

来春景,朱彦鹏,王春青,等.黄土高填方场地地震动参数特性分析[J].地震工程学报,2018,40(6):1168-1173,1231.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1168

LAI Chunjing,ZHU Yanpeng,WANG Chunqing,et al.Characteristics of Ground Motion Parameters of Loess-high Filling Sites [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1168-1173,1231.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1168

## 黄土高填方场地地震动参数特性分析

来春景<sup>1,2</sup>,朱彦鹏<sup>1,2</sup>,王春青<sup>1,2</sup>,马天忠<sup>1,2</sup>

(1.兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃兰州730050;

2.兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃兰州730050)

**摘要:** 削山造地后形成的黄土高填方场地对地震动参数特性影响较大。以实际工程项目为研究对象,构造不同填土高度的计算剖面,采用一维等效线性化方法计算土层地震动参数,分析基岩地震动输入参数和填土高度对场地地表放大效应的影响。研究表明:场地地震放大系数随填土层的高度增加呈递减趋势。在多遇地震动和基本地震动作用下,场地地震放大系数递减速度比罕遇地震动和极罕遇地震动作用下要大。当填土高度达到一定程度后放大效应趋于平稳;填土高度的变化,会改变地表加速度反应谱的形状。填土高度越大,地表反应谱长周期的频谱成分越显著,反应谱曲线向后移,反应谱峰值点均明显向长周期移动,并出现多个峰值点,反应谱特征周期值变大;下伏基岩的刚度越大,地表峰值加速度的放大效应越大。地表加速度反应谱特征值相比变小。当填土高度增大到一定程度时,下伏基岩的种类对地表地震动特性影响则不明显。该研究成果对高填方场地的地震安全评价和结构抗震设计提供参考。

**关键词:** 黄土高填方;土层地震反应分析;地震动特性;设计反应谱

中图分类号: P315.9; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1168-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1168

## Characteristics of Ground Motion Parameters of Loess-high Filling Sites

LAI Chunjing<sup>1,2</sup>, ZHU Yanpeng<sup>1,2</sup>, WANG Chunqing<sup>1,2</sup>, MA Tianzhong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Loess-high filling sites formed by cutting off hilltops exert a large influence on the characteristics of the ground motion parameters. Based on an actual project, calculation sections with different filling heights were constructed, and the one-dimensional equivalent linearization method was used to calculate the ground motion parameters of soil layers to analyze the influences of bedrock ground motions and height of the filling soil on the ground surface amplification effect. The seismic amplification coefficient of the site decreased with increasing filled height. In addition, the seismic amplification coefficient of the site decreased faster under the action of frequent

收稿日期: 2018-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11162008); 甘肃省自然科学基金项目资助(1310RJZA040)

第一作者简介: 来春景(1974-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事场地地震效应、岩土工程测试研究。E-mail: laichunj@163.com。

and basic earthquakes than under the action of rare and extremely rare earthquakes. When the filled height reaches a certain level, the amplification effect stabilizes; variations in filled height change the shape of the surface acceleration response spectrum. At a certain filled height, the bedrock type shows no obvious influence on the surface ground motion characteristics. This research provides a reference for seismic safety evaluation and structural seismic design of loess-high filling sites.

**Keywords:** loess-high filling; seismic response analysis of soil layer; ground motion characteristics; design response spectrum

## 0 引言

黄土丘陵沟壑地貌广泛分布于我国西北地区,以流水侵蚀形成川谷、冲沟、梁、峁为主要地貌特征。长久以来,黄土丘陵沟壑区的城镇发展受地形和空间限制,多沿川谷延伸,空间狭窄,面临建设用地紧缺的问题。近年来在国内许多城市开展了“削山造地”工程,开发出了大量的城市建设用地。从而破解城市发展中土地资源短缺的制约瓶颈。低丘缓坡沟壑等未利用地开发项目的实施,通过挖山填沟,削崩建塬改造地势,使沟壑变平地 and 台地,彻底改变了沟壑梁峁纵横的自然地貌,形成了大量的超大厚度高填方场地和超高挖方边坡,削山造地后的推填场地,土体欠压密程度较高,地震安全问题比高阶地更为复杂突出。对于该类地基,场地放大效应、黄土震陷、液化是必须给予足够重视的地震安全问题<sup>[1-2]</sup>。

