

兰州地区剪切波速实测误差分析与评价^①

陈卓识^{1,2}, 董 林³, 袁晓铭^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3 中国地震局兰州地震研究所 黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为了给兰州乃至西北地区的地震安全性评价和重大工程抗震设计提供参考,在兰州地区选取 4 个不同类别场地,完成由 10 家单位参加、使用不同仪器剪切波速现场测试误差专项实验,研究该地区剪切波速实测误差分布规律,讨论测试误差对地表加速度反应谱影响的统计特征,并给出该地区剪切波速测试误差评价。结果表明:兰州地区各单位剪切波速测试误差具有明显规律性,测试误差绝大部分符合标准正态分布,且误差大小不随深度和场地类别而改变;兰州地区波速测试水平优于全国平均水平,I 类、II 类和 III 类场地的剪切波速测试精度较高,偏差较小,其平均标准差可以定为 10%;就兰州地区而言,其 1 倍波速测试标准差引起 PGA 最大偏差为 25%,2 倍标准差为 50%;给定波速测试误差下反应谱变化程度与输入波形相关,输入波频率成分与场地频率成分接近的地震输入下,误差影响较大,反之则影响较小。

关键词:兰州地区;剪切波速;实测误差;地表加速度;反应谱

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0757-13

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0757

Measurement Error Analysis and Evaluation of Shear-wave Velocity in Lanzhou Area

CHEN Zhuo-shi^{1,2}, DONG Lin³, YUAN Xiao-ming^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 3. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Lanzhou, located in China's major earthquake belt, is China's most earthquake-proof city. In this region, one of the most important earthquake parameters—shear-wave velocity—always involves a certain degree of test error. This test error can greatly impact seismic evaluation results. In this study, our objective was to develop basic guiding error-analysis principles for Lanzhou and the Northwest China region. First, we selected four test sites in Lanzhou, and then developed a specific in-situ shear-wave velocity test involving ten institutes and various kinds of test equipment to determine the actual in-situ test error in the Lanzhou region. In this paper, we discuss the statistical characteristics of this error and determine its impact on the surface accelerated response spectra. Based on our results, we can draw the following conclusions: (1) The in-situ test error in the Lanzhou area has obvious regularity, which mostly obeys the standard normal distribution. This error remains consistent and does not vary with depth or type of site. (2) The technical level of the Lanzhou region is better than the average

① 收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2016C01); 国家科技部地震行业专项(201308015)

作者简介: 陈卓识(1984—), 男, 助理研究员, 主要从事岩土工程研究。E-mail: various@163.com。

通信作者: 袁晓铭(1963—), 男, 研究员, 主要从事岩土工程研究。E-mail: yxmiem@163.com。

level over the whole of China. Its Class I, Class II, and Class III test errors are smaller and the average standard deviation of the test is 10%. (3) For the Lanzhou area, the test standard deviation of one time of shear-wave velocity could cause a maximum change in the peak ground acceleration (PGA) of 25%, and the standard deviation of two times of shear-wave velocity may result in a change of up to 50%. (4) The calculation results are also influenced by the input ground motion. When the frequency of the input wave has a frequency band similar to that of the site, the spectra will have more vivid differences, and otherwise the impact is lower.

Key words: Lanzhou region; shear-wave velocity; measurement error; ground surface acceleration; response spectrum

0 引言

我国活动地震带主要集中在 5 个地区的 23 条地震带上,兰州—天水地震带是其中非常活跃的一条。兰州及其周边地区强震频发,历史上曾发生过破坏性地震 20 余次,对兰州影响较大的外围强震有 1920 年的 8.5 级海原地震、1927 年古浪 8 级地震、1932 年昌马 7.6 级地震和 1954 年山丹 7.25 级大地震。兰州地区活断层勘测研究表明^[1],兰州是一个存在多条活断层、断陷盆地占主导地位的城市。目前我国已将兰州列为重点抗震设防城市,主城区抗震设防烈度为Ⅷ度,四个市辖区的设计基本地震加速度值为 0.2g,红古区抗震设防烈度为Ⅶ度,设计基本地震加速度值为 0.15g。为保证结构物的安全,我国要求依据建筑抗震规范进行设计并进行地震安全性评价工作。在这两项工作中,由于计算地表加速度反应谱需要场地的剪切波速、动剪切模量阻尼比等参数,各种参数变化引发的地震动变化一直是研究人员的重点研究内容,并取得了一些成果^[2-7]。这些研究多采用假设各种参数发生变化的方法研究其对地震动的影响。随着认识水平的深入,地震动的分析也从定性逐渐向定量方向转变,这就要求对计算中相关参数的变化规律进行实测,并依据实测结果进行定量分析。

在参与计算的参数中,由于剪切波速用途广泛、简单易测、代表性强,一直是重点研究对象之一。受场地条件、测试人员水平、仪器精度、数据分析水平等因素的影响,实测的剪切波速结果经常会产生一定程度的不确定性,即使是多人多次重复进行的剪切波速测试,其结果也存在一定程度的误差。1988 年美国研究人员采用单孔法、跨孔法、悬浮测井法和面波法对 Turkey Flat 场地上的剪切波速进行多次重复测试^[8],证实了剪切波速测试误差客观存在。2008 年 Annie O.L.Kwok 等^[9]基于 1988 年的波速

测试报告分析了 Turkey Flat 场地上剪切波速测试结果的离散性,研究了其对地震动的影响,并将计算结果与实际地震记录进行对比,结果表明:剪切波速测试误差对地震动的影响非常明显。Hollender F 等^[10]对欧洲地区三个场地的波速测试结果进行了研究,结果表明不同深度的波速测试误差不一。国外另一些学者基于不同的测试方法研究了剪切波速测试误差,均得到了非常有意义的成果^[11-14]。国内目前针对剪切波速测试误差研究主要集中在土层剪切波速随埋深变化的分布上^[15-17]。由于缺乏场地实测数据的支持,对于剪切波速实测误差对地表加速度反应谱的影响还没有系统的成果发表,但通过假设剪切波速变化来研究其对地震动影响,已经得到了十分明确的结论,即采用现有的计算方法,剪切波速的变化对地震动响应有直接的影响^[2-5]。笔者团队对剪切波速测试误差开展专项测试工作,得到全国范围内波速测试误差分布的规律^[18]。但波速测试精度与测试人员、技术水平和场地条件等密切相关,不同地区应具有自身的特点。兰州地区以黄土为主,具有显著的地域特征,其波速测试误差需要单独分析研究。

本文以兰州地区的剪切波速测试误差专项实验为基础,研究其波速测试误差的分布规律,并通过与全国平均情况对比,得到该地区波速测试技术水平评价结果。在兰州地区选取 4 个不同类别场地,开展 10 家单位参加、使用不同仪器的剪切波速现场测试误差专项实验,以此研究该地区剪切波速实测误差分布规律并讨论实测误差对地表加速度反应谱影响的统计特征,最后给出兰州地区剪切波速测试误差及其对地震动影响分析结果。通过对兰州地区剪切波速测试误差的专项研究,得到符合该地区波速测试误差分布的规律,为兰州地区以至西北地区工程场地地震安全性评价和重大工程抗震设计提供

参考。

1 现场实验

采用大量重复测试的方法对实测误差进行研究。为保证波速样本来源的全面性,本次剪切波速

测试误差专项实验分别选取了兰州市区 4 个不同方位场地进行现场测试。这 4 个场地中两个位于兰州市区西北,一个位于市区南部,另一个位于市区东北。测试地点详细描述见表 1,位置描述参照均来自于百度地图。

