

DOI: 10.11779/CJGE201906002

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

陈国兴^{1,2}, 刘薛宁^{1,2}, 朱姣^{1,2}, 金丹丹³, 许汉刚^{2,4}

(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. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 4. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于区域地震构造与活动性特征, 苏州存在遭遇近场中强地震、中远场强地震和远场大地震影响的风险。根据 250 m 深钻孔信息与 111 个不同深度原状土样的动三轴试验结果, 采用修正 Matasovic 本构模型描述土的动剪切模量折减和阻尼比增长特性是适宜的。基于 393 个钻孔的剪切波速资料, 以剪切波速不小于 700 m/s 的岩土层为地震基岩, 采用集中质量模型非线性分析法进行钻孔土柱地震反应分析, 提出了场地卓越周期的弱震预测法, 给出了场地卓越周期和地面峰值加速度 (PGA) 的空间变化特征: ①在近场中强地震、中远场强地震和远场大地震的基岩弱震动作用下, 场地卓越周期等值线图的空间变异性相似, 但 PGA 放大系数等值线图的空间变异性与基岩地震动特性密切相关。②基岩峰值加速度小于 0.1g 时, PGA 的大小主要取决于基岩峰值加速度; 反之, 基岩地震动频谱特性的影响不可忽略。
关键词: 深厚场地; 卓越周期; 弱震周期; PGA 放大效应; 等值线图

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)06-0996-09

作者简介: 陈国兴(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com。

Spatial variation of predominant periods of site and amplifications of peak ground accelerations for deep sediment layers: case study of Suzhou City

CHEN Guo-xing^{1,2}, LIU Xue-ning^{1,2}, ZHU Jiao^{1,2}, JIN Dan-dan³, XU Han-gang^{2,4}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering and Earthquake Disaster

Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University,

Zhenjiang 212013, China; 4. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the regional tectonic environment, the urban region of Suzhou City may be subjected to the effects of near-field mid-strong earthquakes, middle-field strong earthquakes and far-field large earthquakes. According to the cyclic triaxial test results of 111 undisturbed soil samples from a 250 m-deep borehole, the modified Matasovic model can be used to well characterize the tendency of reduction of shear modulus and increase of damping ratio. Based on the 393 sets of borehole shear wave velocity data, and by identifying the weathered rock layer with shear-wave velocity larger than 700 m/s as the seismic bedrock, the nonlinear 1D site response analysis is performed using a discretized lumped mass model. A method for evaluating the site predominant period using the weak motion records is proposed. The spatial variation of the predominant periods and the amplifications of peak ground accelerations (PGAs) in the urban region of Suzhou City are given: (1) Using the seismograms during the near-field mid-strong earthquakes, the middle-field strong earthquakes and the far-field large earthquakes as the bedrock motions, the contour maps of the predominant periods of site are quite similar, but the spatial variation of the amplification of PGAs is closely related to the characteristics of bedrock motions. (2) The PGAs are mainly related to bedrock motion intensities less than 0.10g, otherwise, the effects of frequency characteristics of bedrock motions on the PGA amplifications are significant.

Key words: deep site; predominant period; weak-motion site period; PGA amplification; contour map

0 引言

国内外许多震害调查显示, 深厚松软的沉积层对于地震动及高层建筑的震害有重大的影响。如 1967

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378258; 51708256)

收稿日期: 2018-03-19

年委内瑞拉 Ms6.4 级地震中,震中距为 56 km 的委内瑞拉加拉加斯震害严重,建在 160~230 m 厚冲积土层上的 14~24 层高层建筑有 75% 遭破坏,而建在 230~300 m 厚冲积土层上的高层建筑破坏率更是高达 80%^[1]。1970 年土耳其 Ms7.2 级地震,距震中 135 km 的盖迪兹地区地表地震烈度为 IV 度至 V 度,而该地区位于几百米厚冲积土层上的 Fiat-Tofas 汽车厂的地震烈度达到 VIII 度。1985 年墨西哥城西南 300 km 以远的太平洋海岸 Michoacan Ms8.1 级特大地震,致使墨西哥城中心区位于 150~300 m 厚覆盖层上的 100 多栋高层建筑完全倒塌,死亡人数超千人,直接经济损失达 40 亿美元^[2]。

这些严重的震害现象使得深厚松软场地地震效应的研究得到了越来越多专家和学者的关注,如:1985 年 Michoacan 地震,墨西哥城古湖区地震波相应于丘陵区被放大 8~50 倍,该放大现象主要是古湖区局部岩土沉积条件所致^[3]。Campillo 等^[4]认为正是建筑物基本周期接近场地卓越周期,导致地震过程中上部结构和场地发生“类共振”现象,致使墨西哥城在 1985 年 Michoacan 地震中震害严重。Hashash 等^[5]通过对密西西比湾松散沉积土进行一维非线性地震反应分析发现,地震波在深厚软土层中的传播会导致其长周期成分大大增加,进而使地表地震动卓越周期变长。

从以上研究可以发现,深厚松软场地之所以震害严重,最根本原因是易出现地震动与场地土的“类共振”现象及其对长周期地震动的显著放大作用。陈国兴^[6]等针对苏州深厚松软场地地震效应的初步研究发现:地表设计地震动参数值远大于现行国家抗震规范的取值;类似苏州城区的深软场地,应充分考虑远场大地震效应的影响。第四纪沉积层是苏州建筑物的主要持力层,其为一套层序清楚、黏性土与砂层相互叠置的松软沉积物,其厚度受基底构造古地貌形态控制,一般为 150~260 m,呈现出由西向东、由南向北增厚的特点。文献[7]详细地给出了基于钻孔资料的苏州城区三维地层特征。图 1 展示了剪切波速测试钻孔位置及其在苏州各工程地质区内的分布概况^[7-8]。苏州城区以沉积平原为主,仅西部局部区域存在丘陵地貌。故采用多质点集中质量土柱模型的一维非线性方法对 393 个钻孔进行非线性地震反应分析,探讨深厚松软场地卓越周期及 PGA 放大效应的空间变异性。

1 钻孔剖面模型的建立

1.1 地震基岩面的选取

朱姣等^[9]在对苏州场地多个钻孔剖面非线性地震

反应分析得出的地表峰值加速度进行比较之后认为:苏州场地宜采用剪切波速不小于 700 m/s 的土层作为地震基岩。据此,将地震基岩面设在剪切波速 700 m/s 的土层顶面,根据文献[7, 8]的钻孔剪切波速逐步外推法,将实际钻孔底部剪切波速由不小于 500 m/s 逐步外推至 700 m/s。在钻孔剪切波速外推后的 393 个钻孔中,地震基岩的深度小于 100 m 的钻孔 24 个,大于 200 m 的钻孔共 97 个,平均深度为 181 m。图 2 给出了苏州研究区地震基岩深度等值线图。研究区西部为丘陵地区,地震基岩深度起伏较大;东部以冲积平原为主,地震基岩深度普遍超过 200 m。

