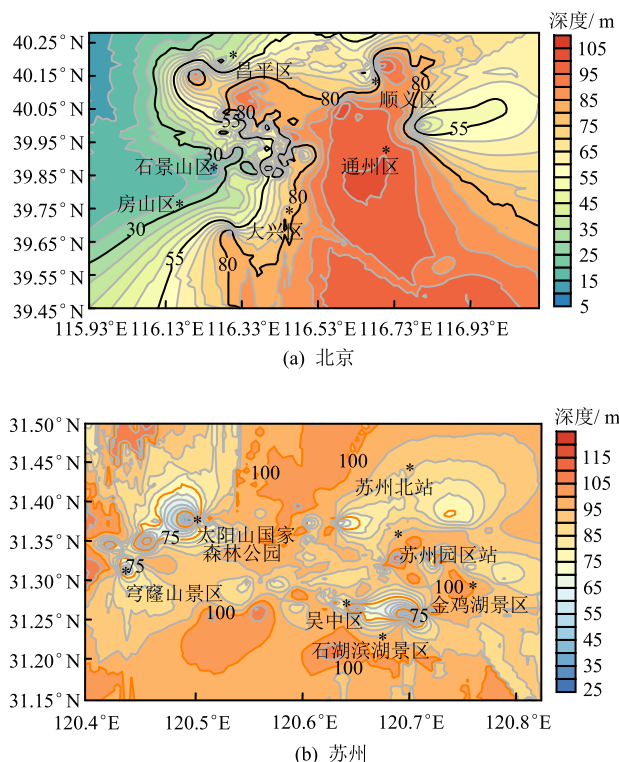


图3 北京和苏州城区地震基岩等深线图
Fig.3 Contour maps of seismic bedrock in Beijing and Suzhou urban areas

两者的区别是我国规范计算 V_{SE} 时取覆盖层厚度和 20 m 两者的较小值, 美国规范在计算 V_{SE} 时取地表 30 m 深度的岩土层。

为直观地了解北京、苏州城区剪切波速的空间变化特征及中美两国场地类别分类的差异, 计算出全部钻孔的 V_{S20} 和 V_{S30} , 依据我国和美国规范的场地分类方法, 绘制北京和苏州城区不同场地类别 V_{S20} 和 V_{S30} 的空间变化, 如图 4 和图 5 所示。

V_{S20} 和 V_{S30} 的空间分布特征相似。北京城区大部分钻孔的 V_{S20} 为 180~250 m/s, 而 V_{S30} 为 200~270 m/s, 这些钻孔位于北京东北部冲积扇平原区; 西南部石景山区钻孔的 $V_{S20} > 250$ m/s, 而 $V_{S30} > 270$ m/s, 甚至分别可达 290 m/s 和 320 m/s。 $V_{S20} < 150$ m/s 和 $V_{S30} < 180$ m/s 的区域位于河流、水塘附近。苏州城区大部分钻孔的 V_{S20} 为 160~180 m/s, 而 V_{S30} 为 180~200 m/s, 这些区域位于东部湖沼积洼地平原和西部冲湖积平原; 西南部局部构造剥蚀低山丘陵处 $V_{S20} > 180$ m/s, 而 $V_{S30} > 200$ m/s, 甚至分别可达 245 m/s 和 295 m/s。 $V_{S20} < 160$ m/s 和 $V_{S30} < 180$ m/s 的钻孔邻近湖泊、塘[17]。由此可知, V_{S20} 和 V_{S30} 的空间分布均表明土层剪切波速具有区域相关性, 沉积环境相同区域剪切波速变化不大, 具有较好的统计规律; 工程地质特征差异明显的区

域,土层走时平均剪切波速 V_{S20} 和 V_{S30} 值显著不同。

依据我国现行规范,北京城区的场地类别以 II 类和 III 类场地为主;依据美国 NEHRP 规范,多数属于 D 类场地,仅石景山区和丰台区存在小部分 C 类及河流附近存在 E 类场地,且 D 类场地基本涵盖我国的 II 类、III 类场地, E 类场地不仅完全涵盖我国的 IV 类场地,还涵盖部分 III 类场地。

依据我国现行规范,苏州城区的场地类别基本都属于 III 类场地,仅丘陵处存在 II 类场地及湖泊附近存在 IV 类场地;依据美国 NEHRP 规范,大多数属于 D 类场地,仅湖泊附近存在 E 类场地,且 D 类场地基本涵盖我国的全部 IV 类场地及部分 III 类场地。

2.1 V_{S20} 和 V_{S30} 的定量关系

图 6 给出北京、苏州及唐山城区覆盖层厚度 $H \geq 30$ m 的 895 个钻孔的 V_{S20} 和 V_{S30} 散点图及对应的场地类别见表 1。计算 V_{S20} 时取覆盖层厚度和 20 m 两者的较小值;计算 V_{S30} 时取覆盖层厚度和 30 m 两

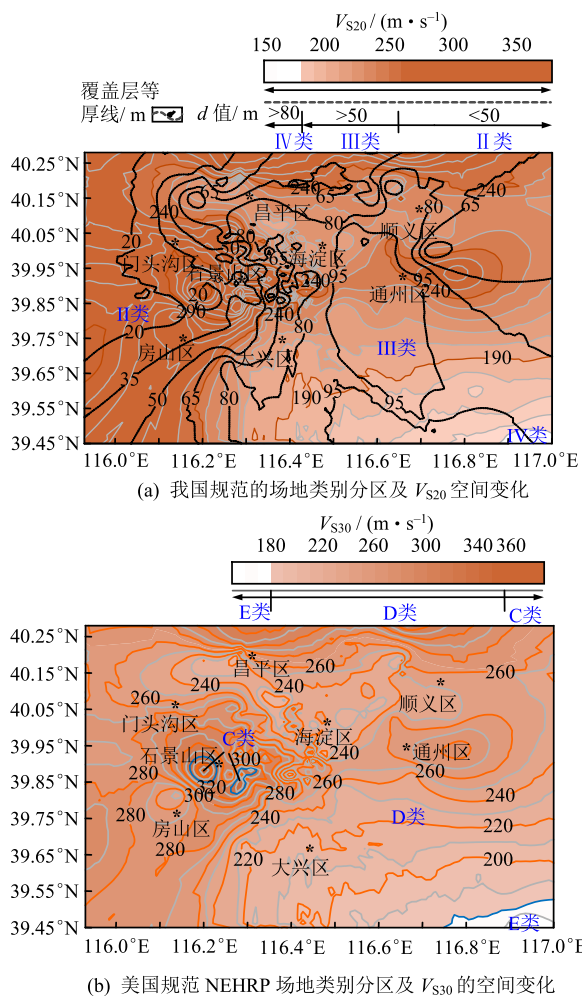
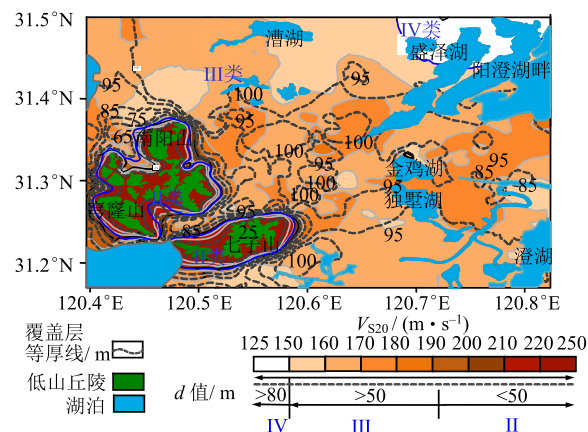
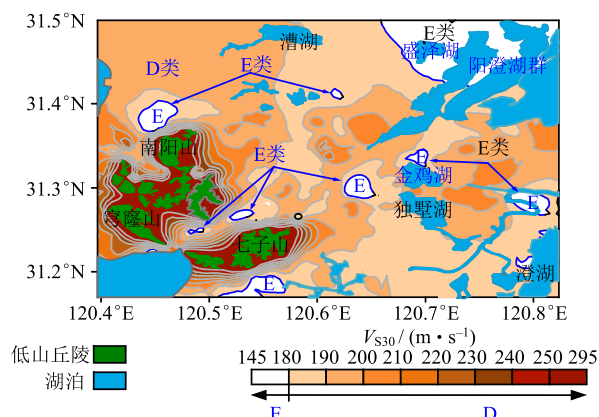