表 1 测试地点位置表

Table 1 Location of the in-situ tests

场地	位置	场地描述	钻探情况
一	靠近刘沙公路鑫鑫钢构,位于丘陵地带中半山的平地	距离最近的建筑物约 200 m,刘沙公路有重载车辆和普通车辆经过,场地噪音中等。	0~0.5 m 为砾类土,0.5~2 m 为中砂,2~6 m 为强风化砂岩,6~11.2 m 为中风化砂岩,11.2 m 终孔未见地下水。
二	位于望东山和小岷岭围起的山谷地带的谷底,地势平整	距离最近的建筑物和公路超过 700 m,基本没有环境噪音	0~5 m 为砾类土,5~9 m 为强风化砂岩,9~10 m 为中风化砂岩,10~13.5 m 为微风化砂岩。13.5 m 终孔未见地下水。
三	位于西固区临洮街旁的平整建筑场地	距离建筑工程场地约 500 m,周边有大型建筑设备正在施工,噪音较大	0~5 m 为素填土,5~6.5 m 为含砾青杂填土,6.5~27.5 m 为黄土状粉土,27.5~33 m 为饱和黄土,33~38 m 为卵石,38 m 终孔,地下水位距孔口 27.5 m。
四	位于夏东公路西侧的丘陵区内,距离公路约 750 m 的丘陵间平地	距离最近的超过公路 500 m,测试环境噪音较小	0~32 m 为黄土层,32~46 m 为钙质胶结层,类岩石。地下水位距孔口 32 m

为了统一的计算和研究,在实验中当钻孔达到基岩或类似基岩的位置钻探即停止。场地一和二钻探达到中风化砂岩,场地三达到卵石,场地四达到钙质胶结层。场地一和场地二的研究深度统一为 10 m,场地三为 30 m,场地四为 40 m。按照规范^[19]中的场地分类,场地一和场地二为 I 类场地,场地三为 II 类场地,场地四为 III 类场地。为保证测试结果的全面性和可靠性,本次实验共组织 10 家测试单位进行现场测试。参加项目测试单位如下(排名不分先后):中国地震局工程力学研究所、中国地震局兰州地震研究所、兰州大学、甘肃抗震工程技术研究院、甘肃水文地质工程地质勘察院、甘肃省交通规划设计院、中国水电顾问集团西北勘测设计研究院、甘肃省地震工程研究院、中铁西北科学研究院、甘肃省建筑设计研究院。在测试中,有的采用了地表激发孔内接收的方法,有些采用了悬浮测井法,有些则采用了超声波原理,使用方法符合单孔法剪切波速测试要求。为保证结果的可靠性,各测试单位均提供了波速测试结果的原始波列图。由于本项目研究的目的是找出兰州地区剪切波速测试误差的分布规律,因此并未对剪切波速仪器的测试原理进行区分。这些仪器都是工程中常见、可靠的,提供的波速测试结果纳入统计范围符合我国目前的工程要求。在现场实验中,每个场地钻孔 1 个,测试单位对每个场地的钻孔进行了 30 次重复测试,4 个场地共得到了 120 组波速实验结果。其中 0~10 m 有结果 120 组,10~30 m 有结果 60 组,30~40 m 结果 30 组。

2 实验结果

通过对大量现场波速测试结果进行汇总,本文得到现场剪切波速实测误差。为了找到剪切波速实测误差的分布规律,用如下统计学参数对剪切波速实测误差的程度进行描述。由于采用的计算方法均为统计学基本原理,其计算方法见参考文献[20],此处不再赘述。图 1 左图给出了 4 个场地剪切波速实测结果,并给出了剪切波速实测误差的统计参数;右图给出了 4 个场地剪切波速实测误差相对每个场地算数平均值的偏差量,用相对均值的偏差百分比来描述误差程度。

图 1 左图相关参数的定义如下:

$v_{S(Data)}$ 为每个场地 30 次剪切波速测试结果;

$v_{S(Mean)}$ 为每个场地 30 次剪切波速测试结果的算数平均值,用以代表场地波速真值;

$v_{S(Mean \pm 0.5\sigma)}$ 为均值加减 0.5 倍标准差的波速;

$v_{S(Mean \pm \sigma)}$ 为均值加减 1 倍标准差的波速;

$v_{S(Mean \pm 2\sigma)}$ 为均值加减 2 倍标准差的波速。

图 1 右图中剪切波速相对均值的偏差量计算为:

$$Bias_{(Data)} = (v_{S(Data)} - v_{S(Mean)}) / v_{S(Mean)} \times 100\% \quad (1)$$

其中: $Bias_{(Data)}$ 为各条波速曲线在每米深度上相对均值的误差程度,以百分比表示; $Bias_{(Mean)}$ 为测试误差的均值,近似为 0; $Bias_{(Mean \pm 0.5\sigma)}$ 为误差均值加减 0.5 倍标准差的测试误差; $Bias_{(Mean \pm \sigma)}$ 为误差均值加减 1 倍标准差的测试误差; $Bias_{(Mean \pm 2\sigma)}$ 为误差均值加减 2 倍标准差的测试偏差。

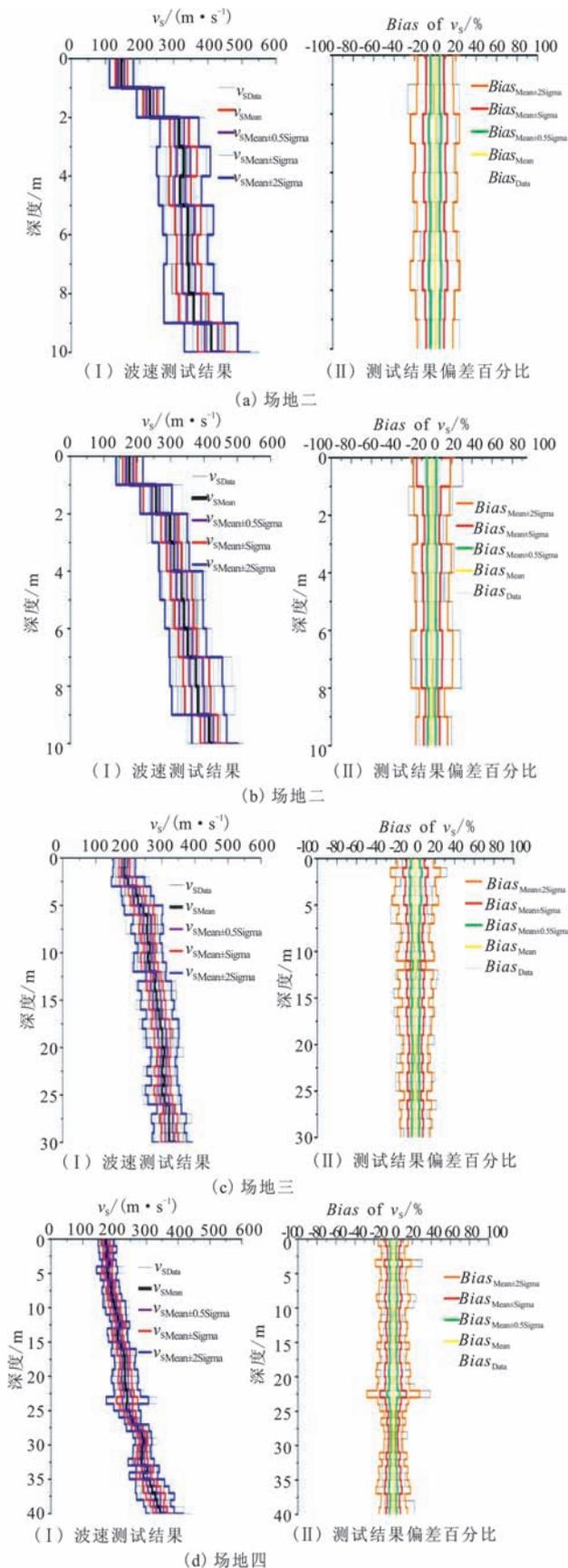


图1 4个场地剪切波速实测结果

Fig.4 Measured results of shear-wave velocity at four sites

依据图1的结果对测试结果进行评价,结果表明:场地一中有67%的剪切波速在均值的1倍标准差范围内(在1倍标准差范围内的波速数除以测试总结果数),94%的波速在均值的2倍标准差范围内;场地二中有70%的剪切波速在均值的1倍标准差范围内,92%的波速在均值的2倍标准差范围内;场地三中有68%的剪切波速在均值1倍标准差范围内,95%的波速在均值的2倍标准差范围内;场地四中有71%的波速在均值1倍标准差范围内,93%的波速在均值2倍标准差范围内。偏差百分比的分布范围与此结果相同。由于是对每米的剪切波速测试误差进行统计,实测过程中发现,剪切波速实测误差在每米的深度基本保持在相似的误差水平上。除了诸如场地二中深度1 m处、场地三中深度12 m和26 m处、场地四中深度22 m处个别几个点的测试误差量与各自场地整体的误差程度相差较大以外,各个场地误差水平基本相当。表2给出4个场地剪切波速实测误差统计范围,可见4个场地测试误差的标准差基本都在10%左右。研究表明^[18],全国范围内I类场地误差的标准差为9%~16%,II类场地误差标准差为10%~17%,III类场地的误差标准差为10%~18%。将三个类别场地统计在一起,全国范围内的误差标准差为15%。与之相比,兰州地区整体的波速测试误差波动区间相对较小,这一结果表明兰州地区波速测试水平优于全国平均水平。

