

DOI: 10.11779/CJGE201511020

地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响

朱 娇^{1, 2}, 陈国兴^{*1, 2}, 许汉刚^{3, 2}

(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. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 地震基岩面的选取对场地设计地震动参数取值的合理性有重要影响。以苏州城区的钻孔剖面为研究对象, 选取剪切波速介于400~800 m/s的9个土层顶面作为地震基岩面, 采用等效线性方法考虑土的非线性特性, 采用一维波传法分析地震基岩面的选取对地表地震动特性的影响。结果表明: ①地表峰值加速度PGA随地震基岩面剪切波速的增大而增大, PGA的增大幅度随输入地震动强度的增大而减小; ②地表加速度反应谱放大系数 β 谱值也随地震基岩面土层剪切波速的增大而增大, 且 β 谱值随输入地震动强度的增大而减小; 对于中强地震的近场地震动作用, 基岩面深度对周期小于1.0 s的 β 谱值的影响较大; 而对于特大地震的远场地震动作用, 基岩面深度对周期小于4.0 s的 β 谱值均有较大影响; ③远场地震动作用时的 β 谱值明显大于近场地震动作用的 β 谱值; ④取剪切波速不小于700 m/s的土层顶面为地震基岩面较为适宜。

关键词: 地震基岩面; 深厚场地; 等效线性化方法; 一维波传法; 地表峰值加速度; 地表加速度反应谱放大系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)11-2079-09

作者简介: 朱 娇(1990-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为场地地震效应。E-mail: zhujiao90@163.com。

Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site

ZHU Jiao^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, XU Han-gang^{3, 2}

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

Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: The seismic bedrock interface depth has great influence on design ground motion parameters. Based on the borehole profiles in the downtown area of Suzhou City, nine interfaces of soil layers, whose shear wave velocities range from 400 to 800 m/s, are selected as the seismic bedrock interfaces. The equivalent linear method is used to describe the nonlinear characteristics of soil, and the effects of seismic bedrock interface depth on site surface motion are analyzed on the basis of the one-dimensional wave propagation model. The results show that: (1) The peak ground acceleration (PGA) increases as the shear wave velocity of seismic bedrock interface grows, but the PGA increasing range decreases as the input motion PGA increases; (2) The values of ground motion acceleration response amplification factor β spectrum become larger with the increase of the shear wave velocity of seismic bedrock interfaces, and the β values become smaller with the increase of input motion PGA. Under near-field ground motion of moderate strong earthquake, the depth of seismic bedrock interface has significant influence on the β values for the period less than 1.0 s. But under far-field ground motion of great earthquake, the depth of seismic bedrock interface has significant influence on the β values for the period less than 4.0 s; (3) The β values under far-field ground motion are obviously higher than those under near-field ground motion; (4) It is appropriate to choose the interface of soil with shear velocity not less than 700 m/s as the seismic bedrock interface.

Key words: seismic bedrock interface; deep soft site; equivalent linear method; one-dimensional wave propagation model; peak ground acceleration; amplification factor of acceleration response spectrum

0 引言

场地条件对地震动特性及震害分布影响显著, 已被一系列破坏性地震所证实, 这主要体现在两方面: 沉积年代较晚的软土对地震动的放大效应明显大于密实土和坚硬土^[1], 地形地貌的局部变化对地震波传播

产生较大影响, 致使地震动空间分布特征的差异性显著^[2]。因此, 工程场地地震效应及其设计地震动参数

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258)

收稿日期: 2014-09-08

*通讯作者

的合理评价是预测工程震害并采取地震防御有效措施的重要科学依据。

目前对场地地震反应的研究主要包括理论分析法和经验分析法^[3]。经验分析法通常基于实测地震动记录展开, 如 SSR^[4]和 HVSR^[5]法, 分析结果可靠, 但依赖于场地地震动记录的获取。鉴于实际场地的多样性, 对地形地貌与土层物理力学特性复杂的工程场地, 很难给出其解析解; 数值模拟已成为分析复杂非均匀场地地震动特性的主流方法^[6-7]。地震基岩面或称地震动输入界面的选取是影响场地地震效应分析结果合理性的重要因素。对沿江濒海的深软场地, 基岩埋藏很深, 要获取完整的土层钻孔资料不是轻易可行的。因此, 地震基岩面的合理选取对深软场地地表设计地震动参数的估计十分重要。

在场地地震效应分析中, GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》选择剪切波速大于 500 m/s 的土层顶面为地震基岩面; GB50267—97《核电厂抗震设计规范》选择剪切波速大于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面; 美国核电站的相关规范 ASCE4-98、ASCE43-05 和 NUREG-0800 选择剪切波速大于 1100, 2400, 2400 m/s 为地震基岩面^[8-11]。地震基岩面的位置变化会引起场地土覆盖层厚度的改变, 进而影响地表峰值加速度和频谱特性等地震动特性的变化。鉴于此, 基于苏州地区两个典型钻孔剖面, 选取剪切波速

不同的土层顶面为地震基岩面, 探讨地震基岩面的选取对深软场地地表地震动特性的影响。

1 计算模型

1.1 场地模型

以苏州城区场地为研究背景, 选取 2 个钻孔剖面 1、剖面 2 为计算场地, 属于 III 类场地, 详见表 1。剖面 1 的钻孔深度 250 m, 已揭示全风化、强风化泥岩各厚 16.3, 15 m, 在此以下构造 30 m 厚的砂岩, 孔深延至 280 m, 作为剖面 1 的理想基岩面; 剖面 2 的钻孔深度 180 m, 且与剖面 1 的钻孔相距较近, 参照剖面 1 的地层特点, 在 180 m 深以下构造 43 m 厚粉质黏土, 16.3 m 厚全风化泥岩, 15 m 厚强风化泥岩, 孔深延至 280 m, 作为剖面 2 的理想基岩面。

因波速测试仪器的局限, 两剖面剪切波速测试深度分别为 200 m 和 167 m; 外延的构造深度土层的剪切波速取实测剪切波速随深度变化拟合曲线的外推值, 如图 1 所示。

