

文章编号:1007-6069(2017)01-0166-06

兰州黄土场地地震动参数量化研究

陈拓¹, 吴志坚^{2,3,4}, 王平^{2,3,4}

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 甘肃省地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000; 4. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃兰州 730000)

摘要:为了进一步了解土体性质(Q3和Q4黄土)和土层厚度对黄土场地地震动效应的定量影响规律,利用等效线性化波动分析方法,在总结了兰州地区不同年代黄土波速值随土层变化的基础上,结合具体的黄土动力学参数及现场波速测试成果,开展黄土场地在不同性质黄土覆盖条件下地表峰值加速度PGA和黄土场地特征周期 T_s 等指标变化特征的场地地震反应计算。本文在考虑50年超越概率分别为63%,10%,2%的兰州人造地震波荷载作用下,探讨了不同性质黄土覆盖层的影响,并进一步建立了不同条件下黄土场地地震动反应谱特征周期计算公式。研究表明:黄土的性质和厚度对地表放大系数影响较大,随着土层厚度的增加,地表峰值加速度放大系数具有非线性特点,整体上随土层厚度的增大而增大。在两种性质黄土覆盖条件下,反应谱特征周期变化规律相同,呈对数变化特点。随着土层厚度增大,反应谱特征周期不断增大,增长速率逐渐减小。

关键词:黄土;地震动;峰值加速度;反应谱

中图分类号:TU43

文献标志码:A

Quantitative analysis of ground motion parameter of Lanzhou loessial sites

CHEN Tuo¹, WU Zhijian^{2,3,4}, WANG Ping^{2,3,4}

(1. The State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Gansu Earthquake Administration, CEA, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 4. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the analysis of shear wave velocity characteristics of typical loess in Lanzhou region, including Q3 and Q4 two different types of loess, the elementary wave velocity variation law with the increase of the soil layer depth is obtained. And then, combining the results of dynamic triaxial test, using three time histories of ground motion acceleration with the exceedance probabilities 62.5%, 10.0% and 2.0% in 50 years related to the research area, the characteristics of ground motion are analyzed for the Lanzhou loessial sites with different loess property and thickness, applying the equivalent linear method of seismic responses for soil layers. Through the study of peak ground acceleration (PGA) and characteristic period of the seismic response spectrum, the impact of loess property and overburden thickness of loessial sites on earthquake ground motion is acquired. Consequently, the influence of different loess and overburden thickness on earthquake ground motion can be drawn. The results show that the acceleration magnified effect that is related to the overburden thickness, has an obvious nonlinear characteristic. With the increase of the loess thickness, the amplitude magnification coefficient of PGA increases gradually. Moreover, the property of loess has a relatively high impact on the magnification of PGA. The period of

收稿日期:2015-01-21; 修订日期:2015-04-20

基金项目:中国地震局黄土地震工程重点实验室开放基金(2013051),中国博士后科学基金(2015M570490)

作者简介:陈拓(1986-),男,讲师,博士,主要从事岩土地震工程与冻土工程研究. E-mail: lzchentuo@163.com

the seismic response spectrum of loess sites with different loess property have the same variation law with the increase of the soil layer depth, presenting the Logarithmic variation characteristics. The period of the seismic response spectrum gradually increased, while the growth rate decreased with the increasing overburden thickness.

Key words: loess; earthquake ground motion; peak ground acceleration; response spectrum

引言

黄土是一种典型的结构性土,其特有的大孔隙架空结构决定了土体的动力易损性特征,在中强地震作用下容易发生液化、震陷以及滑坡等地震地质灾害,危害极大^[1]。对黄土地区而言,其特有的地形地貌特征、土层结构和厚度以及物质组成等决定了该地区地震地面运动规律有其自身特性。历史震害现场调查资料多次证实黄土地区局部场地的震害和地震动放大效应明显^[2]。为了进一步深入认识场地条件特点对黄土地区地震动放大效应的定量影响规律和作用机理,系统开展黄土场地地震动放大效应机制的研究工作具有重要的现实和科学意义。