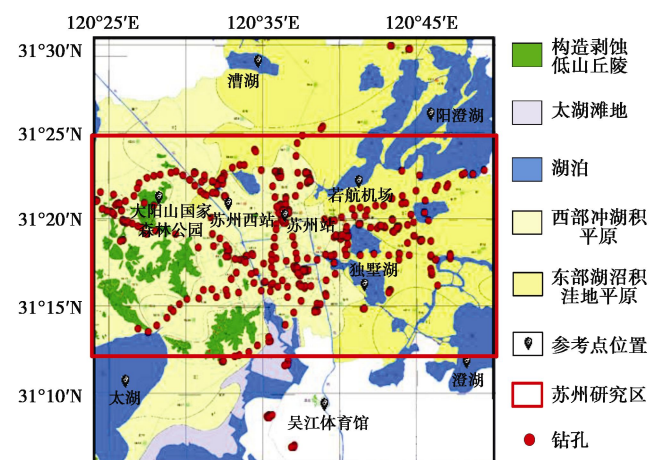


图 1 苏州工程地质分区及波速测试孔分布图

Fig. 1 Engineering geological zonings and locations of borehole shear wave velocity measurements of Suzhou City

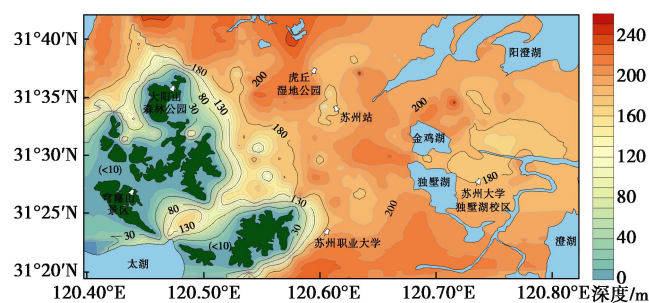


图 2 苏州城区地震基岩等深线图

Fig. 2 Contour map of depth of seismic bedrock in urban region of Suzhou City

1.2 土柱模型与土体的计算参数确定

根据苏州城区 393 个钻孔剖面信息和剪切波速测试资料,采用场地反应分析专业软件 DeepSoil,建立 393 个钻孔剖面土柱模型。波速外推段的土层,是利用邻近钻孔土层的相似性,将邻近实测波速达到 700 m/s 及以上的钻孔土层信息,补充至实测波速不足 700 m/s 的钻孔剖面中外延而成。

根据所有钻孔剖面的土层信息，苏州地层大致可分为 16 种土类（图 3）。选取覆盖层深达 250 m 的典型场地，进行现场钻探、测波速，取得 111 个不同深度各类土的原状土样，利用美国 GCTS 大型循环三轴仪，开展了剪应变 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 量级的动剪切模量和阻尼比试验^[10-11]，各类土代表性土样的动剪模量比 G/G_{\max} 、阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ 的关系曲线如图 3 所示。

DeepSoil 采用 Matasovic 骨架曲线，利用扩展 Masing 法则构造土体加、卸载时的应力 - 应变滞回圈，模拟土体循环加载卸载过程，其骨架曲线可表示为^[5]

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s}, \quad (1)$$

式中， τ ， γ 分别为剪应力、剪应变， β ， s 为模型参数， G_{\max} 为初始最大剪切模量， γ_r 为参考剪应变。

采用 DeepSoil 软件同时基于模量比与阻尼比曲线

的最优拟合法，拟合各类土的平均 G/G_{\max} 和 λ 曲线，得到 Matasovic 本构模型计算参数，如表 1 所示。

表 1 各类土本构模型参数

Table 1 Matasovic model parameters of soils				
土层名称	取样深度/m	s	β	$\gamma_r / \%$
杂填土		0.930	1.560	0.1546
粉质黏土 1	3~3.7	1.035	1.515	0.1078
砂质粉土	10~12	1.095	1.560	0.1268
粉质黏土 2	16~18	1.035	1.515	0.1268
粉质黏土夹粉土	30~31	0.990	1.335	0.1390
粉砂 1	46~46.5	0.930	1.530	0.2832
粉质黏土 3	46.5~48	0.975	1.440	0.1738
粉细砂夹粉质黏土	68.7~70.2	0.945	1.530	0.2384
黏土 1	76~78	0.990	1.455	0.1686
粉质黏土 4	87.9~88.1	1.020	1.485	0.2210
中粗砂	99~99.4	0.975	1.125	0.3198
粉质黏土 5	100~101.5	1.050	1.515	0.2206
细砂	106.8~108	0.990	1.425	0.2884
粉质黏土 6	156~157	1.110	1.605	0.2618
粉砂 2	174~177	0.945	1.290	0.3452
黏土 2	194.7~195	0.930	1.560	0.2768
风化泥岩	231.4~231.7	0.840	0.465	0.2840

