

夏坤,董林,李璐.黄土斜坡动力响应特征分析[J].地震工程学报,2019,41(3):694-701.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.694

XIA Kun, DONG Lin, LI Lu. Dynamic Response Characteristics of Loess Slopes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 694-701. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.694

黄土斜坡动力响应特征分析

夏 坤, 董 林, 李 璐

(中国地震局兰州地震研究所中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 斜坡动力响应特征与斜坡形态密切相关, 若入射地震波主频接近斜坡卓越频率就会放大斜坡动力响应, 甚至造成斜坡失稳。汶川地震对远离震中的黄土地区造成了较为严重的破坏, 局部场地震害和地震动放大效应显著。选取汶川地震典型黄土斜坡场地, 利用地形台阵流动观测和数值模拟计算相结合的方法, 系统开展强震动作用下黄土斜坡场地动力响应特征研究。结果表明: 坡顶卓越频率最小, 其 PGA 放大系数甚至达到坡底的 1.98, 这种现象可能与斜坡高差和入射波波长之比密切相关, 比值 0.2 时坡顶放大效应达到最大。随斜坡坡度增加, 放大效应增强, 坡顶反应谱卓越周期放大系数可达 5, 说明斜坡地形对强震地面运动有显著影响。数值计算结果与实际强震观测基本吻合, 其结果对黄土地区建设工程抗震设防具有重要的科学与实际意义。

关键词: 黄土场地; 斜坡地形; 放大效应; 动力响应; 强震动观测; 有限元分析

中图分类号: P65

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0694-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.694

Dynamic Response Characteristics of Loess Slopes

XIA Kun, DONG Lin, LI Lu

(Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Agency, Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Loess Plateau is seated on the upper and middle stream of the Yellow River in northern China, covering an area of 440 000 km², with loess deposit thickness ranging from several meters to more than 500 meters. The Loess Plateau is one of the most tectonically active areas of the world and one of the most seismically active regions. More than 1.4 million people have been killed by the earthquakes in the region. The Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in 2008 collapsed or seriously damaged enormous buildings, houses, and infrastructure. The field investigations, observations, and analyses indicate that a large number of casualties and tremendous economic losses were caused not only by the collapse and damage of houses with poor seismic performance, but also by the amplification effects of site conditions, topography, and the thickness of loess deposits on ground motion. The morphological characteristics of slopes determine the predominant frequency, which may amplify the incident seismic wave with the same or similar frequency range, and thus, increase the slope dynamic response and even trigger landslides. The field inves-

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(51608496, 51708525); 甘肃省青年科技基金计划(1606RJYA228)

第一作者简介: 夏 坤(1985-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事防灾减灾工程等方面的研究。E-mail: xiakunxiakun@163.com。

tigations of the Wenchuan earthquake indicate that the amplification effects of site conditions and topography on ground motion were very obvious in loess regions. In this paper, we chose a typical loess site for temporary strong motion array and numerical analysis, and aim to explore the dynamic response characteristics of the loess slope. The results reveal the following: (1) The minimum predominant frequency occurred at the slope crest. The highest peak ground acceleration (PGA) amplification coefficient reached 1.98 at the slope crest. The phenomenon of the low predominant frequency corresponding to the high PGA amplification at the slope top may be related to the ratio of slope height to the wavelength of incident wave. The PGA amplification was maximum when the ratio was 0.2. (2) The amplification effects are more predominant with increase in slope gradient. The predominant period amplification coefficient of response spectrum at the slope top may reach 5. The numerical results are basically consistent with the ground motion observations, and thus, they have high scientific and practical significances for engineering seismic fortification in loess regions.

Keywords: loess site; slope terrain; amplification effect; dynamic response; strong motion observation; finite element analysis

0 引言

作为世界上地震灾害最为严重的国家之一,我国黄土高原沟壑纵横、地质构造复杂,致使黄土地区成为我国强震的多发区。大量的震害调查、强震观测以及理论研究表明,地形地貌会对地震波产生放大效应,局部地形对震害以及地震动的影响较大。场地局部地形对震害的影响与构成该地形的岩土介质条件密切相关。由于黄土自身特有的多孔隙和弱胶结结构使之具有很强的软弱土动力灾变特性,表现出极高的动力易损性^[1]。以往震害经验表明,黄土地区局部地形对震害的不利影响,一般要比非黄土地区更为严重。除土体介质特性外,局部地形对震害的影响还与地形的高度、坡度等几何形态有关。黄土地区地形比较复杂,斜坡发育,高陡斜坡的上部边缘部位对震害的加重影响十分明显。高危的地震活动背景与黄土高原特有的地形地貌特性、土层结构以及物质组成等决定了黄土斜坡动力响应的特殊性。

