

# 浅硬场地剪切波速测试标准差对地震动影响初探<sup>①</sup>

陈卓识, 袁晓铭

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**采用 Shake 2000 程序,以 Turkey Flat 试验场地为模型,通过输入不同类型下多种强度的地震波,计算研究多工况下剪切波速测试标准差对地表加速度反应谱和峰值加速度的影响。结论为:(1)浅硬场地上剪切波速测试标准差对地震动的影响很大,影响程度与输入地震波的强度和频率以及场地剪切波速计算值有关;(2)如果将反应谱残差大于 20%或加速度峰值差别大于 20%定义为统计意义上的不可忽略,那么剪切波速测试标准差对计算结果的影响在大多数情况下均不可忽略;(3)当输入波的卓越周期与场地特征周期接近时,浅硬场地上剪切波速测试标准差引起的反应谱变化非常显著;(4)只有当输入波的卓越周期与场地特征周期相差较大且输入波强度偏小时,剪切波速测试标准差引起的反应谱变化才可略去;(5)当浅硬场地上剪切波速实测结果低于统计均值时,地震动计算结果的偏差一般明显大于剪切波速实测结果,高于统计均值时引起的偏差,且地震输入越强表现越明显。

**关键词:**剪切波速;测试标准差;浅硬场地;地震动

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0040-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0040

## Influence of the Shear Wave Velocity Test Standard Deviation on Ground Motion at a Shallow Stiff Site

CHEN Zhuo-shi, YUAN Xiao-ming

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** This study addressed the influence of the shear-wave velocity test standard deviation on ground motion. The Shake 2000 program and site model of Turkey Flat were used to analyze the response spectrum of ground and peak acceleration under a variety of engineering conditions by inputting different types of multi-intensity seismic waves. The study concluded the following: (1) the impact of the shear wave velocity test standard deviation on ground motion in the shallow stiff soil site is related to the intensity and frequency of the input seismic waves, and the calculated value of shear wave velocity; (2) if the response spectrum residuals or peak acceleration  $D$ -value exceed 20%, the effects of the velocity test standard deviation cannot be ignored in most situations; (3) when the predominant period of the input ground motion is similar to the characteristic site period, the changes of the response spectrum caused by the shear wave velocity test standard deviation in the shallow stiff soil site is significant; (4) only when the predominant period of the input ground motion with weak intensity and the characteristic site period are largely different, can the changes in the response spectrum caused by the test standard deviation be omitted; and (5) if the shear wave velocity in the shallow stiff soil is lower than the statistical mean value, the calculated

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家科技部地震行业专项(201308015); 黑龙江省留学归国基金(LC2013C14); 国家自然科学基金(51278472)

作者简介: 陈卓识(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事冻土动力学、现场测试等方面的研究. E-mail: various@163.com

value deviation of ground motion is larger than the measured value of shear wave velocity which is higher than the calculated mean value, and the ground response is more obvious with higher intensity of the input ground motion.

**Key words:** shear wave velocity; test standard deviation; shallow stiff site; ground motion

## 0 引言

近年来我国工程建设项目数量迅速增加,难度大幅提高,抗震设计变得更加重要。自 1998 年《中国人民共和国防震减灾法》颁布实施以来,按其要求开展的地震小区划和工程场地地震安全性评价工作在全国范围内日益广泛。其中,场地地震地面运动(地震动)的计算分析决定了地基和工程结构地震响应的输入,是进行抗震设防以及工程建设地震安全性评价的关键环节<sup>[1-2]</sup>。剪切波速  $V_s$  是地震动分析中必须实地测试的重要参数,也是衡量场地性质的重要指标之一<sup>[1-3]</sup>。剪切波速的变化对地震动的影响是土力学领域的一项重点研究内容。

场地剪切波速实测结果存在着不确定性。这种不确定性主要源于两个方面:一是对确定的某类土或某一地区,其波速的分布具有离散性;二是对某个固定的场地,由于剪切波速测试技术及不同人员引起的测试偏差,即便保持其他条件一致的情况下,  $V_s$  的多次测量也存在偏差<sup>[4-5]</sup>。对于前者,一些学者已经给出了一些统计分析结果,如刘红帅等<sup>[6]</sup>采用  $\chi^2$  分布研究了黏性土剪切波速不确定性,给出了 95% 参考值的上限和下限;王广军等<sup>[7]</sup>统计给出了常规土类的剪切波速值及其变异系数;高玉峰等<sup>[8]</sup>统计给出了合肥膨胀土剪切波速的均值和最大、最小值;齐文浩等<sup>[9]</sup>对西安阎良地区剪切波速进行统计分析后给出了统计方差。但对于后者(即一个确定场地条件下现场波速测试误差问题),目前还缺乏专门的研究成果。这种偏差会引起地震地面运动分析出现偏差,进而影响抗震设计所需地震动参数估计的可靠性和精度。

