

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.003

深厚第四纪沉积土非线性性能对地表地震动特性的影响*

刘薛宁^{1,2}, 陈国兴^{1,2}, 任 炜^{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: 土体非线性性能对地表地震动的影响主要体现在其频谱成分和强度的改变上。采用修正 Matasovic 本构模型描述土的动力非线性特性, 利用专业软件 DeepSoil 对深厚场地的 50 个钻孔剖面土柱模型进行了场地地震反应分析。采用加速度反应谱卓越周期 T_p 、平均谱周期 T_{avg} 及加速度傅氏谱平均周期 T_m 表征地表地震动频谱特性; 以 Arias 强度 I_a 和地表峰值加速度 PGA 表征地表地震动强度。结果表明: (1) 特定场地条件下, T_p 不能反映土体非线性对地震动从基岩传播至地表时频谱成分变化的影响; T_{avg} 和 T_m 在表征地震动频谱成分特性时具有较高的一致性; (2) 基岩地震动高频丰富时, T_{avg} 和 T_m 随着基岩地震动峰值加速度的增大而呈现出线性增长的趋势; 而基岩地震动低频较发育时, T_{avg} 和 T_m 的增长趋势线存在明显的拐点; (3) PGA 与 I_a 值随基岩地震动峰值加速度的增大呈现出基本一致的非线性增长趋势, 且其离散性均随基岩峰值加速度的增大而增大。

关键词: 深厚第四纪场地; 土体的非线性; 地震动; 强度与频谱特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0498-11

Influence of Nonlinear Behavior of Quaternary Deep Sediment Layers on the Characteristics of Surface Ground Motions

LIU Xuening^{1,2}, CHEN Guoxing^{1,2}, REN Wei^{1,2}, JIN Dandan³, XU Hangang^{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: The nonlinearity of soil has a great influence on the spectral characteristics and intensity of ground motions. The modified Matasovic model is accepted to well characterize the nonlinear behavior of soil. The profile soil models of 50 boreholes for the quaternary deep sediment layers are established for site seismic response based on software DeepSoil. The predominant period T_p , average spectral period T_{avg} of the acceleration response spectrum and the mean period T_m of the Fourier amplitude spectrum of an acceleration time history are employed as the proxy to characterize the spectral characteristics of surface ground motions. The ground motion intensity is characterized by the Arias strength I_a

* 收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150512)资助

作者简介: 刘薛宁(1992-), 男, 博士研究生。主要从事场地地震效应的研究。Email: 837450818@qq.com

通讯作者: 陈国兴(1963-), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土工程的研究。Email: gxc6307@163.cn

and the peak ground acceleration (PGA). The results show that: (1) T_p doesn't characterize the changes of seismic motions spectral characteristics during the seismic wave propagating from bedrock to surface ground. T_{avg} and T_m have a good similarity in characterizing the spectral characteristics of seismic motions. (2) When the seismic bedrock motions are rich for high frequency components, T_{avg} and T_m show a linear growth trend with increasing peak bedrock acceleration. However, there are inflection points in the growth trend lines of T_{avg} and T_m if the seismic bedrock motions are rich in low frequency components. (3) The nonlinear generation rates of PGAs and I_a with increasing peak bedrock acceleration are essentially consistent, and the values of PGAs and I_a show much greater dispersion with increasing peak bedrock accelerations.

Keywords: quaternary deep sediment layers; nonlinear behavior of soil; ground motion; spectral characteristics and intensity

引 言

土体在大应变条件下的应力—应变关系具有强非线性特征^[1]。在1995年日本神户7.2级地震^[2]、1999年中国台湾集集7.3级地震^[3]及2013年中国芦山7.0级地震^[4]等大地震的震害考察中,均发现场地土非线性效应对震害有显著的影响。这使得越来越多的学者开展了与之相关的研究:J.Aguirre等^[5]和I.A.Beresnev等^[6]分别在研究日本神户和中国台湾的场地效应时发现:这两个地区的地表地震动峰值加速度(PGA)放大系数在强、弱震动作用下会表现出明显差异,这与陈国兴等^[7]分析河口盆地场地地震效应时得出的结论相同。C.Lee等^[8]利用位于台湾罗东的LSST台阵加速度计获得的地表及地下强、弱震地震动数据分析得出:土体的非线性特性导致地表地震动卓越周期有随着基岩输入地震动强度的增大而增大的趋势。M.S.Rong等^[9]用H/V谱比法识别2008年汶川地震和2013芦山地震中的土体非线性效应后,同样发现了其对地表地震动卓越周期的这一影响。

据此,地震动在传播过程中受土体非线性效应的影响主要表现为其频谱成分和强度的变化。H.B.Seed等^[10]采用5%阻尼比谱加速度最大峰值所对应的卓越周期 T_p 作为表征地震动频谱特性的物理指标;而E.M.Rathje等^[11-12]先后采用加速度傅氏谱平均周期 T_m 和5%阻尼比加速度反应谱平均周期 T_{avg} 作为表征地震动频谱特性的物理指标。 T_m 和 T_{avg} 的定义分别如式(1)和(2):

$$T_m = \frac{\sum_i C_i^2 \left(\frac{1}{f_i}\right)}{\sum_i C_i^2} \quad (1)$$

式中, f_i 为频率(Hz),其频带取为0.25~20 Hz; C_i 为对应 f_i 的傅氏谱幅值。

$$T_{avg} = \frac{\sum_i T_i \cdot \left(\frac{S_a(T_i)}{PGA}\right)^2}{\sum_i \left(\frac{S_a(T_i)}{PGA}\right)^2} \quad (2)$$

式中, T_i 为周期(s),其取值范围为0.06~4 s,间隔0.02 s; $S_a(T_i)$ 为 T_i 对应的5%阻尼比的谱加速度;PGA为地表地震动峰值加速度。

在表征地震动强度方面,国内外通常采用的依然是峰值指标,如地表峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)和峰值位移(PGD),但峰值指标忽略了地震动持时对地震动总能量的影响。Arias强度 I_a 则结合了地震动峰值加速度和持时综合衡量地震动强度^[13]。

苏州位于太湖东岸,广泛分布着深厚的第四纪沉积物,呈现出由西向东、由南向北增厚的特点,覆盖层厚为150~260 m^[14-15]。已有研究表明,苏州场地地震反应的非线性效应十分显著^[14-16]。本文采用 T_p 、 T_{avg} 和 T_m 作为衡量地表地震动频谱成分特性的物理指标,PGA和 I_a 作为衡量地表地震动强度的物理指标,综合分析深厚第四纪沉积土对地表地震动特性的影响。