图 4 北京城区的场地类别分区及 V_{S20} 和 V_{S30} 的空间变化
Fig.4 Spatial variation of V_{S20} or V_{S30} and site classifications in Beijing urban area



(a) 我国规范场地类别分区及 V_{S20} 空间变化



(b) 美国规范 NEHRP 场地类别分区及 V_{S30} 的空间变化

图 5 苏州城区的场地类别及 V_{S20} 和 V_{S30} 空间变化^[17]

Fig.5 Spatial variation of V_{S20} or V_{S30} and site classifications in Suzhou urban areas^[17]

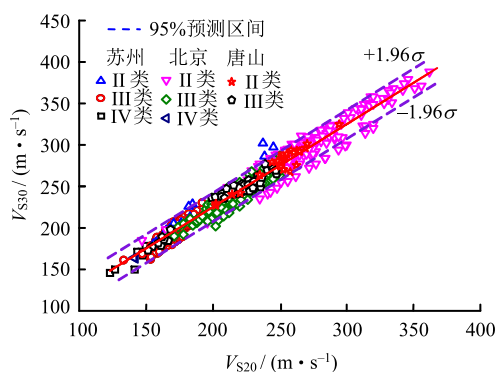


图 6 北京、苏州及唐山城区场地 V_{S20} 和 V_{S30} 的关系
Fig.6 Correlation of V_{S20} and V_{S30} for Beijing, Suzhou and Tangshan urban areas

者的较小值。 V_{S20} 和 V_{S30} 的所有数据点位于斜直线两侧的窄带内,其最佳线性拟合关系式为

$$V_{S30} = V_{S20} + 24.4 \quad (3)$$

拟合优度 $R^2 = 0.971$, 标准差 $\sigma = 7.7$, 说明两者的线性相关性非常显著。

将表 1 中不同场地类别的 V_{SE} 界限值替换为

V_{S30} 时, 取式 (3) 的计算值 V_{S30} (均值) $\pm \sigma$, 应是不同场地类别 V_{S30} 界限值的合理区间值, 即 $V_{SE} = 150 \text{ m/s}$ 和 250 m/s 分别替换为 $(174.4 \pm 7.7) \text{ m/s}$ 和 $(274.4 \pm 7.7) \text{ m/s}$ 。

3 三指标场地类别分类方案

我国规范的 II 类场地跨越美国、欧洲规范的 C 类、D 类和 E 类场地及 III 类场地跨越美国、欧洲规范的 D 类和 E 类场地, 这说明我国 II、III 类场地的设计地震动参数与美国、欧洲规范的 D 类和 E 类场地的设计地震动参数相比, 其离散性更大。一些学者的研究表明: T_S 是一个比 V_{S30} 更好地表征场地特征的指数^[7-11], 且在相应的场地分类方法中引入 T_S 作为场地分类的指标。因此, 下文探讨如何在我国的场地类别分类中引入 T_S ?

3.1 基于 V_{S30} 和 H 的场地分类方案

依据表 1, 图 7 给出北京、苏州和唐山城区不同场地类别各钻孔 V_{S30} 和 H 的关系, 并给出了与 NEHRP 场地分类的对应关系。收集的北京、苏州和唐山城区钻孔资料, 缺失 $H < 15 \text{ m}$ 且 $V_{S30} < 180 \text{ m/s}$ 的 II 类场地钻孔; II 类场地钻孔的 V_{S30} 介于 $180 \sim 380 \text{ m/s}$; III 类场地的 $H > 50 \text{ m}$, 除了图 7 中编号 1~3 的 V_{S30} 分别为 143、161、169 m/s 以外, 其余钻孔的 V_{S30} 介于 $170 \sim 275 \text{ m/s}$; IV 类场地的 V_{S30} 为 $144 \sim 169 \text{ m/s}$ 。

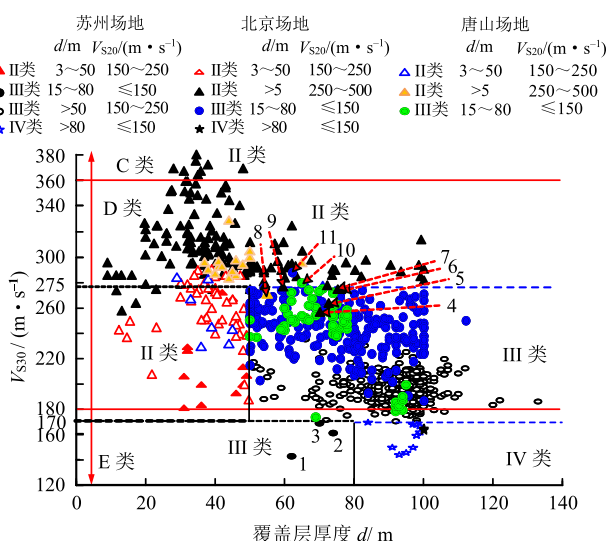


图 7 不同场地类别的 V_{S30} 和 H 之间的关系
Fig.7 Correlation of H with V_{S30} for the different site classifications

可以发现, 我国规范的场地类别分类中, IV 类场地和少量 II 类场地、部分 III 类场地对应于美国规范的 E 类场地, 绝大部分 II 类场地和 III 类场地

对应于 D 类场地, 少量 II 类场地对应于 C 类场地。这意味着我国规范 II 类场地跨越美国规范 C 类、D 类和 E 类场地, 覆盖范围很宽。从工程抗震而言, 将 II 类和 III 类、III 类和 IV 类的过渡场地分别划入 III 类、IV 类是稍偏于安全的。因此, 取覆盖层厚度和 30 m 两者的较小者计算 V_{S30} 时, 将 $3 \text{ m} < H < 80 \text{ m}$ 且 $V_{S30} \leq 170 \text{ m/s}$ 、 $H > 50 \text{ m}$ 且 $170 \text{ m/s} < V_{S30} \leq 275 \text{ m/s}$ 的场地划入 III 类场地, 将 $H > 80 \text{ m}$ 且 $V_{S30} \leq 170 \text{ m/s}$ 的场地划入 IV 类场地, 则我国的 II 类基本对应于美国规范的 C 类、D 类。这样, 图 7 中编号 4~9 的 6 个 II 类场地划入 III 类场地, 这些钻孔在 20 m 以浅是以卵石为主的硬夹层, $20 \sim 30 \text{ m}$ 深土层以松软粉质黏土、黏质粉土和重粉质黏土为主; 图 7 中编号 10 和 11 的 2 个 III 类场地划入 II 类场地, 深 $20 \sim 30 \text{ m}$ 的大部分土层是卵石。因此, 这几个钻孔的场地类别变更应是合理的。

建议的场地分类方案见表 3。表 1 和表 3 的差异是: 将表 1 中的 V_{SE} 界限值 150 m/s 和 250 m/s 分别修改为 170 m/s 和 275 m/s ; 表 1 中 $H < 15 \text{ m}$ 且 $V_{SE} \leq 150 \text{ m/s}$ 的 I₁ 类和 II 类场地划入 III 类; 表 1 中 $H < 3 \text{ m}$ 且 $150 \text{ m/s} < V_{SE} \leq 250 \text{ m/s}$ 的 I₁ 类场地划入 II 类; 增加特殊土类: 存在厚度 $\geq 10 \text{ m}$ 且 $V_S \leq 120 \text{ m/s}$ 的软土层、中等及以上液化土层。