目前,针对剪切波速不确定性对场地响应的影响已经有学者进行了一些研究。刘红帅等<sup>[10]</sup>用一维等效线性化方法研究了不同参数对地表峰值加速度和反应谱的影响。李平等<sup>[11]</sup>用一维等效性方法研究了黏土和砂土剪切波速差异性对地表响应的影响。高玉峰等<sup>[12]</sup>研究了剪切波速对砂土地震反应的影响。陈国兴等<sup>[13]</sup>用一维波法和 SHAKE91 研究了剪切波速变异性对深软场地地表峰值加速度及其反应谱的影响。这些研究均得到了一些有意义的成果。但需注意的是,因为很难获得场地波速的

实际测试误差,上述研究是在假定剪切波速偏差范围的基础上进行的计算分析,因此其结果还无法准确地体现客观事实。

从 1988 年 Turkey Flat 试验场地建成开始,美国雇佣大量的公司和机构对同一永久试验孔内的剪切波速进行了大量的现场测试并给出了孔内波速测试误差<sup>[14]</sup>。这为研究波速误差对地震动影响提供了重要的现场实测结果。因此,本文以此场地的剪切波速实测结果为依据,采用计算分析方法研究剪切波速测试标准差对浅硬场地上地震动影响,分析中采用不同类型地震波的不同强度输入,以期获得浅硬场地上多工况下的真实剪切波速测试标准差对地表响应影响规律的初步认识。

## 1 计算模型和参数

Turkey Flat 场地位于美国加州 Parkfield 地区的一个冲积河谷中。图 1 给出了 Turkey Flat 场地钻孔布置图,本文所用数据由钻孔 V1-D2-D3 提供。图 2 为 V1-D2-D3 剪切波速实测曲线和根据实测波速曲线给出的考虑了标准差的波速曲线。根据 1988 年 Real 等<sup>[14]</sup>的实验结果,图 2 中  $V_{s(\text{Mean})}$  代表剪切波速测试均值,  $V_{s(\text{Mean} \pm \text{Sigma})}$  代表剪切波速均值加减标准差的剪切波速。

V1-D2-D3 试验孔的土性如表 1 所示。该场地上表层覆盖约 2 m 深的软土,下层为风化岩石和岩石,场地的特征周期约为 0.19~0.20 s<sup>[4]</sup>。按照我国《建筑抗震设计规范》(GB50 011-2010)的定义<sup>[5]</sup>,本场地为 I 类场地,是典型的浅硬场地。

本文计算中输入的 4 条加速度记录分别为 Turkey Flat 场地 2004 年实际记录到的  $M_w 6.0$  Parkfield 波、El-Centro 波、2002 年日本 KYTH04 台阵加速度记录以及 Qianan 波。4 条输入的加速度时程及反应谱如图 3 所示。由于 Parkfield 波为场地地震仪实际记录到的地震动卓越周期为 0.2~0.3 s,和场地特性的匹配性最好,故以其为基准值简要分析另外 3 条地震动的特性。El-Centro 波的卓越周期成分与其较为接近,但在 0.2~0.25 s 的反应谱成分峰值略低;KYTH04 波卓越频率比 Parkfield 波高,以周期为 0.06~0.14 s 的高频成分

为主;Qianan波卓越频率比Parkfield波低,以周期为0.3~0.8 s的低频成分为主。本文为研究不同强度地震作用下 $V_s$ 误差对场地响应的影响,输入的4条地震波的峰值加速度分别取0.03 g,0.06 g,0.15 g和0.30 g。通过这样的数据组合,4条地震波的频率成分较为丰富,基本上覆盖了卓越周期从0.06~1 s的地震波。这样的数据组合较为合理<sup>[15]</sup>。

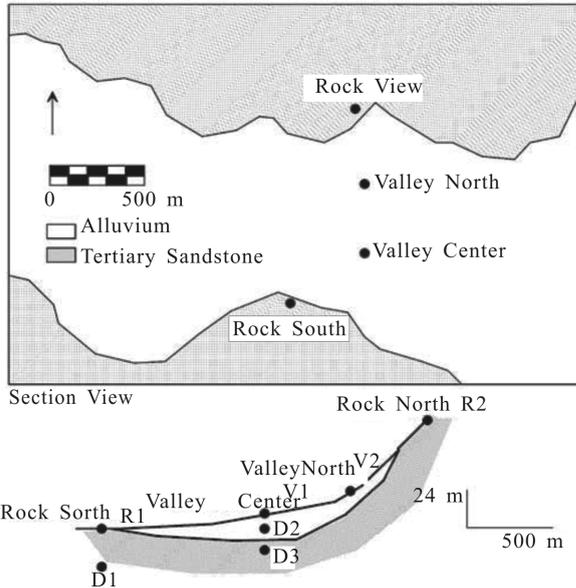


图1 Turkey Flat 场地 V1-D2-D3 钻孔布置图

Fig.1 Boreholes V1-D2-D3 in site Turkey Flat

本文计算场地响应的程序采用国际上通用的一维土层地震反应分析程序SHAKE2000,输入图2

表2 土体非线性数据

Table 2 Nonlinear parameters of the soil

应变取值	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
$G/G_{\max}$	0.982 1	0.952 4	0.821 4	0.726 2	0.386 9	0.248 1	0.077 4	0.047 6
$\beta$	0.014 2	0.016 0	0.033 7	0.051 5	0.115 4	0.150 9	0.204 1	0.213 0