近年来,斜坡地形对地表地震动的影响研究取得了实质性的进展,而黄土斜坡对地震动的影响还不明确。加之,以往考虑斜坡实测地形记录与数值计算分析之间关联的研究不多,且数值模拟中较多地考虑单一频率简单波输入、均质边坡模型以确定斜坡卓越频率,而富含多种频率的实际地震动输入、非均质边坡模型往往被忽视^[2]。因此极有必要对黄土斜坡的动力响应特征做进一步的研究。

汶川地震中,远离震中的黄土地区遭受了较为严重的破坏影响,局部场地的震害和山体放大效应十分显著。如位于甘肃省陇南市武都区同一山体的

蒿坪村和刘家堡村(两村海拔相差 326 m),地震中位于山顶的蒿坪村临坡区域的房屋几乎全部被破坏,而位于半山腰的刘家堡村的主要震害仅为房屋墙体有一定的开裂;另一武都区黄土斜坡,位于山顶的陇南市气象局办公楼震害严重,已被拆除,而位于山底的同类型房屋基本完好。

本文利用汶川地震获得的强震动记录及其场地钻孔、波速等资料,采用地形台阵流动观测和数值模拟计算相结合的方法,系统开展强震动作用下黄土斜坡场地的地震反应特征和对地震动放大效应的影响机理研究,并结合实际震害特点,提出黄土斜坡地区建筑结构抗震及地震安全对策中一些值得注意的问题。以期使黄土斜坡场地效应等灾害的评定更加科学、精细和合理,并使得由其诱发的潜在危害得以尽可能地降低;为黄土斜坡地区建设工程场地确定合理的设计地震动参数提供科学依据与参考;为提高该地区的抗震设防水平起到积极的科学与实际意义。

1 流动台阵地形影响分析

1.1 地形台阵及强震记录

汶川地震后,调查组在甘肃省文县县城某山体进行流动台阵斜坡地形地震动监测(图 1)。观测场地位于甘肃省东南部,为高山峻岭与峡谷盆地相间的复杂地形,地貌类型有浅山丘陵盆地地貌区及高山地貌区,场地均为黄土层覆盖。山体斜坡南北长 450 m,高差约 50 m。斜坡上部地形平缓,坡角 5° 左右,斜坡下部地形稍陡,坡角 $35^\circ \sim 45^\circ$ 。

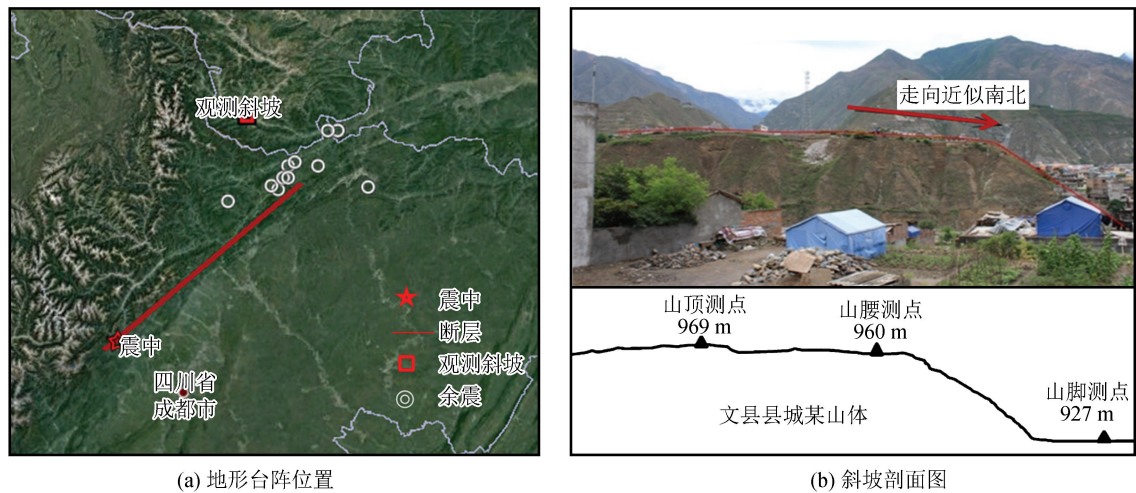


图 1 文县斜坡地形台阵位置及剖面图

Fig.1 Location of arrays and profile of the selected slope in Wenxian

经对斜坡现场地质调查,选择地质条件基本相同的位置布设了 3 个强震动观测点:1 点山脚(32.94°N、104.70°E;高程:927 m)、2 点山腰(32.95°N、104.67°E;高程:960 m)和 3 点山顶(32.94°N、104.67°E;

高程:969 m)。地震监测仪器使用美国凯尼公司研制的 ETNA 型强震加速度计。自 2008 年 5 月 22 日至 6 月 28 日期间,斜坡地形台阵获得了 12 次余震的良好加速度记录,记录的地震信息见表 1^[3]。