表 3 依据 V_{SE} 和 H 的场地类别分类方案

Table 3 Proposed site classifications based on V_{SE} and H

场地类别	土层 V_{SE} 或岩石 $V_S / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	土层厚度 H / m
I ₀	$V_S > 800$	—
I ₁	$800 \geq V_S > 500$	—
II	$500 \geq V_{SE} > 275$	< 5
III	$275 \geq V_{SE} > 170$	≥ 5
IV	$V_{SE} \leq 170$	≥ 50
特殊土类	$V_S \leq 120$	≥ 80

注: ① V_{SE} 的计算深度取覆盖土层厚度和 30 m 两者的较小值;

② $H < 3 \text{ m}$ 的场地, 如土层不作为持力层, 则场地划入 I₁ 类。

其原因是: ①现行欧洲、美国、智利规范场地分类标准中, $V_{S30} \leq 180 \text{ m/s}$ 的场地均归入 E 类或 D 类 (软土地), $180 < V_{S30} \leq 350 \text{ m/s}$ 的场地均归入 D 类或 C 类 (一般土地)。②美国规范 IBC 和 NEHRP 引入 A 类的意图是为了区分出通常出现在美国东部的裸露岩石场地。这意味着岩石裸露与否, 地表地震动特性是有显著区别的。③我国 1964 年版、1974 年版抗震规范中 I 类场地, 明确规定仅

含岩石场地; 将薄层的一般土、软土划入 I 类场地, 是 1989 年版抗震规范中规定的并延续至今^[15-16]。④Pitilakis 等^[9]的研究成果, 将整个土层深度的走时平均剪切波速 $V_{\text{Sav}} \geq 300 \text{ m/s}$ 且 $H < 5 \text{ m}$ 的中硬风化土场地才划入 A 类场地。⑤场地反应计算表明^[7], 薄层地表软土对地表地震动特性有显著影响, 薄层软土与裸露岩石的地表地震动特性差异显著。⑥厚的软土层、液化土层会产生显著的地震动高频滤波、低频放大效应, 甚至产生严重的震陷和侧向位移, 已是不争的事实。如: 1976 年唐山地震, 天津塘沽、新港和汉沽的一些住宅楼产生 20~40 cm 的震陷, 1985 年 Michoacan 地震墨西哥城古湖区和 1989 年 Loma Prieta 地震旧金山港湾 Marina 区的严重震害, 均因软土地层长周期地震动显著放大所致。又如: 1976 年唐山地震天津—唐山地区、2010~2011 Canterbury 系列地震 Christchurch 城、2011 年东日本大地震东京湾区大面积液化导致的严重震害。存在厚软土层、液化土层的场地单列场地类别, 对这类场地的设计地震动参数专门研究, 实属必要。

3.2 场地基本周期的估算方法

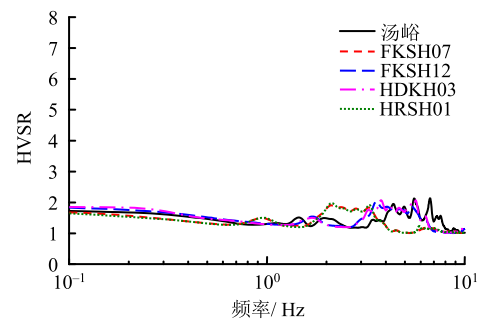
采用陈国兴等^[18]提出的弱震法和 Nakamura^[19]提出的谱比法, 即 HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio) 法计算场地基本周期 T_s , 取两者计算的平均值。

弱震法^[18]: 输入水平向基岩弱地震动, 计算土柱模型地表地震反应的傅里叶幅值谱, 以窄频带傅里叶幅值谱最大峰值对应的频率作为场地基本频率 f_s , 其倒数为场地基本周期 T_s 。应注意: ①计算场地反应时, 土体应基本处于小应变弹性状态, 即最大剪应变水平小于 5×10^{-5} ; ②地表地震动的傅里叶幅值谱须在窄频带内有显著的峰值。

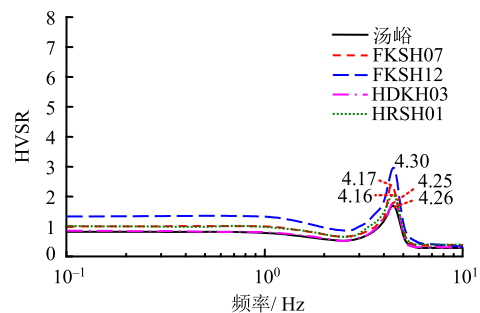
HVSR 法^[19]: 计算双向震动 (同时输入水平向与竖向的弱地震动) 时土柱模型的地表地震反应的水平向与竖向傅里叶谱, 绘制 HVSR-频率曲线, 其峰值对应的频率即为场地基本频率 f_s , 其倒数为场地基本周期 T_s 。图 8 为北京城区 4 类典型场地条件的 HVSR-频率曲线。第 1 类 HVSR-频率曲线无明显放大现象或在宽频带上相当平坦, 近似等于 1 (见图 8(a)), 这种情况无法确定 f_s , 也无法确定 T_s (这类情况, 可采用上述的弱震法)。其原因是土层较薄或土层与基岩的软硬相近。第 2 类 HVSR-频率曲线呈现单峰放大现象 (见图 8(b)), 其峰值对应的频率即为 f_s 。第 3 类 HVSR-频率曲线呈现多个峰值, 大部分情况是双峰现象, 可取双峰或多峰中的最大峰值所对应的频率作为 f_s (见图 8(c) 和 8(d))。发生该现象的原因是由于土层中存在硬夹层或土层

的剪切波速随深度变化存在多次突变现象。

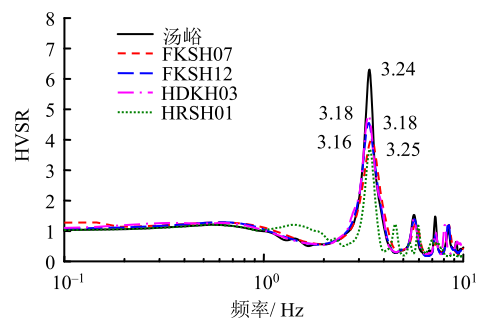
场地基本周期属于场地固有属性, 理论上应与输入地震动特性无关。弱震法^[18]和 HVSR 法^[19]本质上属于弱非线性场地反应分析, 输入地震动特性的轻微影响是不可避免的, 只能给出稍大于 T_s 真值的近似值。为消除输入地震动特性差异引起的误差, T_s 宜取输入多个弱震记录的计算值的均值。



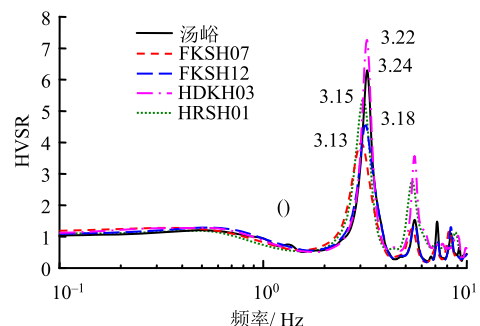
(a) 土层较薄, 土质坚硬



(b) 土层分布均匀, 波速连续性良好



(c) 土层含少许硬夹层, 波速连续性弱



(d) 土层硬夹层较多, 波速不连续性强

图 8 北京城区 4 种典型场的 HVSR-频率曲线
Fig.8 HVSR versus frequency curves of four typical sites in Beijing urban area

选取日本 KiK-net 强震台网 4 个台站和我国汶川地震汤峪台站的基岩($V_s \geq 760$ m/s)弱震记录作为输入基岩地震动。基岩弱震记录水平向和竖向的傅里叶幅值谱近似相等, 台站 FKSH07、HRSH01 记录的加速度反应谱具单峰、窄频带特征, 高频成分丰富; 其余 3 个台站记录的加速度反应谱具多峰、宽频带特征, 中低频丰富, 且台站 HDKH03 及汶川-汤峪记录的频带最宽, 低频尤其丰富。输入地震记录的信息见表 4, 截止频率 $f_{\max}$ 取 30 Hz。