### 3 地表加速度反应谱影响等级划分

场地特征周期对地震响应有重要影响。按剪切波速加权平均,以 $4H/V_s$ 简化方法计算得到的考虑剪切波速测试标准差的场地特征周期如表3所示。其中,输入 $V_{S(\text{Mean})}$ 计算得到的场地卓越周期与实测结果较为接近。

为直观给出剪切波速测试标准差对反应谱的影响,定义反应谱残差 $R$ 为

$$R = \ln[S_a(T)]V_{S(\text{Mean} \pm \text{Sigma})} - \ln[S_a(T)]V_{S(\text{Mean})} \quad (1)$$

式中, $[S_a(T)]V_{S(\text{Mean} \pm \text{Sigma})}$ 代表用 $V_{S(\text{Mean} \pm \text{Sigma})}$ 计算得到的地表加速度反应谱; $[S_a(T)]V_{S(\text{Mean})}$ 代表用

中所示的 $V_{S(\text{Mean} + \text{Sigma})}$ 、 $V_{S(\text{Mean})}$ 和 $V_{S(\text{Mean} - \text{Sigma})}$ 三组剪切波速值。场地土的动力非线性如表2所示, $G/G_{\max}$ 为动模量比, $\beta$ 为阻尼比,由室内试验给出<sup>[4]</sup>。通过下文的计算分析给出不同地震波在不同地震强度输入下剪切波速测试标准差对地面响应的影响。

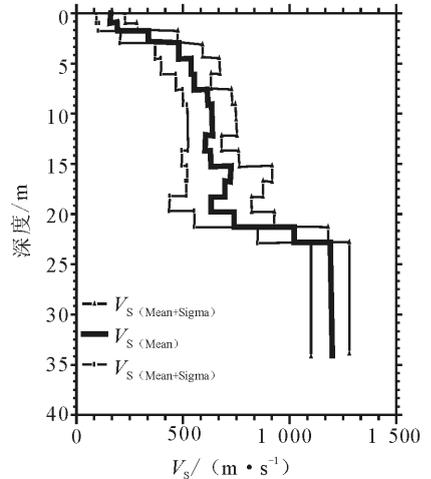


图2 V1-D2-D3 钻孔内剪切波速均值及其标准差  
Fig.2 Mean value and standard deviation of the shear-wave velocity in boreholes V1-D2-D3

表1 V1-D2-D3 试验孔土性

Table 1 Soil characters of boreholes V1-D2-D3 in Turkey Flat

土壤类别	深度/m	密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
表层软土	0~1.8	15.7
深层硬土和风化岩石	1.8~22.9	17.6
风化层下部基岩	>22.9	21.5

$V_{S(\text{Mean})}$ 计算得到的地表加速度反应谱;残差 $R$ 表示计算 $[S_a(T)]V_{S(\text{Mean} \pm \text{Sigma})}$ 对 $[S_a(T)]V_{S(\text{Mean})}$ 计算残差后取对数的值。残差值取对数的好处是可以以0轴作为标准轴,偏差值在轴两端波动,变化量一目了然。 $R$ 曲线直观给出了剪切波速测试标准差对地表加速度反应谱的影响程度。

表3 场地的特征周期和等效剪切波速

Table 3 The characteristic period and equivalent shear-wave velocity of the site

$V_s$ 计算取值	等效剪切波速 $V_{se}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	场地特征周期 $T/s$
$V_{S(\text{Mean} - \text{Sigma})}$	381	0.242
$V_{S(\text{Mean})}$	537	0.178
$V_{S(\text{Mean} + \text{Sigma})}$	671	0.139