黄土场地显著的地震动放大效应、严重的地震滑坡和震陷是黄土地区主要地震岩土灾害。场地的震害程度往往和输入地震动的特性、场地条件、土层结构及结构动力特性的特殊组合有关。平整后的场地受填料动力特性变化、填土高度及地形地貌改变的影响,削山造地后的场地在地质地质条件上与原始场地相比有较大差异,其场地的地震动响应特征也会发生比较大的变化,包括地震动峰值、反应谱和持续时间等。场地条件对地震动特性有显著的影响,表现在引起地震动强度和频谱特性同时发生显著的变化。特别是场地土层对地震动峰值加速度和不同频段谱值均有明显的放大作用,尤其是对水平向地震动。本文以兰州某一典型的低丘缓坡沟壑未利用地开发的场地为工程背景,在对大量的现场试验数据分析的基础上,通过对该场地的高填方部分进行场地地震动反应测试,分析了影响高填方场地地震动参数变化的因素,揭示了黄土高填方场地地震动放大效应的特征,为黄土地区低丘缓坡沟壑未利用地开发建设提供抗震设计参考。

## 1 工程概况

项目场地地处黄土丘陵沟壑地区,是国家国土资源部批准的低丘缓坡沟壑等未利用地综合开发试点工程,综合开发利用地总面积为 4.85 km<sup>2</sup>,填方高度超过 30 m 的区域面积约 1.23 km<sup>2</sup>。工程区的原始地貌类型为典型侵蚀-剥蚀堆积的黄土丘陵沟谷地貌,黄土梁峁区海拔 1 555~1 907 m,山坡上部坡角为 20°~25°,下部坡角为 50°~60°,坡面冲刷破坏严重,山体遭水流侵蚀切割较强烈,形成山顶宽缓开阔,上缓下陡的黄土梁峁地形,黄土堆积厚度在 50~120 m 之间。岩性主要为大厚度黄土,上部披覆风成的马兰黄土(Q<sub>3</sub>),浅黄色,以粉土为主,土质均匀,结构疏松,具大孔隙,垂直节理发育,底部含有古土壤,局部可见白色钙质斑点,其下为离石黄土(Q<sub>2</sub>),基底为不同岩性段的基岩。

该项目的实施改变了原有的地形、地貌特征。土石方的开挖和填筑,使原有沉积的土层结构发生了较大改变,分层压实使原有的风成黄土层的土体性质发生了较大的改变。按照施工图的要求,对于填方高度小于 30 m 的区域,将来可作为建设用地,其压实系数不低于 0.93,对于填方高度大于 30 m 的区域,将来可作为景观绿化用地,其压实系数不低于 0.88。土料填筑采用分层碾压、强夯成型。

## 2 高填方场地地震动反应计算

### 2.1 基岩地震动输入的确定

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)的规定,按照项目场地所在的地震动峰值加速度分区,确定工程场地所在地Ⅱ类场地条件下基本地震动峰值加速度为  $a_{\max\text{II}}^B = 0.20g$ ,地震动加速度反应谱特征周期  $T_g = 0.45$  s。在此场地基本参数的基础上确定了多遇、罕遇和极罕遇地震动峰值加速度及加速度反应谱特征周期的数值。采用规准反应谱标准形式拟合人工地震波,合成地震动的规准目

标反应谱由表 1 所列的特征参数根据公式(1)计算得到,并将其分别乘以基岩峰值加速度  $a_{\max}$ ,得到拟合加速度时程的目标反应谱。拟合过程中,从目标谱中选择 60 个周期作为拟合目标谱的控制点,控制点的周期为 0.04~6.00 s,按对数等间距分布,目标谱与合成地震动时程的反应谱间的相对误差要求小于 5%。罕遇地震和极罕遇地震动加速度反应谱特征周期应大于基本地震动加速度反应谱特征周期,增加值为 0.05 s,以充分考虑大震长周期成分地震动的影响。

表 1 项目所在区的地震动峰值加速度和反应谱特征周期  
Table 1 Seismic peak ground acceleration and characteristic period of acceleration response spectrum in the project location area

地震作用分级	50年超越概率水平/%	地震动峰值加速度/g	地震动加速度反应谱特征周期
多遇地震	63	0.067	0.45
基本地震动	10	0.200	0.45
罕遇地震动	2	0.380	0.50
极罕遇地震动	0.01	0.580	0.50