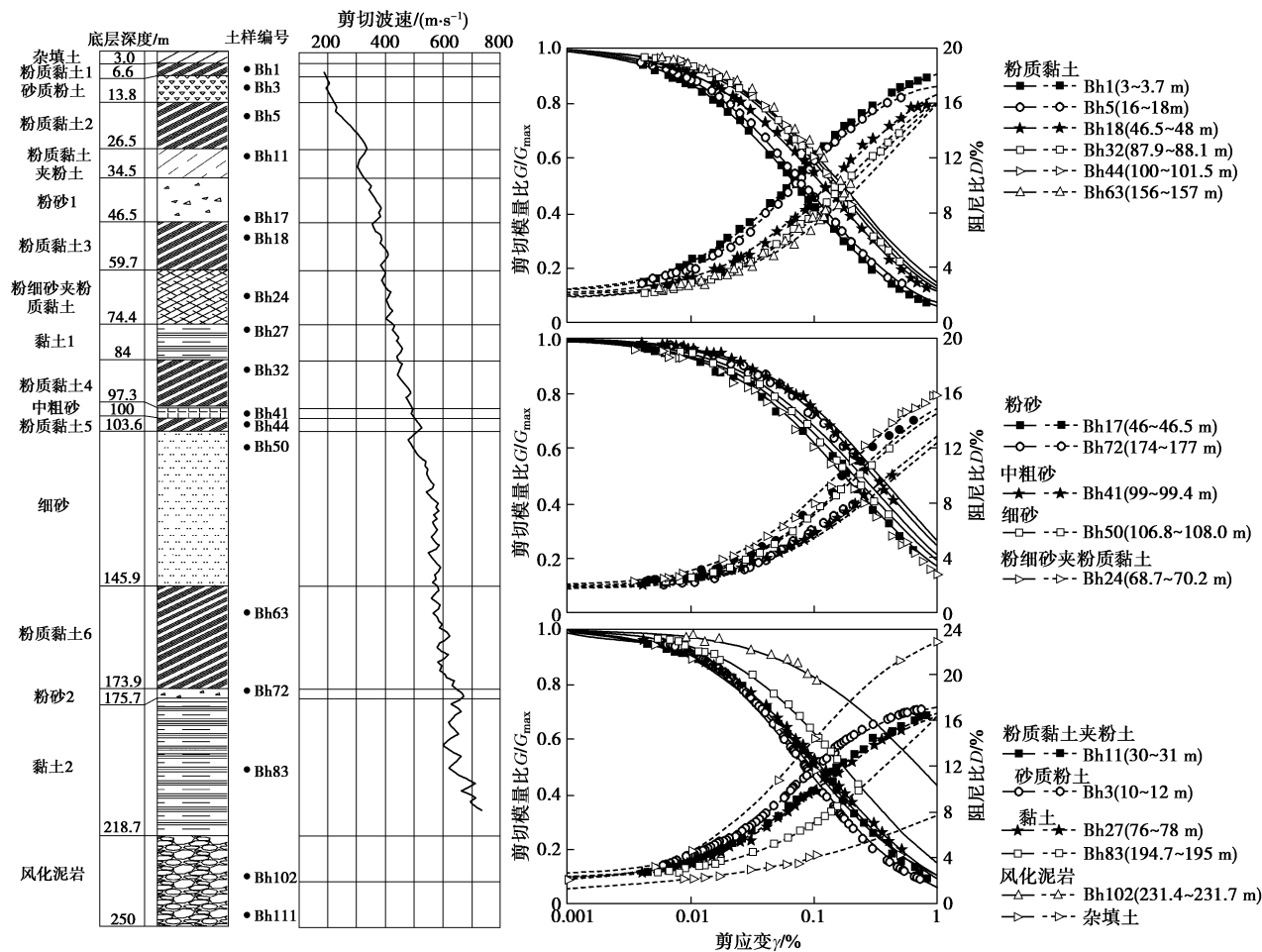


图 3 苏州深厚第四纪土钻孔剖面与代表性土样的模量比和阻尼特性试验结果

Fig. 3 Sequence stratigraphic structures of quaternary deep sediment layers and shear-wave velocity profile in urban region of Suzhou City, shear modulus reductions (G/G_{\max}) and damping ratios (λ) versus shear strain amplitudes (γ) for typical soil samples

2 苏州研究区潜在地震威胁与输入地震动选取

依据《中国及邻区地震震中分布图》^[12]: 苏州研究区及邻区曾发生 1731 年昆山南 5 级地震、1839 年宜兴东 5 级地震、1872 年太湖 5.5 级地震、1974 年 5.5 级和 1979 年溧阳 6.0 级地震; 1615 年南通 5 级地震、1990 年常熟—太仓 5.1 级地震。因此, 苏州城区存在遭遇近场 6.0~6.5 级中强震地震威胁的可能性。

南黄海海域北纬 32°~34°、东经 121°~123°范围内集中分布着 16 次 6 级以上地震, 含 7 级 1 次; 而北纬 34°以北的广阔海域仅发生过 4 次 6 级以上地震。南黄海 6 级以上历史地震区距苏州市辖区约 150~300 km; 最大历史地震为 1846 年 7 级地震, 震中距离苏州城市中心约 270 km^[12]。因此, 苏州城区存在遭遇南黄海海域 7.0~7.5 级中远场强震威胁的可能性。

郯庐地震带是中国东部规模最大的地震带, 曾发生过 1668 年郯城 8.5 级大地震, 震中离苏州城市中心约 470 km, 当时苏州的地震烈度为 6 度^[12]。有关地震专家指出: 郯庐地震带未来可能发生的特大地震, 很可能比历史上的郯城特大地震更加靠近苏州研究区, 约 300~400 km。因此, 苏州城区存在遭遇郯庐地震带 8.0 级以上远场特大地震威胁的可能性。

大量震害表明: 地震动特性是影响场地地震效应的重要因素。鉴于苏州地区缺乏基岩强地震动记录, 依据上述的苏州城区潜在地震威胁, 选用国内外 4 次

地震 5 个台站的 5 条水平向加速度记录作为基岩输入地震动。5 个输入地震动的详细信息如表 2 所示, 其中地震动的强度以峰值加速度和 Arias 强度 (AI) 来表征, 持时时以 Arias 强度的 5%~95% 的时长 (D_{5-95}) 来表征, 频谱特征以卓越周期 (T_p , 阻尼比为 5% 的加速度反应谱最大值所对应的周期值)^[13]和平均周期 (T_m , 0.25~20 Hz 范围傅氏幅值谱周期的均值)^[14]来表征, 输入地震动加速度时程及其加速度反应谱如图 4 所示。

从图 4 可以看出, PKAC 台站记录的加速度反应谱的谱形具有单峰、窄带频谱特征, 高频发育; 而其余 4 个台站记录的加速度反应谱的谱形具有多峰、宽带频谱特征, 中长周期发育, 且集集地震 04 号余震 CHY016 记录的频带最宽。CHY016、CHY044 与 PKAC 台站记录的地震震级、震中距离相近, 但这两次地震记录的地震动特性的差异相当大。

3 三类地震环境下苏州研究区场地地震反应特性的空间变异性

3.1 场地卓越周期的弱震预测法

地震工程领域早已广泛接受由 Seed 等^[13]提出的用于表征地震动频谱特性的物理指标“卓越周期”, 并将基岩地震动经由土层传播到地表后的地震动卓越周期 (T_p) 作为场地卓越周期 (T_s) 的近似值。据此方法确定场地卓越周期, 其值的大小无疑与场地所受地震动强度和频谱特性密切相关。国内外通常采用 $T_s =$