目前,国内外很多学者就黄土地区场地震害和地震动放大效应问题进行了积极探索,取得了系列的研究成果。薄景山等^[3]总结分析了场地的地形地貌、岩土组成特征和动力特性参数等对地震动的影响。袁丽侠^[4]指出强震区场地土条件对地震动特性的影响可导致地基土的卓越周期与建筑物的自振周期产生共振。石玉成等^[5]研究了场地覆盖层厚度和地形因素对地震动放大效应的影响规律。吴志坚等^[6]进行了远场地震作用下黄土场地地震动放大效应机制的研究工作,然而目前针对不同年代黄土覆盖条件下的场地效应研究较少。同时,对场地效应的研究大多停留在定性分析的阶段,缺乏定量评价分析。基于此,本文在总结兰州地区不同年代黄土波速值随土层变化的基础上,结合具体的黄土动力学参数及现场波速测试成果,开展黄土场地在不同性质黄土覆盖条件下不同条件下地表峰值加速度 PGA 和黄土场地特征周期 T_s 等指标的变化特征的场地地震反应计算,分析黄土覆盖层厚度的影响规律,同时探讨了不同性质黄土覆盖层的影响。

1 兰州黄土波速特征及动力学参数

不同岩土体具有不同的弹性波传播速度,对黄土而言,形成于不同年代的黄土同样具有不同的波速特征,研究的黄土为兰州地区马兰黄土(Q3 黄土)和全新世黄土状土(Q4 黄土)。相关勘测结果表明:速随沉积时间的增长而明显增大,不同年代土层波速的变化是连续的。

目前,在黄土地区常用的两种关系式为:(1)选取幂函数的形式,用最小二乘法统计建立黄土层波速 V 随深度 H 的变化规律;(2)采用线性回归的方式。

利用石玉成研究成果,采用线性回归的方式来表征兰州地区不同年代黄土波速值随土层的变化,在统计深度 20 m 范围内不同年代黄土波速特征见表 1^[7]:

兰州地区不同年代浅层黄土剪切波速特征值回归公式如下:

兰州 Q3 黄土:

$$V_s = 101 + 14H \quad R^2 = 0.964$$

兰州 Q4 黄土:

$$V_s = 73 + 21H \quad R^2 = 0.874$$

对于统计深度以下的黄土波速根据现有的黄土地区钻孔波速值进行给定。

等效线性化方法采用的是等价非线性粘-弹塑性模型,其非线性特性表现为剪切模量和阻尼比随剪应变幅值变化,这种变化关系由试验给出。

根据在中国地震局兰州地震研究所黄土黄土地震工程重点实验室进行的动三轴试验和现场测试,得到了兰州地区不同年代典型黄土的剪切模量比、阻尼比和剪切波速资料,土层的非线性指标值见表 2。

表 1 不同年代黄土的波速特征

Table 1 Wave velocity characteristics of loess

| 黄土类型 | 沉积时间 / 万年 | 剪切波速 / V_s ($m \cdot s^{-1}$) | | 压缩波速 V_p ($m \cdot s^{-1}$) | |
|------|-----------|-----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| | | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 |
| Q4 | <1 | 110 ~ 310 | 220 | 180 ~ 573 | 395 |
| Q3 | 1 ~ 10 | 195 ~ 346 | 297 | 410 ~ 681 | 552 |

表2 兰州地区不同年代黄土的动剪切模量和阻尼比

Table 2 Dynamic shear modulus and damping ratios of different types of loess in Lanzhou regions

| 黄土类型 | 参数 | 剪应变/(10 ⁻⁴) | | | | | | | |
|------|---------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.05 | 0.1 | 0.5 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 |
| 黄土状土 | G/G_0 | 0.965 | 0.914 | 0.885 | 0.750 | 0.634 | 0.288 | 0.110 | 0.055 |
| | Q4 | λ | 0.008 | 0.015 | 0.031 | 0.043 | 0.072 | 0.129 | 0.173 |
| 马兰黄土 | G/G_0 | 0.980 | 0.930 | 0.875 | 0.735 | 0.620 | 0.275 | 0.103 | 0.053 |
| | Q3 | λ | 0.010 | 0.015 | 0.033 | 0.047 | 0.078 | 0.132 | 0.180 |

2 兰州黄土场地地震反应

根据西北风积黄土的形成过程及黄土场地的地层结构特点,结合具体的黄土动力学参数及现场波速测试成果,开展黄土场地在不同性质黄土覆盖条件下的场地地震反应计算,得到不同厚度的Q4黄土状土及Q3马兰黄土覆盖条件下的场地地震动力响应指标。通过分析对比不同条件下地表峰值加速度PGA和黄土场地特征周期 T_s 等指标的变化特征,得到黄土覆盖层厚度的影响规律,同时探讨不同性质黄土覆盖层的影响。

