

剪切波速对场地地表地震动参数的影响¹

曹均锋 冯伟栋 孟凡月 董双林 翟洪涛

(安徽省地震局, 合肥 230031)

摘要 本文以江淮地区典型场地资料为原型, 将土层剪切波速实测值按照一定比例进行增减, 构造多种场地土层地震反应分析模型, 选择 Taft、Elcentro 和 Kobe 三条强震记录作为地震输入, 采用一维频域等效线性化波动方法进行了土层地震反应分析。研究表明, 剪切波速的变异性与场地地表地震动的影响程度与输入基岩地震动的频谱特性、幅值、土层结构等因素有关。地表峰值加速度随着剪切波速的增大而逐渐增大, 地表加速度反应谱的特征周期随着剪切波速的增大而逐渐减小。

关键词: 剪切波速 峰值加速度 特征周期

引言

在工程场地地震安全性评价工作中, 土层剪切波速由于能够反映土体动力特性, 一直是评价场地条件的重要指标和土层地震反应分析中不可缺少的基本参数。目前, 土层剪切波速主要是通过原位测试得到的, 测试方法主要有单孔检层法、跨孔法、瞬态面波法和稳态面波法等。在实际场地剪切波速测试工作中, 由于存在钻孔位置选取、施工方法、测试方法、仪器精度、人工操作等方面的差异, 使得剪切波速的测试结果存在较大的离散性, 而且这种离散性可高达 30%—40%, 甚至更高, 会给科学合理地确定场地地震动参数带来严重的干扰(高玉峰等, 2001; 刘红帅等, 2005; 兰景岩等, 2007; 陈国兴等, 2007; 孙锐等, 2009)。因此, 深入研究土层剪切波速的变异性对场地地表地震动参数的影响, 对相应的影响范围和变化趋势进行探讨是一项非常有意义的工作。

本文以江淮地区典型场地资料为原型, 将其剪切波速实测值按照一定比例进行增减, 重点分析了土层剪切波速的变化对场地地表峰值加速度、加速度反应谱的影响, 以为合理确定安徽及同类地区的重大建设工程抗震设防要求提供参考。

1 分析方法和计算参数

1.1 分析方法

目前, 场地土层地震反应分析计算的方法较多, 如线弹性波动(及振动)分析方法、等效线性化波动分析方法、直接时域非线性积分分析方法等。工程上广泛采用的方法是一维频

1 基金项目 安徽省自然科学基金项目(10040606Q24)和安徽省地震科研青年基金项目(20120707)联合资助

[收稿日期] 2013-03-20

[作者简介] 曹均锋, 男, 生于1983年。工程师。主要从事地震工程方面的工作。E-mail: caojunfeng2009@126.com.

域等效线性化波动方法，也是《工程场地地震安全性评价（GB 17741-2005）》（中华人民共和国国家标准，2005）推荐使用的方法（廖振鹏等，1989）。该方法是在总体动力学效应大致相当的意义上，用一个等效的剪切模量和阻尼比代替所有不同应变幅值下的剪切模量和阻尼比，将非线性问题转化为线性问题，利用频域线性波动方法求解。本文在土层地震反应分析中即运用该方法。

1.2 基本剖面

在江淮地区某场地资料的基础上，结合一维频域等效线性化波动方法的要求，确定 2 个典型钻孔 ZK4、ZK24 作为基本计算剖面。其中，ZK4 的覆盖层厚 42.3m，主要由填土、粘土、中粗砂和砂岩组成，属于中硬场地土；ZK24 的覆盖层厚 29.4m，主要由填土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土、中粗砂、砾石和砂岩等组成，属于中软场地土。基本计算剖面的土层分布情况及实测剪切波速详见图 1。土层非线性动力参数主要是通过现场取典型土样进行动三轴试验得到的，部分土层动力参数采用经典推荐值（袁晓铭等，2000）。