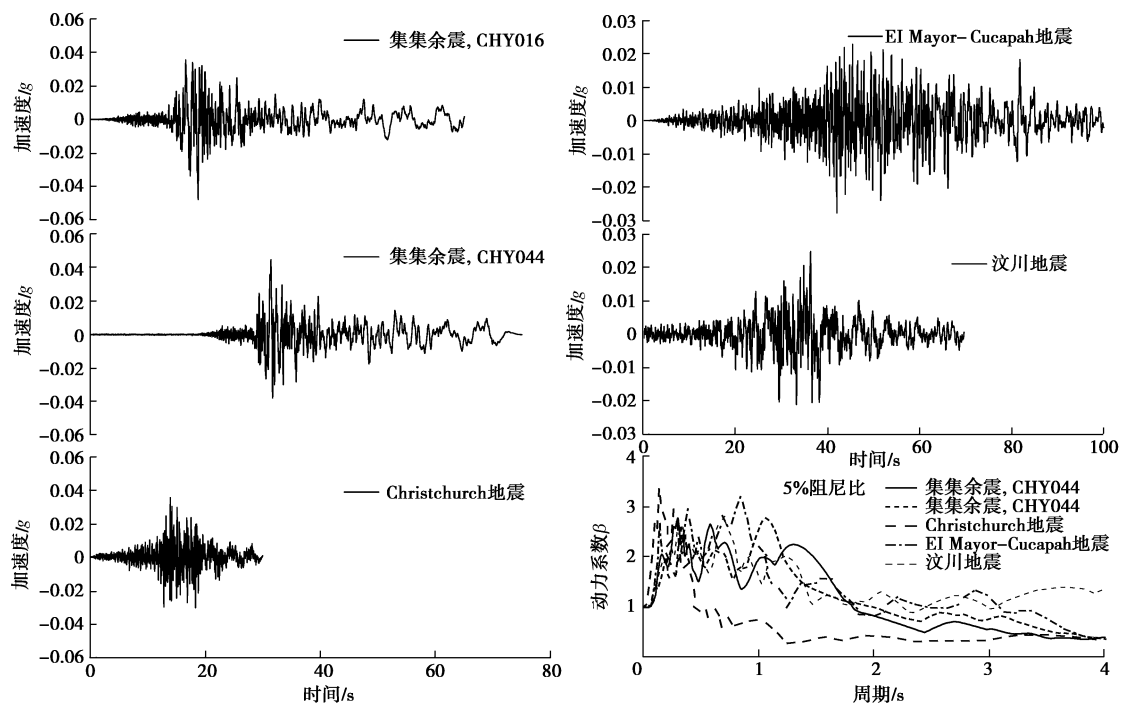


图4 基岩地震动加速度时程曲线和规范化加速度反应谱

Fig. 4 Acceleration time-histories and normalized spectral accelerations of bedrock motions

表 2 输入地震动信息

Table 2 Details of input bedrock motions used for site response analysis										
地震(时间)	M_s	台站	震中距 /km	分量	PGA /g	AI /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	T_m /s	D_{5-95} /s	采样率 /Hz
台湾集集地震 04 号余震 (1999 年)	6.2	CHY016	79.770	NS	0.048	0.050	0.30	0.950	40.76	250
台湾集集地震 04 号余震 (1999 年)	6.2	CHY044	69.883	NS	0.045	0.043	1.06	1.060	35.87	200
新西兰 Christchurch 地震 (2011 年)	6.3	PKAC	58.300	S76E	0.035	0.016	0.14	0.366	13.16	200
墨西哥 EI Mayor-Cucapah (2010 年)	7.2	Blythe-Fire	141.000	NS	0.028	0.043	0.84	0.900	52.62	200
汶川地震(2008 年)	8.0	静宁	480.000	EW	0.025	0.021	0.70	1.186	33.02	200

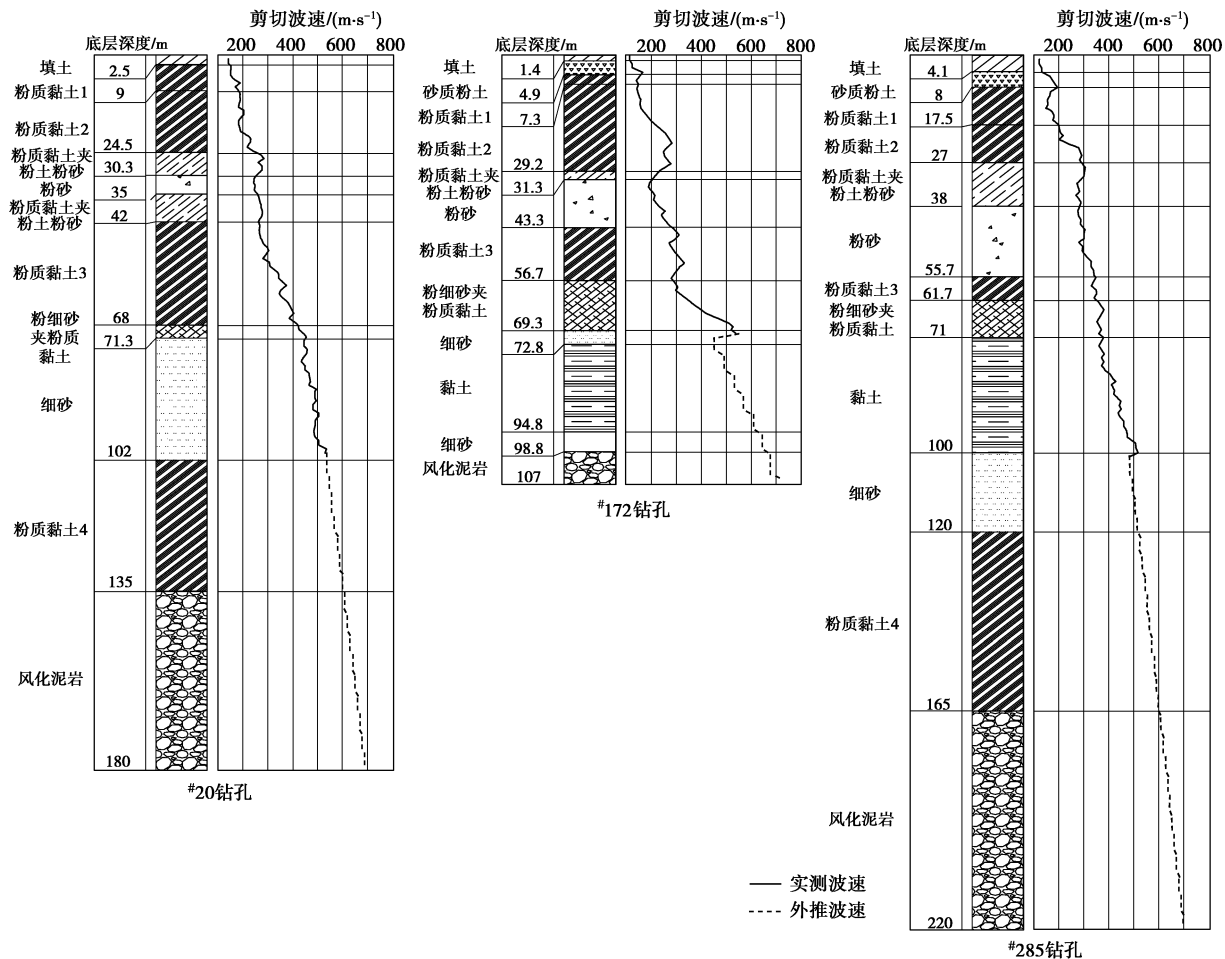


图 5 3 个代表性钻孔的土层与剪切波速剖面

Fig. 5 Sequent stratigraphic structures of deep sediment layers and shear-wave velocity profile at three borehole locations

