

边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究

徐光兴^{1, 2}, 姚令侃¹, 李朝红², 高召宁³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 石家庄铁道学院, 河北 石家庄 050043; 3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要:利用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立了一个边坡动力数值分析模型, 用振动台模型试验对数值模拟效果进行了验证。在此基础上, 分析了地震作用下边坡的动力响应规律, 以及地震动参数对边坡动力响应的影响。结果表明, 边坡对输入地震波存在垂直放大和临空面放大作用, 边坡土体对输入地震波低频部分存在放大作用, 对高频部分存在滤波作用。坡面加速度峰值放大系数随输入地震波振幅、频率的增加而减小, 持时对加速度峰值响应的影响不大; 坡体位移随振幅、持时的增加而显著增大, 随频率的增大而减小。强震作用下剪应变增量最大区域的位置和形状表明, 单一均质土层边坡的破坏模式仍是沿着某一弧形潜在滑动面失稳。研究结果有助于进一步揭示边坡在地震作用下的失稳机制。

关键词: 边坡; 动力响应; 地震; 地震动参数; FLAC^{3D}

中图分类号: TU435; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0918-06

作者简介: 徐光兴(1974-), 男, 江西上饶人, 博士研究生, 主要从事边坡工程抗震技术研究。E-mail: xugx@sjzri.edu.cn。

Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters

XU Guang-xing^{1, 2}, YAO Ling-kan¹, LI Zhao-hong², GAO Zhao-ning³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China; 3. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: A dynamic numerical simulation model of soil slopes was established with FLAC^{3D} program, and the validity of simulation was validated with a shaking table model test. Based on this, the dynamic response laws and the influence of parameters of ground motion on the responses under earthquakes were analyzed. It was shown that the input seismic waves were affected by vertical and surface amplification of the slopes, and the effect amplified the input seismic waves with low frequency and filtered those with high frequency. It was reported that the coefficients of amplification of PGA along the slope surface decreased with the increase of amplitudes and frequencies of earthquakes, while these coefficients were less affected by the duration. It was also indicated that the maximum displacement of the slopes evidently increased with increase of amplitudes and duration of earthquakes while decreased with increase of frequencies. Furthermore, it was shown by the location and the shape of the maximum shear-strain increment region that the failure pattern of homogeneous soil slopes under earthquakes is instability along a potential sliding surface, similar to that under static condition. The results were helpful to further researches on the mechanism of slope instability under earthquakes.

Key words: slope; dynamic response; earthquake; ground motion parameter; FLAC^{3D}

0 引言

地震是触发边坡失稳的重要原因之一。我国多山地、多地震的地理地质条件不可避免地带来了大量和地震作用有关的边坡问题。随着西部大开发战略的实施和国民经济的持续发展, 相当多的大型基础设施如南水北调西线、三峡工程等水利枢纽工程以及山区高速公路和铁路客运专线将建在强震区, 岩土边坡的地震稳定性问题日趋突出。

目前, 边坡地震稳定性分析的常用方法有规范推荐的拟静力法、滑块分析法以及动力有限元法^[1], 这

些方法都还没有达到成熟的水平。为了进一步了解地震作用下边坡失稳机理, 为边坡地震稳定性分析提供科学的依据, 首先必须对地震作用下边坡动力响应特征和变化规律进行深入的研究^[2-5]。边坡的动力响应包括加速度、速度、位移、动应力和动应变响应等, 其中, 边坡的加速度反应及其分布规律是评价边坡地震

基金项目: 国家自然科学基金西部重大研究计划项目(90202007); 西藏自治区交通厅资助项目(XZJK2006-1); 西南交通大学交通运输工程研究生创新实践基地项目; 石家庄铁道学院科研专项(2007Q99)

收稿日期: 2007-06-22

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil material

参数	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
数值	2070	78.4	50.4	29.8	0.31	13.1	28

动力响应性状的基本资料, 边坡可能发生的残余变形也是人们十分关心的问题。边坡的地震动动力响应与边坡所遭受的地震动特性密切相关^[6], 地震动特性一般包括地震动强度、频谱特性和持时等三个方面^[7], 其对边坡动力响应的影响规律是一个十分重要的问题。

FLAC^{3D}有限差分软件可以很好地解决非线性动力分析问题, 已经成功地应用于岩土开挖、边坡稳定性及地震动力响应分析等诸多领域^[8-10]。本文建立了一个概化边坡模型, 利用FLAC^{3D}中的动力分析模块进行了大量的数值模拟, 对边坡在地震作用下的动力响应规律(主要是加速度响应和位移响应)以及地震动参数对动力响应的影响做了一些尝试性的探讨。

1 边坡动力分析模型及参数选取

1.1 计算模型与边界条件

为了探讨边坡地震动力响应的一般规律, 采用一个概化边坡模型, 取长×高×厚=160 m×50 m×20 m的区域为模拟范围, 其中, 边坡高 $H=20\text{ m}$, 坡角 $\alpha=34^\circ$, 坡顶后缘长度 $B=80\text{ m}$ 。

对边坡这样的半无限体进行模拟时, 依赖于空间中有限区域离散化的数值方法需要在人工数值边界上强加合适的条件。静态分析所采用的固定边界或弹性边界, 在动力分析中将导致向外传播的波反射回模型, 且不允许必要的能量发散。为解决这一问题, FLAC^{3D}在动力分析中采用静态边界和自由场边界。模型在底面采用静态边界, 四周采用自由场边界。本构模型和屈服准则分别采用理想弹塑性本构模型和Mohr-Coulomb强度准则。计算模型、边界条件设置如图1所示。