3.3 弱震法与 HVSR 法估算的 T_s 对比

根据北京城区钻孔剖面资料, 选取代表性的 170 个钻孔剖面, 建立 170 个钻孔的土柱模型。

弱震法估算 T_s 值采用国际专业软件 DeepSoil^[20] 将土柱简化为多自由度集中质量模型进行场地地震反应分析实现的。对每个土柱模型从基岩输入弱震记录, 视为竖向入射的剪切波, 进行一维土柱水平向地震反应分析。该软件采用 Matasovic 骨架曲线, 采用扩展 Masing 法则构造加、卸载的应力-应变滞回圈, 模拟土体循环加卸载非线性特性, 其骨架曲线表示为^[20]

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \beta(\gamma / \gamma_r)^s} \quad (4)$$

式中: τ 、 γ 分别为剪应力、剪应变; β 、 s 均为模型参数; $G_{\max}$ 为最大剪切模量; γ_r 为参考剪应变。

HVSR 法估算 T_s 值是通过软件 ABAQUS 平台对二维土柱模型进行弱震反应计算实现的, 模型边界为黏弹性边界^[21]。对土柱模型, 从基岩输入弱震记录的水平、竖向分量, 进行水平-竖向地震动耦合作用的二维地震反应分析。为描述土的动力非线性特性, 赵丁凤^[22]、Chen^[23]等提出了一组新的不规则循环加、卸载准则, 基于 Davidenkov 骨架曲线构造应力-应变滞回圈, 并集成到 ABAQUS 软件。

Davidenkov 骨架曲线可表示为

$$\tau = G_{\max} \gamma [1 - H(\gamma)] \quad (5)$$

$$H(\gamma) = \left\{ \frac{(\gamma / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^{2B}} \right\}^A \quad (6)$$

式中: A 、 B 均为 Davidenkov 模型参数。

通过分析北京城区的钻孔剖面, 土层大致可分为 39 种土类。对覆盖层厚 105 m 的某工程场地进行现场钻探和波速测试, 取不同深度的原状土样, 利用 GCTS 循环三轴仪器^[24]试验给出的各类土代表性土样的动剪切模量 $G/G_{\max}$ 、阻尼比 λ 与剪应变 γ 的关系曲线, 如图 9 所示。依据 $G/G_{\max}$ 、 λ 曲线, 可拟合给出各类土的 Matasovic 模型参数 β 、 s 和 γ_r 值及 Davidenkov 模型参数 A 、 B 和 γ_r 值。土的动泊松比: 地下水位以下取 0.49, 地下水位以上取 0.40。

对每个钻孔土柱模型, 输入 5 个弱震记录, 弱震法和 HVSR 法计算的 T_s 值各取其 5 次计算的均值。图 10 给出了两种方法计算出的 166 个钻孔土柱模型 (已扣除 HVSR 法不能设别出 T_s 的 4 个钻孔) 的 T_s 值对比结果。发现两者计算的 T_s 值, 96% 的数据点差异小于 $\pm 10\%$, 这相互佐证了弱震法和 HVSR 法计算 T_s 值的可信性; 且 HVSR 法对输入 5 个不同地震记录计算的 T_s 值的极差小于 0.2 Hz (见图 8), 这也佐证了 HVSR 法计算的 T_s 值的可信性的。图 10 中编号 1~5 的 5 个数据点, 两种方法计算结果的差异较大。究其原因, 数据点 1~3 是由于弱震法计算时钻孔剖面的地震反应已呈现出较强的非线性特性, 导致计算的 T_s 值偏大 (f_s 偏小); 数据点 4~5 是由于钻孔剖面的剪切波速沿深度变化突变较显著, 导致 HVSR 法计算的 f_s 偏大。

3.4 场地基本周期估算的简化方法

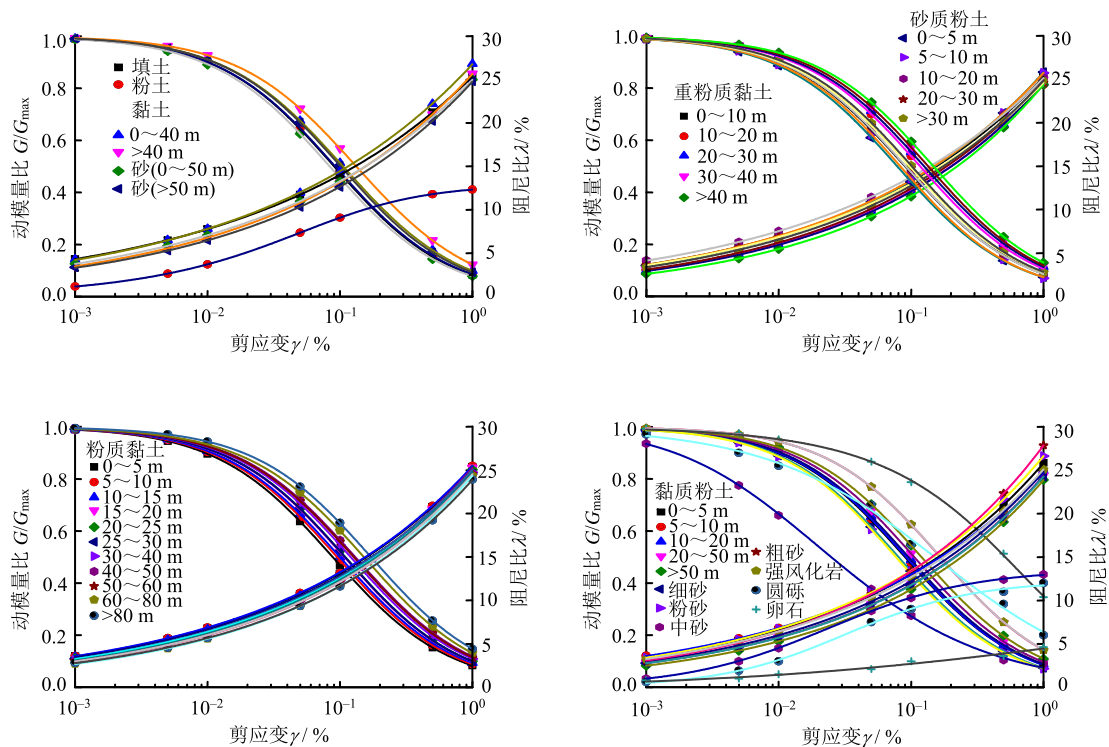
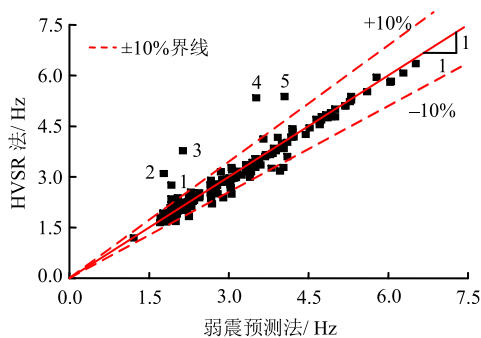
工程界普遍采用式 (7) 表示成层土地基本周期 T_s 和走时平均剪切波速 V_{Sav} 的关系^[6, 8]:

$$T_s = 4H / V_{\text{Sav}} = 4 \sum_{i=1}^n (d_i / V_{Si}) \quad (7)$$

表 4 基岩弱震记录信息
Table 4 Bedrock weak-motion information

地震名称	时间	地震动编号	台站	方向	PGA /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	震级	震中距 / km	采样频率 / Hz	$D_{5\% \sim 95\%}$	T_p / s	基岩波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
新泻	2004	FKSH070410231834	FKSH07	EW	17.02	6.5	51	200	12.73	0.06	2 600
新泻	2004	FKSH070410231834	FKSH07	UD	18.14	6.5	51	200	15.30	0.10	2 600
鸟取	2000	HRSH010010061330	HRSH01	EW	14.40	7.3	105	200	20.19	0.08	1 962
鸟取	2000	HRSH010010061330	HRSH01	UD	10.14	7.3	105	200	21.66	0.38	1 962
日本海底	2003	HDKH030309260608	HDKH03	EW	17.45	7.1	148	200	25.84	0.60	1 400
日本海底	2003	HDKH030309260608	HDKH03	UD	18.04	7.1	148	200	27.11	0.58	1 400
日本海底	2005	FKSH120508161146	FKSH12	EW	16.84	7.2	202	200	23.15	0.26	2 320
日本海底	2005	FKSH120508161146	FKSH12	UD	13.75	7.2	202	200	26.69	0.20	2 320
汶川	2008	汶川-汤峪	汤峪	NS	29.43	8.0	550	200	30.43	0.34	780
汶川	2008	汶川-汤峪	汤峪	UD	26.84	8.0	550	200	32.64	0.46	780