$4H/V_s$ (H 为地表至基岩的土层厚度, V_s 为土层的剪切波速) 计算场地卓越周期。这样计算的 T_s 无疑是场地的基本固有周期 (fundamental natural site period) 或是场地受微震 (microtremor) 或弱震 (weak motion) 影响时场地卓越周期 T_s 的近似值。该表达式是基于单层均质土层推导出的解析解, 用于非单层均质土层时, 为了简便, 在工程实践中直接采用平均剪切波速代替单层均质土层的剪切波速, 但其可信度饱受质疑。

为了较为精确地预测苏州城区场地卓越周期的近似值, 比较了在输入不同特性的基岩地震动加速度时程时地表地震动的卓越周期与场地卓越周期 (频率) 的相关性。图 5 给出了 3 个代表性的钻孔剖面 and 剪切波速信息: 地震基岩深度 180 m 的东部#20 钻孔、深

度 220 m 的东部#285 钻孔及深度 107 m 的西部#172 钻孔。对比 3 个钻孔地震反应计算得到的土层最大峰值剪应变可知: 输入集集余震 CHY016 记录时, #20 钻孔为 0.2% (约 20 m 深处), #172 钻孔为 0.08% (约 35 m 深处), #285 钻孔为 0.15% (约 20 m 深处); 输入 EI Mayor-Cucapah 地震和汶川地震记录时, #20 钻孔为 0.04% (约 20 m 深处), #172 钻孔为 0.03% (约 35 m 深处), #285 钻孔为 0.04% (约 20 m 深处)。这表明: 3 个钻孔剖面的最大剪应变水平均处于非线性弹性至弹塑性状态。由此推测, 受近场 6.0~6.5 级中强震、中远场 7.0~7.5 级强震和远场 8.0 级以上大震影响时, 苏州城区场地总体上处于非线性弹性状态, 就场地效应而言, 均属于弱震影响, 据此得到的场地

卓越周期属于弱震卓越周期。在集集地震 04 号余震、Christchurch 地震和汶川地震加速度记录作用下,这 3 个钻孔的地表谱加速度和傅氏幅值谱分别如图 6、7 所示。从图 6 可以看出,对于地震动特性差异相当大的 3 条地震加速度记录,3 个钻孔的地表谱加速度的谱形与输入基岩地震动的谱加速度谱形颇为相似,尤其是输入集集余震记录时,地表谱加速度峰值对应的周期值与基岩地震动谱加速度的卓越周期 (T_{pb}) 值相比,两者几乎没有偏差。这意味着,若以地表谱加速度最大峰值来判断场地卓越周期 (T_{ps}),输入同一条地震记录时,3 个土层条件差异很大的代表性钻孔的 T_{ps} 值只会发生在基岩地震动的 T_{pb} 值处。计算结果的统计分析表明:若以地表谱加速度最大峰值所对应的周期作为场地卓越周期,基岩输入 Christchurch 地震 PKAC 加速度记录时,计算的 T_{ps} 值与输入基岩地震动的 T_{pb} 值基本相同的钻孔数量占总数的 96.43%,而在基岩输入集集地震 04 号余震 2 个台站的加速度记录时,计算的 T_{ps} 值与输入基岩地震动的 T_{pb} 值基本相同的钻孔数量分别占 91.09% 和 87.02%。虽然苏州东西部地区的场地特性差异性相当大,但在输入相同的基岩地震动且其峰值加速度较小时,计算给出的 T_{ps} 值基本相同,很显然,该方法所确定的 T_{ps} 值并不能代表场地卓越周期值。同样,场地卓越周期作为表征场地固有属性的一个物理指标,在输入不同特性的基岩地震动且其峰值加速度较小(弱震)时,计算给出的同一钻孔剖面的 T_{ps} 值却差异很大,这显然也是不合理的。从 3 个典型钻孔的地表加速度傅氏幅值谱中可以看到,深厚场地对 3 个输入地震动不同频段都有着不同程度的放大作用,但其放大效应显著的卓越频带或频率差异很大。

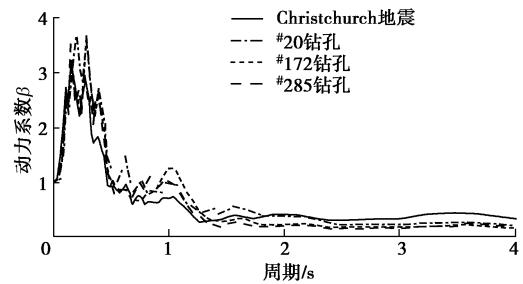
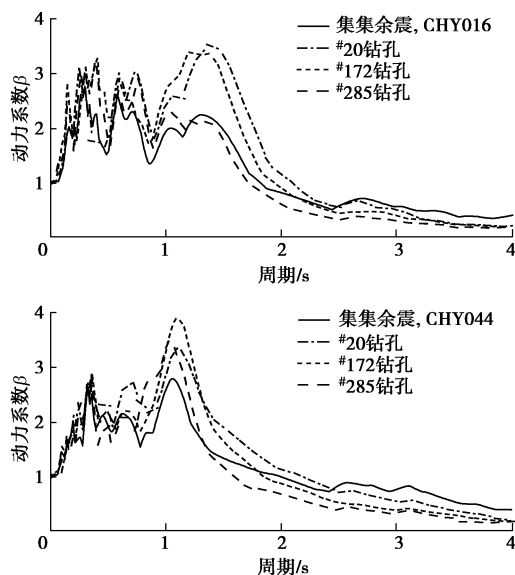


图 6 3 个典型钻孔的输入基岩地震动和地表谱加速度的比较

Fig. 6 Comparison of acceleration response spectra of bedrock motions and ground motions for typical three boreholes