1 一维土柱模型

用于计算地震反应的50个苏州深厚软土区的钻孔位置如图1所示。采用场地反应分析专业软件

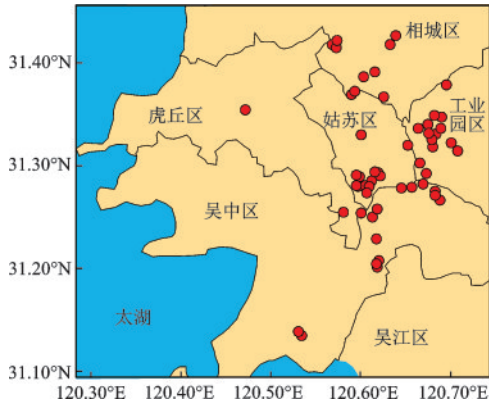


图1 苏州城区钻孔分布

Fig.1 The distribution of boreholes in Suzhou urban area

DeepSoil,建立 50 个钻孔剖面土柱模型。

1.1 非线性动力本构模型

DeepSoil 采用 Matasovic 骨架曲线描述土体的动力非线性特征,采用扩展 Masing 法则构造土体加

卸载的应力-应变滞回圈。其骨架曲线可表示为:

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (3)$$

式中, τ 、 γ 分别为剪应力与剪应变; β 、 s 为无量纲拟合参数; G_{\max} 为初始最大剪切模量; γ_r 为参考剪应变,由式(4)确定。

$$\gamma_r = \gamma_{\text{ref}} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_{\text{ref}}} \right)^b \quad (4)$$

式中, b 为不同深度处 γ_r 的修正系数; σ' 为土竖向有效应力; σ_{ref} 为参考围压; γ_{ref} 为参考围压下对应的剪应变。

根据 453 个钻孔的剖面信息及一个 250 m 的深孔钻探结果^[15-16],苏州地层大致可以分为 16 层不同的土类,各类土代表性土样的动剪切模量比 G/G_{\max} 、阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ 的关系曲线以及现场钻探结果如图 2 所示^[17-18]。

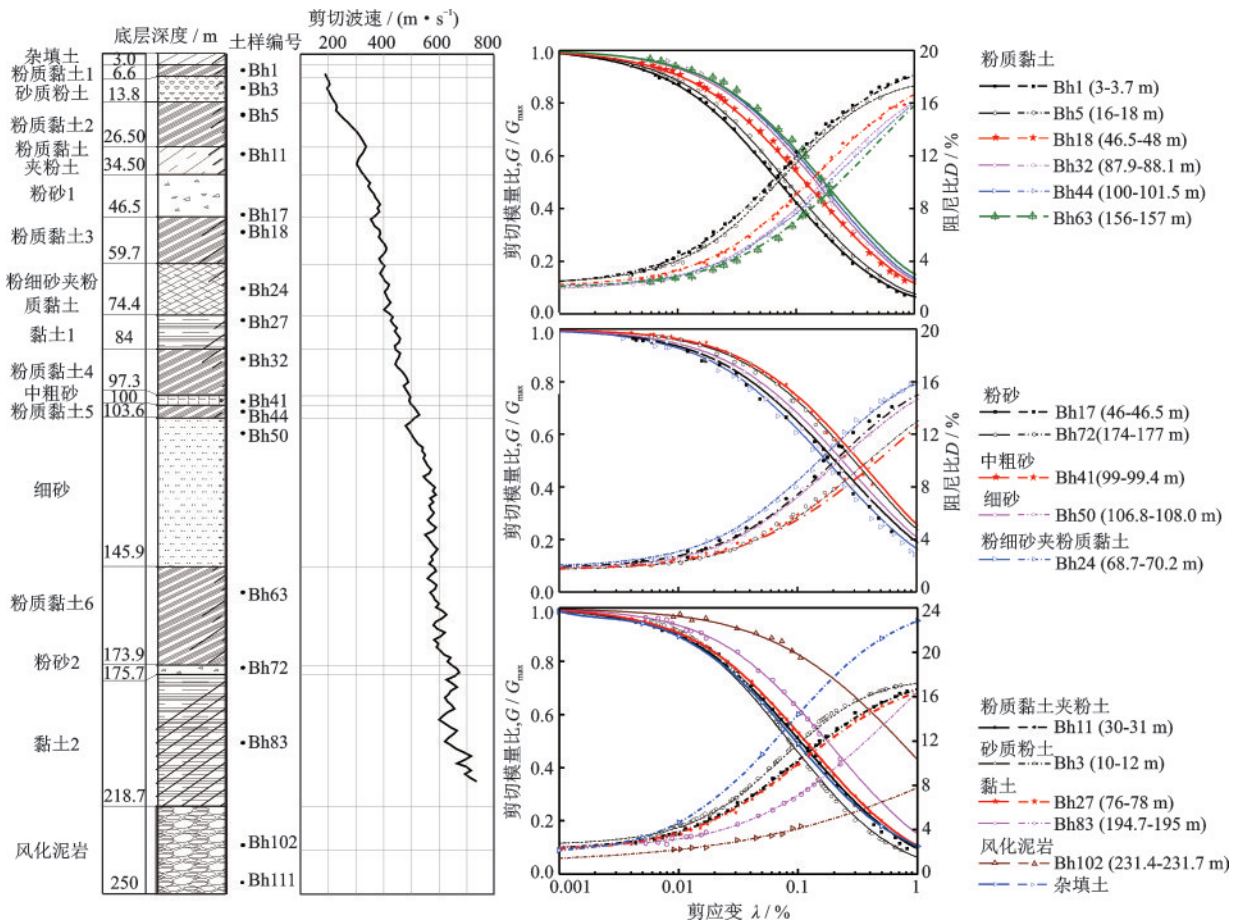


图2 苏州深厚第四纪土钻孔剖面及其代表性土样的模量比和阻尼比试验结果

Fig.2 The borehole profile data of quaternary deep sediment layers, the shear modulus reductions and the damping ratios versus the shear strain amplitude for typical soil samples in Suzhou urban region

采用专业软件 DeepSoil 中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 G/G_{max} 和 λ 的平均曲线, Matasovic 模型参数见表 1。

1.2 地震基岩面的选取

在对深厚软土地场进行地震反应计算时,由于工程场地钻孔的勘测深度所限,通常在土层中设定一个地震基岩面,假设地震基岩面以下岩土体对地震波传播至地表的影响不显著。依据文献[19]的研究结果,苏州城区场地的地震基岩面剪切波速取为 700 m/s 较为适宜。

据此,本文将地震基岩面取为剪切波速 700 m/s 的土层顶面,采用剪切波速逐步外推法^[15-16],将钻孔底部的剪切波速外推至 700 m/s。钻孔波速外推段的土层,则是利用邻近钻孔土层的相似性,根据现场钻探的钻孔及邻近的、实测波速达到 700 m/s 以上的钻孔信息,将具有相应波速的土层补充至实测波速不足 700 m/s 的钻孔模型中^[16]。典型钻孔柱状图及外推的波速剖面,如图 3 所示。