所采用规范反应谱  $\beta_m(T)$  的形式:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 & T \leq T_0 \\ 1 + (\beta_m - 1) \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} & T_0 < T \leq T_1 \\ \beta_m & T_1 < T \leq T_g \\ \beta_m \left(\frac{T_2}{T}\right)^\gamma & T_g < T \leq 6 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为反应谱周期; $\beta_m$ 为反应谱放大系数,取 2.5; $T_0$ 为反应谱起始点,取 0.04 s; $T_1$ 为反应谱第 1 拐点周期,取 0.1 s; $T_g$ 为反应谱特征周期; $\gamma$ 为反应谱衰减系数,取 0.9。

人工合成基岩地震动加速度时程的方法采用三角级数叠加法,其基本思路是将目标反应谱转换为功率谱,然后用三角级数叠加法生成零均值的平稳高斯过程,再乘以强度包络函数,得到非平稳的基岩加速度时程,最后迭代调整至满足精度要求后得到拟合地震动时程<sup>[3]</sup>。时程强度包络函数的参数  $c$  取 0.25。根据表 1 参数确定 4 条人工拟合的地震加速度时程,每个时程的离散点数为 2 048,离散步长为 0.02 s。图 1 为人工拟合基岩地震波时程目标谱,图 2 为 50 年超越概率水平为 10% 的拟合地震波时程曲线,其余拟合的地震波时程受篇幅限制,不再一一列出。人工拟合地震波的输入采用输入加速度时程

最大的 1/2 作为输入的最大值。

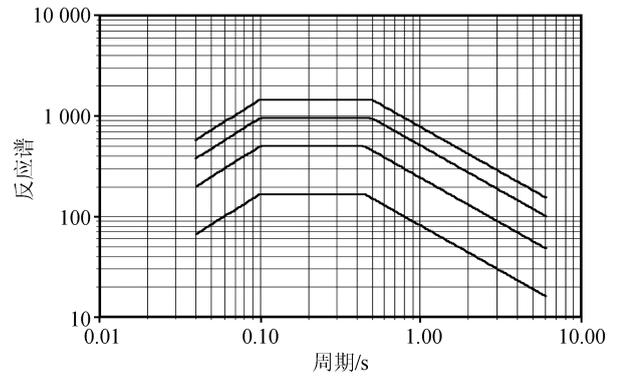


图 1 人工拟合基岩地震波时程目标谱

Fig.1 Target spectra of artificial bedrock seismic waves

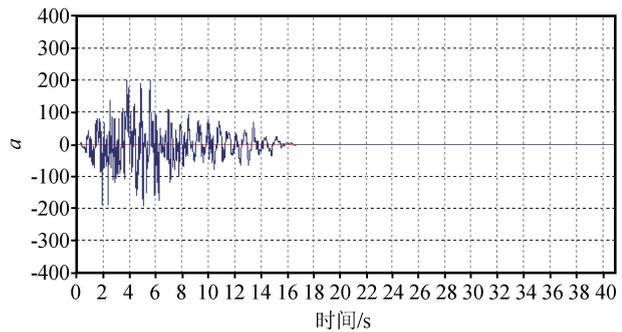


图 2 人工拟合地震波时程曲线

Fig.2 Time history curves of artificial seismic waves

## 2.2 场地地震反应计算模型和土层动力学参数的确定

研究区域内填筑体的下伏岩层主要有 2 类,一类为裸露加里东期花岗岩及白垩系砂岩、砂砾岩,该层层位稳定,厚度大。另一类为中等风化的砂岩和砂砾层。上部填筑体剖面比较复杂,互层之间的土性离散性较大,大面积填土以黄土状粉土和风成马兰黄土为主。本文在计算中简化土层土性不确定性的影响,根据现场测试的数据,将填筑体土性分为 I 类填土和 II 类填土。

场地结构剖面由上覆黄土填筑体和下伏基岩构成。填筑体高度取 5、10、20、30、40、50、60、70、80 m 共 9 种工况构造填方高度剖面,每层厚取 5 m 作为计算模型进行场地地震动反应分析。

场地剪切波速的取值是基于现场测试数据,按照同层标高相等取等效剪切波速所得。测试方法采用检层单孔法进行,由于现场填筑分区域分块进行。本文选取典型剖面,按照等效剪切波速的取值方法,每 5 m 取等效剪切波速值构建计算剖面。