表2 各场地波速偏差的标准差

Table 2 The standard deviation of velocity test bias of each site

场地名称	$Bias (Mean \pm 0.5 \text{ Sigma})$	$Bias (Mean \pm \text{Sigma})$	$Bias (Mean \pm 2 \text{ Sigma})$
场地一	约-5%~5%	约-10%~10%	约-20%~20%
场地二	约-5%~5%	约-10%~10%	约-20%~20%
场地三	约-5%~5%	约-10%~10%	约-20%~20%
场地四	约-5%~5%	约-10%~10%	约-20%~20%

3 兰州地区场地测试误差统计建模

为了研究兰州地区剪切波速测试误差的分布规律,将4个场地的剪切波速测试偏差百分比绘制于图2,图中相关参数的定义同前一节。汇总结果表明,兰州地区总体波速测试误差较为恒定,每米测试误差的标准差在10%左右波动,区间为7%~13%。数据量较大的0~10 m部分波速误差分布均匀,区间范围为7%~12%;10~30 m部分偏差程度有所增加,区间范围8%~13%;30~40 m部分离散程度增大,区间范围7%~13%。整体结果表明,0~

10 m 部分有 69% 的波速在 1 倍标准差范围内,93% 的波速在 2 倍标准差范围内;10~30 m 部分有 68% 的波速在 1 倍标准差范围内,90% 的波速在 2 倍标准差范围内;30~40 m 部分有 65% 的波速在 1 倍标准差范围内,87% 的波速在 2 倍标准差范围内。为了研究兰州地区波速测试误差整体的分布规律,用 SPSS 软件对每米的剪切波速偏差量进行统计及分布拟合。统计图给出了波速测试误差概率分布曲线,统计结果见图 3。

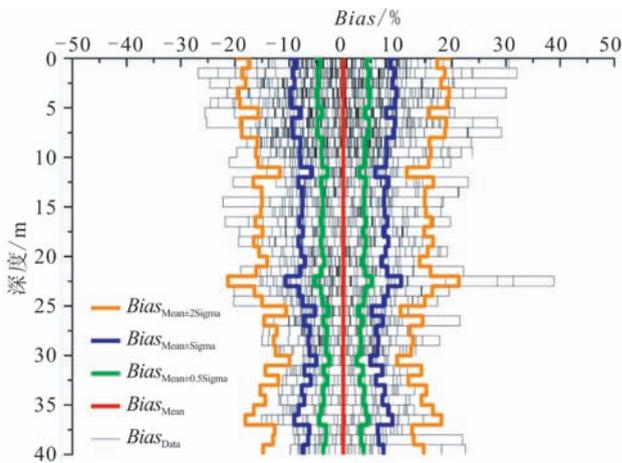


图 2 4 个场地波速测试误差汇总

Fig.2 Summary of test bias of the four sites

统计结果初步表明,在 0~10 m,剪切波速测试结果较多,误差基本符合丘型分布。随着深度增加,测试结果逐渐减少,尤其是分析 30~40 m 的数据时,分布的离散程度与丘型分布相差较大。通过研究实测结果并观察剪切波速的丘型分布图,可以怀疑剪切波速实测误差符合正态分布,但因为没有准确的验证,这一结论还无法肯定。为了进一步研究剪切波速测试误差的分布规律,用 SPSS 软件的 P-P 图正态分布检验功能对图 2 中的结果进行了拟合检验。由于深度 0~10 m、10~30 m 及 30~40 m 的数据量分别是 120 组、60 组和 30 组,限于篇幅,本文未列出所有的检验结果,只按照深度分别给出了 3 个数据量范围内各 3 个深度的 P-P 结果,见图 4。

P-P 图检验结果表明,参加正态分布检验的数据量越大,测试误差更符合正态分布;数据量减小,波速测试误差的分布与正态分布相差较远,离散程度增加。由于误差的均值为 0,可以认为 0~10 m 的波速测试误差符合标准正态分布,10~30 m 的近似符合标准正态分布,30~40 m 的与标准正态分布有一定偏差。通过与全国范围内 P-P 图检验结果对比,发现当数据量大幅增加时,拟合结果符合标准正

态分布,因此可以推断兰州地区 30~40 m 波速测试误差也应符合标准正态分布。目前统计结果与标准正态分布相差较多的原因是拟合数据量较小,当数据量进一步丰富时,该深度的波速测试误差也会符合标准正态分布。此时剪切波速测试误差已经与实际的场地无关,而只用波速测试结果相对均值的偏差百分比来表示,已经是一个脱离场地的无量纲的物理量。由此可得到如下结论:兰州地区剪切波速测试误差符合标准正态分布,标准差为 10%。这一结果表明,兰州地区剪切波速测试误差可以采用标准正态分布模型进行描述,用标准正态分布的性质可以推算波速实测误差的各种误差程度。

4 兰州地区剪切波速测试误差对反应谱影响分析

通过上述实验与分析,得到了兰州地区剪切波速实测误差的分布规律。当剪切波速发生变化时,加速度反应谱也随之发生明显的变化。波速整体增加会导致地表加速度反应谱峰值部分向短周期移动,而波速整体减小会导致地表加速度反应谱峰值部分向长周期移动。依据实测结果,用 SHAKE2000 程序计算研究了波速实测误差对地震动的影响。为了研究输入地震动不同时剪切波速实测误差对地震动的影响程度,计算共采用了 El-Centro 波、KYTH 波、Qianan 波和 Turkey Flat 波作为输入程序的地震动。这 4 条波的加速度记录和反应谱如图 5 所示。

为了尽可能地为安评工作提供参照,在计算中输入的地震动峰值分别取 0.03g 和 0.06g,计算结果模拟了烈度Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度。由于 4 个类别场地的土层构成不同,无法用同一个动剪切模量和阻尼比曲线进行地震动计算,为了统计规律和计算研究方便,在计算中 4 个场地统一用 SHAKE2000 软件自带的剪切模量和阻尼比曲线进行计算,用以分析地表加速度反应谱的变化规律。输入的模量阻尼比曲线如图 6 所示。

计算过程中每个场地计算 4 种不同地震动在 2 个峰值强度下的波速曲线 9 条,共计算 288 组工况。除了前文统计得到的 $v_{S(Mean)}$, $v_{S(Mean \pm 0.5Sigma)}$, $v_{S(Mean \pm Sigma)}$, $v_{S(Mean \pm 2Sigma)}$ 7 条剪切波速曲线,本节中增加了波速实测值中的极小值 $v_{S(Min)}$ 和极大值 $v_{S(Max)}$,用以计算场地可能受到波速变化的极限响应。四个场地的计算结果分别见图 7~图 10。