为了区别于输入地震动本身的傅氏幅值谱峰值,将明显由于土层特性所产生幅值放大现象的峰值定义为特征峰值。图 7 的傅氏幅值谱反映了场地放大效应的 3 类典型特征。第一类: Christchurch 地震记录的高频成分丰富,但低频成分很不发育,地表与基岩地震动的加速度傅氏谱谱形基本类似,地表加速度傅氏谱具有宽频带放大的特征,存在多个幅值相近的峰值,且其对应的频率均与输入基岩地震动傅氏谱最大峰值对应的频率不同。鉴于场地弱震卓越周期的唯一性,不能在该情况下识别出特征峰值。第二类:集集余震 CHY016 和 CHY044 台站加速度记录的中长周期成分比较发育,地震波经过土层传播到地表,可以很清晰地发现,地表加速度傅氏谱相应于基岩输入加速度傅氏谱具有窄频带放大的特征,且在该频带中有一个或多个幅值相近且其频率与输入地震动卓越频率不同的峰值,则可从地表加速度傅氏谱的这些峰值中选择对输入基岩加速度傅氏谱放大效应最大(傅氏幅值谱传递函数值最大)的峰值作为特征峰值,如图 7 (e) 的 0.83 Hz 处(#172 钻孔)、图 7 (f) 的 1.31 Hz 处(#285 钻孔)、图 7 (g) 的 0.73 Hz 处(20 号钻孔)和图 7 (h) 的 0.84 Hz 处(#172 钻孔)。第三类:地表加速度傅氏谱具有很明显的单峰,该峰值的频率与基岩加速度傅氏谱最大峰值的频率一致。若该单峰附近不存在放大效应比较显著的窄频带,则可认为输入地震动的卓越频率与场地卓越频率恰好一致,即该单峰为特征峰值,如图 7 (d) 的 0.64 Hz 处(#20 钻孔);如该单峰邻近的窄频带放大效应也比较显著,则不能认定该单峰作为特征峰值,如图 7 (i) 的 1.01 Hz 处(#285 钻孔)。据此,特征峰值对应频率的倒数即为场地的卓越周期。

3.2 场地卓越周期的空间变异性

研究发现,集集 04 号余震 CHY016 台站记录、2010 年 EI Mayor-Cucapah 地震 Blythe-Fire 台站记录及 2008 年汶川地震静宁台站记录,可分别代表 6~6.5 级近场中强震、中远场 7~7.5 级强震和远场 8 级以上

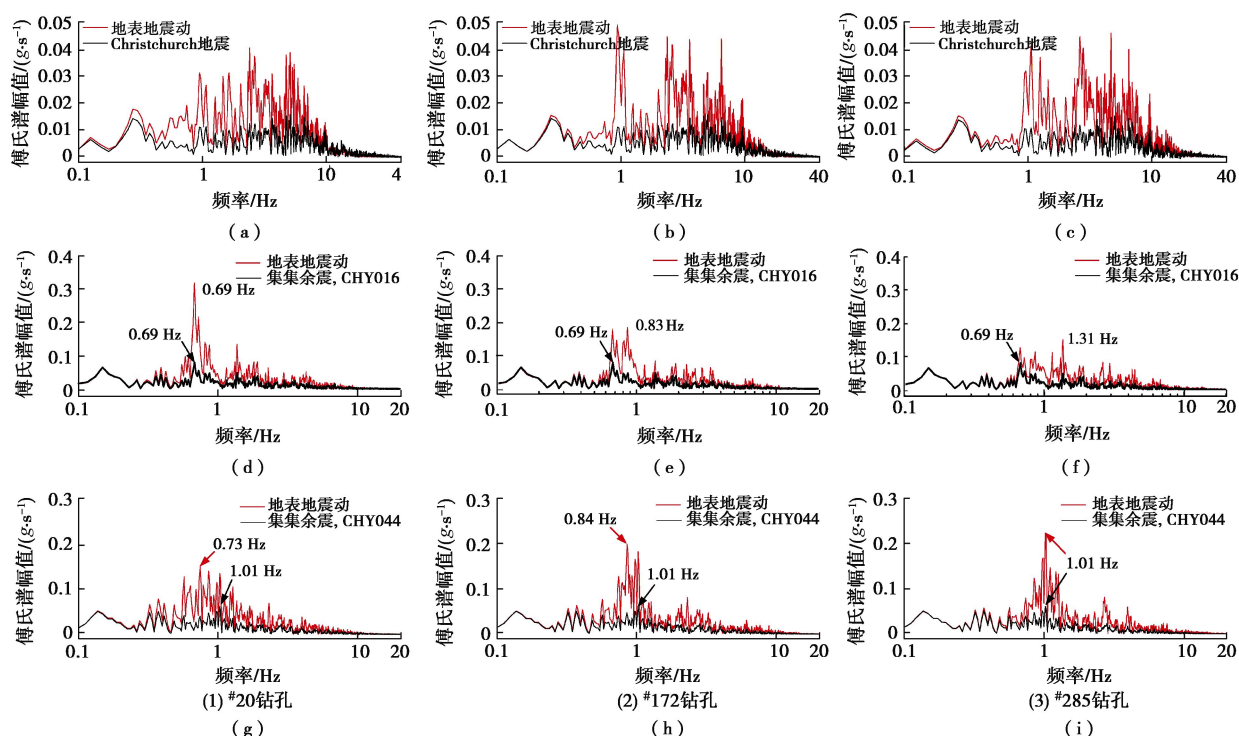


图 7 3 个典型钻孔的基岩地震动与地表加速度的傅氏谱对比

Fig. 7 Comparison of acceleration Fourier amplitude spectra of bedrock motions and ground motions for typical three boreholes

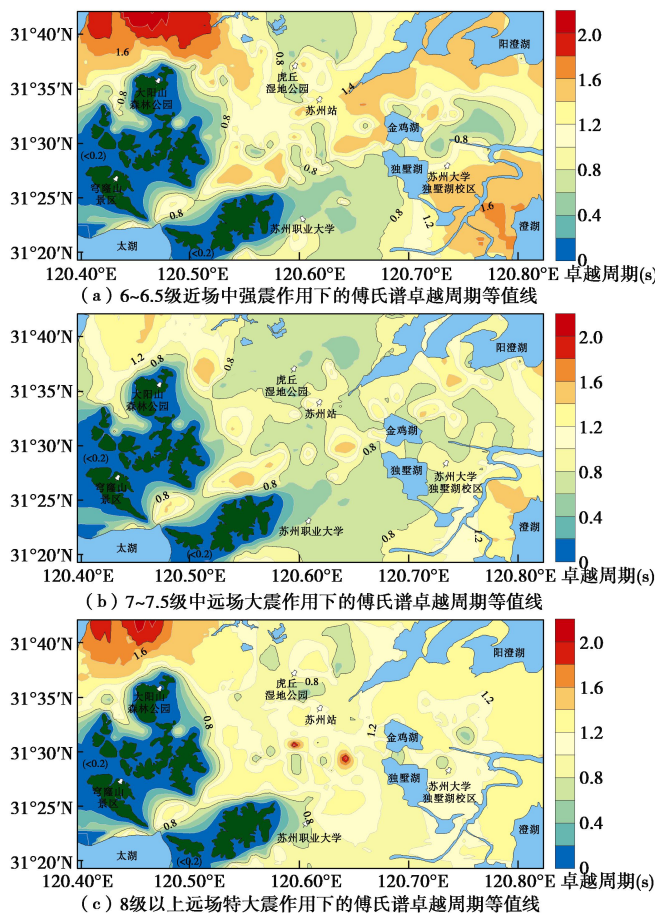
大震的加速度记录, 地表加速度傅氏幅值谱中可以识别出上述的特征峰值。三类地震环境下苏州城区场地的卓越周期如图 8 所示。由图 8 (a)、(b)、(c) 可知: 三类地震环境下苏州城区场地卓越周期的空间分布较为一致, 总体上反映出苏州城区场地卓越周期的空间变异性特征。城区南部和北部的场地卓越周期较小, 大致介于 0.8~1.0 s; 城区西北角和环阳澄湖、澄湖区区域场地卓越周期较长, 约为 1.2~1.4 s, 西北角局部甚至可达 1.6 s 以上。