表 1 流动观测点记录的地震信息

Table 1 Seismic information recorded by mobile observation points

地震序号	日期	发震时间	震级/ M_s	经度/(°)	纬度/(°)	震中地名	震中距/km
1	2008-05-27	16:37:53	5.7	105.600	32.800	宁强	85
2	2008-05-27	21:59:34	4.9	105.167	32.533	青川	62
3	2008-06-05	12:41:08	5.0	105.000	32.300	青川	76
4	2008-06-07	10:18:00	3.2	104.933	32.333	平武	70
5	2008-06-07	14:28:35	4.3	105.400	32.500	青川	80
6	2008-06-08	06:14:29	4.7	105.100	32.500	青川	61
7	2008-06-10	10:14:00	3.7	105.050	32.400	青川	66
8	2008-06-17	13:51:00	4.5	105.600	32.800	宁强	85
9	2008-06-19	18:25:00	4.4	105.500	32.800	青川	77
10	2008-06-22	18:37:00	4.2	104.500	32.200	平武	83
11	2008-06-23	05:38:00	4.1	105.100	32.400	青川	70
12	2008-06-28	05:42:13	4.8	105.900	32.317	平武	132

1.2 观测记录处理方法

基于强震观测记录的地形对地震动的影响,一般采用谱比法进行研究。传统谱比法^[4]采用场地及其附近参考场地(一般为基岩场地)之间地震动记录的傅氏谱比值进行分析,研究场地效应。该方法简单易行,广泛应用于具有参考场地的台阵。之后,由传统谱比法衍生出广义反演谱比法^[5],利用局部或区域强震观测网络获取的多次地震的地震动记录同时求取震源、路径和场地效应。

假设有 M 个台站组成的强震观测网络获得 N 次地震的地震动记录,第 i 个台站记录的第 j 次地震的地震动傅氏谱(O_{ij})可以表达为震源(E_j)、路径

(P_{ij})和场地(S_i)的乘积:

$$O_{ij} = E_j(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot S_i(f) \tag{1}$$

其中 f 为频率。

如果参考场地($i = R$)的场地反应可忽略不计(即 $S^R = 1$),而且台站之间的距离与震中距相比很小,路径效应则可以忽略,即 $P_{ij} \approx P_{Rj}$ 。那么,每个台站的场地反应(S_{iSR})可用式(2)估计:

$$S_i^{SR}(f) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{O_{ij}(f)}{O_{Rj}(f)} \tag{2}$$

对一次地震、由 M 个台站组成的强震台阵而言,第 i 个台站的场地反应可用式(3)估计:

$$S_i^{SR}(f) = \frac{O_i(f)}{O_R(f)} \tag{3}$$

1.3 地震动幅值特征

选择山脚台站场地为参考场地,分析斜坡地形

的放大效应。图 2 给出了斜坡地形台阵各监测点记录的地震峰值加速度及放大系数。

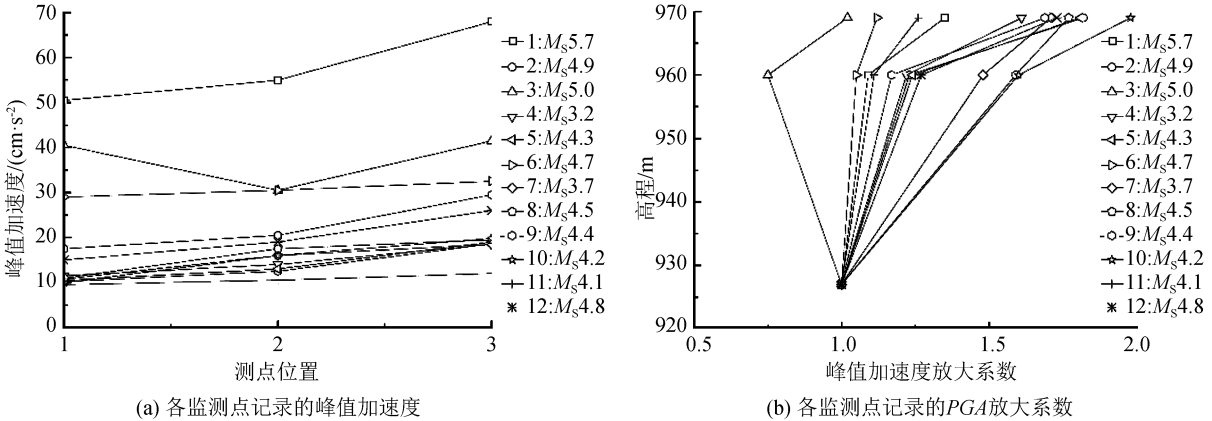


图 2 斜坡各监测点峰值加速度及 PGA 放大系数
Fig.2 Peak acceleration and PGA amplification coefficients of different monitoring points on the slope