2.1 场地地震反应计算方案

根据研究目的,设计黄土场地在不同年代黄土覆盖条件下的场地地震反应计算方案。图1为场地地震反应计算模型示意图,假定场地上覆黄土和下伏基岩双层结构组成,下伏基岩波速为800m/s,不随上覆黄土层厚度增加而改变。上覆黄土层分别考虑为Q4黄土状土及Q3马兰黄土2种情况,在每一种黄土覆盖情况下,黄土层厚度分别设定为5m、10m、15m、20m、25m、30m、35m、40m、45m、50m、55m、60m共12种工况。

2.2 输入人工地震荷载

在黄土场地地震反应分析计算中,研究项目以兰州为例,结合兰州典型黄土场地的地震动强度、分布厚度及历史震害等特点,地震输入波为甘肃省地震局工程院柳煜工程师提供的50a超越概率分别为63%、10%和2%的兰州人造地震波,为了考虑相位随机性的影响,每种超越概率的地震波有3条地震动时程,图2给出超越概率为10%的3条人工地震动时程。通过地震反应分析来判断在某一超越概率危险水平的可能地震动作用条件下,研究区在不同地震烈度下的地震反应,从而对该场地的地震动特性做出评价。

2.3 地震动峰值加速度分析

为了定量描述不同黄土覆盖情况下土层的地震反应强度,根据地表地震动峰值加速度PGA的值,引入地震动放大系数的概念,定义:

$$\frac{\text{地表峰值加速度}}{\text{输入地震动最大幅值}} = \text{地震动放大系数}$$

式中:峰值加速度为3个地震波时程作用下,地表反应峰值加速度的平均值;地震动放大系数越大,说明地表震动反应越强烈。

图3为不同年代Q3、Q4黄土在不同覆盖层厚度情况下,地表峰值加速度放大系数随土层厚度的变化分布图,图3(a)为超越概率为63.5%的地震作用,图3(b)为超越概率为10%的地震作用,图3(c)为超越概率为2%的地震作用。从图中可以看出:随着土层厚度的增加,地表峰值加速度放大系数具有非线性的特点,整体上随土层厚度的增大而增大。在中小地震作用下,在土层厚度为25m~40m的时候,放大系数出现最大值。在超越概率为2%的大震作用下,呈现不一样的特点,土层厚度在50m~60m的时,放大系数出现最大值。

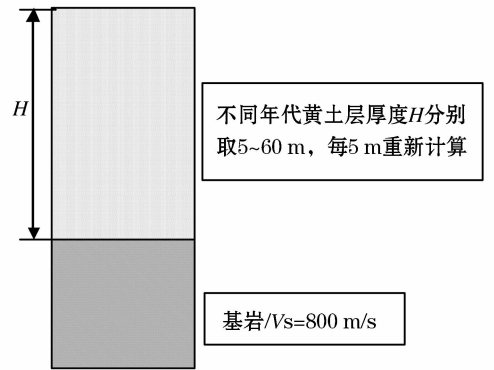


图1 考虑不同黄土厚度的场地地震反应计算模型
Fig. 1 Seismic response calculation model of soil layer with different loess thickness