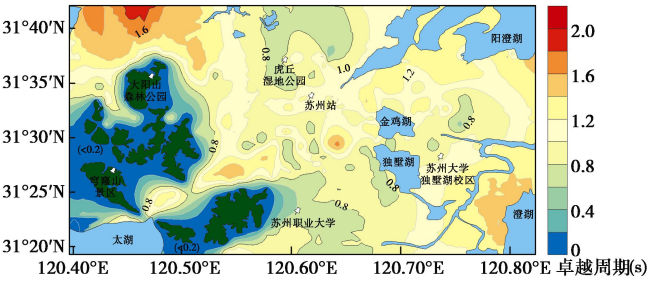
另外, 由于集集余震 CHY016 台站记录的地震动强度最大, 浅层土体的剪应变水平达到 0.1%~0.2%, 局部土层进入弹塑性状态, 而 EI Mayor-Cucupah 地震 Blythe-Fire 台站和汶川地震静宁台站记录的地震动强度较小, 浅层土体的应变水平未超过 0.04%, 土层基本处于非线性弹性状态。因此, 整体而言, 采用集集余震 CHY016 台站记录时场地卓越周期也相对较大。场地弱震卓越周期值虽受输入地震动特性的影响, 但该影响并不显著, 故图 8 (d) 给出了三类地震环境下的卓越周期均值等值线, 一定程度上能较好地反映出苏州城区卓越周期分布区间。

3.3 PGA 放大系数的空间变异性

三类地震环境下苏州场地的 PGA 放大系数等值线如图 9 所示。可以看出, PGA 放大系数的空间分布规律不太明显。但就苏州城区总体而言, 采用峰值加

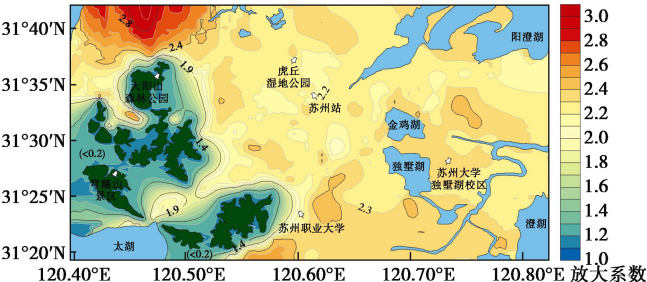
速度相近的 EI Mayor-Cucupah 地震 Blythe-Fire 台站记录和汶川地震静宁台站记录计算得到的 PGA 放大系



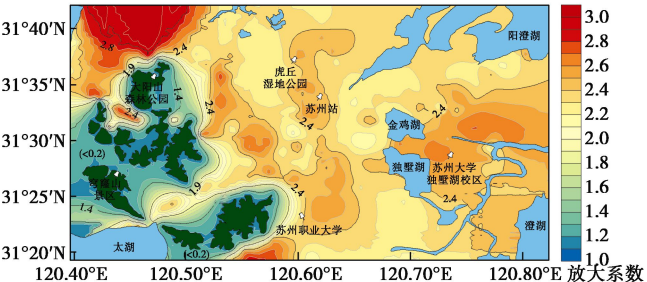


(d) 建议的场地卓越周期均值等值线
图 8 苏州城区场地卓越周期等值线图

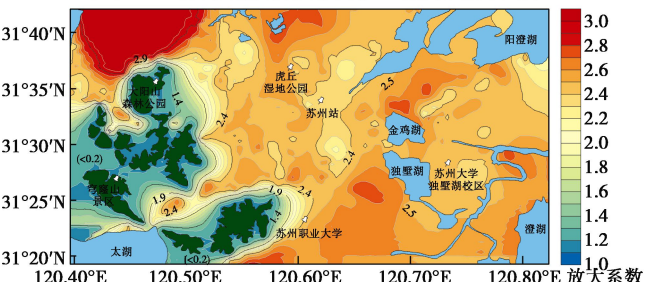
Fig. 8 Contour maps of site predominant periods for urban region of Suzhou City obtained using weak seismograms



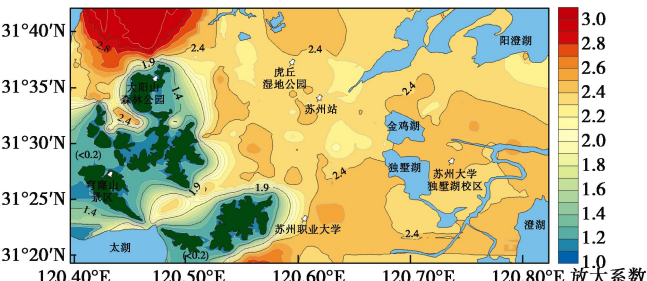
(a) 6~6.5级近场中强震作用下的PGA放大系数等值线



(b) 7~7.5级中远场大震作用下的PGA放大系数等值线



(c) 8级以上远场特大震作用下的PGA放大系数等值线



(d) 建议的PGA放大系数均值等值线
图 9 苏州城区 PGA 放大系数等值线图

Fig. 9 Contour maps of PGA magnification factors for urban region of Suzhou City obtained using weak seismograms
数平均值分别为 2.41 和 2.46, 西北角局部可达 2.8 以上; 采用峰值加速度较大的集集 04 号余震 CHY016 台站记录计算得到的 PGA 放大系数平均值为 2.26, 西