表 1 各类土本构模型参数

Table 1 The 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	0.154 6
粉质黏土 1	3~3.7	1.035	1.515	0.107 8
砂质粉土	10~12	1.095	1.560	0.126 8
粉质黏土 2	16~18	1.035	1.515	0.126 8
粉质黏土夹粉土	30~31	0.990	1.335	0.139 0
粉砂 1	46~46.5	0.930	1.530	0.283 2
粉质黏土 3	46.5~48	0.975	1.440	0.173 8
粉细砂夹粉质黏土	68.7~70.2	0.945	1.530	0.238 4
黏土 1	76~78	0.990	1.455	0.168 6
粉质黏土 4	87.9~88.1	1.020	1.485	0.221 0
中粗砂	99~99.4	0.975	1.125	0.319 8
粉质黏土 5	100~101.5	1.05	1.515	0.220 6
细砂	106.8~108	0.990	1.425	0.288 4
粉质黏土 6	156~157	1.110	1.605	0.261 8
粉砂 2	174~177	0.945	1.29	0.345 2
黏土 2	194.7~195	0.93	1.56	0.276 8
风化泥岩	231.4~231.7	0.840	0.465	0.284 0

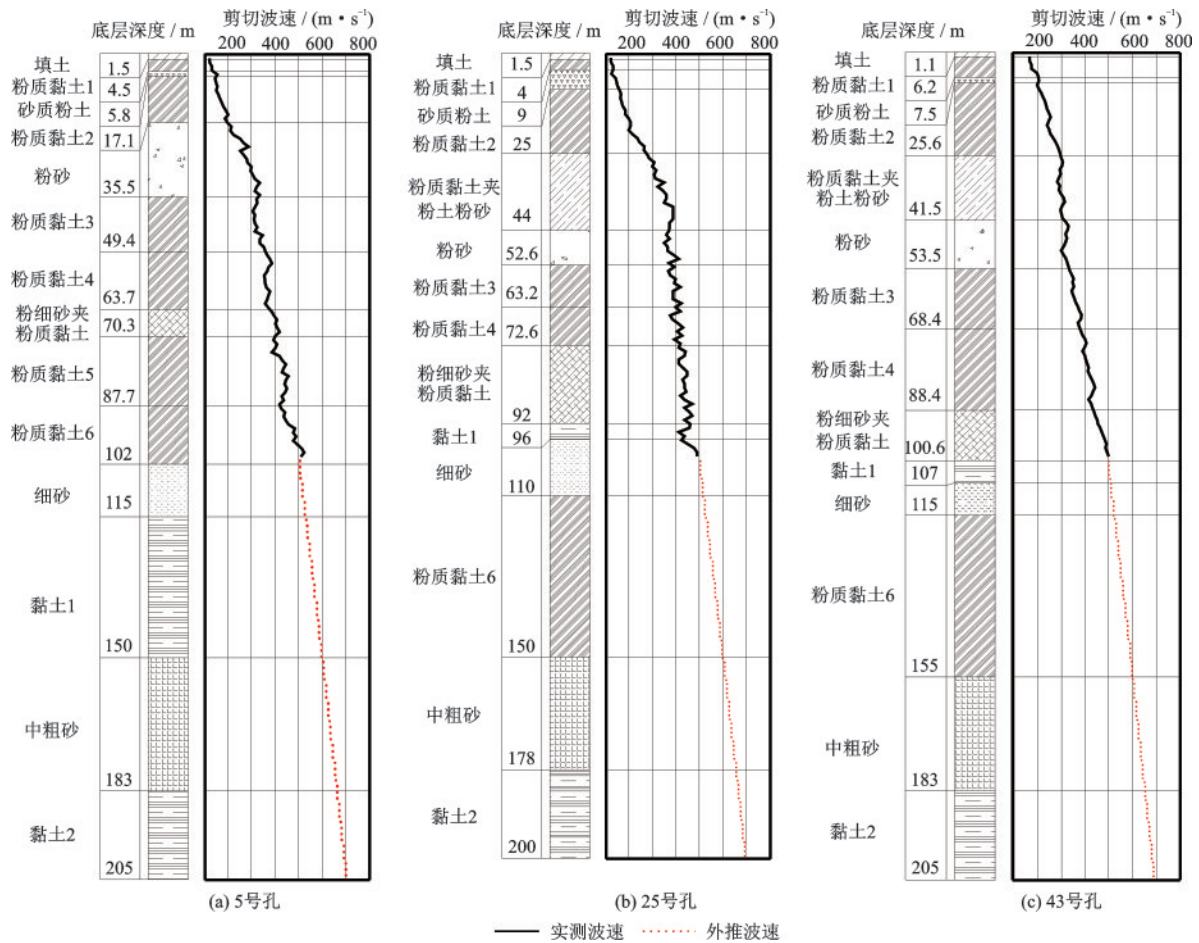


图 3 典型钻孔土层波速示意

Fig.3 The profiles and shear velocities of typical boreholes

1.3 输入地震动的选取

震级和震中距是确定地震动特性最主要的因素。鉴于苏州地区缺乏实际的强地震动记录,依据苏州的区域地震构造及活动性特征^[14],现选用国内外4次地震中5个台站的水平向加速度记录作为基岩输入地震动。地震动记录的信息见表2,其相应的加速度时程曲线、傅氏幅值谱和5%阻尼比的加

速度反应谱如图4、5、6所示。可以看出,这5条地震动加速度时程的频谱特性具有显著差异。Christchurch地震记录的高频成分丰富,汶川地震和2条集集地震余震记录则是低频段十分发育,而EI Mayor-Cucapah地震动的高低频均衡、低频略发育。因此,上述5条地震加速度记录作为基岩输入地震动,可以考虑输入地震动较宽的频谱特性对苏州深厚软土地表地震动特性的影响。

表2 输入地震动信息

Table 2 Details of input motions used for site response analysis

地震信息	Ms	台站	震中距/ km	分量	PGA/ g	I_a / ($m \cdot s^{-1}$)	T_p / s	T_m / s	D_{5-95} / s	T_{avg} / s	采样率/ Hz
台湾集集地震04号余震(1999)	6.2	CHY016	79.8	NS	0.048	0.050	0.30	0.950	40.76	1.051	250
台湾集集地震04号余震(1999)	6.2	CHY044	69.9	NS	0.045	0.043	1.06	1.060	35.87	1.153	200
新西兰 Christchurch地震(2011)	6.3	PKAC	58.3	S76E	0.035	0.016	0.14	0.366	13.16	0.612	200
墨西哥 EI Mayor-Cucapah (2010)	7.2	Blythe-Fire	141	NS	0.028	0.043	0.84	0.900	52.62	1.356	200
汶川地震(2008)	8.0	静宁	480	EW	0.025	0.021	0.70	1.186	33.02	1.550	200