注: PGA 为峰值加速度; $D_{5\% \sim 95\%}$ 为 5% 至 95% 的 Arias 强度持时; T_p 为 5% 阻尼比加速度反应谱曲线最大值对应的周期值。

图 9 北京城区代表性土样的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 曲线Fig. 9 $G/G_{\max}$ - γ and λ - γ curves of typical soil samples in Beijing urban area图 10 弱震法和 HVSR 估算的北京城区 166 个钻孔场地基本频率 f_s 的对比Fig.10 Correlation of site fundamental frequencies f_s according to the weak motion method and the HVSR method for 166 borehole profiles in Beijing urban

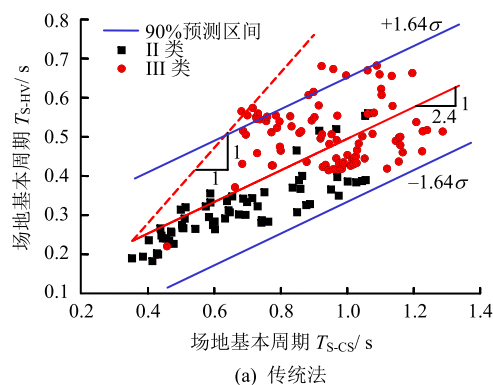
式 (7) 是由均质土层的解析解外推到成层土场地的近似表达式。

齐文浩等^[14]基于逐层单自由度法建立了一个场地基本周期 T_s 的修正简化公式:

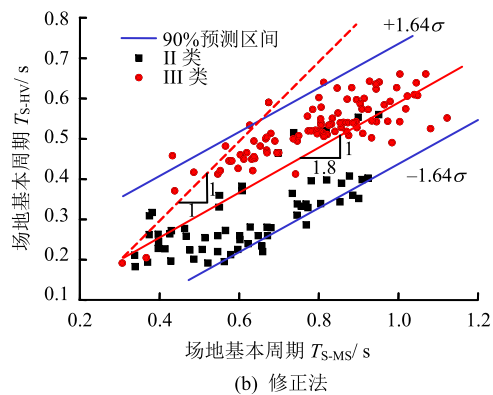
$$T_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{4d_i}{V_{Si}} \right)^2 \frac{2H_i}{d_i}} \quad (8)$$

式中: $H_i = \sum_{n=1}^i h_n - 0.5h_i$, 为第 i 层土的中点深度。

式 (7)、(8) 分别为传统简化法和修正简化法, 相应的 T_s 记为 T_{s-CS} 和 T_{s-MS} ; HVSR 法的 T_s 记为 T_{s-HV} 。图 11 给出北京城区 166 个钻孔场地的 T_{s-CS} 、



(a) 传统法



(b) 修正法

图 11 II类和III类场地(表1)的 T_{s-s} 与 T_{s-HV} 对应关系
Fig.11 Correlation between site fundamental periods T_{s-s} and T_{s-HV} for site types II and III (Table 1)

T_{s-MS} 与 T_{s-HV} 的散点图。传统简化法、修正简化法估算的 T_s 值均存在系统性误差, II类场地数据点大

多数位于最佳拟合线的左下侧、III 类场地数据点大多数位于最佳拟合线的右上侧, T_{S-MS} 与 T_{S-HV} 的吻合度高于 T_{S-CS} 与 T_{S-HV} 的吻合度。对 II 类场地, $T_{S-MS}/T_{S-HV} = 2.08 \pm 0.45$ (1 倍标准差); 对 III 类场地, $T_{S-MS}/T_{S-HV} = 1.50 \pm 0.20$ (1 倍标准差)。

Hunter 等^[25]对加拿大 Ottawa 地区 185 个钻孔场地 T_s 值的两种估算方法进行了系统性的比较: 测试环境地震噪声并用 HVSR 法估算 T_{S-HV} 值, 采用浅层反射/折射法测波速并用式(7)估算 T_{S-CS} 值, T_{S-CS} 与 T_{S-HV} 之比介于 1.0~1.6。由于弱震法、HVSR 法对输入 5 个不同实际地震记录计算的 T_s 值都基本相近, 其均值应接近真值; 因此, 式(7)、(8)估算的 T_s 偏离真值较大。

3.5 基于 V_{S30} 、 H 和 T_s 的场地分类方案

图 12 给出北京城区 166 个钻孔剖面的 T_s 、 V_{S30} 和 H 的三维散点分布。 T_s 为 HVSR 法和弱震法各对 5 个地震记录输入计算给出的均值, 即 10 次计算的均值。计算的 II 类场地 T_s 最小值 $T_{Smin} = 0.19$ s、III 类场地 T_s 最大值 $T_{Smax} = 0.69$ s。II 类和 III 类场地界限取在 $H = 50$ m, $V_{S30} = 275$ m/s, $T_s = 0.4$ s 时, 有 5 个 II 类场地划入 III 类场地 (图 12 中 1~4), 3 个 III 类场地划入 II 类场地 (图 12 中 5~7), 场地类别被变更的原因是 T_s 值。经查, 编号 1~4 的 II 类场地钻孔 H 值分别为 79.2、78.3、74.6、100.0 m, 且剖面主要为松软粉质黏土、重粉质黏土, 因此, 这些钻孔 II 类场地被划入 III 类场地是合理的; 编号 5~7 的 III 类场地在 30~80 m 是以圆砾和卵石为主的土层, 对比国外学者基于 T_s 值的场地分类^[8], 将其划入 II 类场地也是合理的。

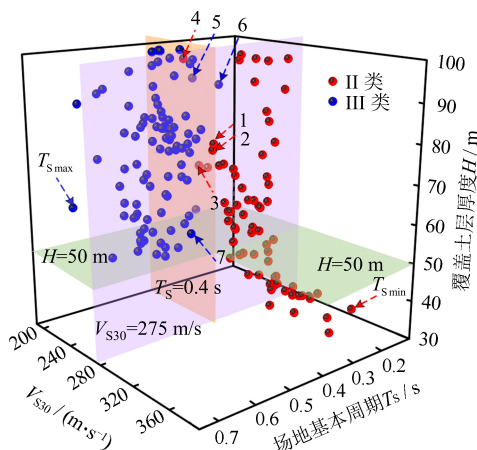


图 12 II 和 III 类场地 (表 1) 的 V_{S30} 、 H 和 T_s 值界限
Fig. 12 Boundaries of the indicators V_{S30} , H and T_s for site types II and III (Table 1)

Zhao 等^[10]采用日本 K-net 强震台网 603 个台站 3 分量地震记录计算 HVSR 值, 给出表 5 中以土性和 V_{S30} 为指标分类的场地类别 I、II、III 和 IV 类的 T_s 界限值。可以看出, Zhao 等^[10]的 II、III 类场地的 T_s 界限值, 与本文给出的 $H=50$ m 的 II、III 类场地的 T_s 界限值相同。Hassani 等^[26]采用美国 NGA-East 和 Southern Ontario 强震记录数据库 353 个台站 3 分量强震记录计算 HVSR 值, 以土性和 V_{S30} 为指标分类的场地类别 I、II、III 和 IV 类的 T_s 界限值如表 5 所示。Hassani 等^[27]分析了美国 CENA 强震台阵场地 V_{S30} 与 T_s 关系, 发现 $150 \text{ m/s} < V_{S30} \leq 300 \text{ m/s}$ 时 $T_s \geq 0.5$ s, 但两者的对应关系相当离散, 且 $V_{S30} \geq 700 \text{ m/s}$ 时 $T_s \approx 0.1$ s。Zhao^[10]和 Hassani^[26-27]等给出的不同场地类别的 T_s 界限值相近。