土体的动剪切模量和阻尼比是反映土体动力

特性的重要参数,其表现形式为随应变振幅变化呈明显的非线性变化。压实黄土的动力特性主要受到含水量、干密度和固结应力比等因素影响<sup>[4]</sup>,在压实黄土特性中表现尤为明显。本文计算土层参数采用的是等价非线性黏-弹塑性模型。非线性参数的取值采用场地实测数值的平均值,考虑到填方

高度较大,压实过程中土体特性离散性也很大,根据现场实测数值,取 2 类压实黄土的动力参数指标进行计算,分为 I 类填土和 II 类填土,见表 2 所列。依据以上基本参数通过地震反应分析方法来分析在某一超越概率危险水平地震动作用下的地震动响应。

表 2 压实黄土的动剪切模量和阻尼比取值

Table 2 Values of dynamic shear modulus and damping ratio of the compacted loess

黄土类型	非线性动力参数	剪应变/( $\times 10^{-4}$ )							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
I 类填土	$G/G_{max}$	0.983	0.967	0.885	0.772	0.624	0.462	0.112	0.046
	$\lambda$	0.012	0.018	0.038	0.054	0.096	0.118	0.146	0.162
II 类填土	$G/G_{max}$	0.989	0.978	0.864	0.735	0.531	0.346	0.103	0.053
	$\lambda$	0.013	0.015	0.043	0.058	0.106	0.124	0.161	0.175

### 3 黄土地区高填方场地地震动参数特性分析

场地地震动反应分析采用一维等效线性化方法,该方法在频域线性波动分析的基础上利用非线性动力方程的等效线性化处理技术给出。假定覆盖土层和下伏基岩为力学性质竖向成层变化,从而求得不同填土层的地震动响应参数。该方法也是国内地震安评工作中常用的地震反应分析方法。

#### 3.1 填方高度对地面地震动峰值加速度的影响分析

为了定量描述不同填方高度对地面地震动峰值加速度的影响,采用地表地震动放大系数指标进行对比分析。地表地震动放大系数取地表峰值加速度的计算值除以基岩地震动峰值输入值<sup>[5]</sup>。场地地震动放大系数越大,说明地震动放大效应越强烈。

根据计算结果,不论填方高度为多少,场地地表地震动峰值加速度均大于基岩地震动峰值加速度输入值。填方场地对地表地震动峰值加速度有放大作用。放大效应主要受填方高度和基岩输入地震动特性有关。50 年不同超越概率水平地震作用下不同填方高度的地表峰值加速度放大效应如图 3 所示。

不同强度的地震作用下,地表峰值加速度放大效应变化不同,具有明显的非线性特点,放大系数随着输入地震动峰值加速度的增加而减小。多遇地震作用下,填方高度对地表峰值加速度放大效应最大,放大系数可以达到 4.2。多遇地震和基本地震作用下,地表峰值加速度放大效应随填土高度变化较明显,而罕遇地震和极罕遇地震波输入后地表峰值加速度放大效应差异不明显。主要原因是输入地震动峰值加速度的增大使土的剪应变水平增大,剪切模量降低所引起,也与该计算方法在处理等效线性变

化中高频分量求解的缺陷有关<sup>[6]</sup>。

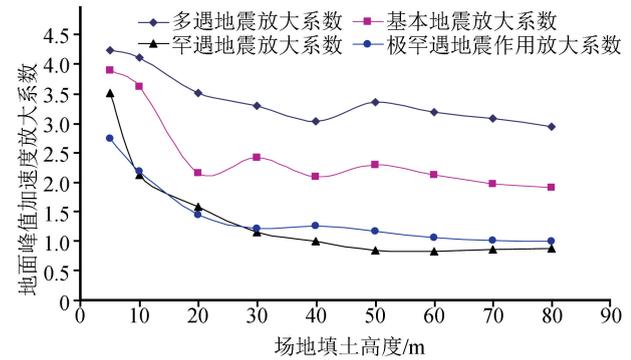


图 3 不同地震作用下场地地表加速度放大系数随填方高度变化曲线

Fig.3 Variation curves of ground acceleration amplification coefficient with the filling height under different earthquakes

在每一特定地震波输入作用下,填土高度小于 20 m 时,地表峰值加速度放大效应出现了最大值,并随填土高度增大而减小,这与该厚度层压实程度高而引起实际测试的剪切波速值增高有很大的关系。当填土高度在 20~60 m 时,随着填方高度的增加而放大效应趋于平稳,填方高度大于 60 m 时,其放大效应随填方高度增大而减小。