土的动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 D 是场地地震反应分析中不可或缺的基础性资料, 依据文献[12], 本文采用的苏州各类典型土动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 D 与剪应变幅值 γ 的关系曲线, 如图 2 所示; 依据文献[13], 采用的砂岩动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 D 与剪应变幅值 γ 的关系曲线, 如图 2(b) 所示。

表 1 钻孔剖面土层简况

Table 1 Parameters of soil layers along borehole profiles

钻孔 1				钻孔 2			
土层名称	层厚/m	层底深度/m	重度/(kN·m ⁻³)	土层名称	层厚/m	层底深度/m	重度/(kN·m ⁻³)
填土	3.6	3.6	18.50	填土	3.0	3.0	18.50
粉质黏土 1	4.4	8.0	19.65	粉质黏土 1	10.8	13.8	19.35
粉质黏土 1	5.1	13.1	18.95	粉质黏土 2	12.7	26.5	19.50
粉质黏土 2	12.3	25.4	19.18	粉质黏土 3	8.0	34.5	19.20
粉质黏土 3	9.1	34.5	18.77	粉砂 1	12.0	46.5	18.70
粉砂 1	13.3	47.8	18.73	粉质黏土 4	13.2	59.7	18.40
粉质黏土 5	12.7	60.5	18.33	粉砂 2	2.1	61.8	19.20
粉砂 3	13.1	73.6	19.70	粉质黏土 5	6.9	68.7	19.70
黏土	10.4	84.0	18.27	粉砂 3	5.7	74.4	19.70
粉质黏土 6	6.7	90.7	20.30	黏土	9.6	84.0	18.60
粉砂 4	3.0	93.7	20.60	粉质黏土 6	5.8	89.8	20.30
粉质黏土 6	2.1	95.8	20.50	粉砂 4	3.9	93.7	20.10
粉砂 4	2.3	98.1	19.80	粉质黏土 6	3.6	97.3	20.30
粉质黏土 6	5.7	103.8	20.20	粉砂 4	2.7	100.0	19.50
粉细砂	42.8	146.6	19.77	粉质黏土 6	3.6	103.6	20.10
粉质黏土 7	28.4	175.0	20.15	粉细砂	42.3	145.9	19.80
粉砂 4	3.2	178.2	19.00	粉质黏土 7	28.0	173.9	20.00
粉质黏土 7	40.5	218.7	20.39	粉砂 4	1.8	175.7	20.20
全风化泥岩	16.3	235.0	20.35	粉质黏土 7	43.0	218.7	19.70
强风化泥岩	15.0	250.0	18.98	全风化泥岩	16.3	235.0	20.35
砂岩	30.0	280.0	23.50	强风化泥岩	15.0	250.0	18.98
坚硬砂岩	—	—	—	砂岩	30.0	280.0	23.50
				坚硬砂岩	—	—	—

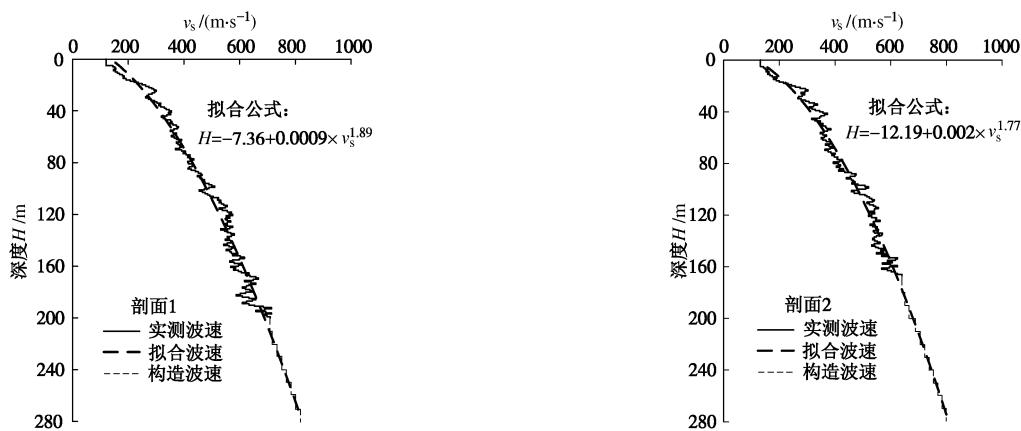


图1 剪切波速随土层深度的变化情况

Fig. 1 Shear-wave velocity with soil depth

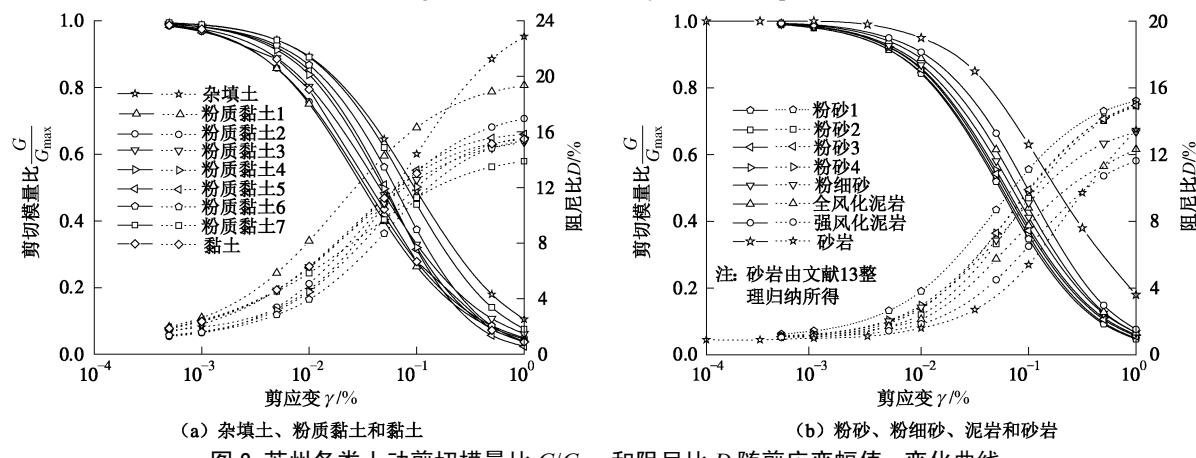
图2 苏州各类土动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 D 随剪应变幅值 γ 变化曲线Fig. 2 Variation of G/G_{\max} and damping ratio D with shear strain amplitude γ for soils in Suzhou region