表 5 基于强震记录的不同场地类别的场地基本周期 T_s 值
Table 5 Site fundamental periods according to strong motion records for different site classifications

场地类别	土性描述	V_{S30} /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	T_s / s (Zhao 等 ^[10])	T_s / s (Hassani 等 ^[26-27])
—	硬岩	$> 1\ 100$	< 0.15	< 0.08
I	岩石	≥ 600	< 0.25	< 0.25
II	硬土	$300 \sim 600$	$0.25 \sim 0.40$	$0.25 \sim 0.50$
III	一般土	$200 \sim 300$	$0.40 \sim 0.80$	$0.50 \sim 0.90$
IV	软土	< 200	≥ 0.80	$T_s \geq 0.90$

注: V_{S30} 值由 T_s 和 H 值反算给出: $V_{S30} = 4H/T_s$ 。

Cadet 等^[28]利用日本 KiK-net 强震记录数据库检验了不同标准的“基岩场地”定义, 将“标准基岩场地”定义为 $750 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 850 \text{ m/s}$ 且 $T_s < 0.125$ s 的场地。Kotha 等^[29]利用 Kiban-Kvoshin 强震台网记录数据库, 对矩震级 $3.4 \leq M_w \leq 7.3$ 的 850 次地震、 $106 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 2\ 100 \text{ m/s}$ 的 641 个场地、观测点到断层破裂面在地表投影点的最近距离 $0 \leq R_{JB} \leq 543 \text{ km}$ 的 15 896 个地震记录, 场地聚类分析结果见表 6。Verdugo 等^[7-8]利用 6 次震级 8.8 级及以上的巨震记录, 采用 HVSR 法确定 T_s 值, 定义场地类别 E 类为 $V_{S30-E} \leq 180 \text{ m/s}$ 且 $T_s > 0.8$ s 的场地, 要求位于 E 类场地上的柔性结构基本周期 $T_F < 1.5$ s。

表 6 场地聚类特征范围^[30]

Table 6 Site cluster characterizations^[30]

场地聚类	V_{S30} / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	H_{800} / m	T_s / s
C ₁	450~800	5~20	< 0.1
C ₃	450~600	10~30	0.1~0.2
C ₄	450~600	30~100	> 0.6
C ₅	300~450	> 50	> 1.0
C ₆	200~300	> 50	0.4~1.0
C ₇	200~450	30~100	0.2~0.4

注: H_{800} 为地表到地震基岩 ($V_s > 800 \text{ m/s}$) 的覆盖层厚度。

图 13 给出了修正简化法计算的北京、唐山、苏州城区 956 个钻孔的 T_{S-MS} 分布图。可以看出, 现行规范的 II 类和 III 类、III 类和 IV 类场地的 T_{S-MS} 值有相当大的重叠区间。II 类场地 (264 个钻孔) T_{S-MS} 介于 $0.1 \sim 1.08$ s, 均值 $\pm$ 标准差 $= 0.47$ s $\pm$ 0.20 s; III 类场地 (683 个钻孔) 的 T_{S-MS} 介于 $0.18 \sim 1.48$ s, 均值 $\pm$ 标准差 $= 0.95$ s $\pm$ 0.17 s; IV 类场地 (9 个钻孔) T_{S-MS} 介于 $0.99 \sim 1.25$ s。齐文浩等^[14]收集了国内不同地区的剪切波速钻孔资料, 计算的现行规范的 II 类场地 (125 个钻孔) T_{S-MS} 介于 $0.057 \sim 0.849$ s, 均值为 0.374 s; III 类场地 (84 个钻孔) T_{S-MS} 介于 $0.592 \sim 1.463$ s, 均值为 0.966 s; IV 类场地 (12 个钻孔) T_{S-MS} 介于 $1.224 \sim 1.397$ s。

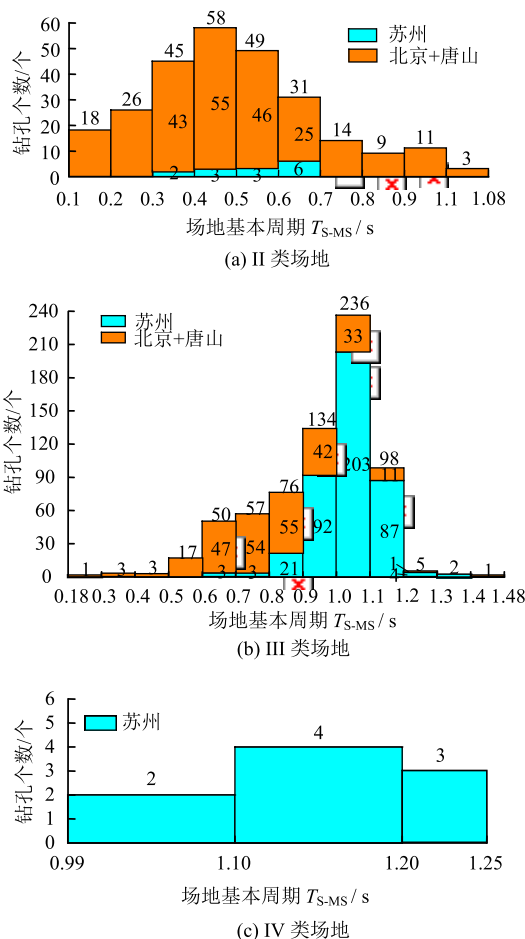


图 13 北京、唐山和苏州城区不同场地类别 (表 1) 的场地基本周期的分布

Fig. 13 Site fundamental period distributions of three site types (Table 1) in Beijing, Tangshan and Suzhou urban areas

场地分类的目的是对不同场地类别给出适当的场地相关的弹性设计反应谱。现行场地分类的不同类别场地 T_S 值的重叠区间较宽: 相当部分 II 类场地的 T_S 值比 III 类场地的 T_S 值大、III 类场地的 T_S 值

比 IV 类场地的 T_S 值大。这意味着 T_S 重叠区间的场地, 现行场地分类方法确定的设计地震动参数将与实际场地反应的地震动参数相悖。其主要原因是, 现行场地分类中 II 类场地的范围太宽, 跨越 NEHRP 场地分类 C、D 和 E 类; III、IV 类场地的界限不尽合理。另外, 苏州的 IV 类场地, 基本处于场地分类 III 类和 IV 类的边缘。

鉴于不同场地类别的界限并非完全清晰, 在界线两侧的狭窄区间内, 不同类别场地的 T_S 值重叠是必然的。由图 13 可知, 将 T_S 值近似视为正态分布, 取 90% 置信区间, 则有: II 类场地的 T_{S-MS} 值均值 $+1.64$ 倍标准差等于 0.798 s; III 类场地的 T_{S-MS} 值均值 ± 1.64 倍标准差等于 0.671 s、 1.229 s。由 4.3 节知: II 类场地 T_{S-MS}/T_{S-HV} 的均值等于 2.08 ; III 类场地 T_{S-MS}/T_{S-HV} 的均值等于 1.50 。据此关系, 将图 13 中 II 类、III 类场地的 T_{S-MS} 换算成 T_{S-HV} , 则 90% 置信区间的界限: II 类场地上限 0.798 s/ $2.08 = 0.383$ s; III 类场地下限 0.671 s/ $1.5 = 0.447$ s、上限 1.229 s/ $1.5 = 0.819$ s。即: II、III 类场地 T_S 界限值约 0.4 s, 这与图 14 给出的 II、III 类场地 T_S 界限值 0.4 s 基本一致。III、IV 类场地界限值应 ≥ 0.819 s, 这与表 5 中 Zhao^[10]和 Hassani 等^[26-27]给出的 IV 类场地 (软土) 的下限相近。