为了研究剪切波速测试误差对 PGA 的影响,

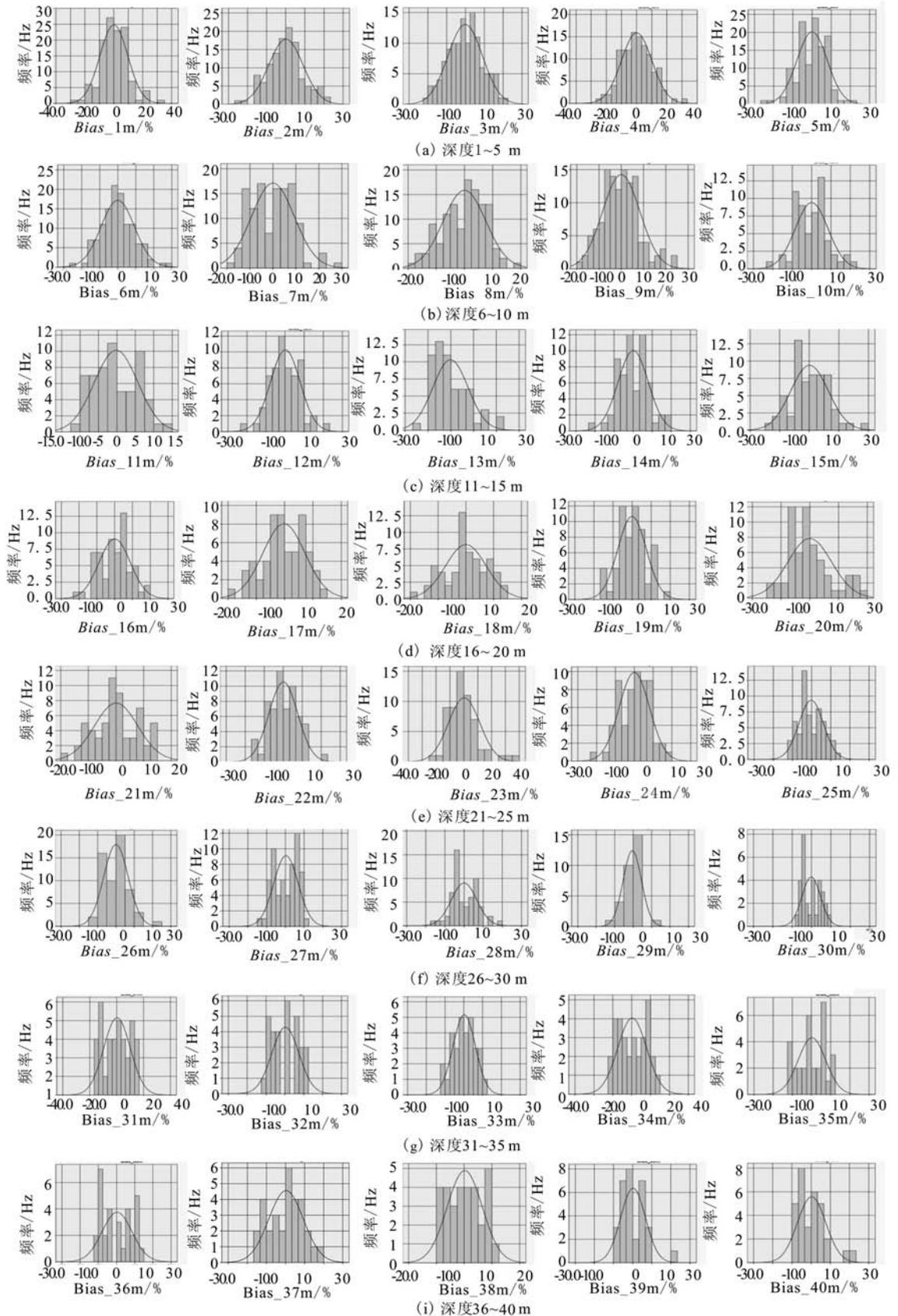


图3 剪切波速测试误差统计拟合结果

Fig.3 Statistics and fitting results of test bias of shear-wave velocity

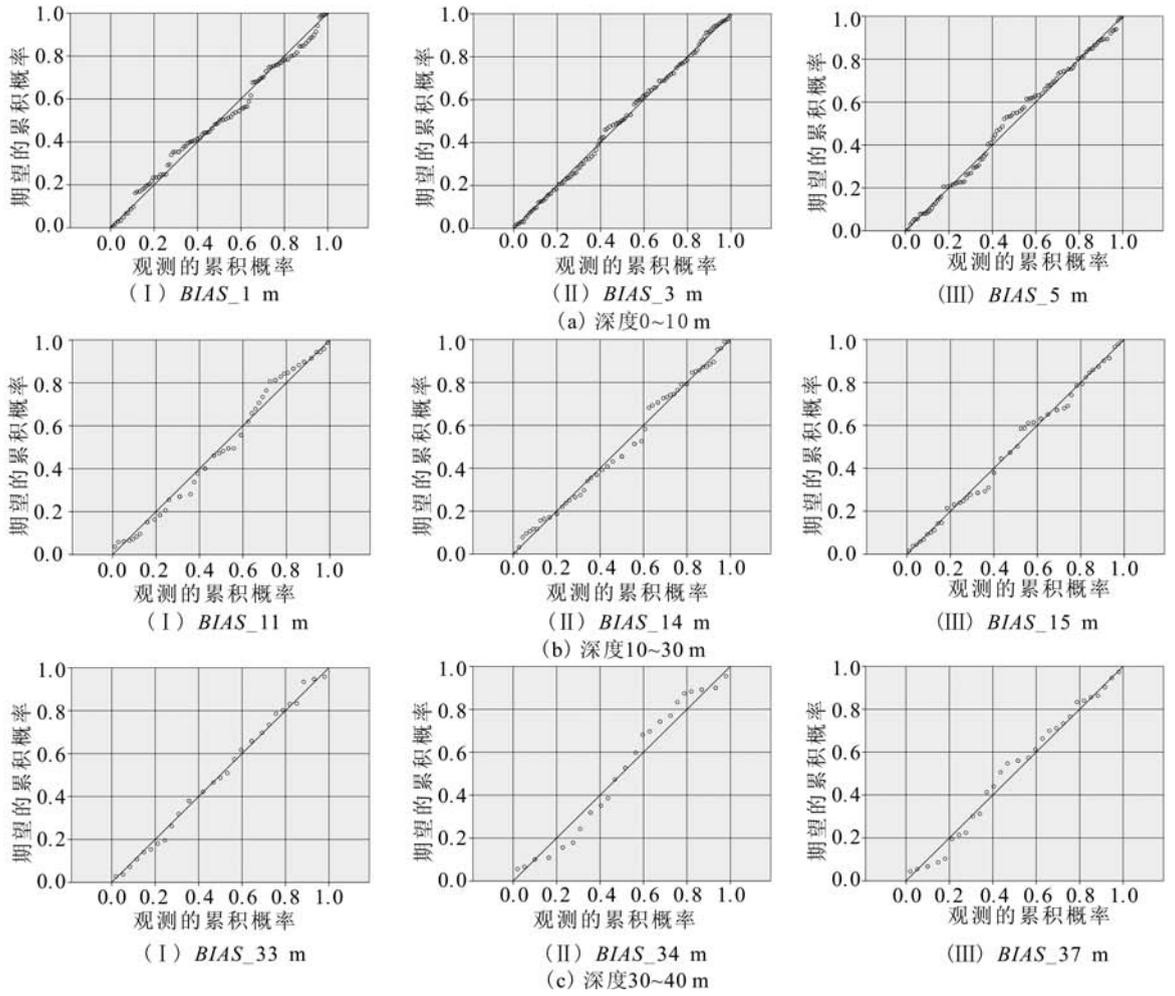


图 4 P-P 图正态分布检验例证

Fig.4 The normal distribution test results by P-P figure