#### 3.2 不同填方高度对地面地震动反应谱的影响分析

反应谱在本质上反映的是地震动强度与频谱特性,是确定设计反应谱的基础。地震反应谱的特征周期、平台值和谱峰值是描述地震动反应谱的基本内容。地震动反应谱特征周期是反应谱的重要参数之一,是设计反应谱标准化之后的地震动加速度反应谱平台值的终止周期。能够同时反映地震震级、震源机制和震中距等地震本身方面的影响,同时也

能反映场地特性。

从场地地面运动反应谱的计算结果可以看出,填土高度的增大,将改变反应谱的形状,填土高度越大,

长周期的频谱成分越显著,反应谱曲线越向右移动。图4是50年不同概率水平地震作用下在填方高度30 m和60 m条件下的地表加速度反应谱曲线。

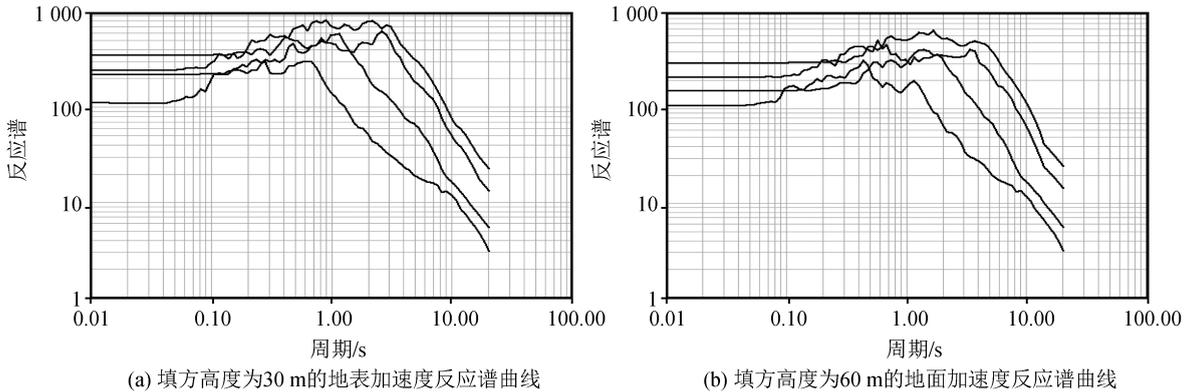


图4 下伏基岩为花岗岩情况下不同填方高度的地震反应谱曲线

Fig.4 Seismic response spectrum curves with different filling heights in the case that the bedrock is granite

从计算结果可以看出,加速度反应谱的形状随土层厚度的变化而变化,且非常显著。随着填方高度的增大,反应谱峰值点均明显向长周期移动,且随着填土高度的增加,移动趋势越为明显,偏移量较大,反应谱特征周期值变大,最大可达5 s。同时出现多个反应谱峰值点。加速度反应谱谱峰和平台值随填土高度的增大反而影响不大。

相同填土高度的场地,在不同地震作用下,随着地震动强度的变化,加速度反应谱谱峰随地震动强度增大而增大,反应谱特征周期的取值也增大。在多遇地震作用下,反应谱特征周期变化较大。

填土高度对峰值加速度反应谱平台值影响不明显,对反应谱特征周期值也没有太大的影响。

### 3.3 不同种类下伏基岩对场地地震动参数的影响分析

在场地地震动反应分析中,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的影响<sup>[7]</sup>,特别是对于高厚度覆盖层场地,不同的土层顶面作为地震波输入的基岩面,土层地震反应的结果相差较大。本文所选取的研究区域内填筑体的下伏基岩主要有2类,一类为出露加里东期花岗岩及白垩系砂岩、砂砾岩,另一类为中等风化的砂岩和砂砾层。基岩的密度和剪切波速值相差较大,花岗岩密度为 $2.5 \text{ g/cm}^3$ ,剪切波速为 $628 \text{ m/s}$ ,砂岩密度为 $1.95 \text{ g/cm}^3$ ,剪切波速为 $490 \text{ m/s}$ 。本文选取10 m、30 m、60 m和80 m填土高度构造土层剖面,其他参数取值同前文,分别输入四级地震作用下的地震动时程,分析场地地面地震动峰值加速度和地震反应谱特征。图5和图6分别表明了不同地震动强度输入在不同下伏基岩的地震峰值加速度计算值和反应谱曲线。