(1) 除第 3 次地震事件外,无论震级大小、震中距远近,山顶峰值加速度均大于山腰,山腰峰值加速度略大于山脚。峰值加速度放大系数随高程增加而增大,山顶 PGA 放大系数最大值为 1.98。

(2) 第 3 次地震事件,PGA 放大系数随高程增加表现出先减小后增加的“凹型”特征,与文献[2]中青川狮子梁斜坡的观测结果一致。狮子梁斜坡中山顶、山腰和山脚三个观测点相对高差较大(山顶与山腰高差 69 m、山腰与山脚高差 105 m),而文县斜坡三个观测点相对高差较小,尤其是山顶与山腰高差仅为 9 m,这可能是文县斜坡 PGA 放大系数随高程先减小后增加特征不太明显的原因。

当 $H/\lambda < 0.2$ 时,若坡高 H 一定,坡顶水平 PGA 放大系数随入射波波长减小而增加,而波长 $\lambda = C/f$ (其中, C 为波速, f 为入射波的主频),即水平 PGA 放大系数随入射波主频的增加而增加。当 $H/\lambda > 0.2$ 时,30°和 75°斜坡水平 PGA 放大系数随高程保持增大趋势,可能是 11 次余震(除第 3 次地震事件)山腰及山顶 PGA 放大系数均大于 1.0 的原因。

PGA 放大系数除了与坡脚参照点的选择有关外,还与斜坡坡角、入射波波长、斜坡坡顶与坡脚高差密切相关^[6]。当坡高与入射波波长之比为 0.2 时,放大系数达到极值(图 3)。

但当 $H/\lambda > 0.2$ 时,45°斜坡水平 PGA 放大系数则出现衰减趋势,甚至降到 1.0 以下。文县斜坡下部坡度为 35°~45°,在余震主频较高时,斜坡 PGA 放大系数极有可能出现明显衰减,甚至降至 1.0 以下,如第 3 次地震事件。

1.4 地震动频谱特征

图 4 给出了宁强 5.7 级地震斜坡各测点频谱曲线。选择山脚台站场地为参考场地,采用传统谱比法给出斜坡加速度反应谱的放大系数曲线(图 5)。

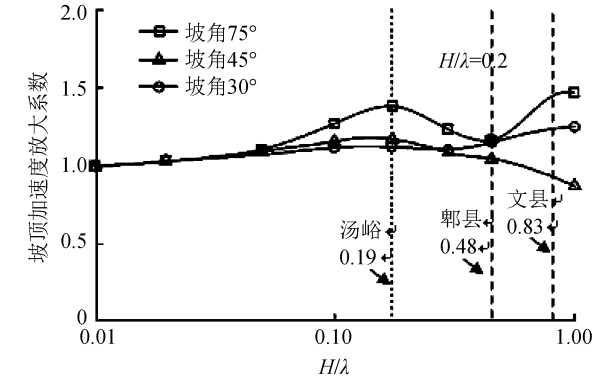


图 3 斜坡坡顶水平 PGA 放大系数随 H/λ 分布图
Fig.3 Relationship between horizontal PGA amplification coefficient at crest of slope and H/λ

(1) 随着斜坡高度的增加,从山脚到山腰再到山顶,反应谱卓越周期延长(如 EW 向反应谱卓越周期分别为 0.06 s、0.10 s、0.12 s),谱峰值增大。

(2) 周期 > 0.1 s,反应谱放大效应显著,山顶放大效应尤为突出。其中周期 0.1~1 s,山腰反应谱放大系数可达 2.7,山顶甚至达到 3.6;周期 1~4 s,山腰反应谱放大系数为 1.5~1.8,山顶为 1.7~2.0。

(3) 周期 0.1~1 s,竖向地震动放大系数大于水平地震动;周期 1~4 s,水平地震动放大系数大于竖向地震动。

此外,通过对其他地震事件频谱曲线的综合分析发现:随着斜坡高程的增加,从山脚到山腰再到山

顶,加速度反应谱卓越周期延长,谱峰值增大,坡脚地震动卓越周期为 0.05~0.15 s,坡顶卓越周期可达 0.4~0.6 s,以至于斜坡周围地区固有周期为

0.05 s到 0.6 s 的建筑都有较大反应,且随着斜坡高度的增加,反应逐渐增大,显示出斜坡地形对强震地面运动频谱特性的显著影响。

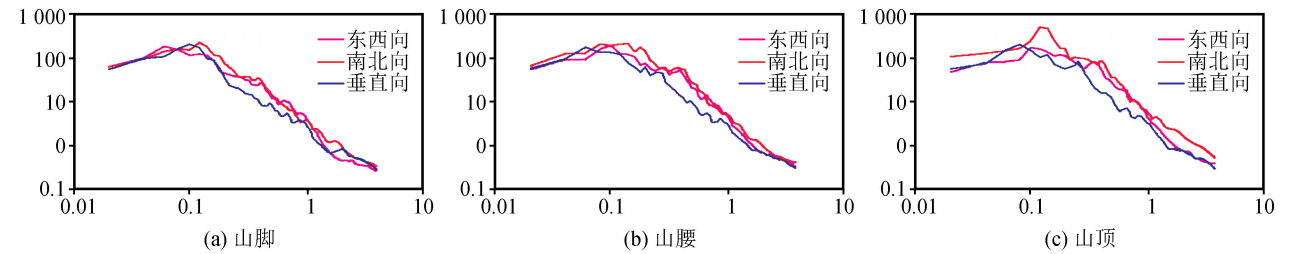


图 4 各测点加速度反应谱($M_s5.7$ 宁强余震)