表2 输入界面埋深及相应的剪切波速

Table 2 Depths and corresponding shear-wave velocities of input interfaces

编号	输入界面	Table 2 Depths and corresponding shear-wave velocities of input interfaces								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
剖面1	埋深/m	72	88	107	118	165	191	200	230	260
	界面顶面的土层剪切波速 $v_s / (m \cdot s^{-1})$	405	452	505	556	606	654	709	750*	800*
剖面2	埋深/m	81	93	105	145	164	170	200*	240*	270*
	界面顶面的土层剪切波速 $v_s / (m \cdot s^{-1})$	412	459	508	546	602	650*	700*	750	800*

注: 不加*号为实测值, 加*号为外推值。

1.2 地震基岩面的选取

为定量研究地震基岩面的选择对深厚场地地震反应的影响, 地震基岩面顶面的剪切波速取值范围为400~800 m/s, 具体为: 剖面1选取剪切波速405~800 m/s的土层顶面即深度72~260 m的9组土层界面为地震基岩面; 剖面2选取剪切波速412~800 m/s的土层顶面即深度81~270 m的9组不同的土层界面为地震基岩面, 详见表2。

1.3 输入地震动的选取

大量震例表明: 近、远场地震的场地地震效应存在显著差异。选取1994年美国Northridge 6.6级地震Tarzana台站(震中距5.41 km)的加速度记录、1999年土耳其7.4级地震Tekirdag台站(震中距226.8 km)

的加速度记录NS分量和2008年中国汶川8.0级地震静宁台站(震中距552 km)的加速度记录EW分量及1条苏州人工波, 作为基岩输入地震动, 以反映输入地震动特性对场地地震效应的影响。

依据《工程场地地震安全性评价》规定的地震危险性概率分析结果, 苏州城区某场点50 a超越概率63%, 10%和2%的基岩地震动峰值加速度依次约为0.020g(小震, 简称LLE), 0.070g(中震, 简称MLE)和0.135g(大震, 简称HLE), 其中g为重力加速度。为此, 相应于抗震设防水准的小震、中震和大震, 将苏州人工波、近场Northridge波以及远场土耳其波和汶川静宁波的峰值加速度均调整为3个峰值加速度水准0.020g, 0.070g和0.135g。图3为输入地震动纪录

的加速度时程和傅氏谱, 其中近场 Northridge 波中、高频成分丰富, 人工波的频谱特征与 Northridge 波相似, 中、高频成分也较为丰富, 而两个远场波的低频成分则相当发育, 其中汶川静宁波的低频分量尤其丰富。

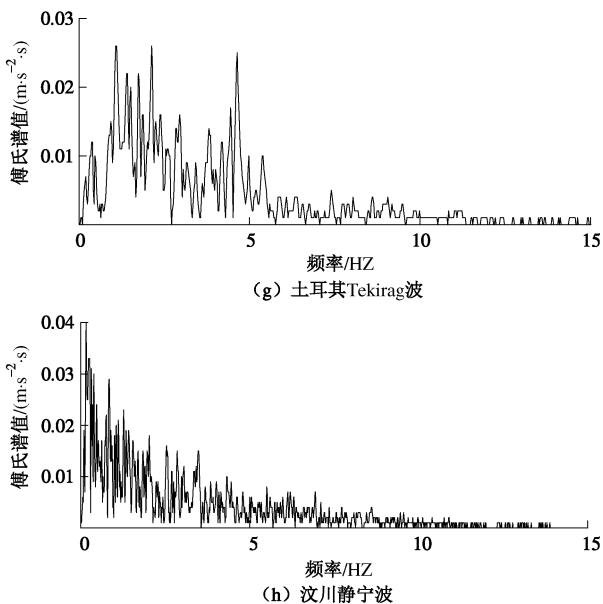
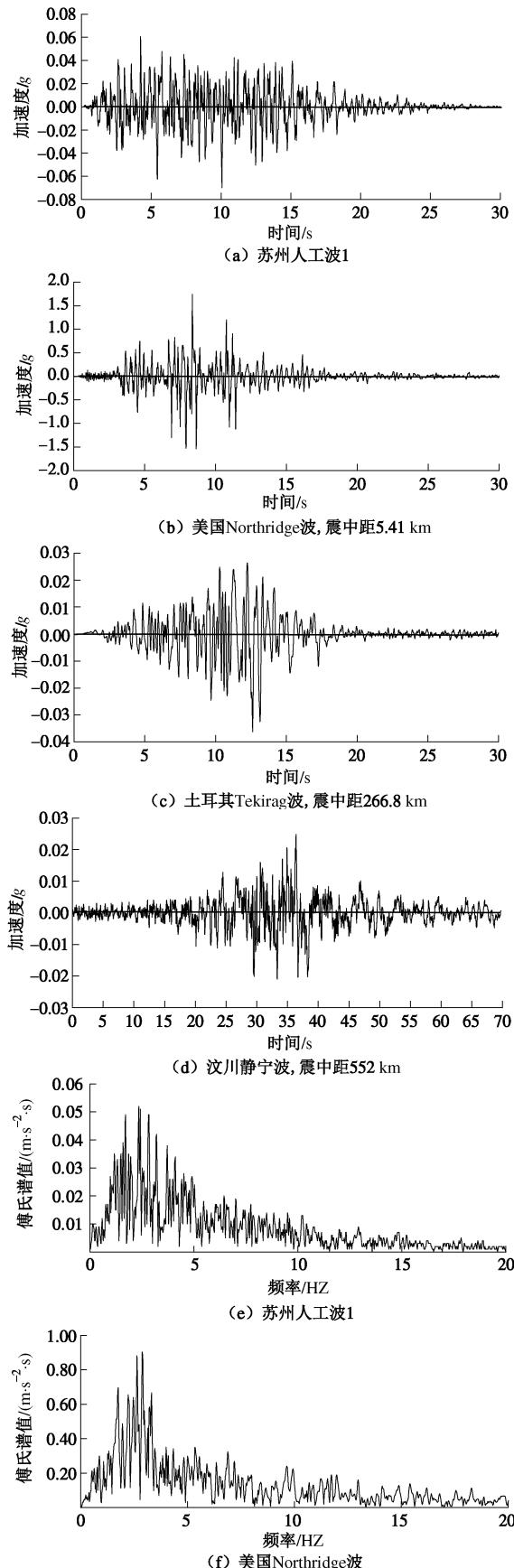