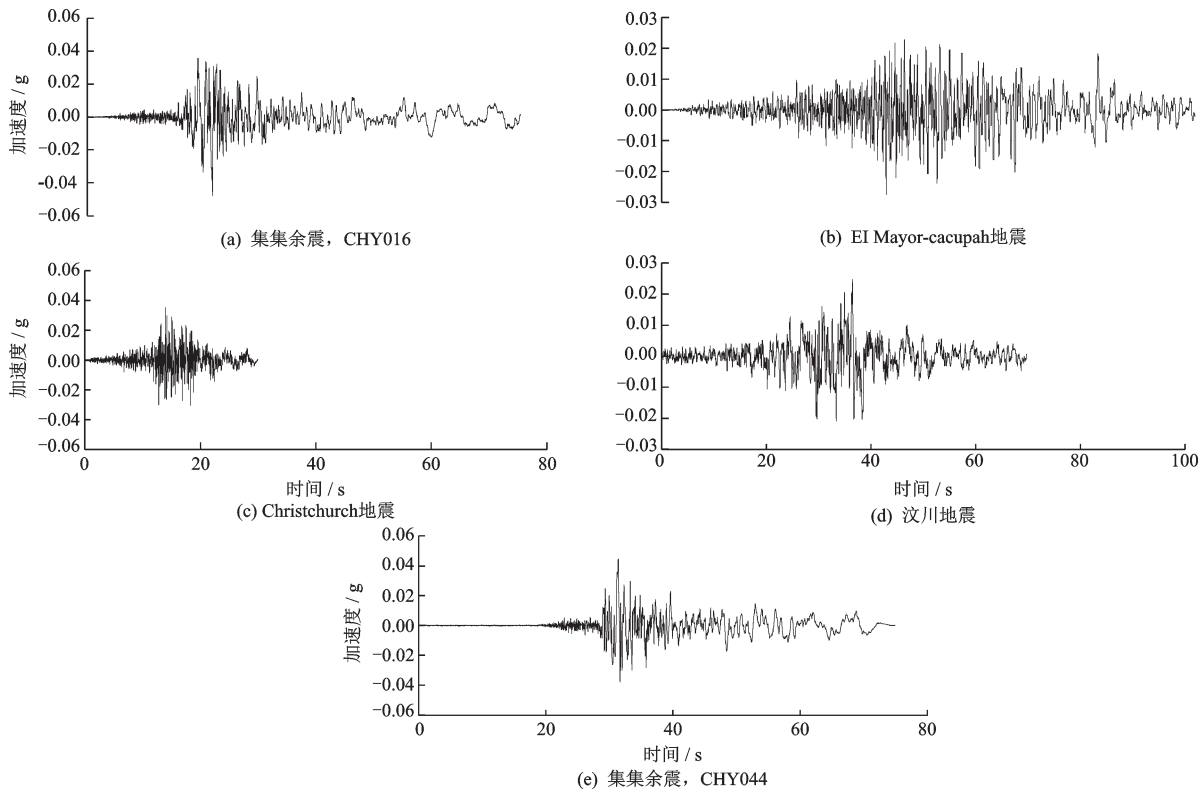


图4 基岩输入地震动原始记录的时程曲线

Fig.4 The acceleration time-histories of bedrock motions

为了能够探究苏州深厚第四纪沉积土在强、弱震动作用下土体的非线性对地表地震动的影响,每

一条地震动记录的峰值加速度按增量0.01g依次调整为0.01g~0.15g,将调整后的加速度记录作为基

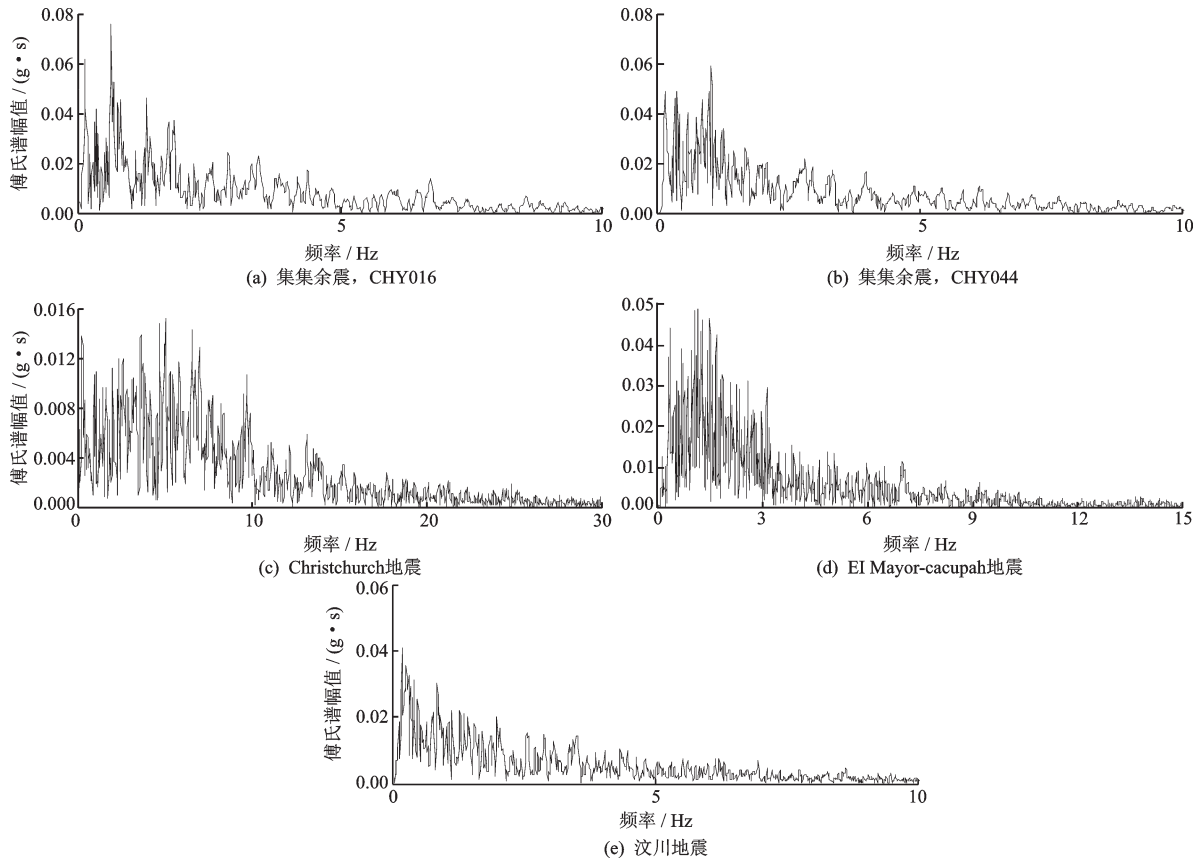


图5 基岩输入地震动原始记录的傅氏幅值谱

Fig.5 Fourier amplitude spectra of bedrock motions

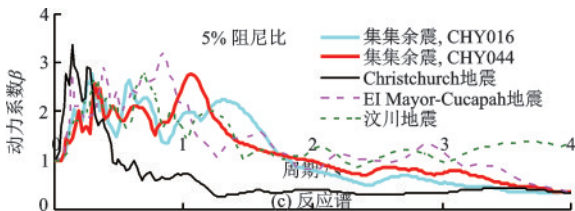


图6 基岩输入地震动原始记录的反应谱

Fig.6 Thenormalized spectracl accelerations of bedrock motions

岩输入地震动。

2 计算结果与分析

以43号钻孔为例,图7给出了输入不同峰值加速度的基岩地震动时50m以内浅土柱的最大剪应变与深度的关系。可以发现,当基岩地震动的峰值加速度达到0.06g时,土柱浅层土的最大剪应变均达到 10^{-4} 量级,土体处于非线性弹性至弹塑性状态;且基岩输入长周期发育的汶川地震和2条集集余震的地震动记录时,土柱浅层土的最大剪应变水平甚