Fig.4 Acceleration response spectra of different monitoring points (Ningqiang $M_s5.7$ earthquake)

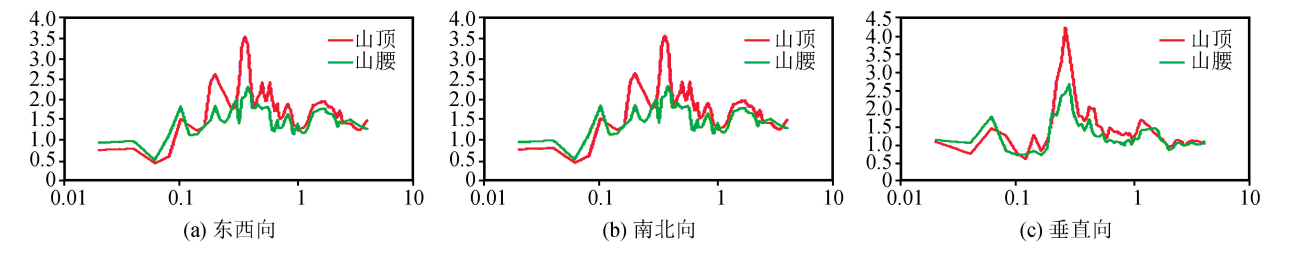


图 5 斜坡地形对地震动反应谱的放大效应($M_s5.7$ 宁强余震)

Fig.5 Amplification effect of slope terrain on the response spectra of ground motion (Ningqiang $M_s5.7$ earthquake)

2 斜坡动力响应数值模拟

2.1 分析模型

(1) 模型建立方法

利用有限元分析软件 ABAQUS,采用二维等价线性时程响应动力分析法建立几何模型并进行动力响应分析。在二维、弹性条件下,单面边坡几何形状可用坡度 α 描述。本文以典型黄土场地为例建立标准模型,在此基础上分别考虑坡度为 20°、30°、45°、60°和 70°斜坡的动力响应特征。

土体材料选用弹塑性 Drackev-Prager 模型,基岩采用线弹性模型,地基设定为平面应变单元。为防止向外传播的地震波在人工边界产生反射效应,模型左右边界采用自由场边界,模型底部采用黏滞边界^[7],基岩底部施加水平方向地震荷载(图 6)。

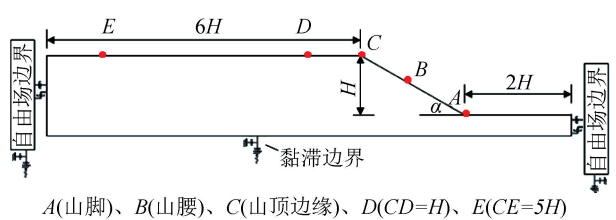


图 6 边坡几何模型及边界条件示意图

Fig.6 Slope geometrical model and boundary condition

(2) 计算剖面

选取典型黄土斜坡场地计算剖面^[1](表 2),土的各项物理力学指标取自兰州、天水、西安等实测数据较多点的平均值。地层构造依次为黄土、卵石、基岩,覆盖层厚度 54 m,黄土厚度 50 m,土层等效剪切波速为 291.67 m/s。该场地属 II 类场地。

(3) 地震动输入

研究选用了三条汶川地震基岩台站实际强震动记录,即四川郫县地震记录、甘肃文县地震记录和陕西汤峪地震记录。对所选地震记录均采用文献^[8]中的校正处理方法进行误差校正处理。图 7 为经校正处理后的输入地震动时程及反应谱。

为了排除各地震动由于峰值不同对地表地震动反应产生的影响,这里将基岩输入地震动峰值按照《建筑抗震设计规范》^[9]中 8 度多遇地震动作用下地震加速度时程曲线峰值 70 cm/s² 进行调整。

同时,动力响应计算的持续时间对边坡响应将产生影响。对于尺寸较大的边坡,如动力响应的计算持续时间太短,波动未能传播到边坡顶部,边坡内部波场分布没有达到稳定,这时得到的边坡动力响应规律就不能真正反映边坡的动力响应规律^[10]。