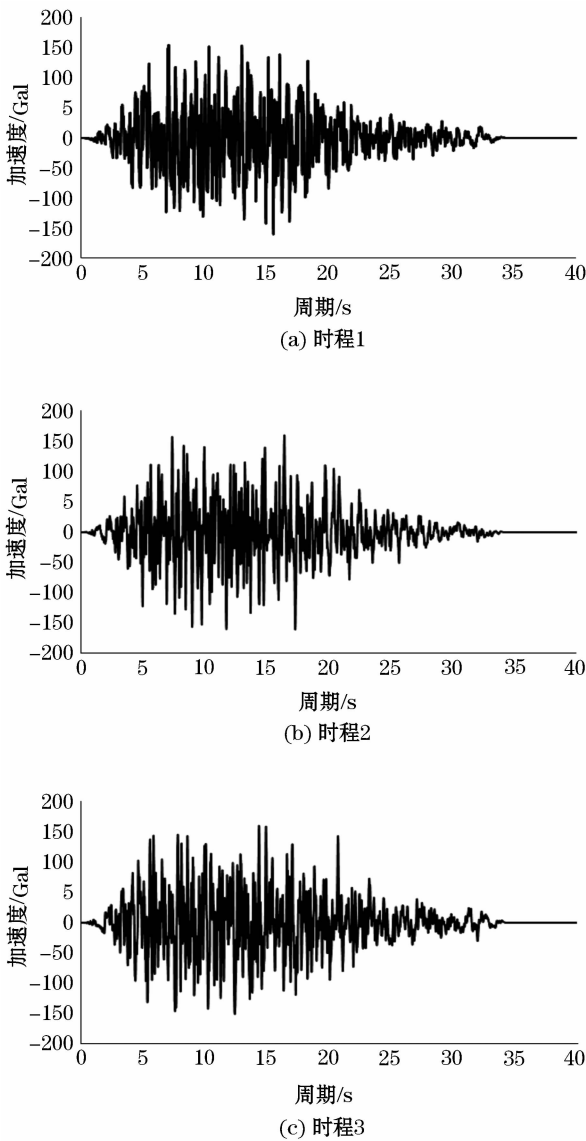


图 2 超越概率为 10% 的兰州人造地震波

Fig. 2 Time histories of ground motion acceleration with the exceedance probabilities 10.0% in 50 years

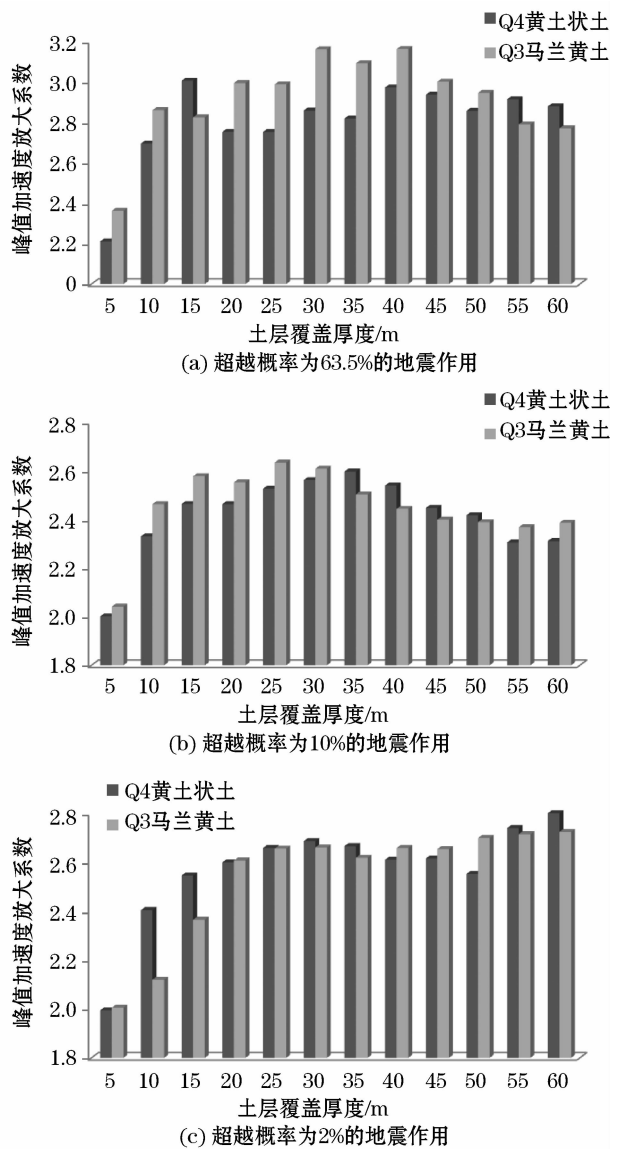


图 3 地表峰值加速度放大系数分布图

Fig. 3 Distribution of peak acceleration amplification coefficient

不同强度的地震荷载作用下,地表峰值加速度放大系数变化较大,超越概率为 63.5% 的小震作用下,放大系数可以达到 3.2,随着地震动强度的增大,放大系数逐渐变小,最大可以达到 2.8。

在相同的地震荷载作用下,黄土的性质对地表放大系数影响较大,但规律不明显。整体上,当场地为 Q3 马兰黄土覆盖情况下,地表放大系数要大。

3 地震动反应谱特征周期分析

地震动反应谱特征周期是在地震影响系数曲线中,水平段与下降段交点的横坐标,反映了地震震级,震源机制(包括震源深度)和震中距等地震本身方面的影响。同时也反映了场地的特性,如软弱土层的厚度和类型等场地类别,所以特征周期同时反映了地震动及场地的特性^[8]。

为了进一步明确特征周期变化规律,对不同地震动时程作用下的特征周期求取平均值,反应谱特征周期平均值随土层厚度分布情况如图 4 所示。其中:图 4(a)为超越概率为 63.5% 的地震作用,图 4(b)为超越概率为 10% 的地震作用,图 4(c)为超越概率为 2% 的地震作用。