至达到 10^{-3} 量级,土体处于弹塑性状态。因此,基岩峰值加速度大于0.06g时,苏州场地的地震反应包含了浅层土非线性效应的影响。

2.1 非线性效应对地表地震动频谱的影响

2.1.1 卓越周期(T_p)

基岩输入不同峰值加速度的Christchurch地震PKAC台站、EI Mayor-Cucapah地震Blythe—Fire台站及集集余震CHY044台站记录的加速度时程时,5、25和43号典型钻孔的地表加速度反应谱如图8所示。图中虚线处对应的周期为谱加速度的卓越周期。输入Christchurch地震动时,3个钻孔的地表地震动卓越周期没有随基岩峰值加速度的增大而发生明显的变化,几乎都在0.28s左右。这表明,不同峰值加速度的Christchurch地震动在苏州第四纪沉积土的传播过程中,土的非线性对表征其频谱特征的物理指标 T_p 几乎没有影响。输入EI Mayor-Cucapah地震动时,当基岩峰值加速度较小($\leq 0.06g$)时,3个钻孔的 T_p 在0.4s左右;而当基岩峰值

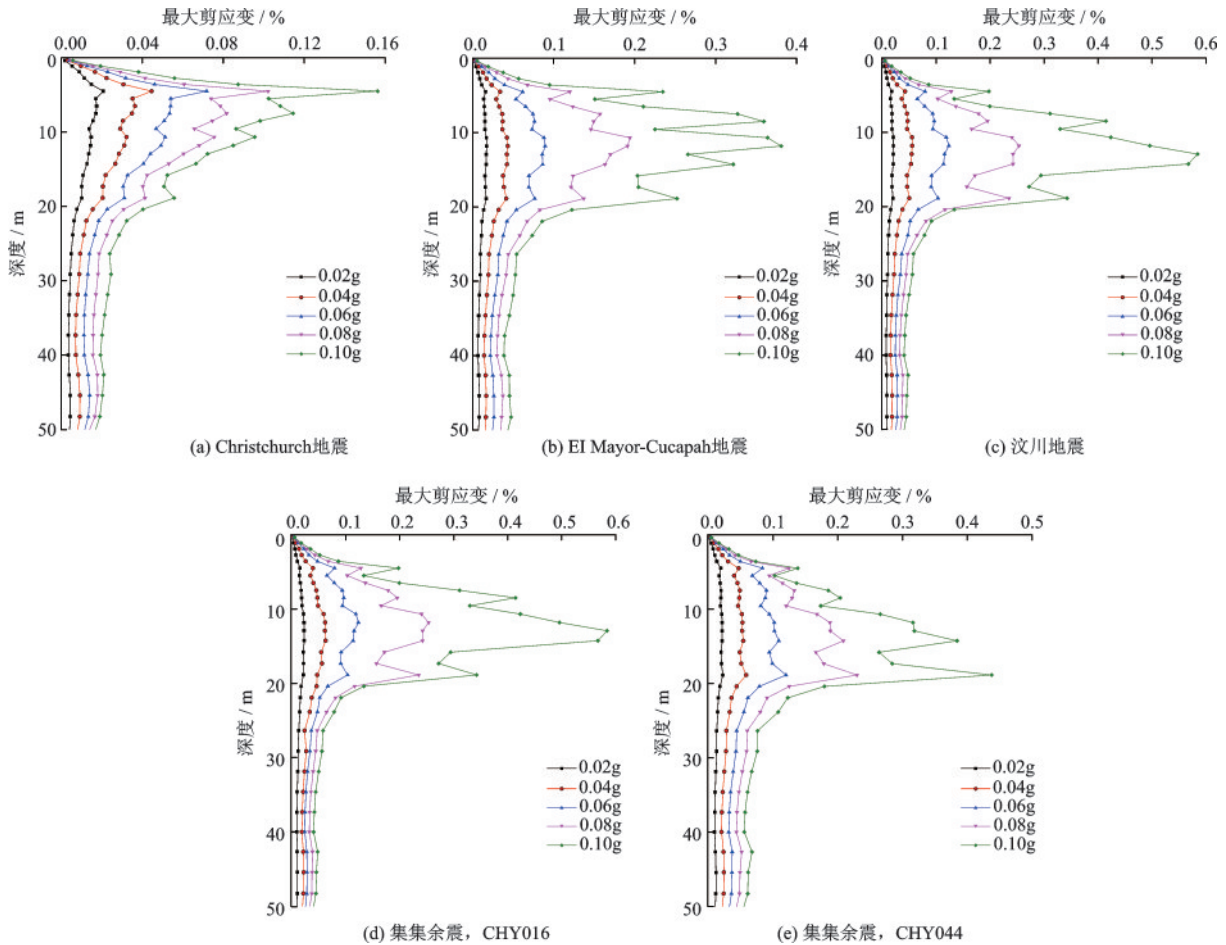


图7 不同地震动作用时43号钻孔50 m以内浅土层的最大峰值剪应变

Fig.7 Comparison of maximum peak shear strains for 50 m below the ground surface of the No.43 boreholes

加速度较大($> 0.06g$)时 T_p 为0.86 s左右;且当基岩峰值加速度从0.1 g 逐渐增加到0.15g时,由于土体的非线性效应导致周期1.2~1.8 s的地表谱加速度值不断增大,也即该频段的地表地震动的谐波强度增大,但谱加速度反应谱的 T_p 未能反映出这一变化特征。类似地,输入集集余震CHY044台站记录时,谱加速度的 T_p 也未能反映出土体的非线性效应引起的地表地震动频谱特性的变化特征。究其原因是一周期点谱加速度值的大小仅受该周期值邻近窄带谐波的影响。由此,地表谱加速度的卓越周期 T_p 未必能反映出基岩地震动经由深厚土层传播至地表时频谱成分的变化。

2.1.2 平均谱周期(T_{avg})