图 3 基岩输入地震动加速度时程曲线和傅氏谱

Fig. 3 Time histories of acceleration and Fourier spectra of bedrock motions

2 计算结果与分析

采用一维等效线性化方法考虑土的非线性特性, 利用国际通用软件 Proshake、一维波传法计算场地地震反应, 以地表峰值加速度 PGA 及其加速度反应谱曲线表征场地地表的地震反应特征。

2.1 地表峰值加速度

图 4, 5 分别为选取不同剪切波速的土层顶面为地震基岩输入面时钻孔剖面 1、剖面 2 的地表 PGA 值。可以看出: ①随地震基岩顶面土层剪切波速的逐渐增大, 相应的, 地震基岩面的埋深也逐渐增大, 地表 PGA 近似呈单调递增的特征, 且单调性随输入地震动强度的增加而减弱, 这表明深厚场地上覆土层越厚, 地震动放大效应越显著; 以剪切波速 $v_s=800$ m/s 的土层顶面为地震基岩面时, 地表 PGA 随基岩面剪切波速的增加而增大的趋势显著提高, 这可能由于该深度处构造的砂岩的动剪切模量比和阻尼比与上覆土层的动剪切模量比和阻尼比的差异较大, 从而以砂岩层顶面为地震基岩面时使场地地表 PGA 值的增大更为显著。如不考虑因深度外延而构造的砂岩产生的突变, 地震基岩面的剪切波速约 700 m/s 时地表 PGA 已渐趋稳定, 剪切波速的继续增大对地表 PGA 的影响较小。就地表 PGA 而言, 取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面是较为适宜的。②地表 PGA 与输入地震动特性密切相关, 输入频谱特征相似的地震动时, 其地表 PGA 也相似, 且对深厚场地而言, 远场地震动作用的场地地震反应明显高于近场地震动作用的场地地震反应。从图 4, 5 中明显可见输入频谱特征相似的人工波和近场 Northridge 波时地表 PGA 值相近, 而输入两

条远场地震波(即土耳其波和汶川静宁波)时地表 PGA 值也相近, 且后者的地表 PGA 值大于前者的地表 PGA 值。③因输入地震动频谱特征不同引起的地表 PGA 值的差异随输入地震动强度的增大而增大, 且这种差异性随选取的地震基岩面土层剪切波速的增大而增大。

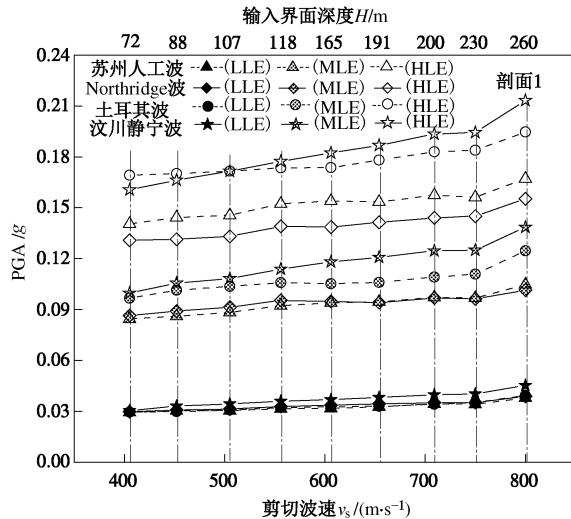


图 4 取不同地震基岩面时钻孔 1 的地表 PGA 值

Fig. 4 PGAs of surface ground under bedrock motions from different soil interfaces for borehole profile No.1

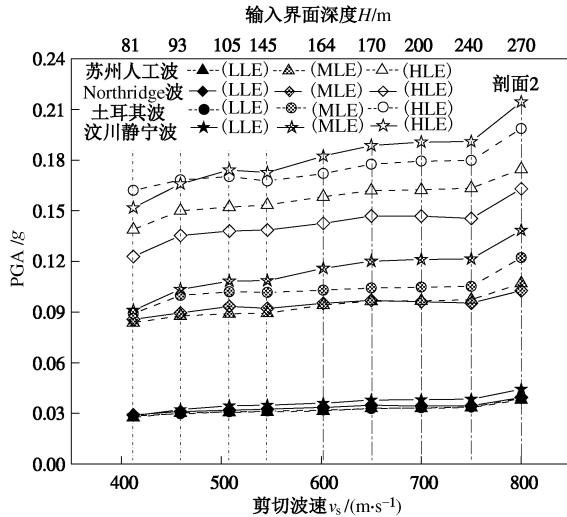


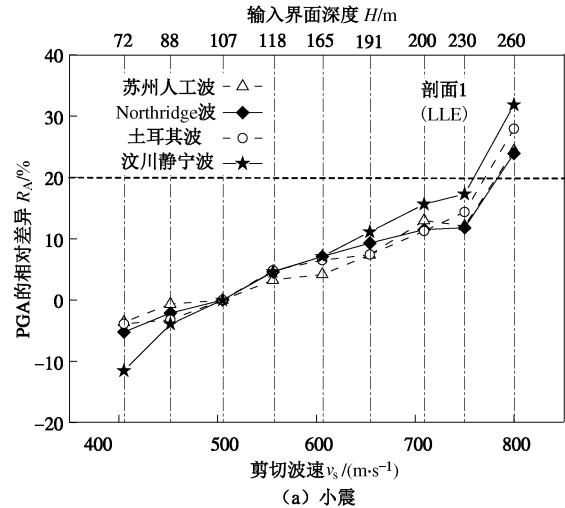
图 5 取不同地震基岩面时钻孔 2 的地表 PGA 值

Fig. 5 PGAs of surface ground under bedrock motions from different soil interfaces for borehole profile No.2