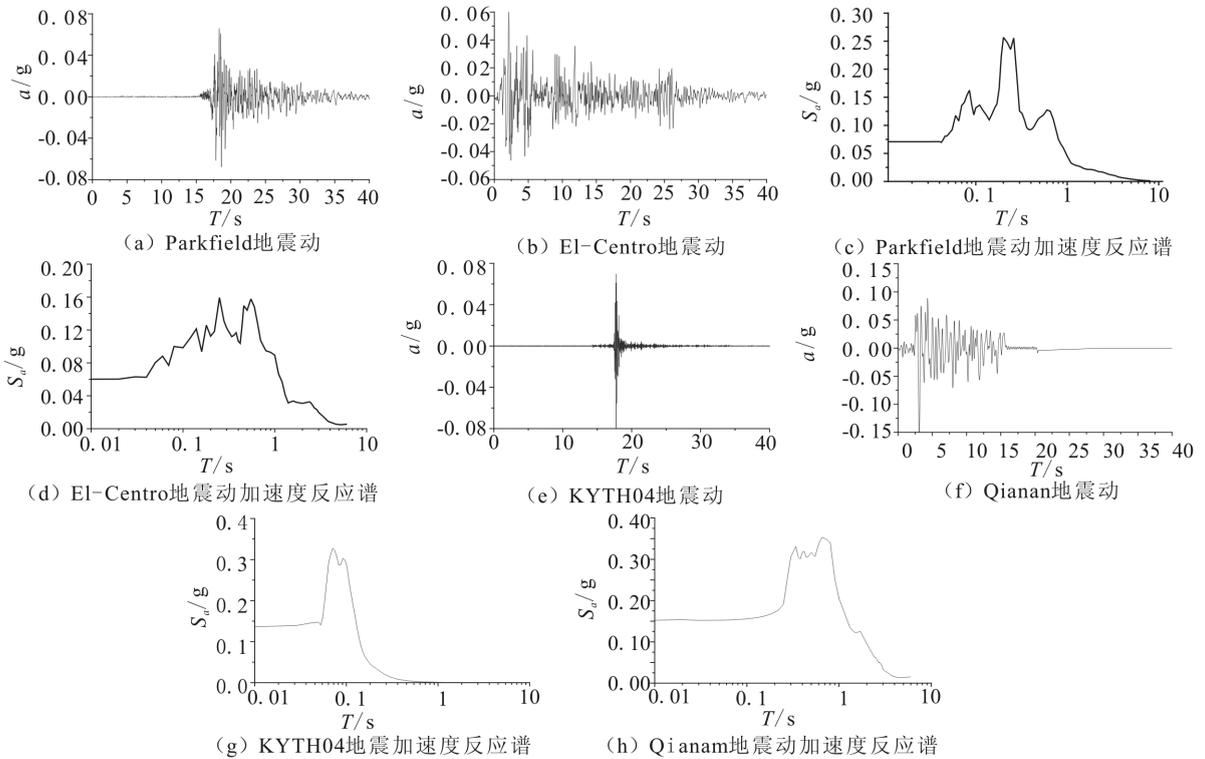


图 3 输入的地震动及其反应谱

Fig.3 Input ground motions and their response spectrums

由式(1)确定的反应谱谱比值  $[S_a(T)] / V_{S(\text{Mean} \pm \text{Sigma})} / [S_a(T)] V_{S(\text{Mean})}$  与残差对应关系如表 4。规范<sup>[2]</sup>中认为,所谓“统计意义上相符”指多组时程波的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所用的地震影响系数曲线相比,在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%”。根据这一定义,只要地表加速度反应谱卓越周期部分的变化超过 20%即可认为反应谱的变化不可忽略。这一指标定性给出了反应谱影响程度的基本线,但作者认为只有这一指标是不够的,还需给出更详细的影响程度划分指标。

本文以反应谱峰值变化 20%、50%和 80%作为波速标准差对反应谱影响程度的分级标准。由表 4 中  $R$  和反应谱谱比值的对应关系定义:当  $|R| \leq 0.2$  时(此时反应谱峰值相差 20%以内),认为波速标准差引起地表加速度反应谱变化可以忽略;当  $-0.7 \leq R \leq -0.2$  或者  $0.4 \geq R \geq 0.2$  时(此时反应谱峰值相差 20%~50%),波速测试标准差对地表加速度反应谱有一定影响;取  $-1.6 \leq R \leq -0.7$  或者  $0.6 \geq R \geq 0.4$  时(此时反应谱峰值相差 50%~80%),波速测试标准差对地表加速度反应谱有较大影响;取  $R \leq -1.6$  或者  $R \geq 0.6$  时(此时反应谱峰值相差大

于 80%),波速测试标准差对地表加速度反应谱有显著影响。本文定义的地表加速度反应谱影响等级划分标准如表 5 所示。

表 4 反应谱谱比值与残差  $R$  的换算关系

Table 4 Conversion between the ratio of response spectra and the residuals  $R$

$R$	-1.6	-0.7	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6
反应谱谱比	0.20	0.50	0.81	1.00	1.22	1.50	1.81

表 5  $V_s$  标准差对反应谱影响程度划分

Table 5 Influence of the standard deviation of  $V_s$  on the response spectra

反应谱峰值相差	对应 $R$ 值	影响程度
小于 20%	$ R  \leq 0.2$	可忽略
20%~50%	$-0.7 \leq R \leq -0.2$ 或 $0.4 \geq R \geq 0.2$	一定
50%~80%	$-1.6 \leq R \leq -0.7$ 或 $0.6 \geq R \geq 0.4$	较大
大于 80%	$R \leq -1.6$ 或者 $R \geq 0.6$	显著

#### 4 标准差对反应谱的影响

作者使用 SHAKE2000 程序计算模型和参数,给出了多工况下剪切波速测试标准差对地表加速度反应谱的影响。计算得到的反应谱和残差如图 4~图 7 所示。

由图 4~图 7 可见,剪切波速测试标准差引起

的反应谱差别始终存在,且按表 5 以反应谱残差超过 20% 为标准,则大多数情况下波速标准差对反应谱的影响均不可忽略。当输入波的卓越频率与场地特征周期接近时(如图 4、图 5 所示),剪切波速测试标准差引起的反应谱变化显著。只有当输入波的卓