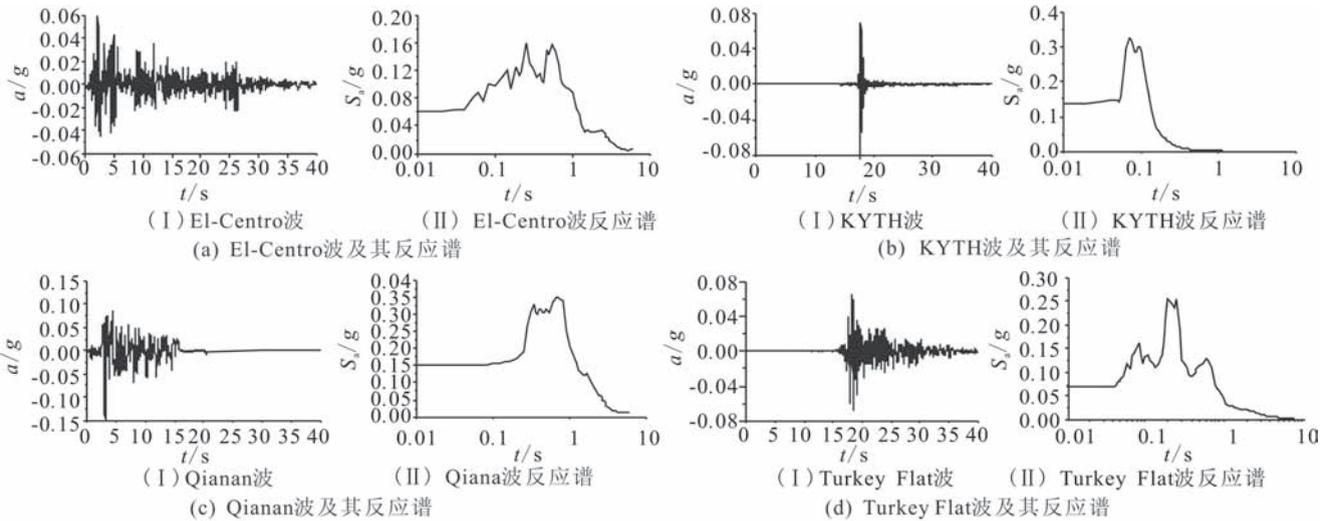


图 5 输入的地震动及其反应谱

Fig.5 Input ground motions and response spectra

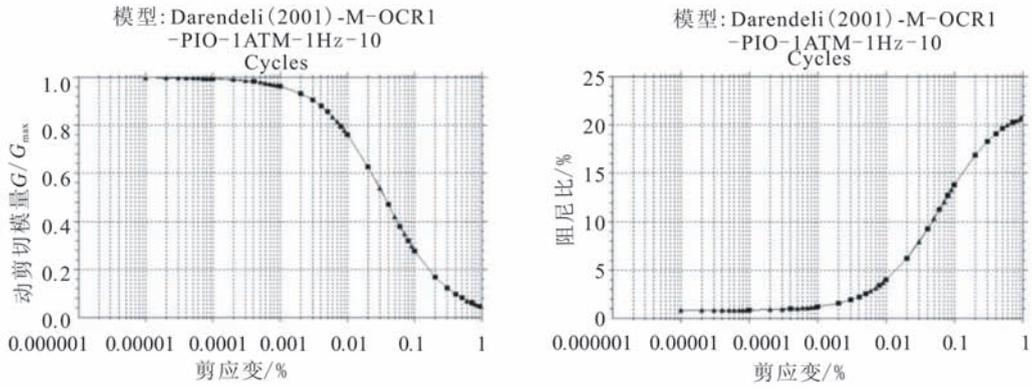


图6 计算采用的动剪切模量和阻尼比曲线

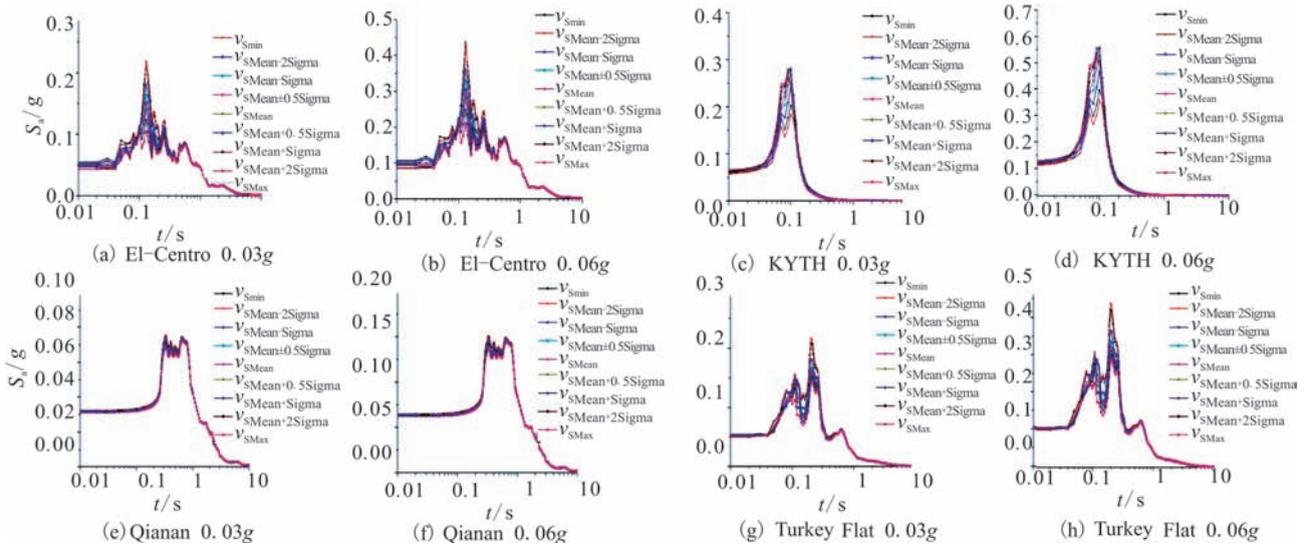
Fig.6 The G/G_{max} and damping ratio curves used for calculation