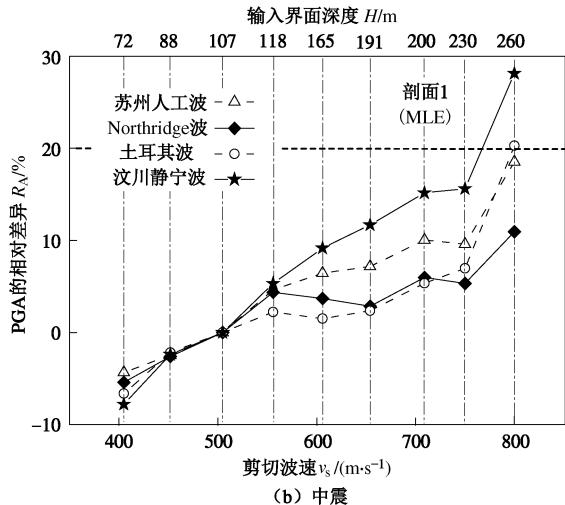
为了更加清晰地反映地震基岩面位置的选择对地表 PGA 的影响, 现以剪切波速约 500 m/s 的土层顶面即界面 3 为地震基岩面的基准面, 定义地表 PGA 的相对差异值 $R_A = (A_{\max} - A_{\max,500}) / A_{\max,500}$, 其中, A_{\max} 为任意剪切波速的土层顶面为地震基岩面时的地表 PGA; $A_{\max,500}$ 为剪切波速约 500 m/s 的土层顶面为地震基岩面时的地表 PGA。

图 6, 7 分别给出不同剪切波速的土层顶面为地震基岩输入面时, 钻孔剖面 1、剖面 2 相应于小震、中震、大震高防水准的地表 PGA 的相对差异值 R_A 。由

此可知: ①基岩层剪切波速在 400~750 m/s 之间时, 地表 PGA 的相对差异值 R_A 均 $\pm 20\%$ 以内; 以剪切波速 $v_s = 800$ m/s 的砂岩层顶面为地震基岩面时, 地表 PGA 的相对差异值 R_A 产生了突变现象。②远场地震动作用时, 地表 PGA 的相对差异值 R_A 呈现出随输入地震动强度的增大而减小的趋势。以剪切波速 $v_s = 800$ m/s 的土层顶面为地震基岩面时, 相应于小震、中震和大震的设防水准, 钻孔剖面 1、剖面 2 的地表 PGA 相对差异值 R_A 的范围依次为 23.88%~31.83%, 10.95%~28.13%, 13.41%~25.02% 和 23.74%~28.34%, 9.94%~27.79%, 14.85%~23.18%。③以剪切波速 $v_s < 500$ m/s 的土层顶面为地震基岩面时, 其相对差异值 R_A 随地震基岩面剪切波速的减小而增大; 以剪切波速 $v_s = 400$ m/s 左右的土层顶面为地震基岩面时, 相应于小震、中震和大震的设防水准, 钻孔剖面 1、剖面 2 的地表 PGA 相对差异值 R_A 的范围依次为 -3.62%~11.54%, -4.34%~7.80%, -1.38%~7.11% 和 -7.47%~17.21%, -5.98%~16.02%, -4.72%~18.57%。就地表 PGA 而言, 地震基岩面的选择是否合理, 不只是取决于土层深度或剪切波速的大小, 也与输入地震动的特性密切相关。



(a) 小震



(b) 中震

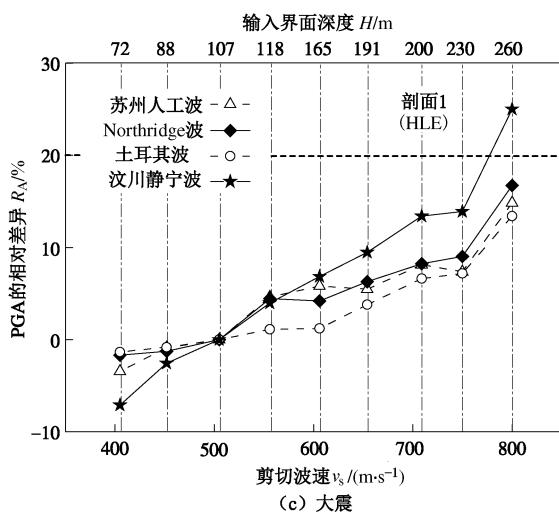
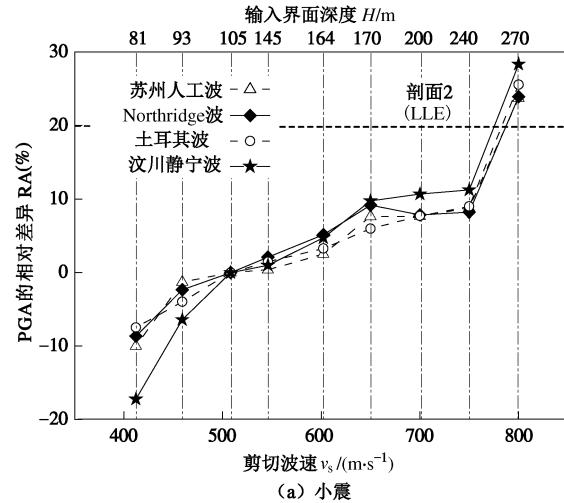
图 6 取不同地震基岩面时钻孔 1 的地表 PGA 相对差异值 R_A

Fig. 6 Relative difference values R_A of surface ground PGA under bedrock motions from different soil interfaces for borehole No.1