图9给出了基岩输入不同峰值加速度的地震动时50个钻孔的地表地震动的 T_{avg} 值。输入高频丰富的Christchurch地震动时, T_{avg} 随基岩峰值加速度的增大几乎呈现出线性增长的趋势。输入其余4条低频较发育的地震动记录时, T_{avg} 随基岩峰值加速度

的增大呈现折线型增长趋势,折线拐点对应的基岩峰值加速度约在0.06g~0.08g, T_{avg} 在折线拐点后的增长速率明显加快。这表明,与基岩输入高频丰富的Christchurch地震动相比,基岩输入低频较发育的地震动时,地表地震动的中长周期成分更为发育,土体的非线性效应也更为强烈。

2.1.3 傅氏谱平均周期(T_m)

图10给出了基岩输入不同峰值加速度的地震动时50个钻孔的地表地震动的 T_m 值。比较图10与图9可以发现:输入高频丰富的Christchurch地震动时,地表地震动的 T_m 也随基岩峰值加速度的增大而几乎呈现出线性增长的趋势。输入其余4条低频较发育的地震动时, T_m 的增长趋势同样存在明显拐点;且在基岩输入相同的地震动时,图9与图10中拐点的基岩峰值加速度是一致的。这说明 T_m 和 T_{avg} 在表征地震动频谱特征方面具有很好的一致性,但 T_m 值始终略小于 T_{avg} 值。

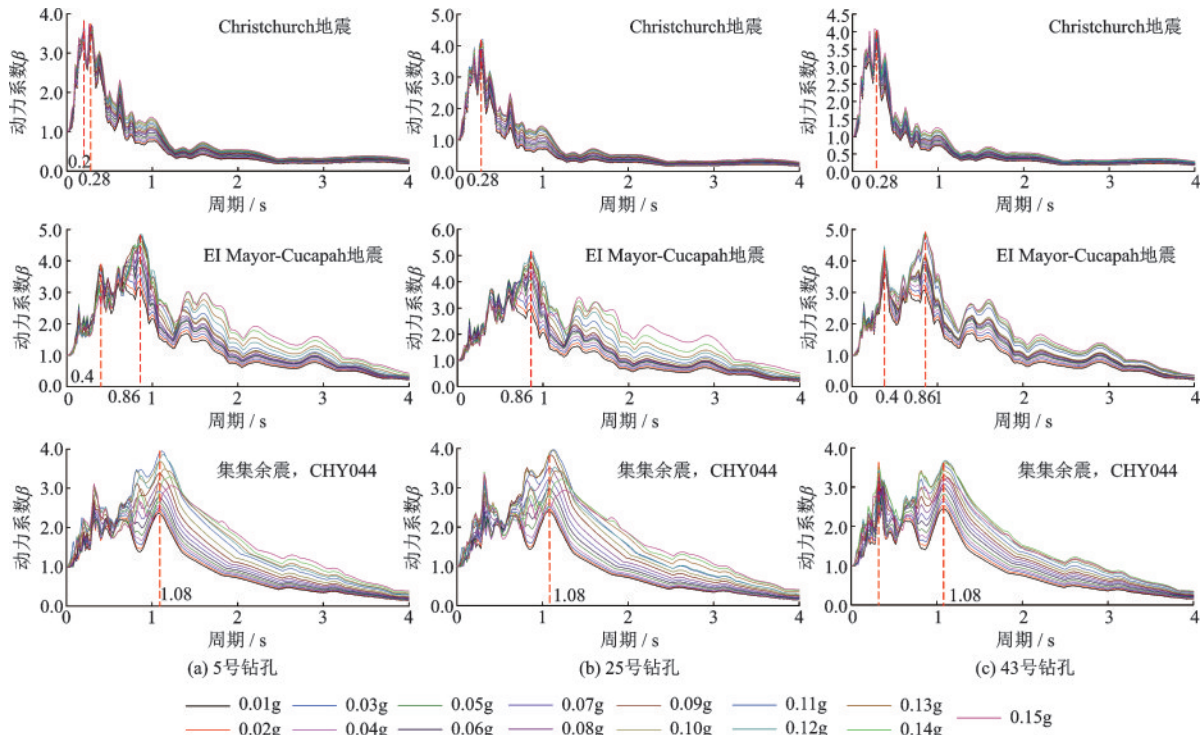


图8 不同地震动作用时3个典型钻孔处的地表地震动谱加速度

Fig.8 Normalized spectral accelerations of ground motions at the typical three boreholes under different bedrock motions with various peak accelerations

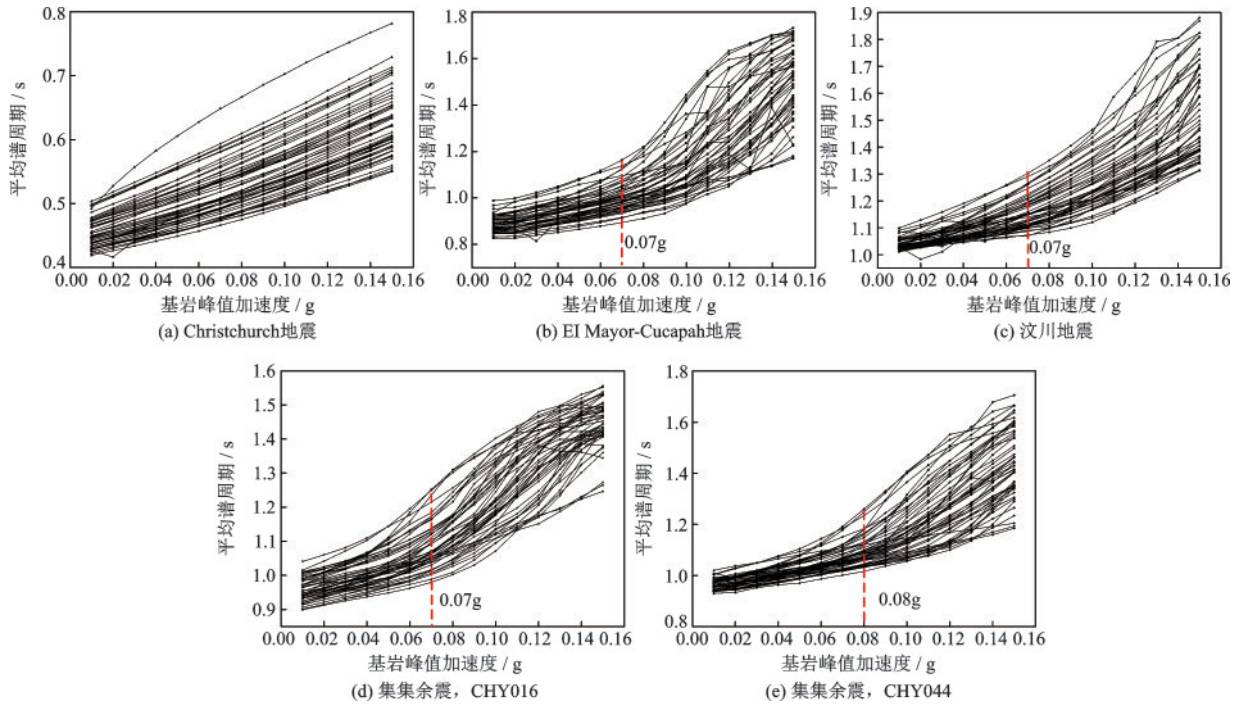


图9 不同地震动作用时50个钻孔处的地表地震动平均谱周期 T_{avg}

Fig.9 The average spectral period T_{avg} of ground motions at 50 boreholes under different bedrock motions with various peak accelerations