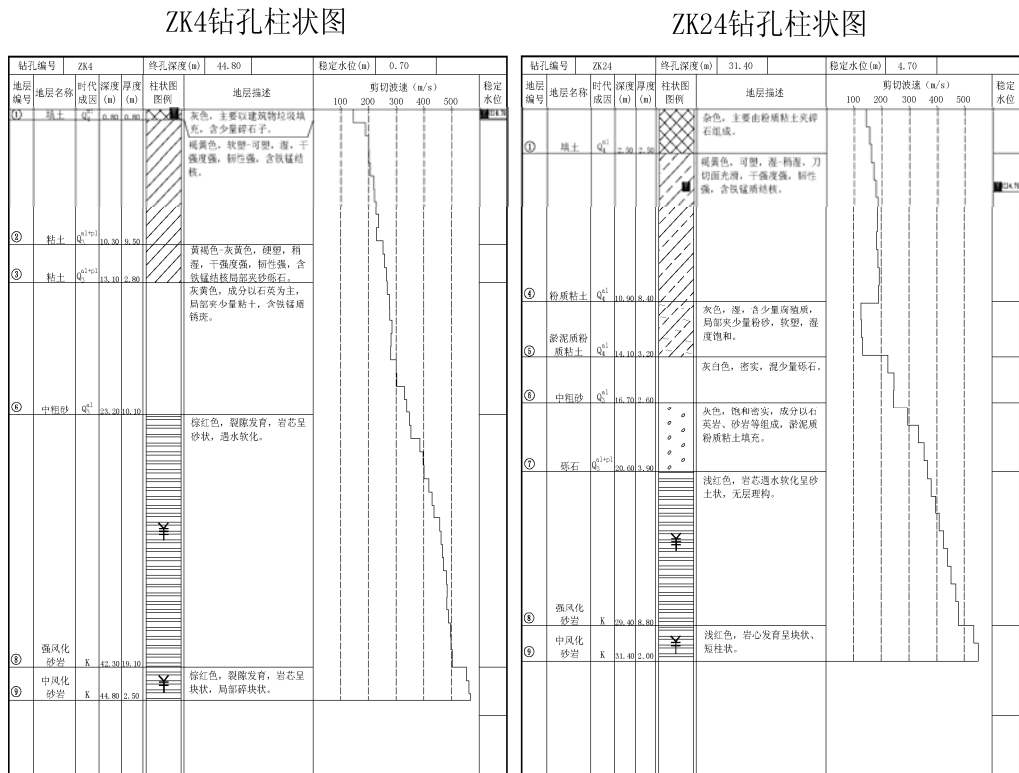


图 1 基本剖面钻孔柱状图

Fig. 1 The drilling histogram of basic profile

1.3 输入基岩地震动

根据输入地震动的选取原则，本次选取了 Taft、Elcentro 和 Kobe 三条符合要求的实际强震记录的时程(图 2)，选取的持时均为 40s。然后将强震记录的加速度峰值均分别调整为 50gal、100gal、200gal、400gal，并将幅值缩小一半的时程作为基岩的地震动输入。