因此动力响应计算过程中,持续时间分别选为郫县地震动 28 s、文县地震动 40 s 和汤峪地震动 25 s,足

以使得边坡内部的波场达到稳定,确保提取波动过程中加速度峰值的可靠性。

表 2 黄土斜坡物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of loess slope						
层序	土类	厚度 /m	层底埋深 /m	密度 ρ /(g · cm ⁻³)	剪切波速 v_s /(m · s ⁻¹)	弹性模量 /(kN · m ⁻²)
1	黄土	5.0	5.0	1.55	180	50.22
2	黄土	5.0	10.0	1.60	200	64.00
3	黄土	5.0	15.0	1.63	230	86.23
4	黄土	5.0	20.0	1.65	280	129.36
5	黄土	5.0	25.0	1.68	300	151.20
6	黄土	5.0	30.0	1.68	330	182.95
7	黄土	10.0	40.0	1.70	350	208.25
8	黄土	10.0	50.0	1.70	380	245.48
9	砂砾石	4.0	54.0	1.90	450	384.75
10	基岩风化带	2.0	56.0	2.00	500	500.00
11	基岩				>500	

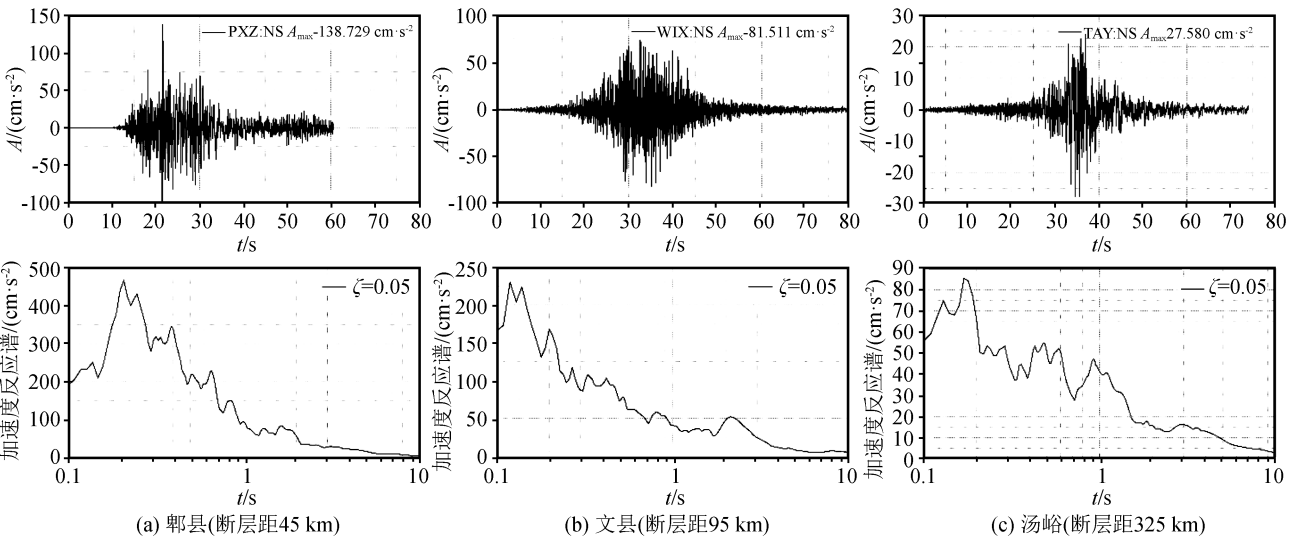


图 7 基岩输入地震动时程曲线和反应谱

Fig.7 Acceleration time-history curves and response spectra of the input ground motion of the bedrock

(4) 网格划分

网格尺寸必须小于等于输入地震波的最高频率对应波长的 1/10~1/8^[11]。综合三条输入地震波的波长特征,模型网格尺寸长度为 4~5 m,即可满足精确模拟波在模型中稳定传播的要求。

2.2 动力响应计算结果

图 8 为不同坡度斜坡各参考点峰值加速度变化情况。为进一步分析斜坡对地震动的影响,图 9 给出了坡顶加速度放大系数(相对于坡脚)的变化情况。

由图 8 和图 9 可知:

(1) 沿着斜坡从山脚、山腰到山顶,地震动峰值加速度呈增大趋势,山顶前缘位置对地震动的放大作用最为显著。但随着距山顶边缘距离的增大,加

速度呈减小趋势。

(2) 坡顶 PGA 放大系数随坡度的增加而增大(郫县和文县 45°斜坡除外),放大系数分布范围较为集中。20°时坡顶放大系数 1.06~1.17;30°时放大系数 1.2~1.25;45°时放大系数 1.06~1.28;60°时放大系数 1.23~1.33;70°时放大系数 1.29~1.49。