图7 场地一地表加速度反应谱计算结果

Fig.7 The calculation results of ground acceleration response spectra of site 1

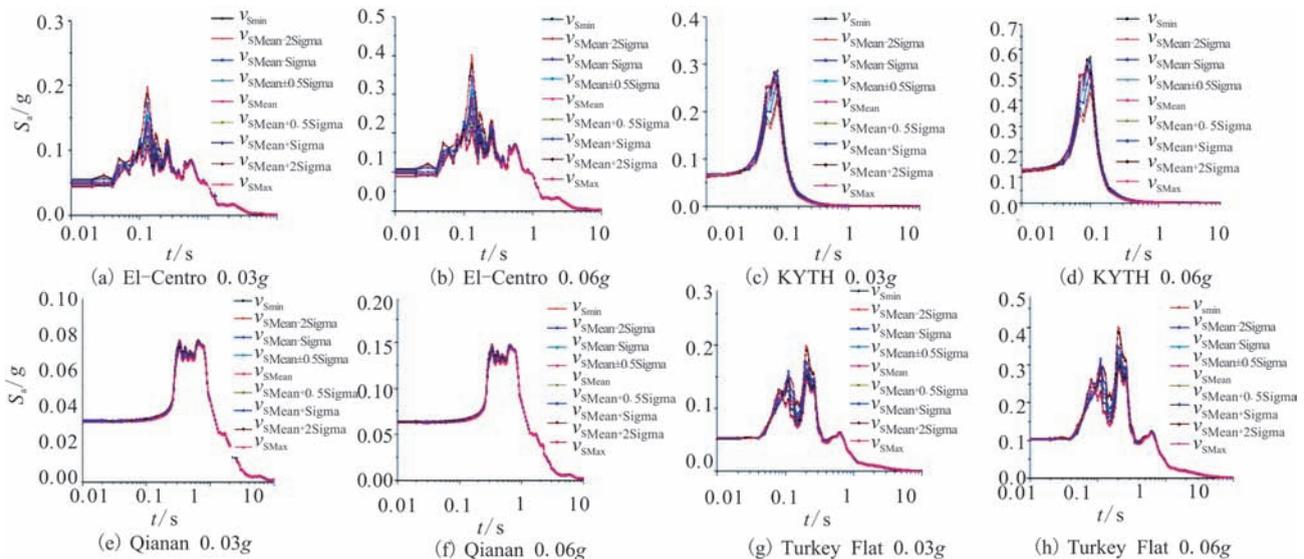


图8 场地二地表加速度反应谱计算结果

Fig.8 The calculation results of ground acceleration response spectra of site 2

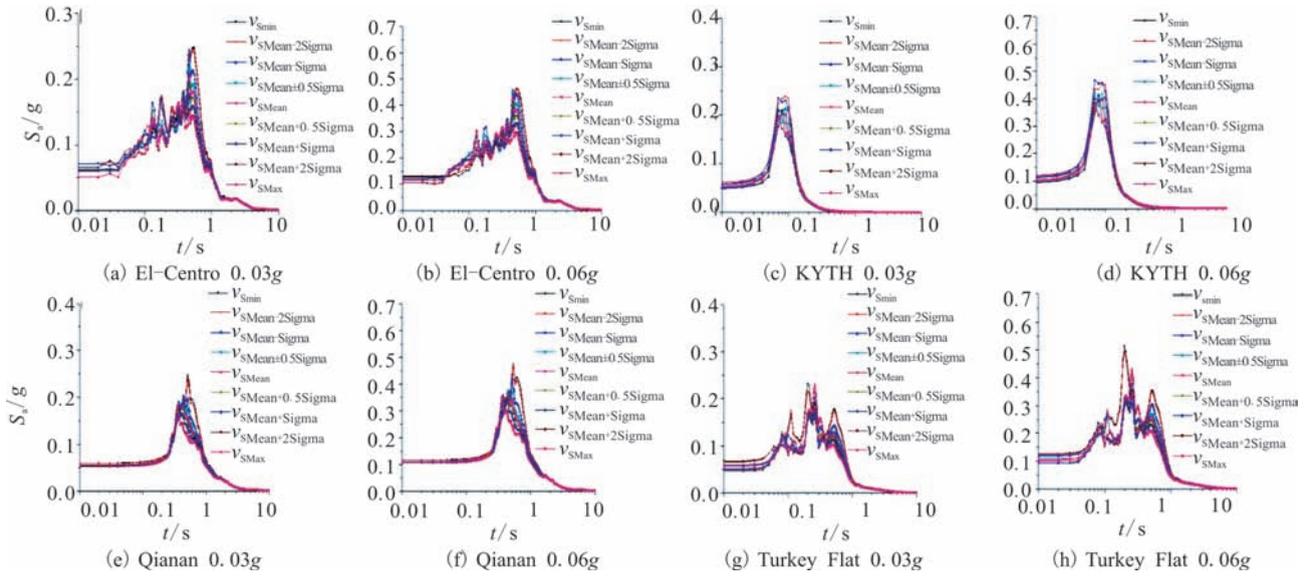


图 9 场地三地地表加速度反应谱计算结果

Fig.9 The calculation results of ground acceleration response spectra of site 3

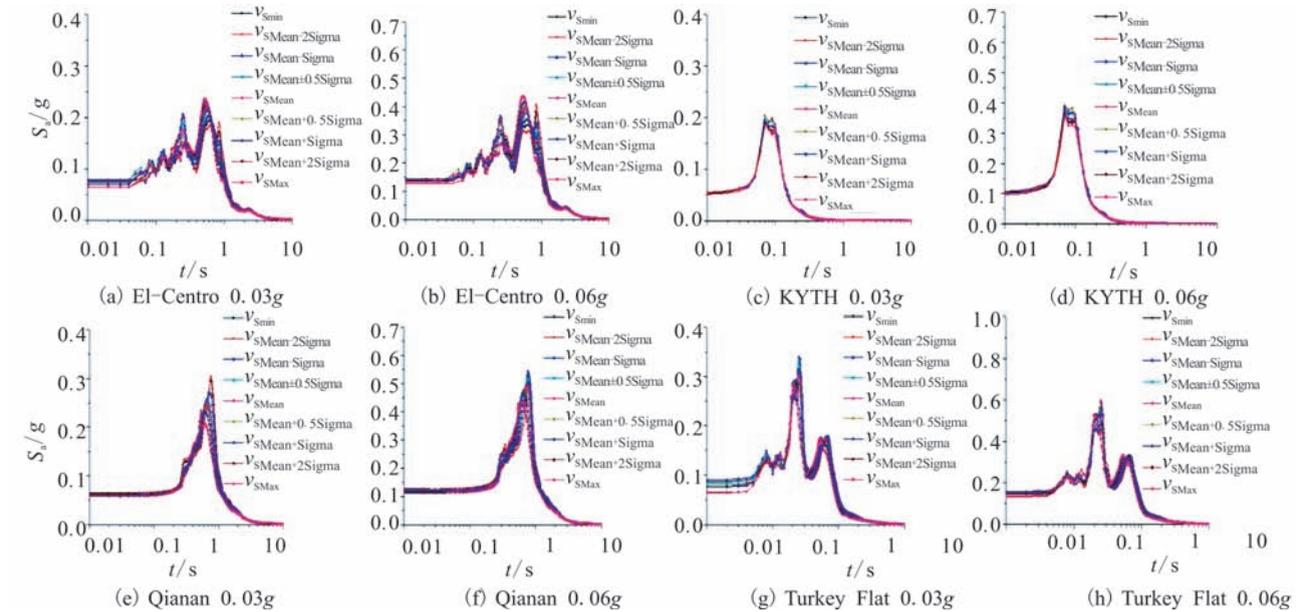


图 10 场地四地表加速度反应谱计算结果

Fig.10 The calculation results of ground acceleration response spectra of site 4

本文用 SHAKE2000 程序的计算过程中保持其他输入条件不变,每个工况仅改变剪切波速的取值,输入了多组剪切波速数据。这些数据代表了不同误差程度的剪切波速测试误差。

这样不同程度的波速测试误差均计算得到了一个地表加速度反应谱曲线 S_{ai} 。在前文的波速测试误差研究中,本文以均值波速为基准给出了不同深度的波速误差程度。为了进一步研究其对地表加速度反应谱的影响,以剪切波速测试值测试的均值 $v_{S(Mean)}$ 计得到的地表加速度反应谱 S_a 为基准线,计

算输入代表不同误差程度的波速曲线 $v_{S(Mean \pm 0.5Sigma)}$, $v_{S(Mean \pm Sigma)}$, $v_{S(Mean \pm 2Sigma)}$, $v_{S(Min)}$, $v_{S(Max)}$ 时反应谱相对均值反应谱的偏差[各波速取值的定义见式(2)]。定义输入均值波速的 S_a 为 0 轴,以式(2)计算其他的反应谱相对偏差 S_aV ,最后形成无量纲的百分比曲线。

$$S_aV = (S_{ai} - S_{a(Mean)}) / S_{a(Mean)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_aV (S_a Variance, 简称为 S_aV) 为反应谱的变化量,单位为百分比; S_{ai} 表示以 $v_{S(Mean \pm 0.5Sigma)}$ 、 $v_{S(Mean \pm Sigma)}$ 、 $v_{S(Mean \pm 2Sigma)}$ 、 $v_{S(Min)}$ 及 $v_{S(Max)}$ 计算得到

的地表加速度反应谱; $S_a(\text{Mean})$ 表示以波速测试均值 $v_{S(\text{Mean})}$ 计算得到的地表加速度反应谱。 $v_{S(\text{Min})}$ 表示各深度波速均取最小值时的波速曲线, $v_{S(\text{Max})}$ 表示各深度波速均取最大值时的波速曲线。其余波速曲线定义见上文。

反应谱偏差量见图 11~图 14。

地表加速度反应谱计算结果表明,剪切波速发

生变化时,随着变化程度增加,相应的加速度反应谱也明显发生变化,且变化程度与输入的地震动有关。当输入地震动的周期成分与场地卓越周期相近时,剪切波速的变化更易引起加速度反应谱的明显变化;如果频率成分相差较远,则引起的反应谱变化不明显。例如场地一的计算结果中,由于场地一和场地二为浅硬场地,因此当输入 KYTH 波在 0.07 s