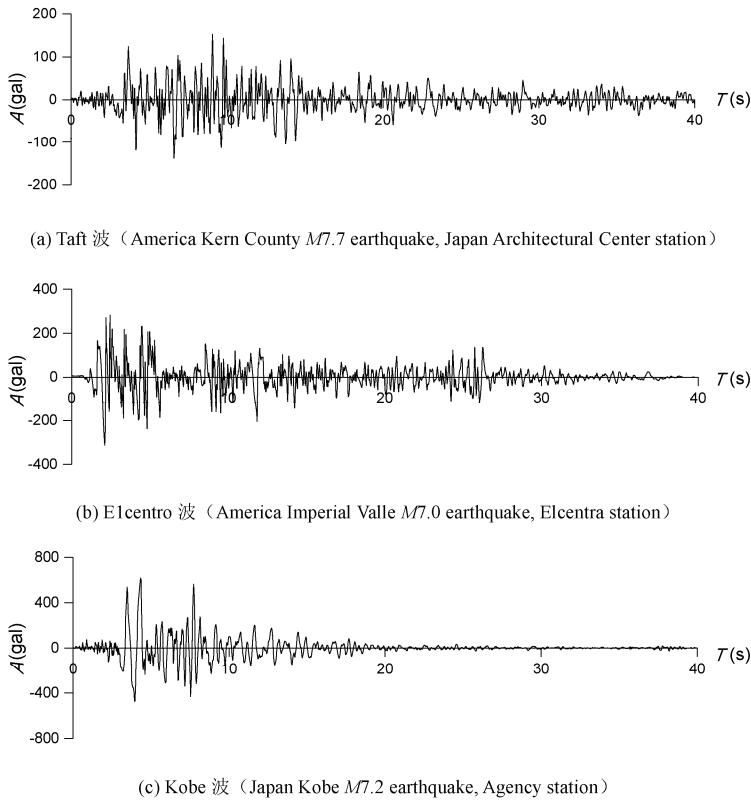


图 2 三条基岩输入强震记录

Fig. 2 The three input strong motion records

2 地震反应分析结果

基于对钻孔ZK4、ZK24基本剖面的分析，对同一剖面将各土层的剪切波速实测值分别按5%、10%、15%、20%比例进行增大或减小建立9种土层反应分析模型，选取调整后的3组地震波作为输入地震动，共对216个工况进行土层地震反应分析，得到各地表峰值加速度 $A_{max}(gal)$ 及地表加速度反应谱的特征周期 $T_g(s)$ 如表1、表2所示（注：表中 A_{max} 和 T_g 取同一峰值下3条输入波计算结果的均值）。其中，反应谱的特征周期 $T_g(s)$ 取反应谱平台值 $A_{max}\beta_m$ 与反应谱曲线的右相交点的横坐标周期值，根据《中国地震动参数区划图》宣贯教材中的相关统计结果（胡聿贤等，2001），反应谱的放大系数 β_m 统一取2.5。

表 1 不同土层剪切波速下的峰值加速度 $A_{max}(gal)$

Table 1 The acceleration peak $A_{max}(gal)$ under different shear velocity of soil layers

基本剖面	输入峰值 (gal)	-20%	-15%	-10%	-5%	实测	+5%	+10%	+15%	+20%
ZK4	50	75.4	75.4	78.6	80.2	81.3	83.5	81.5	82.2	83.3
	100	141.2	144.3	152.2	152.2	155.5	159.6	156.5	157.4	159.8
	200	283.9	275.5	270.9	287.4	296.3	303.6	295.8	305.4	306.9

续表

基本剖面	输入峰值 (gal)	-20%	-15%	-10%	-5%	实测	+5%	+10%	+15%	+20%
ZK4	400	472.1	534.3	594.5	603.5	566.6	547.6	555.7	591.4	608.2
ZK24	50	89.1	84.9	81.3	82.9	87.5	89.7	92.0	98.7	102.3
	100	145.7	164.0	172.1	171.2	160.5	157.1	160.6	160.8	171.5
	200	165.6	190.3	214.8	236.6	253.0	279.0	304.6	315.5	307.8
	400	336.7	355.9	388.6	423.7	453.0	475.7	502.7	524.1	521.0

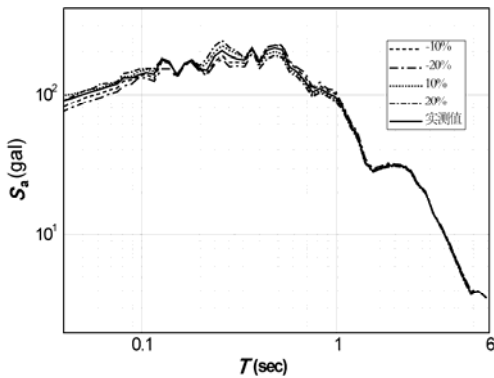
表 2 不同土层剪切波速下的反应谱特征周期 T_g (s)