越周期与场地特征周期相差较大且输入波强度偏小时(如图 7 中输入 0.03 g、0.06 g 所示计算结果),剪切波速测试标准差引起的反应谱变化才可略去。按照前文根据  $R$  值确定出的影响程度的定义,将波速测试标准差对反应谱的影响程度列于表 6。

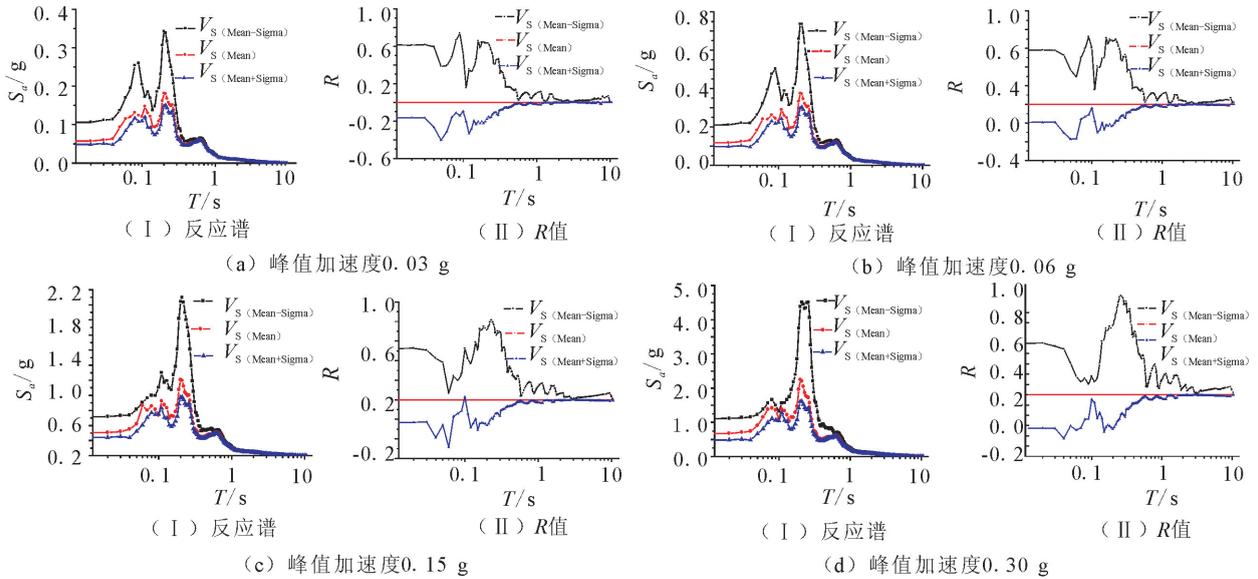


图 4 Parkfield 波作用下地表加速度反应谱及残差

Fig.4 The surface acceleration response spectra and residuals  $R$  under the action of Parkfield wave

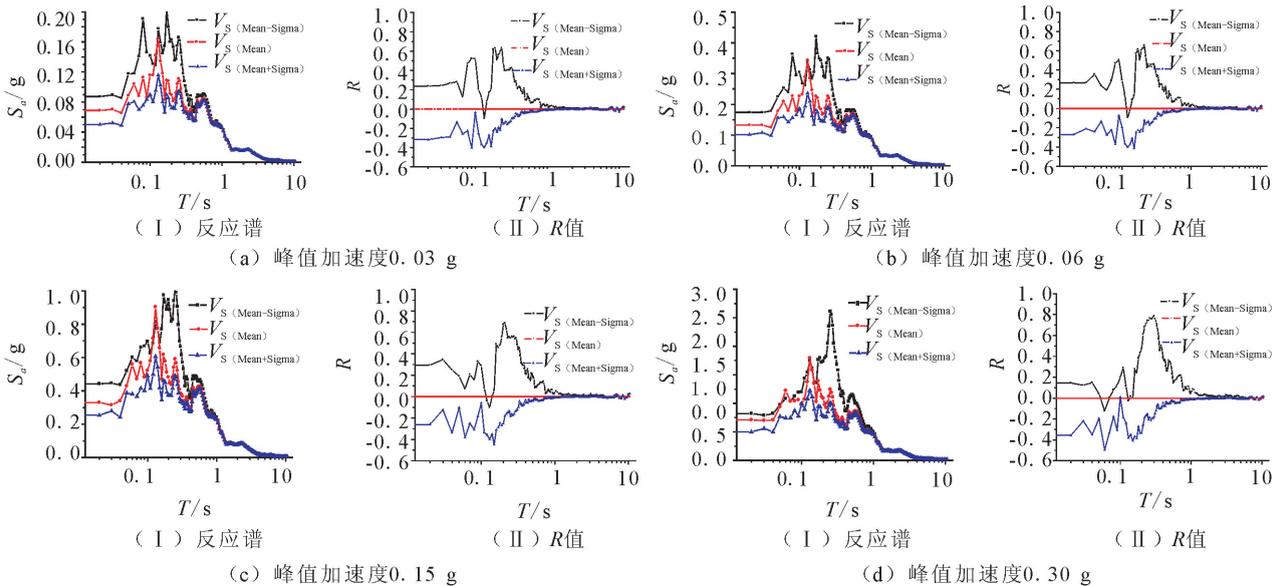


图 5 El-Centro 波作用下地表加速度反应谱及残差

Fig.5 The surface acceleration response spectra and residuals  $R$  under the action El-Centro wave