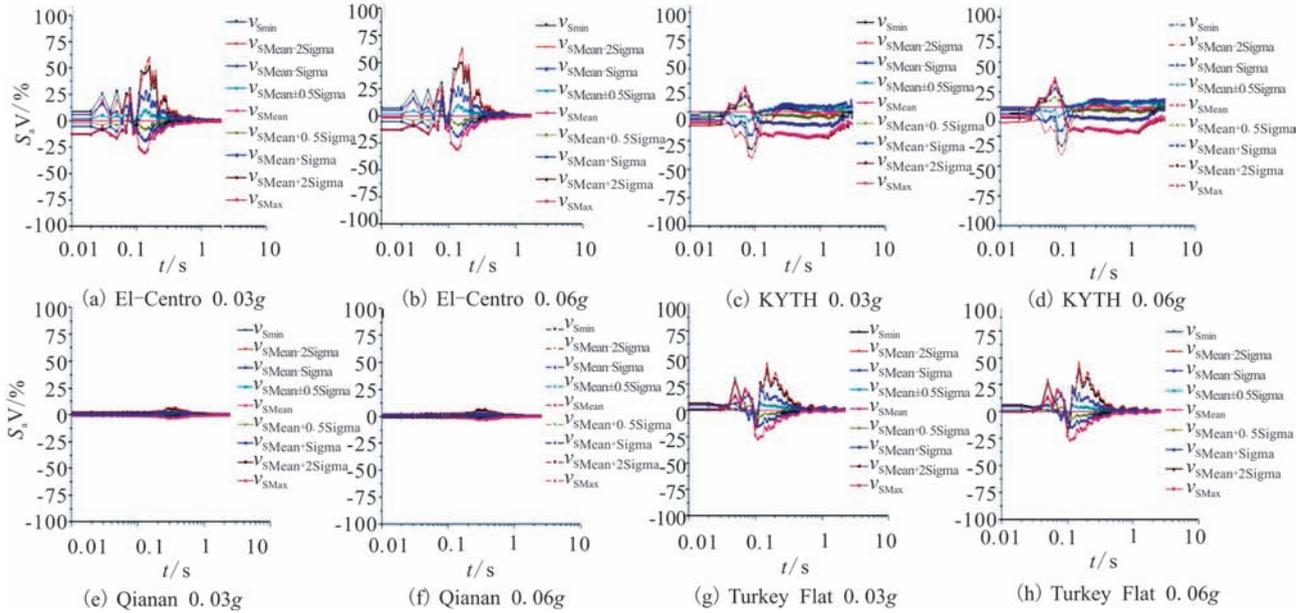


图 11 场地一加速度反应谱偏差

Fig.11 The bias of acceleration response spectra of site 1

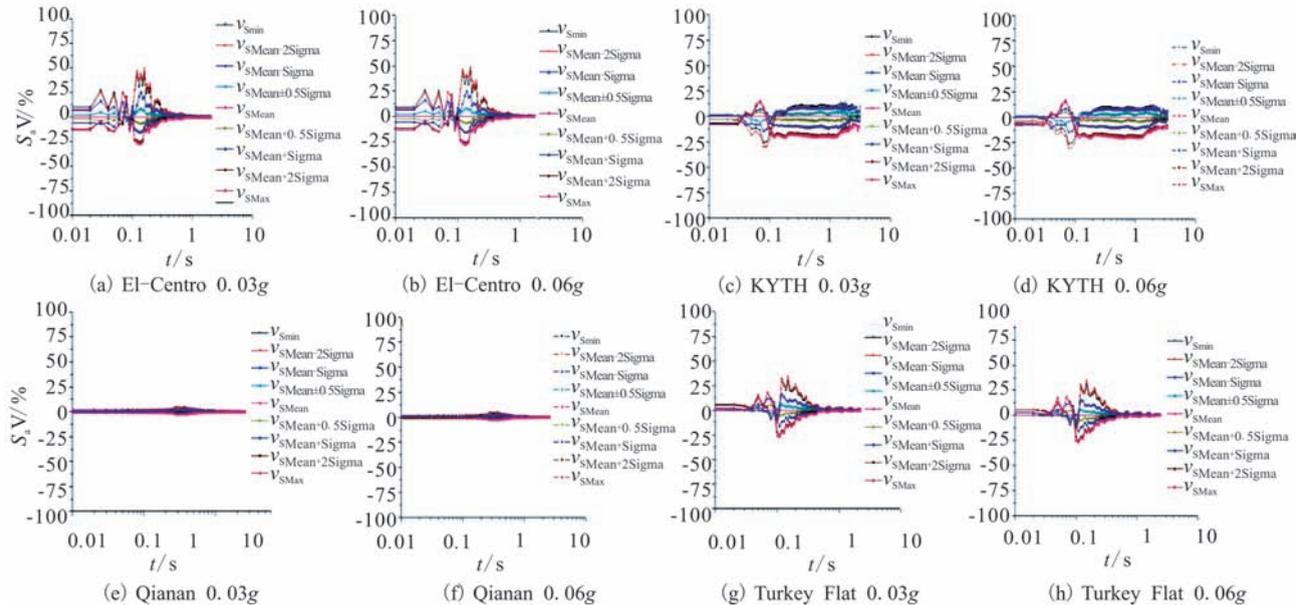


图 12 场地二加速度反应谱偏差

Fig.12 The bias of acceleration response spectra of site 2

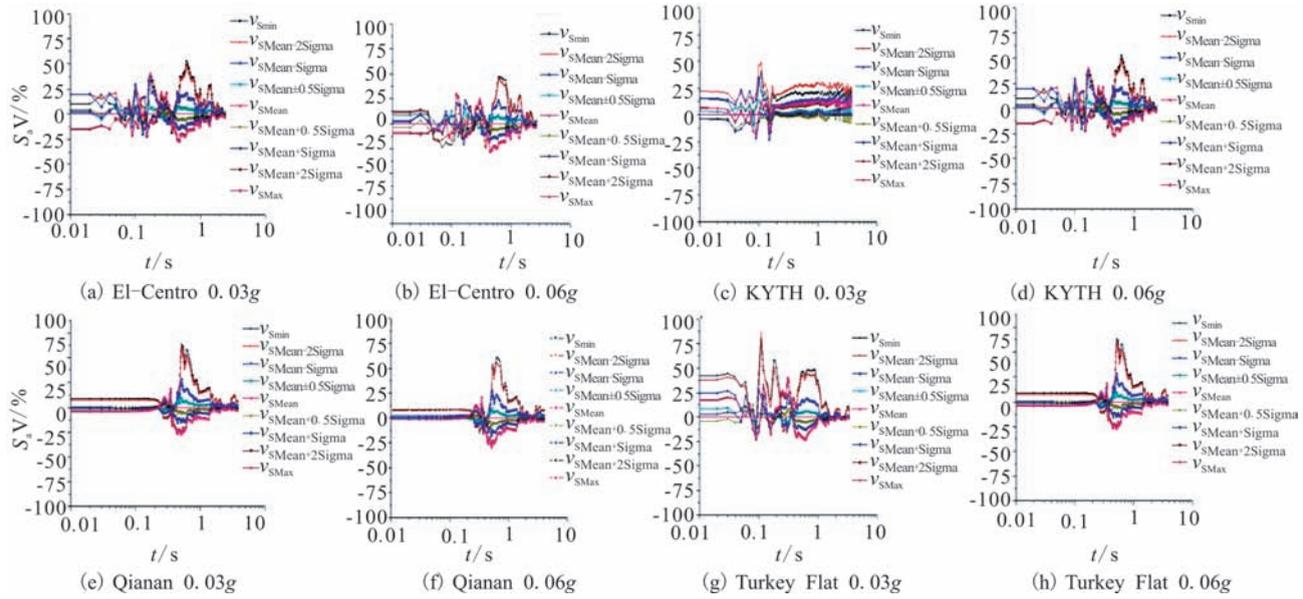


图 13 场地三加速度反应谱偏差

Fig.13 The bias of acceleration response spectra of site 3

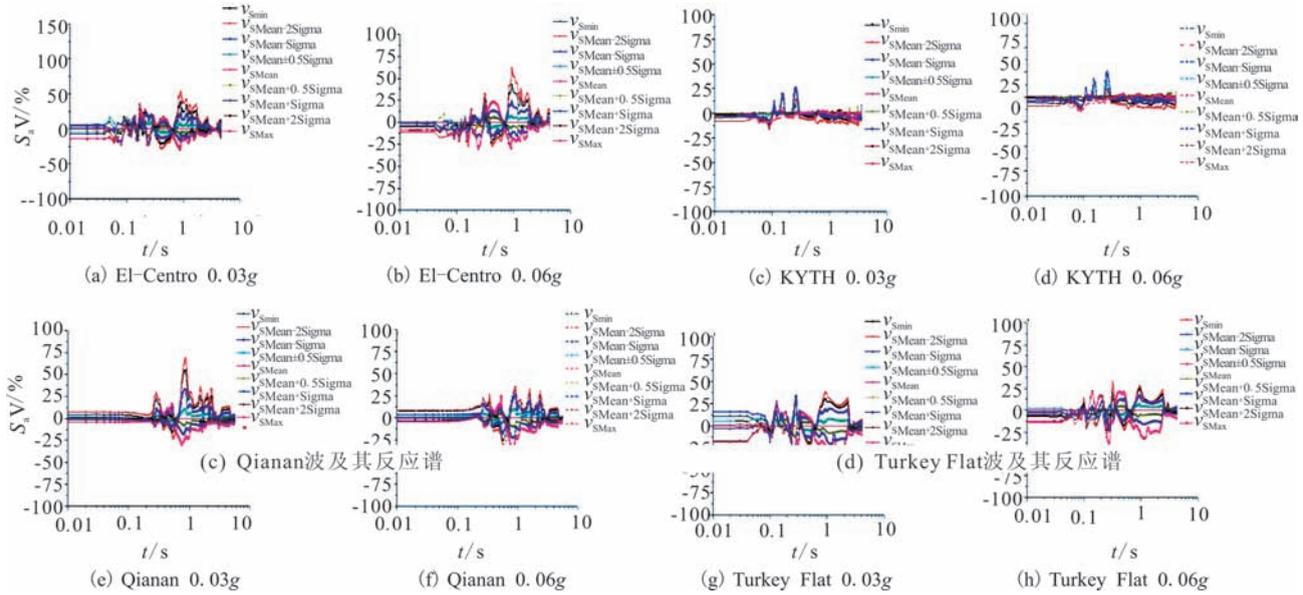


图 14 场地四加速度反应谱偏差

Fig.14 The bias of acceleration response spectra of site 4

时,加速度反应谱的峰值部分偏差最大;当输入 Turkey Flat 和 El-Centro 波时加速度反应谱整体偏差均发生了明显变化;当输入 Qianan 波时,加速度反应谱基本没有变化,偏差很小。在场地三和四中,比起场地一和二,由于场地变得更深、更软,计算结果也随之发生变化,场地对输入地震动的高频成分不敏感,反而对低频成分更敏感,直接表现为 Qianan 波的计算结果偏差明显增加, KYTH 波的结果偏差不大,另外两个波的计算结果随输入地震动的频率成分发生变化。各工况统计结果表明,1 倍

标准差引起的 PGA 最大变化为 25%,2 倍标准差引起的 PGA 最大变化为 50%左右。从反应谱偏差程度上来看,当输入地震动从 0.03g 变化到 0.06g 时,虽然加速度反应谱的整体数值增加,但加速度反应谱的相对误差程度并没有明显的改变。对每个场地来说, PGA 的偏差都有可能接近或超过 50%。波速减小引起的 PGA 变化要明显大于波速增加的变化率,这说明在实际计算中,波速测试结果若小于场地实际波速,则容易引起反应谱发生更大的变化。

6 结论

本文在兰州地区4个场地上开展了波速测试误差专项实验,得到波速测试误差的分布规律,并依据这一分布规律研究了实测误差对地表加速度反应谱的影响,得到如下结论:

(1) 兰州地区剪切波速实测误差具有明显规律性,测试误差绝大部分符合标准正态分布,且误差大小不随深度和场地类别而改变。

(2) 与全国平均水平相比,兰州地区Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类场地的剪切波速测试精度较高、偏差较小,其平均标准差可以定为10%,表明该地区波速测试水平优于全国平均水平。

(3) 剪切波速实测误差对PGA有重大影响,误差大则影响显著,就兰州地区而言,其1倍波速测试标准差引起PGA最大偏差为25%,2倍标准差引起PGA最大偏差为50%。

(4) 给定波速测试误差下反应谱变化程度与输入波相关,输入波频率成分与场地频率成分接近的地震波时,误差影响较大,反之影响较小。

参考文献(References)

- [1] 袁道阳,王兰民,何文贵,等.兰州市地震活断层探测新进展[J].地震地质,2008,30(1):236-248.
YUAN Dao-yang, WANG Lan-min, HE Wen-gui, et al. New Progress of Seismic Active Fault Prospecting in Lanzhou City[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 236-248. (in Chinese)
- [2] 袁晓铭,孙锐,孙静,等.常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):133-140.
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soils[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 133-140. (in Chinese)
- [3] 孙锐,袁晓铭,刘晓健.动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究[J].岩土工程学报,2009,31(8):1267-1274.
SUN Rui, YUAN Xiao-ming, LIU Xiao-jian. Effects of Dynamic Shear Modulus Ratio and Velocity on Surface Ground Motion and Their Equivalent Relations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1267-1274. (in Chinese)
- [4] 刘红帅,薄景山,吴兆营.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)
- [5] 齐文浩.土层非线性地震反应分析方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2008.