Table 2 The characteristic period of response spectrum T_g (s) under different shear velocity of soil layers

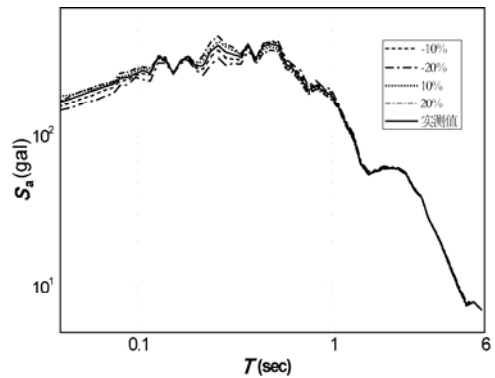
基本剖面	输入峰值 (gal)	-20%	-15%	-10%	-5%	实测	+5%	+10%	+15%	+20%
ZK4	50	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.62	0.62	0.60	0.58
	100	0.72	0.70	0.67	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.59
	200	0.79	0.77	0.74	0.70	0.69	0.67	0.66	0.62	0.61
	400	1.02	0.97	0.87	0.83	0.80	0.76	0.74	0.72	0.67
ZK24	50	0.82	0.80	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.61	0.55
	100	0.98	0.92	0.86	0.82	0.79	0.76	0.74	0.72	0.68
	200	1.12	1.05	1.03	1.01	0.97	0.93	0.87	0.83	0.81
	400	1.17	1.11	1.06	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97

图 3 和图 4 为 2 个钻孔输入 Elcentro (1940NS) 波时不同土层剪切波速下的地表加速度反应谱。由图中可以看出：

(1) 对于剖面 ZK4 而言，当输入基岩峰值 $\leq 100\text{gal}$ 时，不同土层剪切波速下的地表加速度反应谱仅在 0—1.0s 较短周期范围内呈现略微变化，周期越短，反应谱变化越显著，反应谱在 1.0s 以后受土层剪切波速的影响基本可以忽略。当输入基岩峰值超过 200gal 时（即大震



(a) 50gal



(b) 100gal

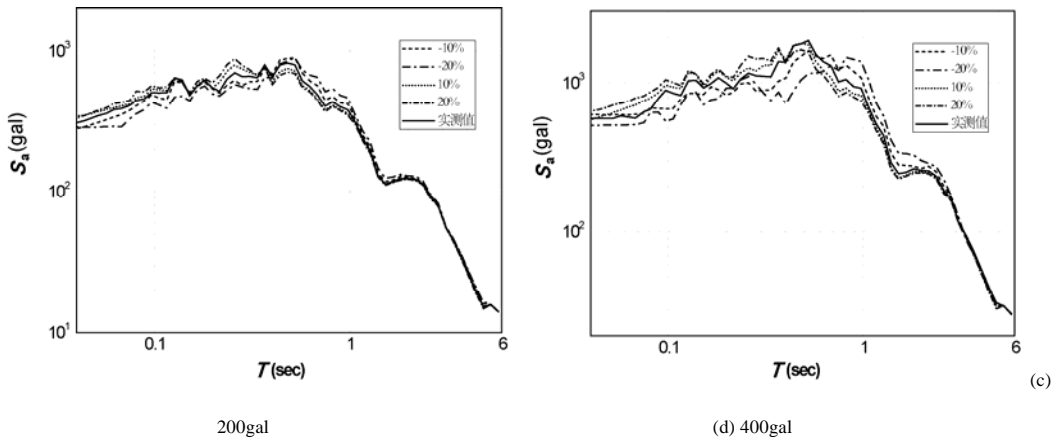


图 3 ZK4 不同土层剪切波速下的地表加速度反应谱

Fig. 3 The response spectrum under different shear velocity of soil layers for basic profile ZK4