统计分析了不同基岩峰值加速度的5条地震加速度记录对50个钻孔的3750个工况的计算结果发现:对应图7与图8中地表地震动 T_{avg} 和 T_m 的增长趋

势出现拐点的计算工况,浅层5~20m土层的最大峰值剪应变都达到了 10^{-3} 量级,该区域的土体应已处于强塑性状态。

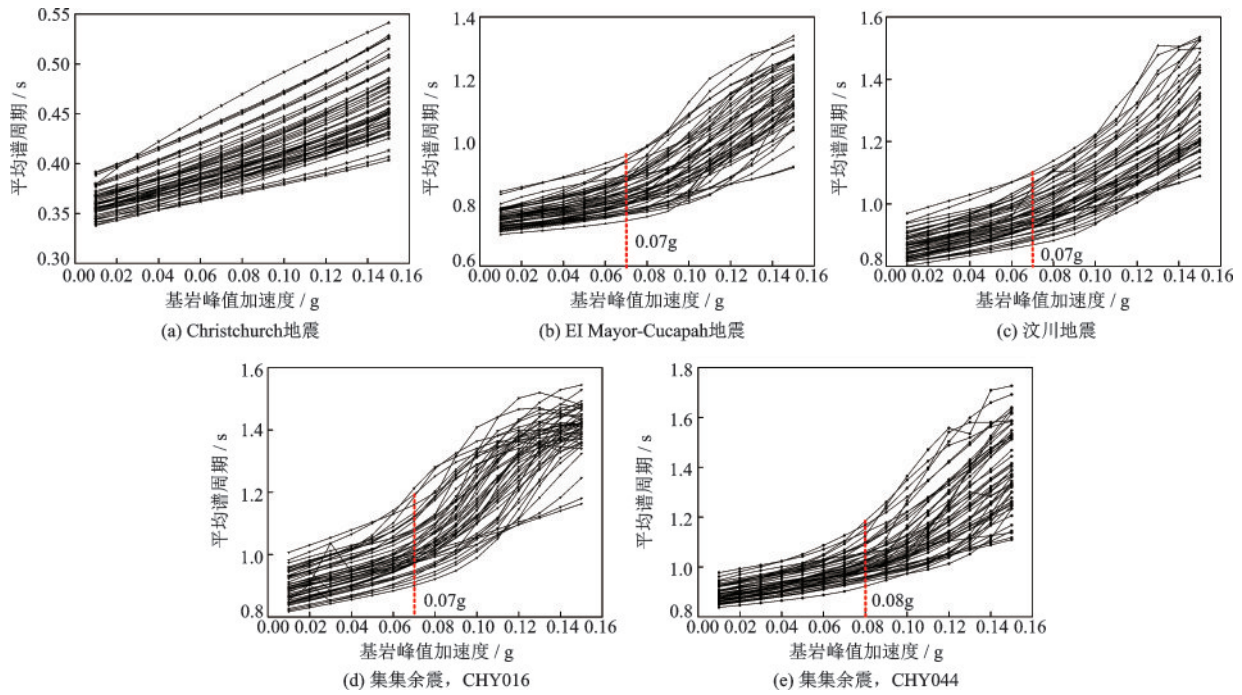


图10 不同地震动作用时50个钻孔处的地表地震动傅氏谱平均周期 T_m

Fig.10 The mean period T_m of ground motions at 50 boreholes under different bedrock motions with various peak accelerations

2.2 非线性效应对地表地震动强度的影响

2.2.1 地表地震动峰值加速度(PGA)

图11给出了基岩输入不同峰值加速度的地震动时50个钻孔地表地震动的PGA值。对于频谱特性差异较大的5条输入基岩地震动时程,计算给出的苏州城区东部场地的PGA随基岩峰值加速度的增大而呈现出非线性的增长趋势,且其平均趋势线的离散范围也随基岩峰值加速度的增大而增大。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,进而导致了PGA的大小随着基岩地震动峰值加速度的增大,其离散性增大。

2.2.2 Arias强度 I_a

I_a 结合了加速度峰值与地震动持时,从地震动能量的角度综合评价地震动强度,其定义如下:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{\max}} a^2(t) dt \quad (5)$$

式中, $a(t)$ 为地震记录加速度时程; t_{\max} 为地震记录总持时。

图12给出了基岩输入不同峰值加速度的地震动时50个钻孔的地表地震动 I_a 值。计算给出的地表地震动 I_a 值随基岩峰值加速度的增大而呈现出非线性的增长趋势,并与PGA的增长趋势基本一致。

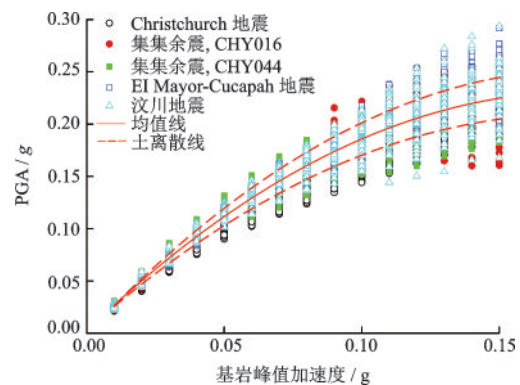


图11 基岩输入地震动峰值加速度与深厚场地50个钻孔处的地表PGA比较

Fig.11 Comparison of the peak accelerations of bedrock motions and PGAs at the 50 borehole profile surfaces of deep sediment layers

其次,基岩峰值加速度相同时,基岩输入高频丰富的Christchurch地震记录计算得到的地表地震动 I_a 的离散性是最小的。这是由于基岩峰值加速度相同时,输入Christchurch地震记录时土柱的剪应变峰值是最小的,因此,在地震动从基岩到地表的传播过程中,土体的非线性影响也是最弱的。