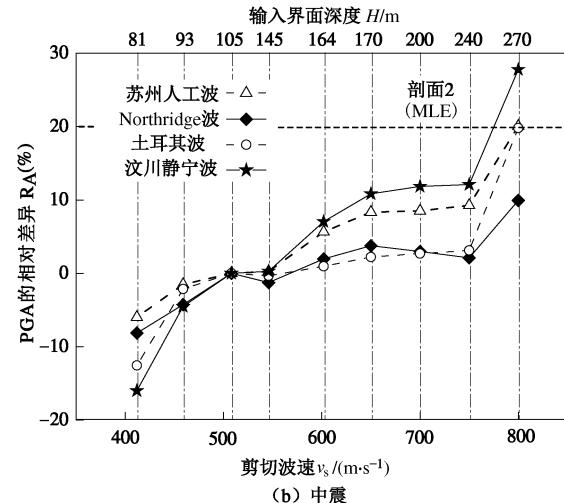
2.2 地表加速度反应谱 β 谱

图 8 给出以不同剪切波速的土层顶面为地震基岩面时钻孔剖面 1 的地表加速度反应谱 β 谱曲线。可以发现: ①随地震基岩顶面土层剪切波速的逐渐增大, 地表 β 谱曲线也逐渐提高, 这表明深厚场地地震动放大效应随上覆土层厚度的增大而增大。如不考虑因深度外延而构造的砂岩为地震基岩面(即界面 9)时, 基岩面剪切波速对 β 谱的影响逐渐变小。与剪切波速约 700 m/s 的地震基岩面(界面 7)相比, 当地震基岩面剪切波速小于 700 m/s 时, 剪切波速的大小对近场地震动作用时周期小于 1.0 s 的 β 谱和远场地震动作用时周期小于 4.0 s 的 β 谱均有较大影响; 而取剪切波速约 750 m/s 的土层顶面为地震基岩面(界面 8)时, β 谱谱值的增大很小, 其短周期部分的 β 谱谱值与界面 7 为地震基岩面时一致, 故 β 谱的变化情况也表明宜采用剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面。②随输入地震动强度的增加, 地表 β 谱谱值变小, 地震动低频成分变得丰富而高频成分削弱, 且这种变化趋势与输入地震动特性密切相关。在近场 Northridge 波作用下, β 谱曲线随输入地震动强度的增大而由单峰变为双峰, 但主峰的位置未改变, 相应于小震、中震和大震的设防水准, 卓越周期都为 0.34 s; 但在远场地震动作用下, 随输入地震动强度的增大, β 谱曲线短周期的峰值显著减小, 且主峰向长周期方向移动, 相应于小震、中震和大震的设防水准, 输入土耳其波和汶川静宁波时, 卓越周期分别为 0.50, 0.90, 0.90 s 和 0.7, 0.7, 1.2 s, 这表明土的非线性地震效应随地震动强度的增大而增强。③与基岩加速度

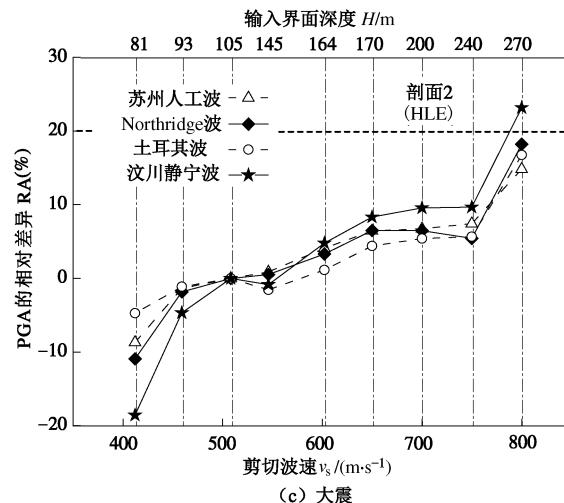
反应谱相比, 地表 β 谱表现出了不同程度的放大效应, 且远场地震动作用时的放大效应比近场地震动作用的放大效应更大, 小震的放大效应比大震的放大效应更为显著。