Pitilakis 等^[9]给出的场地类别 B1 类 (软岩) 场地大致对应于我国规范现行的 I₁ 类场地, C 类和 D 类场地大致对应于我国规范 III 类和 IV 类, C 类和 D 类的 T_S 界限值 1.4 s。Pitilakis 等^[9]给出的 T_S 值是按传统简化方法式 (7) 计算的 T_{S-CS} 值, 如换算成 $T_{S-HV} = 1.4$ s/ $1.5 = 0.933$ s。Verdugo 等^[7-8]给出与智利规范 DS61^[5]场地分类对应的 V_{S30-E} 和 HVSR 法确定的 T_{S-HV} 值: C 类场地对应 $V_{S30-E} \geq 300$ m/s 且 $T_{S-HV} < 0.5$ s、D 类场地对应 $V_{S30-E} \geq 180$ m/s 且 $T_{S-HV} < 0.8$ s、E 类场地对应 $V_{S30-E} < 180$ m/s 且 $T_{S-HV} > 0.8$ s。综上所述, 由不同途径给出的研究结果可知, III、IV 类场地 T_S 的界限值应在 0.9 s 左右。

依据强震记录加速度反应谱特性分析给出的 T_S 值, 应当真实地反映了地震波从基岩传播到地表过程中的滤波和放大效应。Zhu 等^[12]对日本 KiK-net 强震记录数据的研究表明, T_S 值是反映场地效应特征的最佳单一指标。Verdugo 等^[7-8]的研究表明: 2010 年智利 8.8 级 Maule 地震中, Concepción 场地的 $V_{S30-E} = 240$ m/s, 应属于 DS61 的 D 类场地, 但 $T_{S-HV} = 1.42$ s, 地震记录加速度反应谱的卓越周期 $T_p = 1.42$ s, 如将该场地修正为 E 类场地, 则地震记录给出的加速度反应谱特征与 DS61 的 E 类场地设

计反应谱是相当一致的。2008 年汶川地震太原盆地的太钢和小店台站强震记录, 加速度反应谱卓越周期分别为 1.8、2.8 s, 深厚覆盖层对长周期地震动的放大作用非常显著^[30]。

综上, 结合国内外现有场地分类的最新成果, 本文将 I_0 亚类和 I_1 亚类、 I_1 亚类和 II 类、II 类和 III 类、III 类和 IV 类、IV 类和特殊土类的 T_S 界限值分别取为 0.1、0.2、0.4、0.9、1.4 s。建议的三指标场地类别分类方案如表 7 所示。这里, T_S 作为确认场地分类的一个附加指标, 若所要求的 T_S 不满足, 则场地类别分类降为表 7 中的下一个类别。

表 7 建议的以 V_{S30} 、 H 和 T_S 为指标的场地分类方案
Table 7 Proposed seismic site classification according to the proxies of V_{S30} , H and T_S

场地类别	土层 V_{SE} 或 岩石 $V_S / (m \cdot s^{-1})$	土层厚度 H / m	场地基本周期 T_S / s
I_0	$V_S > 800$	—	$T_S < 0.1$
I_1	$800 \geq V_S > 500$	—	$0.1 < T_S < 0.2$
I_1	$500 \geq V_{SE} > 275$	< 5	
II	$500 \geq V_{SE} > 275$	≥ 5	$0.2 \leq T_S < 0.4$
II	$275 \geq V_{SE} > 170$	< 50	
III	$275 \geq V_{SE} > 170$	≥ 50	$0.4 \leq T_S < 0.9$
III	$V_{SE} \leq 170$	< 80	
IV	$V_{SE} \leq 170$	≥ 80	$0.9 \leq T_S \leq 1.4$
特殊土类	$V_S \leq 120$	$\geq 10 m$	

注: V_{SE} 的计算深度取覆盖土层厚度和 30 m 两者的较小值; $H < 3$ m 的场地, 如土层不作为持力层, 则场地划入 I_1 类。

4 结 论

分析了北京、苏州和唐山城区场地 956 个钻孔 V_{S20} 和 V_{S30} 的相关性; 采用弱震法和 HVSR 法估算了北京城区 170 个钻孔剖面的 T_S 值, 结合国内外对场地分类研究的相关成果, 结论如下:

(1) 场地的 V_{S30} 值比 V_{S20} 大 $24.4 m/s \pm 7.7 m/s$, 两者的线性关系显著, 拟合优度 $R^2=0.971$ 。

(2) 弱震法与 HVSR 法计算的 T_S 值基本相近, 相互佐证了其计算结果的可信性。当计算的 HVSR-频率曲线平坦、无显著峰值时, 可采用弱震法计算 T_S 值; 当弱震法计算的地表傅氏谱呈宽频带特征而无主峰时, 可采用 HVSR 法计算 T_S 值。

(3) 提出的 V_{SE} 和 H 双指标场地分类及 V_{SE} 、 H 和 T_S 的三指标场地分类方案, 对我国现行的不同场地类别的界限值进行了调整, 原方法的等效剪切波速界限值为 150、250 m/s, 分别调整为 170、275 m/s; 双指标场地分类法中, 将原方法中 $V_{SE} \leq 150 m/s$ 且 $H < 15 m$ 的场地划入 III 类场地、 $150 < V_{SE} \leq 250 m/s$

且 $H < 3 m$ 的场地划入 II 类场地。三指标场地分类方案增加 T_S 作为指标, 将 I_0 和 I_1 亚类、 I_1 亚类和 II 类、II 类和 III 类、III 类和 IV 类、IV 类和特殊土类的 T_S 界限值依次取为 0.1、0.2、0.4、0.9、1.4 s; 场地分类时三指标须同时满足, 此时, 双指标分类的部分 II 类、III 类场地, 有可能依次划入三指标场地分类的 III 类、IV 类场地。该场地类别分类的变化应是合理且偏于保守的。

5 进一步的讨论

建议的双指标和三指标场地分类方案, 均将 V_{S30} 作为场地分类指标。但一般建设工程场地的 V_S 测试深度未达到 30 m。因此, V_S 测试深度小于 30 m 时, 如何估算 V_{S30} 值? 另外, 走时等效剪切波速的计算深度从地表 20 m 延伸到地表 30 m 时, V_{S30} 较之 V_{S20} 的变异性是增大或减小? 如何提高 V_S 的测试精度? 不具备采用场地反应分析确定场地基本周期 T_S 的估算, 是否有合理的简化方法确定 T_S 值? 这些都是需要进一步研究的基础性工作。

目前, 国内外学者已提出多种模型估算 V_S 测井深度小于 30 m 时的场地 V_{S30} 。Boore^[31]提出了地表至某一深度 Z 处的走时平均剪切波速 V_{SZ} 和 V_{S30} 相关性的 lg 尺度线性模型 (简称 Boore 模型)。Wang 等^[32]利用不同深度 Z_1 和 Z_2 处的走时平均剪切波速 V_{SZ1} 和 V_{SZ2} , 假设 V_{SZ} 与 Z 存在 lg 尺度的线性关系, 据此估算 V_{S30} (简称 Wang 模型)。Boore 模型的应用需有大量区域性波速测试钻孔资料; Wang 模型的应用无需有大量区域性波速测试钻孔资料。江志杰等^[33]采用 Boore 模型和 Wang 模型分析北京地区剪切波速测试深度 $Z > 30 m$ 的 460 个钻孔资料发现: Boore 模型外推 V_{S30} , $\lg(V_{SZ})$ 和 $\lg(V_{S30})$ 的 Pearson 相关系数 r 随 Z 增大而单调增大, $Z > 15 m$ 时, $r \geq 0.95$; $Z = 20 m$ 时, $r \geq 0.98$; $Z_1 \geq 10 m$ 和 $Z_2 \geq 20 m$ 时, $r \geq 0.97$ 。Yu 等^[34]等分析四川、甘肃 147 个强震动台阵场地钻孔波速资料表明: Boore 模型估计的 V_{S30} 与实测波速计算的 V_{S30} 的一致性很好, lg 尺度的标准差 $\sigma_{lg} = 0.079 6$ 。Xie 等^[35]分析了北京 479 个钻孔的波速测试资料, Boore 模型外推 V_{S30} 的结果与江志杰等^[33]的结果基本一致, 并提出基于第四纪土层深度估算 V_{S30} 的双折线模型。朱姣^[17]提出了剪切波速的逐步递推法, 深度 Z 处的 V_{SZ} 与深度 $Z+d$ 处的 V_{SZ+d} 的相关关系 $V_{SZ+d} = kV_{SZ}$, 依据苏州 383 个钻孔波速资料分析, 当 $Z \geq 20 m$ 时, 斜率 k 与 Z 存在很好的相关性, 判定系数 $R_k^2 \geq 0.9$ 。因此, 从北京、苏州的波速测试资料外推结果看,