- QI Wen-hao. The Study on Method of Seismic Response Analysis of Nonlinear Soil Layers[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [6] 李小军,彭青.不同类别场地地震动参数的计算分析[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):29-36.
LI Xiao-jun, PENG Qing. Calculation and Analysis of Earthquake Ground Motion Parameters for Different Site Categories[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 29-36. (in Chinese)
- [7] 曹均锋,冯伟栋,孟凡月,等.剪切波速对场地地表地震动参数的影响[J].震灾防御技术,2013,8(3):252-260.
CAO Jun-feng, FENG Wei-dong, MENG Fan-yue, et al. Effect of Shear Wave Velocity on the Ground Motion Parameters of Site Surface[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(3): 252-260. (in Chinese)
- [8] Real C R. Turkey Flat, USA Site Effects Test Area: Report 2, Site Characterization[R]. Calif Div of Mines and Geology Tech Rept, 1988.
- [9] 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, 2008, 98: 331-343.
- [10] Hollender F, Bard P Y, Cornou C, et al. The Interpacific Project: A Cooperative Exercise for Assessing Reliability and Accuracy of Seismic Methods[C]//76th EAGE Conference & Exhibition 2014(Amsterdam), 2014: 164-166.
- [11] Asten M W, Boore D M. Comparison of Shear-velocity Profiles of Unconsolidated Sediments near the Coyote Borehole (CCOC) Measured With Fourteen Invasive and Non-invasive Methods[R]. US Geol Surv, 2005: 1169.
- [12] Boore D M. Paper 103, Determining Subsurface Shear-wave Velocities: A Review[R]. 3rd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 2006.
- [13] Martin A J, Diehl J G. Practical Experience Using a Simplified Procedure to Measure Average Shear-wave Velocity to a Depth of 30 Meters (v_{SS0}) [C]//13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B C, Canada, 2004.
- [14] Xia J, Miller R D, Park C B, et al. Comparing Shear-wave Velocity Profiles Inverted from Multichannel Surface Wave with Borehole Measurements[J]. Soil Dyn Earthq Eng, 2002, 22: 181-190.
- [15] 邱志刚,薄景山,罗奇峰.土壤剪切波速与埋深关系的统计分析[J].世界地震工程,2011,27(3):81-88.
QIU Zhi-gang, BO Jing-shan, LUO Qi-feng. Statistical Analysis of Relationship between Shear Wave Velocity and Depth of Soil[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(3): 81-88. (in Chinese)
- [16] 高玉峰,刘汉龙,朱伟,等.剪切波速对砂土地震反应的影响[J].工程勘察,2001(1):39-42.
GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei, et al. Effect of Shear