(a) 小震

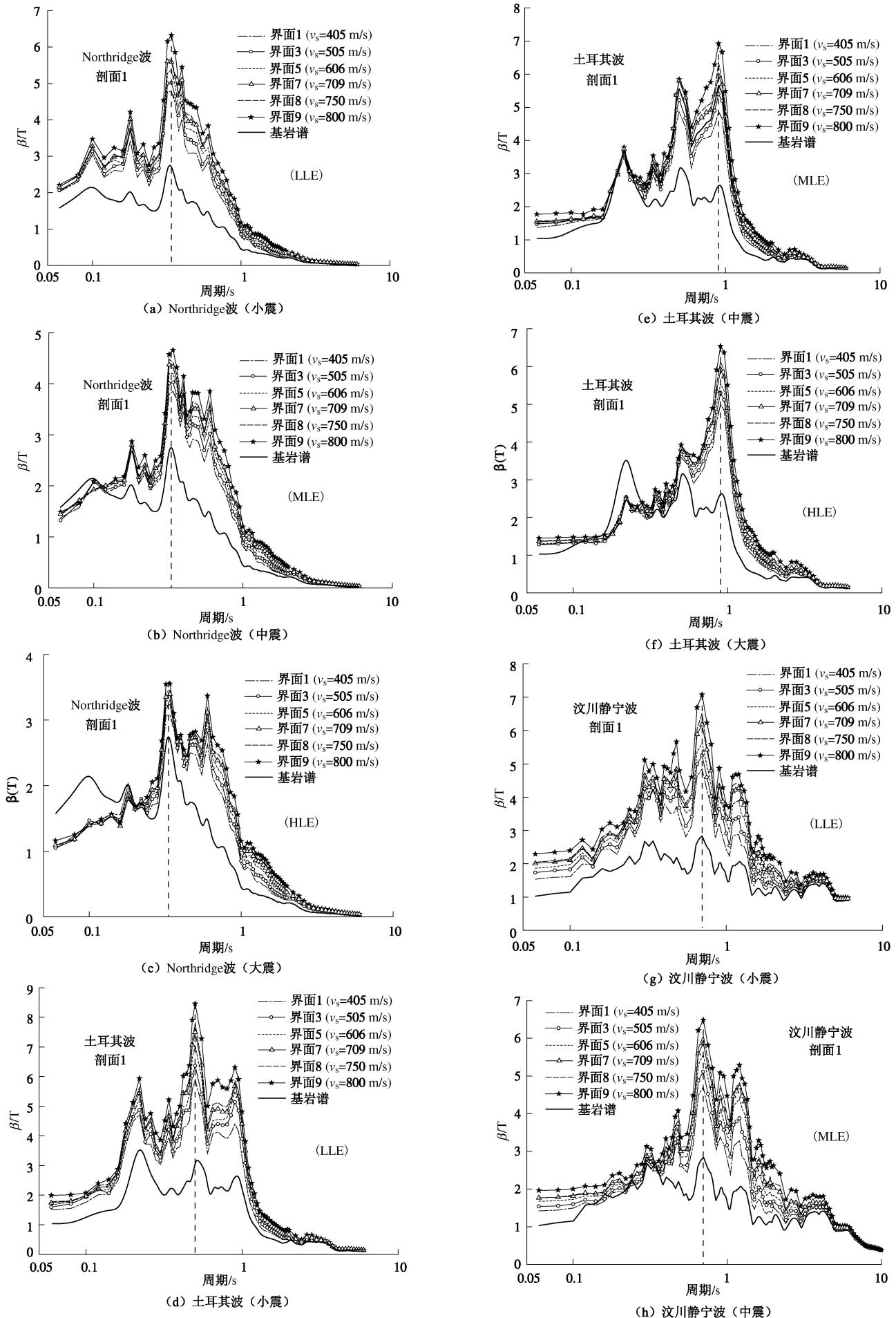


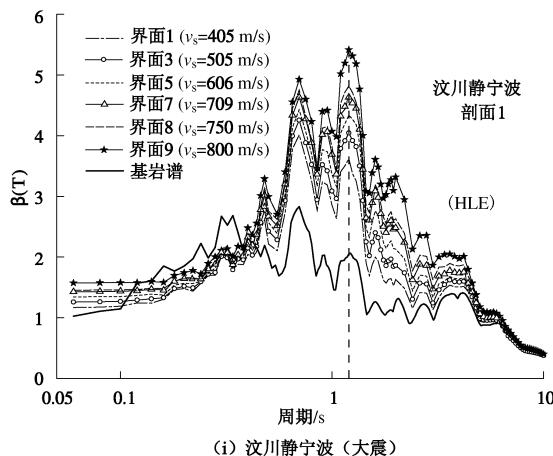
(b) 中震



(c) 大震

图 7 取不同地震基岩面时钻孔 2 的地表 PGA 相对差异值 R_A
Fig. 7 Relative difference values R_A of surface ground PGA under bedrock motions from different soil interfaces for borehole No.2





(i) 汶川静宁波(大震)

图 8 取不同地震基岩面时钻孔剖面 1 地表加速度反应谱 β 谱
Fig. 8 Ground motion acceleration response amplification factor β spectra under bedrock motions from different soil interfaces for borehole profile No.1

从图 9 可知, 相应于小震的设防水准, 土介质的最大剪应变数量级为 10^{-4} , 总体上呈现出弹性特征, 而相应于中震和大震的设防水准, 土介质的最大剪应变数量级为 10^{-3} , 总体上已呈现出弹塑性特征, 故小震时地表 β 谱在整个周期范围内土层都呈现出放大现象, 而中震和大震时在短周期 (≤ 0.4 s) 部分出现了地表 β 谱值低于基岩加速度反应谱值的现象。

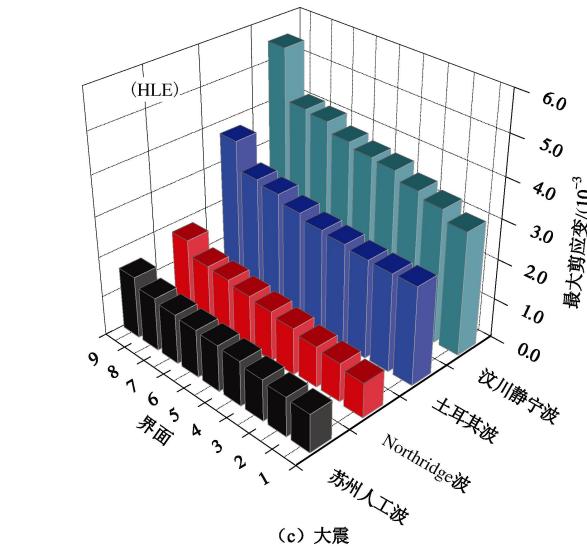
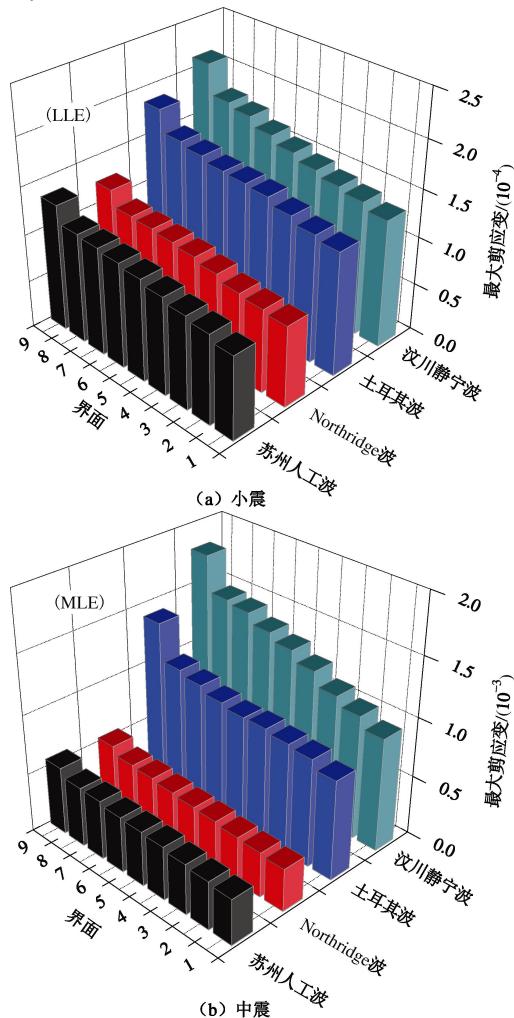