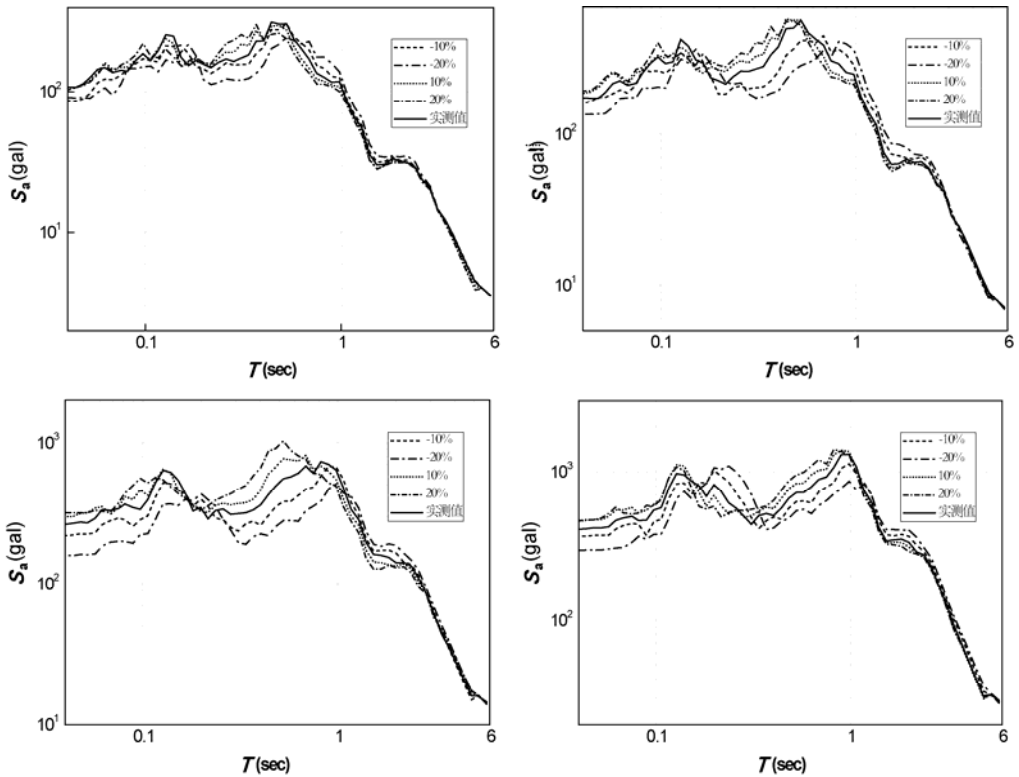


图 4 ZK24 不同土层剪切波速下的地表加速度反应谱

Fig. 4 The response spectrum under different shear velocity of soil layers for basic profile ZK24

作用下), 地表加速度反应谱的形状在 0—6.0s 范围内均受到土层剪切波速不同程度的影响, 当土层剪切波速减小时, 反应谱的长周期部分右移, 短周期谱值减小, 长周期部分谱值普遍增大; 当土层剪切波速增大时, 短周期谱值增大, 反应谱中、短周期部分影响较大, 反应谱曲线向左移动。

(2) 由于剖面 ZK24 包含淤泥质软弱土层，而软弱层表现出强烈的非线性，因此输入基岩峰值的大小对其地表加速度反应谱差异影响有限。当输入基岩峰值为 50gal 时，不同土层剪切波速下的地表加速度反应谱在 0—6.0s 范围即开始呈现较大差异，随着输入基岩峰值的增加，反应谱的形状差异呈扩大趋势，总体表现为与 ZK4 大震作用下呈现的趋势基本一致。