(3) 斜坡坡度为 60°~70°的山顶前缘位置,地震动放大效应尤为显著,地震动放大系数达 1.5 左右时,应予以高度重视。

表 3 给出了不同坡度斜坡上山脚加速度反应谱卓越周期及山顶卓越周期放大系数。由此可知:

(1) 沿斜坡高程的增加,加速度反应谱卓越周期延长,汤峪地震动对斜坡坡顶加速度反应谱卓越

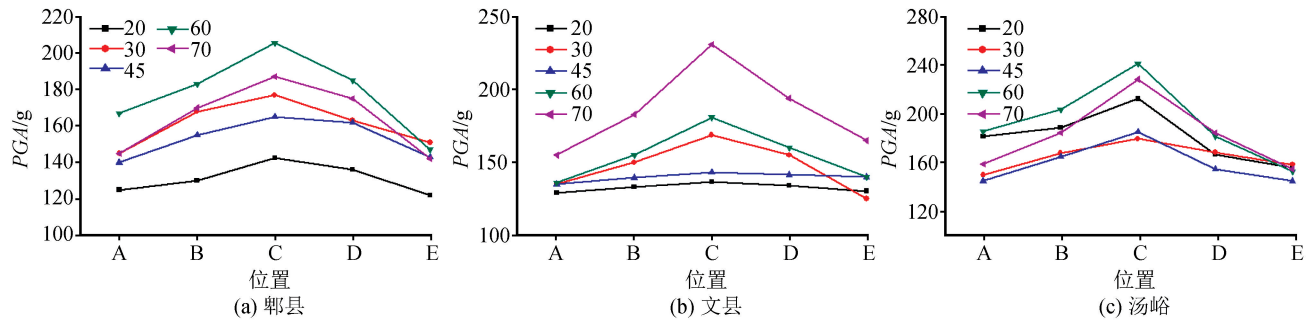


图 8 不同坡度斜坡各参考点峰值加速度
Fig.8 PGA at different locations of the loess slope with different gradients

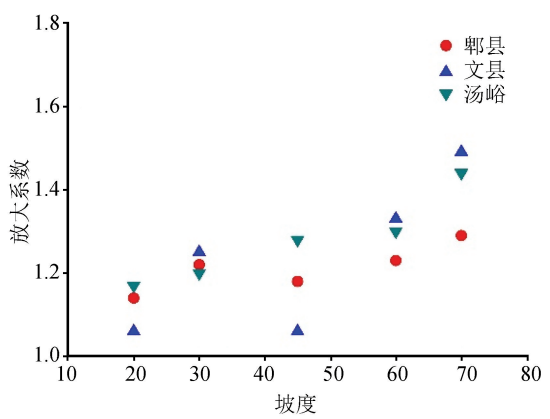


图 9 斜坡坡顶 PGA 放大系数随坡度的变化
Fig.9 Variation of PGA amplification coefficient on the top of slope with the gradient

周期影响最大,郫县地震动的影响最小。

(2) 随斜坡坡度的增加,山顶加速度反应谱卓越周期延长,卓越周期放大系数呈先增大后稳定的趋势。坡度 20°~45°,山顶加速度反应谱卓越周期放大系数随坡度的增加而增大;坡度大于 45°,山顶反应谱卓越周期放大系数不再继续增加。

可见,斜坡地形对强震地面运动频谱特性有显著的影响。其中汤峪远场地震动对斜坡坡顶的频谱影响十分明显,应予以高度重视。

3 计算结果讨论与验证

(1) 由数值计算可知,沿斜坡从山脚、山腰到山顶,地震动峰值加速度呈增大趋势,山顶前缘对地震

表 3 山脚加速度反应谱卓越周期及山顶放大倍数

坡度 /(°)	郫县		文县		汤峪	
	山脚卓越周期/s	山顶放大倍数	山脚卓越周期/s	山顶放大倍数	山脚卓越周期/s	山顶放大倍数
20	0.375	1	0.125	1	0.125	0.375
30	0.375	1	0.125	2	0.125	0.500
45	0.375	1.67	0.125	3	0.125	0.625
60	0.375	1.67	0.125	3	0.125	0.625
70	0.375	1.67	0.125	3	0.125	0.625

动放大作用最为显著,加速度反应谱卓越周期延长。这一现象与地形台阵观测结果相一致。

(2) 文县斜坡高差约 50 m,与斜坡计算模型高度 50 m 相一致。文县斜坡下部坡角为 35°~45°,与数值计算坡度 30°和 45°结果相对比,观测结果中文县斜坡坡顶 PGA 放大系数最大值为 1.98,大于计算结果 1.06~1.28。两种方法得到的坡顶卓越周期基本一致,分别为 0.4~0.6 s 和 0.3~0.6 s;而两者的坡顶卓越周期放大系数略有差别,分别为 2.7~4 和 1.7~5。这主要与土层结构差异、边坡几何形状不同及坡脚参照点的选择有关,存在的较小差异是可以接受的。