图 9 选取不同地震基岩面时钻孔剖面 1 深度 8.5 m 处的最大剪应变值
Fig. 9 Maximum shear strain at soil depth of 8.5 m under bedrock motions from different soil interfaces for borehole profile No.1

图 10 为以界面 3 为地震基岩面时钻孔剖面 1 的最大剪应变沿土层深度的变化特征。可以发现, 最大剪应变与输入地震动特性密切相关, 但剪应变最大值的土层位置基本不变, 深度 10 m 左右的土层剪应变水平明显较高, 这表明此深度的粉质黏土层是该场地的软弱土层, 可合理推测该层土的非线性地震效应影响最大, 剖面 1 在深度 8.5 m 处的最大剪应变值如图 9 所示。从图 9, 10 可知: 相应于小震、中震和大震的 3 个设防水准, 土层的剪应变以远场汶川静宁波作用时最大、土耳其波作用时次之, 近场 Northridge 波作用时再次之、人工波作用时最小; 此外, 随地震基岩面深度的增大, 土层的最大剪应变也增大, 且以剪切波速 $v_s = 800$ m/s 的砂岩层顶面 (界面 9) 为地震基岩面时, 最大剪应变的增大产生突变现象。这表明输入地震动低频成分越丰富, 土层覆盖层深度越大, 土层的非线性地震效应越显著, 且地表地震加速度反应也越大。

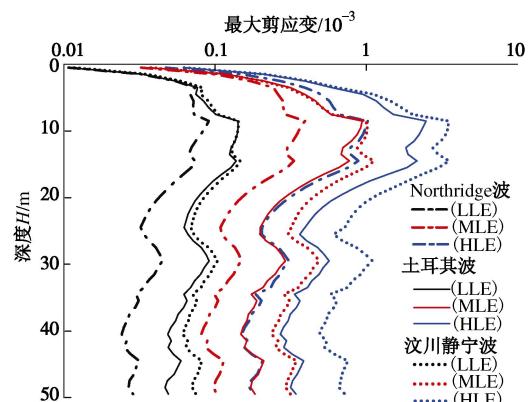


图 10 以界面 3 为地震基岩面时钻孔剖面 1 的最大剪应变沿土层深度的变化
Fig. 10 Variation of maximum shear strain with soil depth under bedrock motions from interface No. 3 for borehole profile No. 1

Fig. 10 Variation of maximum shear strain with soil depth under bedrock motions from interface No. 3 for borehole profile No. 1

3 结论与建议

针对地震基岩面的选取对深厚场地地表地震反应的影响, 依据对苏州城区典型钻孔剖面的研究, 得到以下结论:

(1) 地表 PGA 值随地震基岩面深度的增大而增大。与土层剪切波速约 500 m/s 的地震基岩面相比, 选取剪切波速为 400~750 m/s 的土层顶面为地震基岩面时, 地表 PGA 的相对差异值 R_A 均在 $\pm 20\%$ 以内, 且 R_A 值随输入地震动强度的增大而减小; 选取剪切波速 800 m/s 的砂岩为地震基岩面时, 地表 PGA 的增大发生突变现象, 远场地震动作用 R_A 值可达 25% 以上。

(2) 地表加速度反应谱放大系数 β 谱峰值随地震基岩顶面土层剪切波速的增大而增大; 随输入地震动强度的增大而减小; 在中强地震的近场 Northridge 波作用下, 基岩面深度主要影响周期小于 1.0 s 的 β 谱曲线; 但在特大地震的远场静宁波作用下, 基岩面深度对周期小于 4.0 s 的 β 谱曲线均有较大影响。

(3) 与基岩加速度反应谱相比, 地表 β 谱表现出了不同程度的放大效应, 且远场地震动作用时的放大效应要比近场地震动作用的放大效应更大; 小震时地表 β 谱在整个周期范围内土层都呈现出放大现象, 而中震和大震时在短周期(≤ 0.4 s)部分出现了地表 β 谱值低于基岩加速度反应谱值的现象。

综上, 地震基岩面不宜取剪切波速小于 500 m/s 的土层顶面, 宜取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面。

参考文献:

[1] AKI K. Local site effects on weak and strong ground motion[J]. *Tectonophysics*, 1993, **218**(1): 93~111.

[2] LANZO G, SILVESTRI F, COSTANZO A, et al. Site response studies and seismic microzoning in the middle Aterno valley (L'Aquila, Central Italy)[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, **9**(5): 1417~1442.

[3] KHAM M, SEMBLAT J F, BOUDEN-ROMDHANE N. Amplification of seismic ground motion in the Tunis basin: numerical BEM simulations vs experimental evidences[J]. *Engineering Geology*, 2013, **155**: 80~86.

[4] MITTAL H, KUMAR A, SINGH S K. Estimation of site effects in Delhi using standard spectral ratio[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **50**: 53~61.

[5] DIMITRIU P, KALOGERAS I, THEODULIDIS N. Evidence of nonlinear site response in horizontal-to-vertical spectral ratio from near-field earthquakes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, **18**(6): 423~435.

[6] DI FIORE V. Seismic site amplification induced by topographic irregularity: results of a numerical analysis on 2D synthetic models[J]. *Engineering Geology*, 2010, **114**(3): 109~115.

[7] CHEN G, JIN D, ZHU J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, **105**(2A): 928~949.

[8] ASCE 4-98 Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary[S]. 1998.

[9] ASCE/SEI 43-05 Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities[S]. 2005.

[10] NUREG-0800 standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants, revision 3[S]. 2007.

[11] Westinghouse Electric Company. AP1000 design control document, revision 17[R]. Pittsburgh: Westinghouse Electric Company, 2009.

[12] 战吉艳, 陈国兴, 杨伟林, 等. 苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 559~566. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(3): 559~566. (in Chinese))

[13] EPRI.TR-102293 Guidelines for determining design basis ground motions[S]. 1993.