剪切波速测试标准差引起的反应谱与地震波输入强度和地震波频率有关,也与剪切波速标准差的正负取向有关,几个参数对地震动的影响有着较为复杂的关系。如图 4~图 7 所示, Parkfield 波和 El-Centro 波的主频与场地卓越周期接近,波速测试标

准差不仅对反应谱影响大,而且表现为  $V_{S(Mean-Sigma)}$  引起的反应谱变化比  $V_{S(Mean+Sigma)}$  时影响更加明显,且地震输入越强这种现象越显著,对 Parkfield 波尤其如此。其主要原因下: 一是因为 Parkfield 波的卓越周期为 0.2~0.3s,而场地剪切

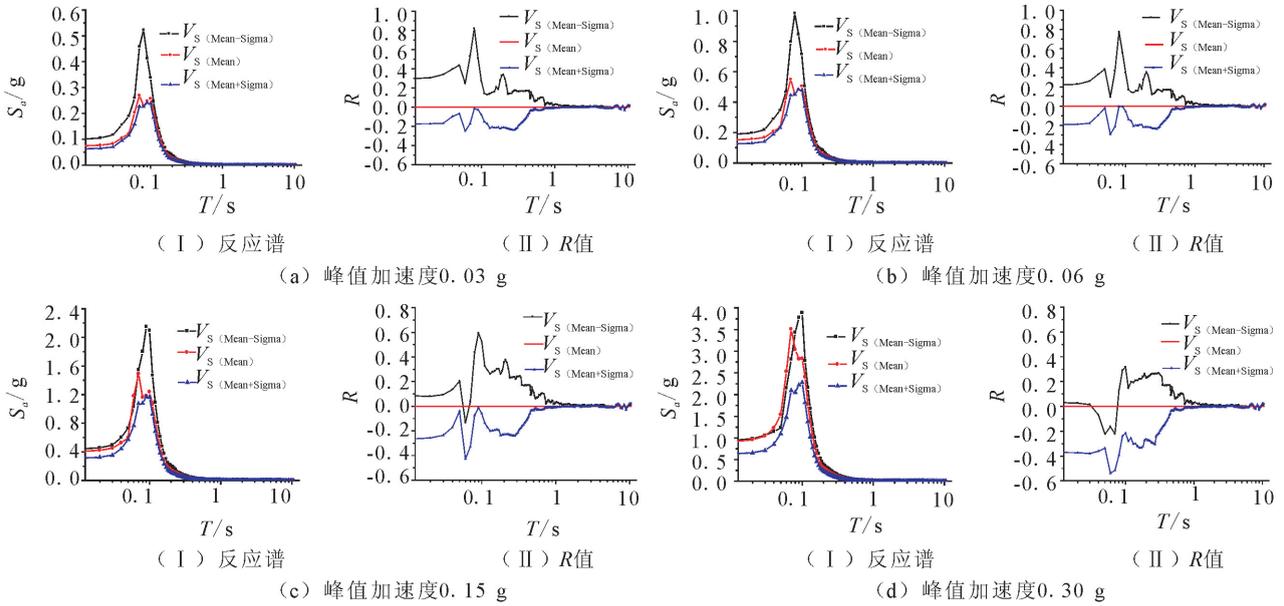


图 6 KYTH04 波作用下地表加速度反应谱及残差

Fig.6 The surface acceleration response spectra and residuals  $R$  under the action of KYTH04 wave