(3) 郫县、文县和汤峪地震动卓越频率分别为 2.85 Hz、4.98 Hz 和 1.15 Hz,对应 H/λ 的值分别为 0.48、0.83、0.19。图 3 同时给出了三条地震动 H/λ 值所在位置。其中汤峪地震动 $H/\lambda < 0.2$,验证了图 9 中“汤峪地震动作用下,坡顶加速度放大系数随坡度的增加而增大”。郫县和文县地震动 H/λ 均大于 0.2,验证了图 9 中“郫县和文县地震动作用下,坡角 45°斜坡坡顶 PGA 放大系数小于其他坡角的对应值。”

4 结论

本文以汶川地震中文县斜坡为典型实例,采用

传统谱比法分析斜坡实测地震动特征,并利用有限元分析方法研究了不同角度斜坡动力响应随高程的变化规律,经对结果的比较与验证,进一步明确了黄土斜坡场地的地震动响应特征。

(1) 从黄土斜坡地震动监测结果可得,坡顶卓越周期达 $0.4\sim 0.6$ s, *PGA* 放大系数最大值为 1.98。从斜坡形态因素进行分析,坡顶存在低频但放大系数较高的现象,可能与斜坡高差与入射波波长之比密切相关,比值 0.2 时坡顶放大效应达到最大。此外,还有可能因斜坡下部坡度 $35^\circ\sim 45^\circ$,水平 *PGA* 放大系数随高程增加呈现先减小后增大的“凹型”特征,坡顶 *PGA* 放大系数甚至会降至 1.0 以下。

(2) 斜坡动力响应计算分析发现:沿斜坡从山脚、山腰到山顶地震动峰值加速度呈增大趋势,加速度反应谱卓越周期延长,这与地形台阵观测结果相一致。随斜坡坡度的增加,坡顶 *PGA* 放大系数增大,且反应谱卓越周期延长,卓越周期放大系数先增大后趋于稳定,最大可达 $4\sim 5$ 。可见,斜坡地形对强震地面运动有着显著影响,其中汤峪远场地震动对大坡度斜坡($60^\circ\sim 70^\circ$)的影响十分明显,应予以高度重视。

参考文献(References)

- [1] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:306-323.
WANG Lanmin,SHI Yucheng,LIU Xu,et al.Loess Dynamics [M].Beijing:Seismological Press,2003:306-323.
- [2] 王文沛,殷跃平,李滨,等.不同坡角斜坡动力响应频谱特征研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):121-127.
WANG Wenpei,YIN Yueping,LI Bin,et al.Spectral Characteristics of Dynamic Response of Slope with Different Angles of Inclination[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):121-127.
- [3] 姚凯,卢大伟,刘旭宙,等.利用汶川余震流动观测资料探讨地形对峰值加速度的影响[J].西北地震学报,2009,31(1):46-50.

- YAO Kai,LU Dawei,LIU Xuzhou,et al.Using Observational Data from the Aftershocks of Wenchuan Great Earthquake to Study the Influence of Geography on Peak Ground Acceleration[J].Northwestern Seismological Journal,2009,31(1):46-50.
- [4] BORCHERDT R D.Effects of Local Geology on Ground Motion Near San Francisco Bay[J].Bull Seism Soc Am,1970,60:29-61.
- [5] ANDREWS D J.Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size[M]//DAS S,BOATWRIGHT J,SCHOLZ C H,Eds. Earthquake Source Mechanics. American Geophysical Union, Washington, D. C., 1986:259-268.
- [6] ASHFORD S A,SITAR N,LYSMER J,et al.Topographic Effects on the Seismic Response of Steep Slopes[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1997,87:701-709.
- [7] KUNAR R R,BERESFORD P J,CUNDALL P A.A Tested Soil-Structure Model for Surface Interaction[R].India:Rooke University,1977.
- [8] 于海英,江汶乡,解全才,等.近场数字强震仪记录误差分析与零线校正方法[J].地震工程与工程振动,2009,29(6):1-12.
YU Haiying,JIANG Wenxiang,XIE Quancai,et al.Baseline Correction of Digital Strong-motion Records in Near-field[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2009,29(6):1-12.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:31-41.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Code for Seismic Design of Buildings:GB50011-2010 [S]. Beijing: Building Industry Press of China,2010:31-41.
- [10] 祁生文,伍法权,孙进忠.边坡动力响应规律研究[J].中国科学 E 辑:技术科学,2003,33(增刊):28-40.
QI Shengwen,WU Faquan,SUN Jinzhong.Characteristics of Dynamic Response of Slope[J].Science in China Ser.E: Technological Sciences,2003,33(Supp):28-40.
- [11] KUHLEMEYER R L,LYSMER J.Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems[J].J Soil Mech & Foundations Div,1973,99(5):421-427.