以深度 $Z \geq 20$ m 的波速测试数据估算 V_{S30} 的可信度是比较高的。

陈卓识等^[36]针对剪切波速现场测试的不确定性, 依据现行规范的场地分类, 选择 6 个 I 类场地、3 个 II 类场地、9 个 III 类场地和 2 个 IV 类场地进行现场 V_S 测试的盲测对比, 测试深度依次为: I 类 10 m、II 类 30 m、III 类 40 m、IV 类 70 m; 每个钻孔分别重复进行 30 次单孔法的 V_S 测试。研究发现: 走时平均剪切波速 V_{SZ} 的变异系数与深度负相关, $Z \geq 20$ m 时 V_{SZ} 的变异系数小于 5%; 我国规范 III 类、IV 类场地的 V_{S20} 和 V_{S30} 的变异系数基本相等。另外, 剪切波 (S 波) 的初至拾取精度对计算场地的 V_S 值有显著影响。何先龙等^[37]回顾了 S 波初至拾取的各种方法, 提出了一种基于剪切波能量变化率时程曲线的多步自动拾取 S 波到时及计算 V_S 的方法, 以提高单孔法 V_S 测量精度。

场地基本周期 T_S 的精确计算仍是有待解决的一个基础性科学问题, 传统简化方法公式 (7) 和修正简化方法公式 (8) 计算的 T_S 值有可能严重高估场地 T_S 的真值。李瑞山等^[38]基于波动问题的物理本质, 建立子层周期贡献系数 χ 与阻抗比 α 和周期比 λ 的关系式, 提出了成层场地 T_S 值估算的新方法, 但需编程计算。文献^[19]表明: HVSr 法采用地震动记录确定的场地基本周期 (共振频率) 与长时地脉动 (环境地震噪声) 测量的场地基本周期 (共振频率) 是类似的。因此, 宜优先采用输入弱震记录进行土柱模型地震反应分析, 采用弱震法^[18]或 HVSr 法^[19]确定场地的 T_S 值; 也可采用 HVSr 法分析长时地脉动的三分量记录确定场地的 T_S 值。

参 考 文 献

- [1] SEED H B, UGAS C, LYSMER J. Site-dependent spectra for earthquake-resistance design[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1976, 66(1): 221-43.
- [2] International Building Code (IBC). International Code Council (ICC)[S]. Illinois: Country Club Hills, 2012.
- [3] Building Seismic Safety Council. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures[S]. Washington: National Institute of Building Sciences, 2015.
- [4] CODE P. EUROCODE 8. Design of structures for earthquake resistance part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [5] DS61 Decreto Supremo. Diseño sísmico de edificios[S]. [S. l.]: Diario Oficial de Chile, 2011.
- [6] TBCJ. BSLJ. The building standard law of Japan[S]. Tokyo: [s. n.], 2007.
- [7] VERDUGO R. Seismic site classification[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2019, 124(3): 317-329.
- [8] VERDUGO R, OCHOA-CORNEJO F, GONZALEZ J, et al. Site effect and site classification in areas with large earthquakes[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2019, 126(11): 105071.
- [9] PITILAKIS K, RIGA E, ANASTASIADIS A. New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2013, 11(4): 925-966.
- [10] ZHAO J X, IRIKURA K, ZHANG J, et al. An empirical site classification method for strong motion stations in Japan using H/V response spectrum ratio[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2006, 96(3): 914-925.
- [11] LUZI L, PUGLIA R, PACO F, et al. Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to V_{S30} [J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2011, 9(12): 1877-1898.
- [12] ZHU C, PILZ M, COTTON F. Which is a better proxy, site period or depth to bedrock, in modelling linear site response in addition to the average shear-wave velocity?[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2020, 18(5): 797-820.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [14] 齐文浩, 薄景山, 王竞. 四类场地基本周期对比分析[J]. **世界地震工程**, 2016, 32(3): 48-52. QI Wen-hao, BO Jing-shan, WANG Jing. Comparison of fundamental periods of four type sites[J]. **World Earthquake Engineering**, 2016, 32(3): 48-52.
- [15] 薄景山, 翟庆生, 刘红帅, 等. 场地分类及其在我国的演变[J]. **自然灾害学报**, 2004, 13(3): 44-49. BO Jing-shan, ZHAI Qing-sheng, LIU Hong-shuai, et al. Site classification and its evolution in Chinese code for

- seismic design of buildings[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2004, 13(3): 44-49.
- [16] 陈国兴. 中国建筑抗震设计规范的演变与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(1): 1-12.
- CHEN Guo-xing. The evolution and prospect of the code for seismic design of buildings in China[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(1): 1-12.
- [17] 朱姣. 大城市尺度复杂深厚不均匀场地的非线性地震效应特征[D]. 南京: 南京工业大学, 2018.
- ZHU Jiao. Nonlinear seismic site effects of complex geography and deep sediment with different sedimentary environments at urban scale[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2018.
- [18] 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 Guo-xing, LIU Xue-ning, ZHU Jiao, et al. Spatial variation of the predominant periods of site and the amplifications of peak ground accelerations for deep sediment layers: a case study of Suzhou urban region[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(6): 996-1004.
- [19] NAKAMURA Y. What is the Nakamura method?[J] **Seismological Research Letters**, 2019, 90(4): 1437-1443.
- [20] HASHASH Y M A, PARK D. Nonlinear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment[J]. **Engineering Geology**, 2001, 62(1): 185-206.
- [21] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性动力人工边界及粘弹性边界元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
- LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 29(9): 1070-1075.
- [22] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 888-895.
- ZHAO Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(5): 888-895.
- [23] CHEN G X, RUAN B, ZHAO K, et al. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to strong earthquake motions[J]. **Journal of Earthquake Engineering**, 2018(9): 1-30.
- [24] CHEN G X, ZHAO D F, CHEN W Y, et al. Excess pore-water pressure generation in cyclic undrained testing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(7): 04019022.
- [25] HUNTER J A, CROW H L, BROOKS G R, et al. Seismic site classification and site period mapping in the Ottawa area using geophysical methods[M]. [S. l.]: [s. n.], 2010.
- [26] HASSANI B, ATKINSON G M. Site-effects for central and eastern north America based on peak frequency[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2016, 106(5), 2197-2213.
- [27] HASSANI B, ATKINSON G M. Applicability of the site fundamental frequency as a V_{S30} proxy for central and eastern North America[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2016, 106(2): 653-664.
- [28] CADET H, BARD P Y, RODRIGUEZ-MAREK A. Defining a standard rock site: propositions based on the KiK-net database[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2010, 100(1): 172-195.
- [29] KOTHA S R, COTTON F, BINDI D. A new approach to site classification: mixed-effects ground motion prediction equation with spectral clustering of site amplification functions[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 110: 318-329.
- [30] 徐扬, 赵晋泉, 李小军, 等. 基于汶川地震远场强震动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 Jin-quan, LI Xiao-jun, 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.
- [31] BOORE D M. Estimating $\bar{V}_{S30}$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depth < 30 m)[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2004, 94(2): 591-597.
- [32] WANG H Y, WANG S Y. A new method for estimating $V_s(30)$ from a shallow shear-wave velocity profile (depth < 30 m)[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2015, 105(3): 1359-1370.