3 剪切波速变异性影响分析

为分析土层剪切波速变异性对场地地震动参数的影响，将调整后的剪切波速计算结果与实测值计算结果进行对比分析。为直观表示差异，以实测值计算结果为基准，表 3、表 4、图 5 和图 6 分别给出了 8 种缩放的剪切波速计算结果与波速实测值计算结果的相对偏差。

表 3 地表峰值加速度比较结果

Table 3 The comparison results of peak ground acceleration

基本剖面	输入峰值(gal)	剪切波速差异程度 (与实测值比较)							
		-20%	-15%	-10%	-5%	+5%	+10%	+15%	+20%
ZK4	50	-7.2%	-7.3%	-3.3%	-1.3%	2.7%	0.2%	1.1%	2.4%
	100	-9.2%	-7.2%	-2.1%	-2.1%	2.7%	0.6%	1.2%	2.7%
	200	-4.2%	-7.0%	-8.6%	-3.0%	2.5%	-0.2%	3.1%	3.6%
	400	-16.7%	-5.7%	4.9%	6.5%	-3.4%	-1.9%	4.4%	7.3%
ZK24	50	1.9%	-3.0%	-7.1%	-5.2%	2.5%	5.1%	12.8%	16.9%
	100	-9.2%	2.2%	7.2%	6.6%	-2.1%	0.0%	0.2%	6.9%
	200	-34.5%	-24.8%	-15.1%	-6.5%	10.3%	20.4%	24.7%	21.7%
	400	-25.7%	-21.4%	-14.2%	-6.5%	5.0%	11.0%	15.7%	15.0%

表 4 反应谱特征周期比较结果

Table 4 The comparison results of characteristic period of response spectrum

基本剖面	输入峰值(gal)	剪切波速差异程度 (与实测值比较)							
		-20%	-15%	-10%	-5%	+5%	+10%	+15%	+20%
ZK4	50	12.2%	10.1%	6.3%	3.7%	-2.1%	-2.1%	-4.8%	-7.4%
	100	12.0%	8.9%	4.2%	2.1%	-1.0%	-2.6%	-5.2%	-7.3%
	200	14.5%	11.1%	7.2%	1.0%	-3.4%	-3.9%	-10.1%	-11.6%
	400	27.5%	20.8%	8.3%	3.3%	-4.6%	-7.5%	-10.4%	-16.7%
ZK24	50	13.9%	11.1%	10.2%	3.7%	-3.7%	-6.5%	-15.7%	-23.1%
	100	23.6%	16.0%	8.4%	3.4%	-3.4%	-5.9%	-8.4%	-13.5%
	200	15.1%	8.2%	6.5%	3.8%	-3.8%	-10.7%	-14.8%	-16.8%
	400	15.5%	9.6%	4.6%	1.0%	-0.7%	-2.0%	-3.3%	-4.3%

从以上结果可以看出：

(1) 在同一基本剖面下, 将实测土层剪切波速值在 20% 范围内增加或减小, 得到的计算结果与实测剪切波速的计算结果存在较大差异, 剪切波速差异性越大, 其地表峰值加速度和地表加速度反应谱特征周期的变化也越大。对于剖面 ZK4 而言, 地表峰值加速度的变化幅度为-16.7%—7.3%, 反应谱特征周期的变化幅度为-16.7%—27.5%; 对于剖面 ZK24 而言, 地表峰值加速度的变化幅度为-34.5%—24.7%, 反应谱特征周期的变化幅度为-16.8%—23.6%。

(2) 地表地震动峰值加速度与土层剪切波速值呈正相关, 土层剪切波速减小, 地震动峰值加速度也逐渐减小; 土层剪切波速增大, 地震动峰值加速度也逐渐增大。如剖面 ZK24 在基岩输入峰值 200gal 条件下, 当土层剪切波速从减小 5% 依次减小 20% 时, 与实测剪切波速计算的地震动峰值加速度相比, 其地震动峰值加速度的差异也从-6.5% 逐渐减小为-34.5%, 反之亦然。