在不同地震荷载作用下,随着土层厚度的增大,反应谱特征周期不断向长周期方向移动。新近黄土 Q4

黄土覆盖条件下的特征周期要大于 Q3 黄土覆盖情况。随着地震作用强度的增加,相同土层覆盖条件下场地地震动反应谱特征周期逐渐增大。在超越概率为 63.5% 的地震荷载作用下, Q3 黄土反应谱特征周期最大可以达到 0.5, Q4 黄土反应谱特征周期最大可以达到 0.4。而在超越概率为 2% 的地震荷载作用下, Q3 黄土反应谱特征周期最大可以达到 0.70, Q4 黄土反应谱特征周期最大可以达到 0.48。

从图中可以直观看出,在超越概率为 2% 的地震荷载作用下,随着土层厚度的增大, Q3 黄土覆盖条件下的特征周期显著增大。不同性质黄土覆盖条件下的反应谱特征周期差距与中小地震荷载作用下相比变大。

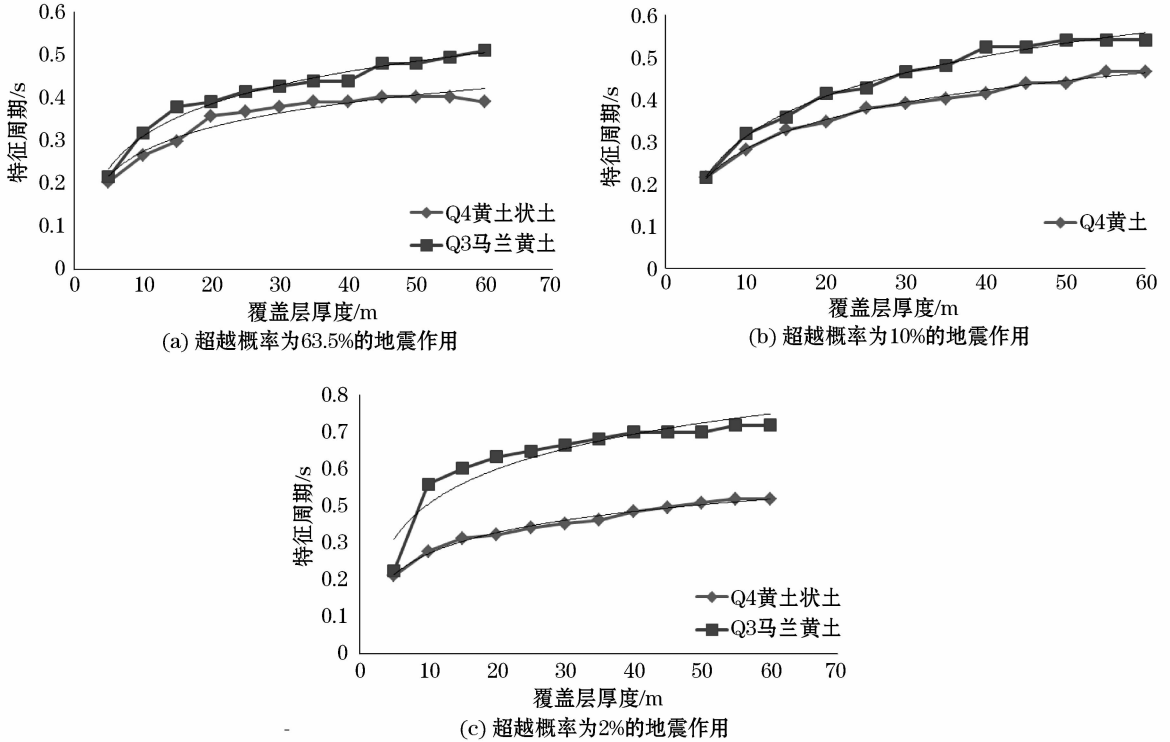


图4 地震动反应谱特征周期分布图

Fig. 4 Distribution of the period of the seismic response spectrum

通过对不同年代黄土在不同覆盖条件下的反应谱特征周期统计分析见表3,可以得出:在2种性质黄土覆盖条件下,反应谱变化规律相同,呈对数变化特点。随着土层厚度增大,反应谱特征周期不断增大,增长速率逐渐减小。在不同超越概率地震荷载作用下,典型黄土场地反应谱特征周期变化特征可以用相关公式表示(详见表3)。