北角局部可达 2.4 以上。图 9 (d) 也给出了三类地震环境作用下计算的 PGA 放大系数均值等值线, 总体上, 城区西北角和环阳澄湖、澄湖区域的 PGA 放大效应显著。

为了进一步探究基岩地震动峰值加速度对于深厚软土地 PGA 放大系数的影响, 选取地震基岩深度 190~240 m 的 50 个钻孔, 将表 2 中的 5 条加速度记录的峰值加速度调整为 0.01g~0.15g、间隔 0.01g, 进行场地地震反应分析, 计算结果如图 10 所示。当基岩峰值加速度为 0.01g 时, 50 个钻孔的 PGA 值标准差仅为 0.0019g; 而当基岩峰值加速度增大到 0.15g 时, PGA 标准差为 0.0191g, 增大了 10 倍以上。对于频谱特性差异较大的 5 条输入基岩地震动时程, 当基岩地震动峰值加速度小于 0.1g 时, 计算给出的苏州城区东部场地的 PGA 离散较小, 与基岩输入地震动频谱特性的关联性并不密切; 而当输入基岩地震动峰值加速度大于 0.1g 时, 计算给出的苏州城区东部场地的 PGA 离散较大, 且随着输入峰值加速度的增大而愈加分散, 其主要原因是由于输入基岩地震动峰值加速度越大, 土体的非线性越显著从而使深厚软土地的非线性地震效应愈发强烈, 此时 PGA 的大小与输入地震动的加速度峰值与频谱特性均有密切关系。

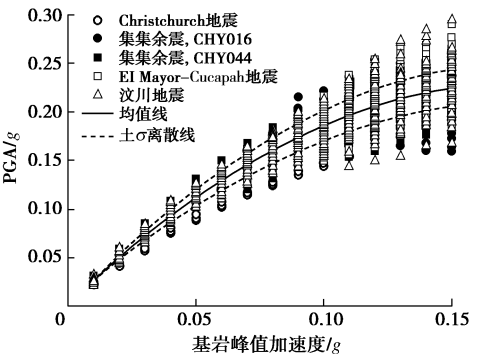


图 10 苏州东部场地的基岩峰值加速度与地表 PGA 的比较
Fig. 10 Comparison between peak accelerations of bedrock motions and peak ground accelerations

4 结 论

基于区域地震构造与活动性特征和苏州城区大量钻孔的剪切波速实测资料、工程地质特征及 250 m 深钻孔原状土样的动剪切模量与阻尼比试验结果, 通过 393 个钻孔剖面非线性地震反应分析, 主要结果如下:

- (1) 提出了基于弱震影响的场地地震反应分析得出的地表加速度傅氏幅值谱的特征峰值预测场地卓越周期方法; 不同强度和频谱特性的弱震影响下给出的场地卓越周期值的一致性佐证了该方法的合理性。
- (2) 给出了近场中强震、中远场强震和远场大震

影响下苏州城区场地弱震卓越周期等值线图及其均值等值线图,不同特性弱震动影响下苏州城区的场地卓越周期空间分布特征较为相似,城区西北区、环太湖、澄湖、阳澄湖区的卓越周期较长,约1.2~1.4 s;而城南区、城北区卓越周期较短,约在0.8~1.0 s;中心城区的卓越周期分布的差异相对较大。

(3) 给出了近场中强震、中远场大震和远场特大地震影响下苏州城区PGA放大系数等值线图及其均值等值线图;输入基岩峰值加速度小于0.1g时,深软场地PGA的大小主要取决于基岩地震动峰值加速度的大小,而其频谱特性的影响不明显;但输入基岩地震动峰值加速度大于0.1g时,输入基岩地震动的强度和频谱特性对深软场地PGA的放大均有显著的影响。

参考文献:

- [1] SEED H B, IDRIS I M, DZEFULIAN H. Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas Earthquake of July 29, 1967[R]. California: College of Engineering University of California, Berkeley, 1970.
- [2] CASTRO R R, PÉREZ-CAMPOS X, HUSKER A, et al. A review on advances in seismology in Mexico after 30 years from the 1985 earthquake[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2016, **70**: 49 - 54.
- [3] SINGH S K, MENA E, CASTRO R R. Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacán earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, **78**(2): 451 - 477.
- [4] CAMPILLO M, GABRIEL J C, AKI K, et al. Destructive strong ground motion in Mexico City: source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, **79**(6): 1718 - 1735.
- [5] HASHASH Y M A, PARK D. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment[J]. Engineering Geology, 2001, **62**(1): 185 - 206.
- [6] 陈国兴, 战吉艳, 刘建达, 等. 远场大地震作用下深软场地设计地震动参数研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1591 - 1599. (CHEN Guo-xing, ZHAN Ji-yan, LIU Jian-da, et al. Parameter study on ground motion design of deep soft site under far-field large earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1591 - 1599. (in Chinese))
- [7] CHEN G X, ZHU J, QIANG M Y, et al. Three-dimensional site characterization with borehole data—a case study of Suzhou area[J]. Engineering Geology, 2018, **234**: 65 - 82.
- [8] 朱 姣, 陈国兴, 许汉刚, 等. 苏州第四纪深厚地层剪切波速空间变化特征及其应用[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(11): 726 - 735. (ZHU Jiao, CHEN Guo-xing, XU Han-gang, et al. Spatial variation characteristics of shear wave velocity structure and its application for quaternary deep sediment layers in Suzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 726 - 735. (in Chinese))
- [9] 朱 姣, 陈国兴, 许汉刚. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2079 - 2087. (ZHU Jiao, CHEN Guo-xing, XU Han-gang. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 2079 - 2087. (in Chinese))
- [10] 陈国兴, 卜屹凡, 周正龙, 等. 沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1344 - 1350. (CHEN Guo-xing, BU Yi-fan, ZHOU Zheng-long, et al. Influence of sedimentary facies and depth on normalized dynamic shear modulus and damping ratio of quaternary soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1344 - 1350. (in Chinese))
- [11] 卜屹凡. 深厚地层土动模量和阻尼比的测试方法与试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2016. (BU Yi-fan. Dynamic modulus and damping ratio test method and experimental study on deep sediment layers[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2016. (in Chinese))
- [12] 中国地震台网中心. 中国及邻区地震震中分布图[M]. 北京: 地震出版社, 2015. (China Earthquake Networks Center. Map of earthquake epicenter in China and adjacent areas[M]. Beijing: Seismological Press, 2015. (in Chinese))
- [13] SEED H B, IDRIS I M. Characteristics of rock motions during earthquakes[J]. Soil Mech Found Div, 1969, **95**(5): 1199 - 1218.
- [14] RATHJE E M, ABRAHAMSON N A, BRAY J D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(2): 150 - 159.