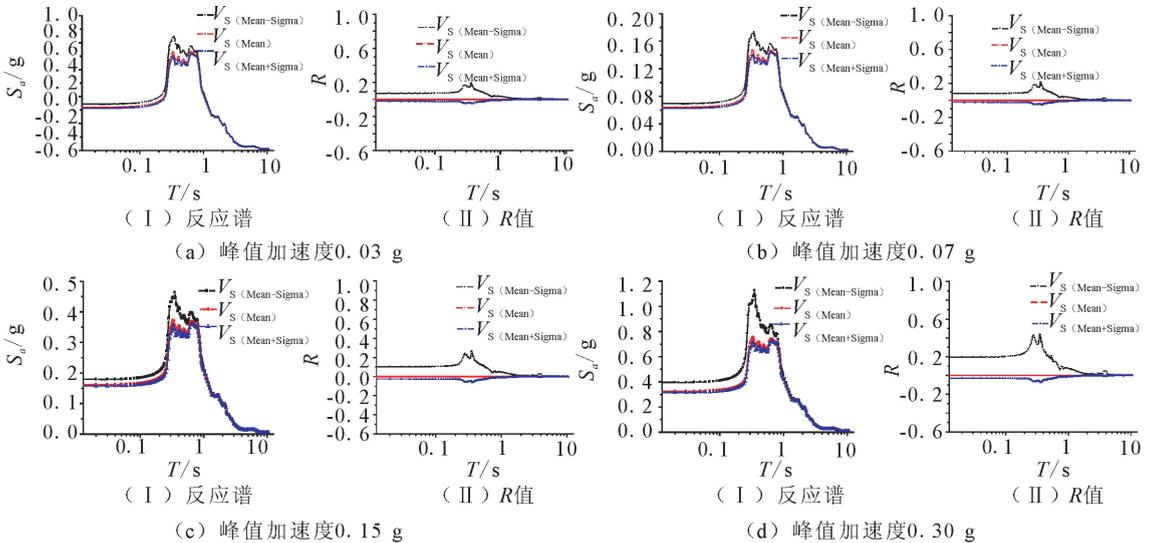


图 7 Qianan 波作用下地表加速度反应谱及残差

Fig.7 The surface acceleration response spectra and residuals  $R$  under the action of Qianan wave

表 6 剪切波速标准差对地表加速度反应谱的影响程度

Table 6 Influence of the shear-wave velocity standard deviation on the surface acceleration response spectrum

输入地震动的加速度峰值/g	$V_S$ 取值	影响程度			
		Parkfield 波	El-Centro 波	KYTH04 波	Qianan 波
0.03	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	显著	显著	显著	可忽略
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	一定	一定	一定	可忽略
0.06	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	显著	显著	显著	可忽略
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	一定	一定	一定	可忽略
0.15	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	显著	显著	较大	可忽略
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	一定	一定	一定	可忽略
0.30	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	显著	显著	一定	一定
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	一定	一定	一定	可忽略

波速取  $V_{S(\text{Mean})}$  时场地特征周期为 0.18 s, 取  $V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$  时场地的特征周期为 0.24 s, 场地偏软, 且与输入波的卓越周期更加吻合; 二是波速取  $V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$  时场地的特征周期为 0.14 s, 与取  $V_{S(\text{Mean})}$  时场地特征周期相差 0.04 s, 与之对应的是波速取  $V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$  时场地的特征周期与  $V_{S(\text{Mean})}$  时场地的特征周期相差 0.06 s, 二者相差更大, 影响也应更大。对于低频成分丰富的 Qianan 波(卓越频率 0.3~0.8 s)和 高频成分丰富的 KYTH04 波(卓越频率 0.06~0.10 s)而言, 这种现象依旧存在。

## 5 标准差对地表峰值加速度的影响

本文以  $V_{S(\text{Mean})}$  计算得到的地表峰值加速度  $a_{\max}$  为标准值,将其余两种剪切波速下的  $a_{\max}$  结果及与标准值偏差示于表 7。以  $a_{\max}$  变化 20% 为不可忽略的标准可得如下结论:剪切波速测试标准差引起的地表加速度峰值  $a_{\max}$  变化,大多数情况下影响

均不可忽略;当输入卓越周期与场地特征周期接近的地震波时(Parkfield 波),  $a_{\max}$  变化非常显著;只有输入波的卓越周期与场地特征周期相差较大且输入地震波强度偏小时(0.3 g 以下的 Qianan 波),测试标准差对  $a_{\max}$  的影响才可略去。这些结论与剪切波速测试标准差对反应谱的影响类同。

表 7 地表加速度峰值及其与波速标准值的最大偏差表

Table 7 The maximum deviation between PGA value and wave velocity standard value

输入地震动的 加速度峰值/g	剪切波速值	Parkfield 波		El-Centro 波		KYTH04 波		Qianan 波	
		$a_{\max}/g$	偏差/%	$a_{\max}/g$	偏差/%	$a_{\max}/g$	偏差/%	$a_{\max}/g$	偏差/%
0.03	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	0.106	83.8	0.088	27.0	0.099	35.0	0.034	7.5
	$V_{S(\text{Mean})}$	0.058	-	0.069	-	0.073	0.0	0.032	-
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	0.049	-15.8	0.050	-27.1	0.062	-15.7	0.031	-2.1
0.06	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	0.211	78.6	0.174	30.7	0.187	24.7	0.070	8.3
	$V_{S(\text{Mean})}$	0.118	-	0.133	-	0.150	0.0	0.064	-
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	0.097	-17.5	0.102	-23.6	0.124	-17.1	0.063	-2.2
0.15	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	0.519	68.6	0.444	34.2	0.442	9.0	0.179	10.7
	$V_{S(\text{Mean})}$	0.308	-	0.331	-	0.405	0.0	0.162	-
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	0.243	-21.0	0.256	-22.8	0.309	-23.7	0.158	-2.5
0.30	$V_{S(\text{Mean}-\text{Sigma})}$	1.114	65.1	0.824	15.6	0.940	3.4	0.397	21.5
	$V_{S(\text{Mean})}$	0.675	-	0.713	-	0.909	0.0	0.327	-
	$V_{S(\text{Mean}+\text{Sigma})}$	0.487	-27.8	0.500	-29.9	0.628	-30.9	0.317	-3.4