4 结论

通过开展一维地震响应数值计算,得到了不同年代黄土在不同覆盖层厚度的条件下的地震动参数的变化规律,主要从地震动峰值放大系数和地震动反应谱特征周期两方面进行讨论,主要得到以下研究结论:

- (1) 在相同的地震荷载作用下,黄土的性质对地表放大系数影响较大,但规律不明显。整体上,当场地为 Q3 马兰黄土覆盖情况下,地表放大系数要大;
- (2) 随着土层厚度的增加,地表峰值加速度放大系数具有非线性的特点,整体上随土层厚度的增大而增大。在中小地震作用下,在土层厚度为 25~40 m 的时候,放大系数出现最大值。在超越概率为 2% 的大震作用下,随着地震动强度的增大,放大系数逐渐变小,土层厚度在 50~60 m 的时,放大系数出现最大值;
- (3) 随着土层厚度的增大,反应谱特征周期不断向长周期方向移动。同时,新近黄土 Q4 黄土覆盖条件下的特征周期要大于 Q3 黄土覆盖情况,随着土层厚度的增大,不同性质黄土覆盖条件下的反应谱特征周期差距与中小地

表3 典型黄土场地反应谱特征周期变化特征

Table 3 Variation characteristics of period of the seismic response spectrum in loess sites

| 地震荷载超越概率 | 黄土性质 | 反应谱特征周期变化公式 | 相关系数 R^2 |
|----------------|-------|-----------------------------|------------|
| 50a 超越概率 63.5% | Q3 黄土 | $Y=0.1088 \ln(x) + 0.0597$ | 0.9763 |
| | Q4 黄土 | $Y=0.0819 \ln(x) + 0.0863$ | 0.9361 |
| 50a 超越概率 10% | Q3 黄土 | $Y=0.1005 \ln(x) + 0.052$ | 0.9895 |
| | Q4 黄土 | $Y=0.1369 \ln(x) - 0.0017$ | 0.9935 |
| 50a 超越概率 2% | Q3 黄土 | $Y=0.0939 \ln(x) + 0.0941$ | 0.8821 |
| | Q4 黄土 | $Y=0.1554 \ln(x) + 0.01057$ | 0.9846 |

震荷载作用下相比变大;

(4)在 2 种性质黄土覆盖条件下,反应谱变化规律相同,呈对数变化特点。随着土层厚度增大,反应谱特征周期不断增大,增长速率逐渐减小。

参考文献

- [1] 王兰民,孙军杰. 特殊土动力学的发展战略与展望. 西北地震学报,2007, 29(1):88-92.
WANG Lanmin, SUN Junjie. Development strategy and prospects for study of special soil dynamics[J]. Northwest Seismology Journal, 2007,29(1):88-92.
- [2] 王兰民,吴志坚. 汶川地震场地条件对地震动放大效应的影响[J]. 土木建设与环境工程, 2010, 32(增刊 2):175-178.
WANG Lanmin, WU Zhijian. Influence of site condition on seismic amplification effects during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 175-178.
- [3] 薄景山,李秀领,李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J];世界地震工程,2003,19(2):11-15.
BO Jingshan, LI Xiuling, LI Shanyou. Some progress of study on the effect of site conditions[J]. World Earthquake Engineering, 2003,19(2):11-15.
- [4] 袁丽侠;场地土对地震波的放大效应[J],世界地震工程;2003,19(1):113-120.
YUAN Lixia. The amplifying effect of ground soil to earthquake wave [J]. World Earthquake Engineering, 2003,19(2):11-15.
- [5] 石玉成,王兰民,张颖. 黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J],西北地震学报,1999,12(2):203-208.
SHI Yucheng, WANG Lanmin, ZHANG Yin. Effects of overburden thickness and topography of loessial sites on earthquake ground motion[J]. Northwest Seismology Journal, 1999,12(2):203-208.
- [6] 吴志坚,王兰民,陈拓,等. 汶川地震远场黄土场地地震动放大效应机[J]. 岩土力学,2012,8(5):3736-3740.
WU Zhijian, WANG Lanmin, CHEN Tuo, et al. Study of mechanism of site amplification effects on ground motion in far field loess during Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,8(5): 3736-3740.
- [7] 石玉成. 黄土地区地震动参数特征及其工程应用研究[D]. 兰州:兰州大学博士学位论文。
SHI Yucheng. The study of ground motion parameters characteristics and its applications in engineering projects[D]. Dissertation for the Degree of Ph. D., Lanzhou:Lanzhou University.
- [8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.
HU Yuxian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Earthquake Publishing House,1988.