(3) 地表加速度反应谱特征周期与土层剪切波速值呈负相关, 当土层剪切波速减小时, 反应谱特征周期反而会相应增加; 当土层剪切波速增大时, 反应谱特征周期会相应减小。如剖面 ZK4 在基岩输入峰值 100gal 条件下, 当土层剪切波速从减小 5% 依次减小 20% 时, 与实测剪切波速计算的反应谱特征周期相比, 其反应谱特征周期的差异也从 2.1% 逐渐增大为 12.0%, 反之亦然。

(4) 相比较而言, 土层剪切波速减小对地表地震动峰值加速度、反应谱特征周期的影响比土层剪切波速增大时影响程度要略微大一些。

(5) 土层剪切波速的变异性对场地地表地震动的影响程度受输入基岩地震动的幅值的制约。总体上表现为随着输入基岩地震动峰值的增大, 不同的土层剪切波速下的地表峰值加速度、反应谱特征周期的差异也逐渐增大。

(6) 同一基岩地震动输入下, 场地相对较软的剖面 ZK24 的土层剪切波速变化对地震动峰值加速度、反应谱特征周期的影响程度比剖面 ZK4 大, 表明土层剪切波速的变异性对场地地表地震动的影响程度与场地的土层结构有关, 土层剪切波速的大小直接反映了场地土层的“软”、“硬”程度, 场地越软, 影响越大。

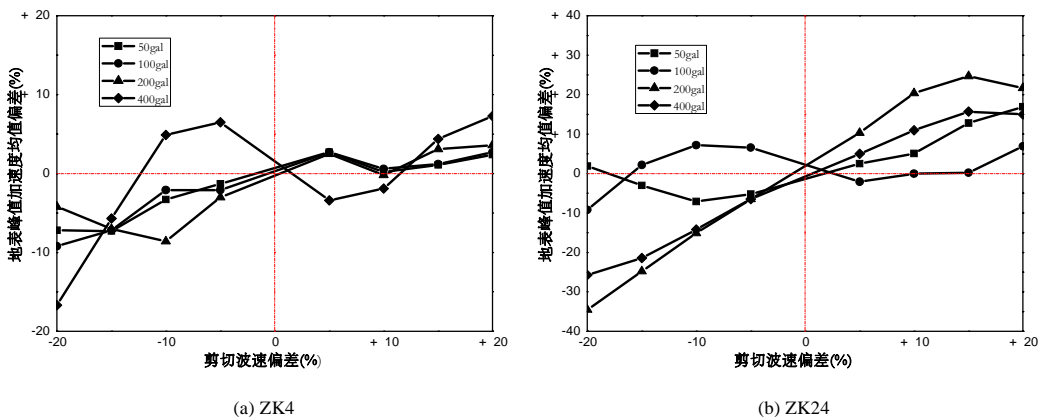


图5 土层剪切波速变化对地表峰值加速度的影响

Fig. 5 Effects of variability of the shear velocity of soil layers on peak ground acceleration