3 结论

(1)特定场地条件下,地表谱加速度的卓越周

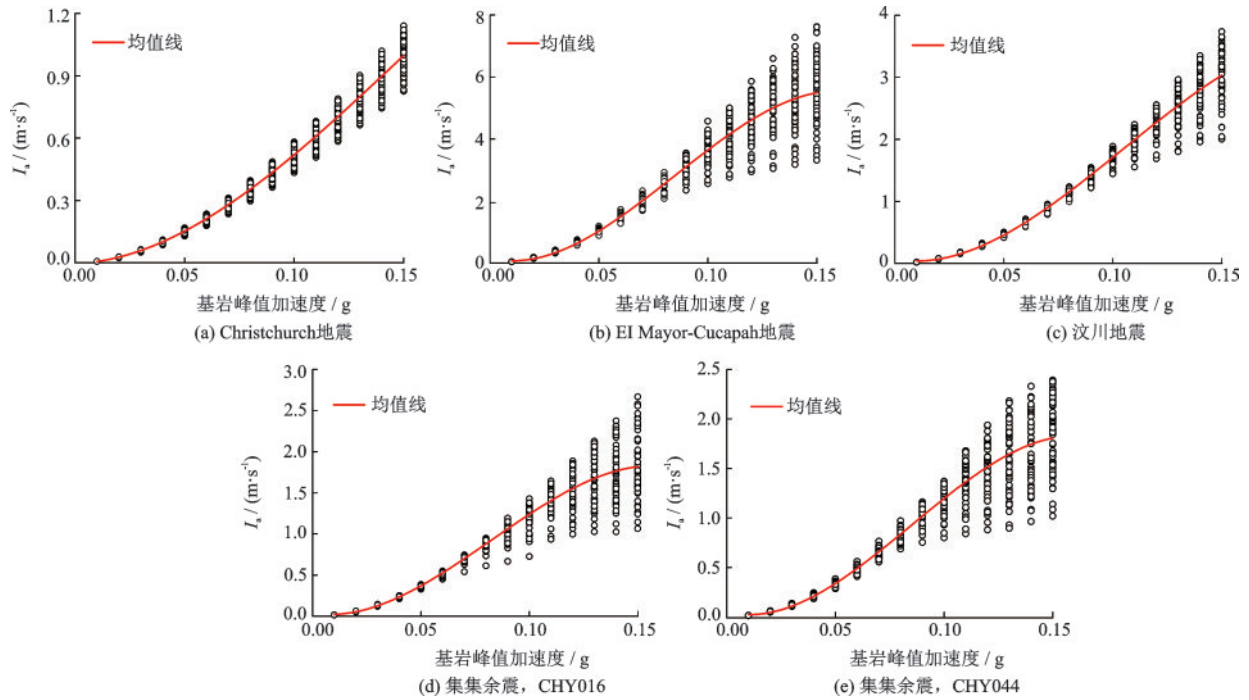


图 12 不同峰值加速度基岩地震动作用下的地表地震动 Arias 强度

Fig.12 The Arias intensity I_a of ground motions at 50 boreholes profile surfaces under different bedrock motions with various peak accelerations

期 T_p 不能反映土体非线性对地震动从基岩经由深厚土层传播至地表时频谱成分变化的影响。加速度反应谱平均谱周期 T_{avg} 和傅氏谱平均周期 T_m 在表征地震动频谱成分特性时具有较高的一致性, 同一条地震动的 T_{avg} 值略高于 T_m 值。

(2) 基岩输入高频丰富的 Christchurch 地震记录时, 深厚场地 50 个钻孔的地表地震动 T_{avg} 和 T_m 随着基岩地震动峰值加速度的增大而呈现出线性增长的趋势; 而当基岩输入低频发育的其余 4 个地震动记录时, 深厚场地 50 个钻孔的地表地震动 T_{avg} 和 T_m 的增长趋势存在明显拐点, 其原因是浅层 5 ~ 20 m 深土层的剪应变水平超过了 10^{-3} 量级, 土体已经表现为强非线性。

(3) 深厚场地地表的 PGA 与 I_a 值随基岩峰值加速度的增大而呈现出非线性的增长趋势, 且 PGA 与 I_a 的均值随基岩峰值加速度的增大而增大的增长趋势基本一致; 但由于基岩地震动强度较大时, 土体的非线性效应较强, 进而导致地表的 PGA 与 I_a 值的离散程度较大。

参考文献:

[1] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社,

2007: 255-256.

Chen G X. Geotechnical earthquake engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007: 255-256. (in Chinese)

[2] Pavlenko O, Irikura K. Changes in Shear moduli of liquefied and nonliquefied soils during the 1995 kobe earthquake and its aftershocks at three vertical-array sites[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2002, 92 (5): 1 952-1 969.

[3] Pavlenko O, Wen K L. Estimation of nonlinear soil behavior during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165 (2) : 373-407.

[4] 冀 昆. 基于 H/V 谱比法的场地特征分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.

Ji K. Estimation on site characteristic based on H/V spectral ratio method[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)

[5] Aguirre J, Irikura K. Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1997, 87(5): 1 244-1 258.

[6] Beresnev I A, Wen K L, Yeh Y T. Nonlinear soil amplification: its corroboration in Taiwan[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1995, 85 (2) :

- 496-515.
- [7] 陈国兴, 金丹丹, 朱 姣, 等. 河口盆地非线性地震效应及设计地震动参数[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1 721-1 736.
Chen G X, Jin D D, Zhu J, et al. Nonlinear seismic response of estuarine basin and design parameters of ground motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1 721-1 736. (in Chinese)
- [8] Lee C, Tsai Y, Wen K. Analysis of nonlinear site response using the LSST downhole accelerometer array data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 435-460.
- [9] Rong M S, Wang Z M, Woolery E. Nonlinear site response from the strong ground-motion recordings in western China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82: 99-110.
- [10] Seed H B, Idriss I M. Characteristics of rock motions during earthquakes [J]. Soil Mechanics and Foundation Division, 1969, 95(5): 1 199-1 218.
- [11] Rathje E M, Abrahamon N A, Bray J D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions [J]. Geotechnical Engineering Division, ASCE 1998, 124(2): 150-159.
- [12] Rathje E M, Faraj F, Russell S, et al. Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(1): 119-144.
- [13] Arias A. A measure of earthquake intensity in seismic design of nuclear power plants[M]. Cambridge Meassachusetts: MIT Press, 1970: 438-483.
- [14] 战吉艳. 远场大地震作用下深软场地的非线性地震效应[D]. 南京: 南京工业大学, 2012.
Zhan J Y. Nonlinear seismic effect of deep soft site under far-field large earthquake [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2012. (in Chinese)
- [15] 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, 234: 65-82.
- [16] 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, 2016, 37(11): 2 079-2 087.
Zhu J, Chen G X, Xu H G, 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, 2016, 37(11): 2 079-2 087. (in Chinese)
- [17] 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, 37(11): 2 079-2 087.
Chen G X, Bu Y F, Zhou Zh L, 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, 37(11): 2 079-2 087. (in Chinese)
- [18] 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 Y F. Dynamic modulus and damping ratio test method and experimental study on deep sediment layers[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2012. (in Chinese)
- [19] 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): 2 079-2 087.
Zhu J, Chen G X, Xu H G. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2 079-2 087. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)