## 6 结语

本文利用剪切波速实测样本,采用计算分析方法讨论了浅硬场地多工况下剪切波速测试标准差对地震响应影响,主要结论为:

(1) 浅硬场地上的剪切波速测试标准差对地震响应的影响很大,影响的程度与输入地震波的强度和频率有关,也与剪切波速实测值较统计均值的高低有关。

(2) 如果以反应谱残差大于 20% 或加速度峰值变化大于 20% 为不可忽略的标准,则剪切波速测试标准差对地震响应的影响在大多数工况下不可忽略。

(3) 当输入波的卓越周期与场地特征周期接近时,浅硬场地上剪切波速测试标准差引起的反应谱变化非常显著;只有输入波的卓越频率与场地特征周期相差较大且输入波强度偏低时,剪切波速测试标准差引起的反应谱变化才可略去。

(4) 浅硬场地上剪切波速实测结果低于统计均值时,计算结果的偏差一般要明显大于剪切波速实测结果高于统计均值的情况,且地震波输入越强影响越大。

(5) 本文利用的 Turkey Flat 场地剪切波速实

测结果,数据量偏少且仅针对浅硬场地,但已初步显示了剪切波速实测误差对地震动分析的重要影响。大量可靠的实测数据是研究剪切波速测试误差对地震动的影响以及推动波速测试技术发展的基础性工作,以后应大力开展。

## 参考文献(References)

- [1] 中国国家标准化管理委员会.GB 17741-2005 工程场地地震安全性评价[S].北京:中国标准出版社,2005:16-47.  
Standardization Administration of the People's Republic of China.GB17741-2005 Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites[S].Beijing:Standards Press of China,2005:16-47.(in Chinese)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:15-40.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.GB50011-2010 Seismic Design Code [S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010:15-40. ((in Chinese)
- [3] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].4 版.北京:中国建筑工业出版社,2007.  
The Editorial Board of the Handbook of the Engineering Geology.The Handbook of the Engineering Geology[M].4th ed. Beijing:China Architecture & Building Press,2007.(in Chinese)
- [4] Annie O L Kwok,Jonathan P Stewart,Youssef M A.Hashash,

- Nonlinear Ground-Response Analysis of Turkey Flat Shallow Stiff-soil Site to Strong Ground Motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, February, 2008, 98: 331-343.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
Ministry of Construction of PRC. GB50021-2001 Code for Investigation of Geotechnical Engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 刘红帅, 郑桐, 薄景山, 等. 粘性土剪切波速不确定性的统计分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增刊): 99-103.  
LIU Hong-shuai, ZHENG Tong, BO Jing-shan, et al. Statistical Analysis of Uncertainty for Shear Wave Velocities of Cohesive Soils[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supl): 99-103. (in Chinese)
- [7] 王广军, 苏经宇. 剪切波速度统计结果及其在场地分类中的应用[J]. 建筑科学, 1986(1): 69-76.  
WANG Guang-jun, SU Jing-yu. Some Statistical Analytical Results of Shear Wave Velocity and its Application in the Site Classification[J]. Building Science, 1986(1): 69-76. (in Chinese)
- [8] 高玉峰, 刘汉龙, 合肥膨胀土剪切波速的特征分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 371-373.  
GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on Shear Wave Velocities in Expansive Soils of Hefei[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 371-373. (in Chinese)
- [9] 齐文浩, 刘德东, 兰景岩, 等. 西安阎良区土层剪切波速统计分析[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10(4): 10-12.  
QI Wen-hao, LIU De-dong, LAN Jing-yan, et al. Statistical Analysis of Soil Layers' Shear Wave in Yanliang, Xi'an[J]. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 2008, 10(4): 10-12. (in Chinese)
- [10] 刘红帅, 薄景山, 吴兆营, 等. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 167-171.  
LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, WU Zhao-ying, et al. Effects of Soil Parameters on Ground Surface Acceleration Peak and Response Spectra [J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(2): 167-171. (in Chinese)
- [11] 李平, 薄景山, 孙有为. 剪切波速差异性对地震反应的影响[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增刊): 133-137.  
LI Ping, BO Jing-shan, SUN You-wei. Shear Wave Velocity Diversity Influence on the Seismic Response[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supl): 133-137. (in Chinese)
- [12] 高玉峰, 刘汉龙, 朱伟. 剪切波速对砂土层地震反应的影响[J]. 工程勘察, 2001(1): 39-42.  
GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei. Effect of Shear Wave Velocity on the Seismic Response of Sand Ground[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 39-42. (in Chinese)
- [13] 陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉. 土动力参数变异性对深软场地地表地震动参数的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 1-10.  
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, WANG Bing-hui. Effect of Variability of Soil Dynamic Parameters on Ground Motion Parameters for Deep Soft Sites [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 1-10. (in Chinese)
- [14] Real C R. Turkey Flat, USA Site Effects Test Area: Report 2, Site Characterization [R]. Calif Div of Mines and Geology Tech Rept, 1988, 88-2.
- [15] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-77.  
LV Hong-shan, ZHAO Feng-xin. Site Coefficients Suitable to China Site Category [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-77. (in Chinese)