不同种类的下伏基岩作为地震动时程的输入界

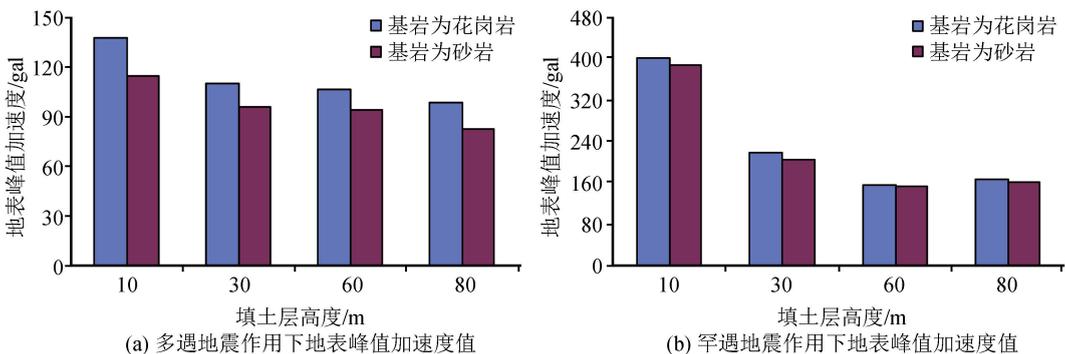


图5 不同地震强度作用下不同类下伏基岩的地震峰值加速度值比较

Fig.5 Comparison between seismic peak ground acceleration values for different bedrocks under different earthquakes

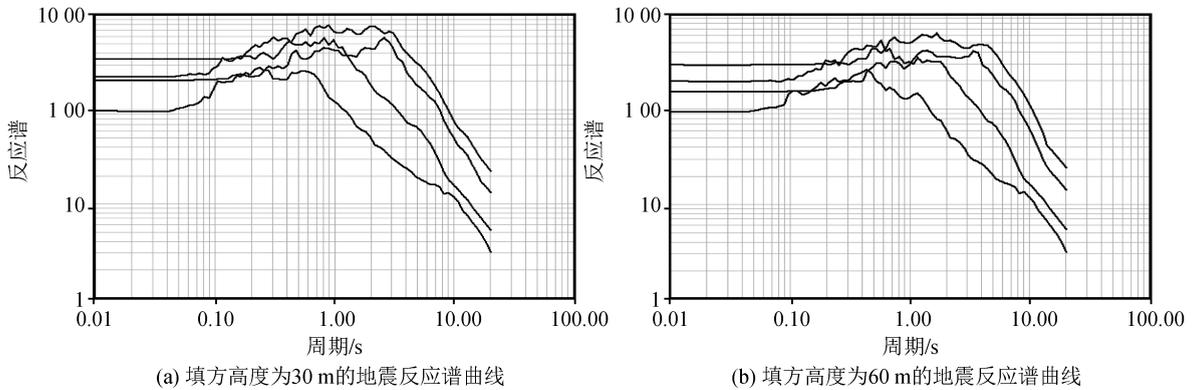


图6 下伏基岩为砂岩情况下不同填方高度的地震反应谱曲线

Fig.6 Seismic response spectrum curves with different filling heights in the case that the bedrock is sandstone

面对地表峰值加速度和反应谱特征曲线影响较大。

填土层厚度对地表峰值加速度有放大效应,下伏基岩的力学性质越高,相同填土高度下的地表峰值加速度放大效应越大。随着输入地震波强度的增大,地表放大效应也越大,但是随着填土高度的增大,放大效应趋势逐渐减小。填土高度在60~80 m之间,下伏基岩的种类对地表峰值加速度的影响不太明显。

地表加速度反应谱特征值随着填土层厚度的增加向右平移,数值变化较大,通过对图4和图6反应谱曲线进行比较,下伏基岩为砂岩的反应谱特征周期取值更大,反应谱平台值和谱峰值改变不明显。

#### 4 结论

黄土丘陵沟壑区原始地形起伏大,平整后的场地具有填土层高度大,填筑不均匀等特性。本文以实际工程项目的现场试验数据为基础,构造不同填土高度的计算剖面,采用土层地震反应的一维等效线性化方法计算,分析了地震动强度对场地地表放大效应和反应谱特性的影响,得到如下结论:

(1) 基岩之上的填土层对基岩输入地震动峰值加速度有明显的放大作用。地表放大效应与填方高度、输入地震动强度有关。场地地震放大系数随填土高度增加呈递减趋势。在多遇地震和基本地震作用下,地震动放大系数递减速度比罕遇地震和极罕遇地震作用下大。当填土高度达到一定程度后放大效应趋于平稳。

(2) 填土高度的变化,会改变地表加速度反应谱的形状。填土高度越大,地表反应谱长周期的频谱成分越显著,反应谱曲线会向后移,并出现多个峰值点。反应谱特征周期值变大。在不同地震作用

下,随着地震动强度的变化,加速度反应谱谱峰随地震动强度的增大而增大,反应谱特征周期的取值也增大,多遇地震作用下,反应谱特征周期变化较大。

(3) 下伏基岩对场地地震动放大效应影响较大,基岩的刚度越大,峰值加速度放大效应越大。地表加速度反应谱特征值则相比变小。当填土高度增大到一定程度,下伏基岩的种类反而对地表地震动特性影响不明显。

削山造地工程是近几年许多城市为解决建设用地紧张问题所采取的新措施,由此形成的建设场地存在一定的地震安全风险,场地的地震反应分析是地震安全风险评价的基础工作,本文的研究结果对该类场地的建设项目具有很好的参考价值,特别是对高耸和大跨等长周期结构的抗震设计提供了参考。

#### 参考文献(References)

- [1] 王兰民,孙军杰.黄土高原城镇建设中的地震安全问题[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):115-122.  
WANG Lanmin, SUN Junjie. Seismic Safety Issues in the Process of Urban Development in Loess Plateau[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 115-122.
- [2] 王兰民.第六届国际地震岩土工程大会综述[J].地震工程学报,2015,37(4):907-914.  
WANG Lanmin. An Overview of the Sixth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering [J]. China Earthquake Engineering, 2015, 37(4): 907-914.
- [3] 周春海.基岩人造地震动随机数对地表地震动参数的影响[J].世界地震工程,2014,30(4):89-93.  
ZHOU Chunhai. Effect of Random Numbers of Artificial Bed Rock Ground Motion on the Surface Ground Motion Parameters[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(4): 89-93.
- [4] 李义云,谢永利,刘保健.路基压实黄土动力特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1037-1046.

- ing, 2015, 32(1): 89-95.
- [9] 汪小平, 高伦浩, 李桅, 等. 建筑结构地震损伤模型的研究进展[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(4): 1-6.  
WANG Xiaoping, GAOLunhao, LI Wei, et al. The Advances of Studies on Seismic Damage Model of Building Structures[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(4): 1-6.
- [10] 王晓飞, 王鹏飞, 贾虎, 等. 基于时变地震损伤模型的多龄期钢框架结构易损性分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 192-200.  
WANG Xiaofei, WANG Pengfei, JIA Hu, et al. Seismic Vulnerability Analysis of Multiage Steel Frame Structures Based on Time-varying Seismic Damage Model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 192-200.
- [11] 郑山锁, 王晓飞, 程洋, 等. 锈蚀钢框架地震损伤模型研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 144-149.  
ZHENG Shansuo, WANG Xiaofei, CHENG Yang, et al. Seismic Damage Model of a Corroded Steel Frame[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 144-149.
- [12] 丛苏莉. 多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌仿真分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 41-47.  
CONG Suli. Simulation and Analysis of the Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multidimensional Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 41-47.

\*\*\*\*\*  
(上接第 1173 页)

- LI Youyun, XIE Yongli, LIU Baojian. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Roadbed Compaction Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037-1046.
- [5] 陈拓, 吴志坚, 王平. 兰州黄土地地震动参量化研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 166-171.  
CHEN Tuo, WU Zhijian, WANG Ping. Quantitative Analysis of Ground Motion Parameter of Lanzhou Loessial Sites[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 166-171.
- [6] 袁晓铭, 李瑞山, 孙锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 95-103.  
YUAN Xiaoming, LI Ruishan, SUN Rui. A New Generation Method for Earthquake Response Analysis of Soil Layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95-103.
- [7] 朱姣, 陈国兴, 许汉刚. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2079-2087.  
ZHU Jiao, CHEN Guoxing, XU Hangang. Effect of Seismic Bedrock Interface Depth on Surface Motion Parameters of Deep Site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2079-2087.