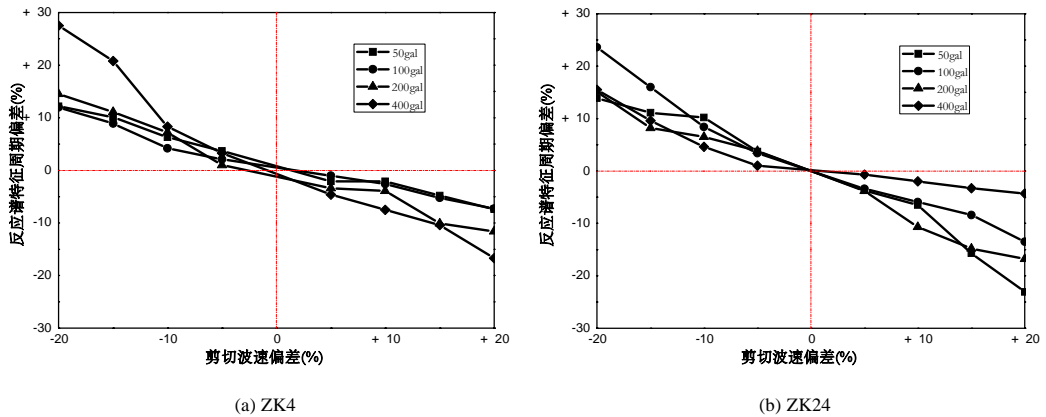


图 6 土层剪切波速变化对反应谱特征周期的影响

Fig. 6 Effects of variability of the shear velocity of soil layers on characteristic period of response spectrum

4 结语

本文以江淮地区典型场地资料为原型，采用一维频域等效线性化波动方法重点分析了土层剪切波速的变化对场地地表峰值加速度、加速度反应谱的影响。研究表明：

(1) 当土层剪切波速减小时，地表地震动峰值加速度也逐渐减小，地表加速度反应谱的长周期部分右移，长周期部分谱值普遍增大，反应谱特征周期会相应增加。

(2) 当土层剪切波速增大时，地表地震动峰值加速度也逐渐增加，地表加速度反应谱的长周期部分右移，对反应谱中、短周期部分影响较大，反应谱曲线向左移动，反应谱特征周期会相应减小。

(3) 相比较而言，土层剪切波速减小对地表地震动参数的影响比土层剪切波速增大对地表地震动参数的影响程度要略微大一些。

(4) 土层剪切波速的差异对场地地表地震动的影响程度与输入基岩地震动的频谱特性、幅值及场地土层结构等因素有关。

由此可见，土层剪切波速的变化对场地地表地震动有着显著影响，因此，获取客观的土层剪切波速资料对土层地震反应分析来说至关重要。

参考文献

- 陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉, 2007. 土动力参数变异性对深软场地地表地震动参数的影响. 防灾减灾工程学报, **27** (1): 1—10.
- 高玉峰, 刘汉龙, 朱伟等, 2001. 剪切波速对砂土层地震反应的影响. 工程勘察, (1): 39—42.
- 胡聿贤, 高孟潭, 杜玮等, 2001. 《中国地震动参数区划图》宣贯教材. 北京: 中国标准出版社, 85—87.
- 兰景岩, 薄景山, 吕悦军, 2007. 剪切波速对设计反应谱的影响研究. 震灾防御技术, **2** (1): 19—24.
- 廖振鹏, 李小军, 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 见: 地震小区化 (理论与实践). 北京: 地震出版社, 141—153.
- 刘红帅, 薄景山, 吴兆营等, 2005. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响. 地震研究, **28** (2): 167—171.

- 孙锐, 袁晓铭, 刘晓键, 2009. 动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究. 岩土工程学报, **31** (8): 1267—1274.
- 袁晓铭, 孙锐等, 2000. 常规土类动剪切模量和阻尼比试验研究. 地震工程与工程振动, **20** (4): 133—139.
- 中华人民共和国国家标准, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.

Effect of Shear Wave Velocity on the Ground Motion Parameters of Site Surface

Cao Junfeng, Feng Weidong, Meng Fanyue, Dong Shuanglin and Zhai Hongtao

(Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract Based on the data from typical sites in Jianghuai Region, many kinds of soil layer sites for the seismic response is modeled by increasing and decreasing the real test values of shear wave velocity to a scale. The seismic response of the soil layer sites is calculated with the one dimension equivalent linear method in frequency domain by choosing the Taft, Kobe and Elcentro strong motion record as the earthquake input. Our results show that the effect degree of velocity variation on the ground motion is in relation to the spectral characteristic of bedrock input earthquake motion, amplitude and soil layer structure. When the shear wave velocity increases, the peak acceleration increases, however, the characteristic period of the acceleration response spectra decreases.

Key words: Shear wave velocity; Peak acceleration; Characteristic period