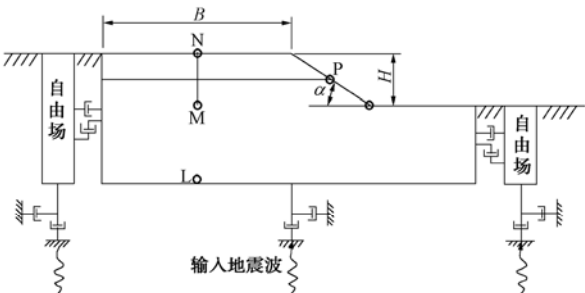


图 1 边坡动力分析数值模型

Fig. 1 Dynamic numerical simulation model of the slope

跟踪模型左侧、前侧边界附近及其同一水平高度内侧2 m各相邻点的加速度、速度反应, 其时程与傅立叶谱均无明显差异, 表明边界模拟效果良好。跟踪模型底部附近的加速度时程, 与输入的加速度时程曲线吻合良好, 说明地震波的输入是正确的。

1.2 土体物理力学参数

为充分反映地震动参数对边坡动力响应的影响, 模型采用单一的均质土层, 土体物理力学参数见表1。

1.3 数值模拟工况

为模拟地震动参数对边坡动力响应的影响, 输入的地震波包括El Centro波(1940, N-S向)、Kobe波(1995, N-S向)和通麦人工波(50 a超越概率10%, 代号Tongmai), 以考虑地震波类型的影响。对El Centro波采用不同的幅值和时间压缩比, 模拟幅值和频率的影响。对通麦人工波采用不同的时间长度, 模拟持时的影响。各工况具体地震动参数见表2。

表 2 各工况地震动参数

Table 2 Parameters of ground motion of input earthquakes under simulation condition

模拟工况 编号	地震波 类型	幅值 /(m·s ⁻²)	时间 压缩比	持时 /s
M1/2/4-1	El Centro	1	1	51.2
M1-2	El Centro	2	1	51.2
M1-3	El Centro	3	1	51.2
M1-4	El Centro	4	1	51.2
M2-2	El Centro	1	1.78	30.3
M2-3	El Centro	1	3.16	18.2
M2-4	El Centro	1	5.62	9.1
M3-1/M4-2	Tongmai	1	1	36.4
M3-2	Tongmai	1	1	18.2
M3-3	Tongmai	1	1	10.8
M4-3	Kobe	1	1	51.2

1.4 数值模拟效果的试验验证

为了研究地震作用下边坡的动力特性和动力响应规律, 进行了土质边坡的大型振动台模型试验^[11], 试验在西南交通大学道路与铁道工程铁道部重点实验室的单向电液伺服驱动式地震模拟振动台上进行。试验模型边坡高2.1 m, 坡顶长1 m, 坡底长3.5 m, 模型厚1.5 m。采用土体作为模型材料, 在层状剪切变形模型箱中分层填筑夯实而成。以模型长度、质量密度和加速度为控制量, 按Bockingham π 定理导出了各物理量之间的相似关系。其中长度相似常数 $C_l=10$, 密度相似常数 $C_\rho=1$, 加速度相似常数为 $C_a=1$, 黏聚力相似常数 $C_c=C_\rho C_l=10$, 内摩擦角相似常数 $C_\phi=1$, 时间相似常数 $C_t=C_\rho^{1/4} C_l^{3/4}=5.62$ 。试验采用的传感器包括加速度传感器和百分表, 全部布置在模型边坡中间的纵剖面上, 用于测量模型边坡的加速度响应和残余位移。

为了验证FLAC^{3D}的模拟效果, 在进行数值分析前, 先对上述试验模型进行1:1尺寸建模, 取其中的一个试验工况进行了数值模拟。该工况输入地震波为El Centro波, 幅值1 m/s², 持时9.4 s, 时间压缩比5.62。坡面PGA放大系数(定义见2.2节)的数值模拟和试验结果对比见图2。

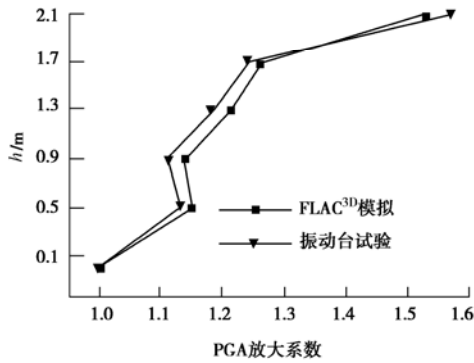


图2 FLAC^{3D}模拟和振动台试验的坡面PGA放大系数

Fig. 2 Coefficients of amplification for PGA along slope surface simulated by FLAC^{3D} and shaking table tests

从图中可看出,数值模拟结果和试验结果吻合较好,说明数值模型是合理的,动力分析结果是可信的。

2 地震作用下边坡动力响应规律

对模型边坡输入表2所列各种工况的地震波进行模拟分析,发现其动力响应具有相似的规律,现以工况M1-1(El Centro原波,幅值 1 m/s^2 ,持时 52.2 s)为例,描述如下。

2.1 位移场分布

跟踪坡面一点的位移时程,可以发现,初始阶段位移振荡较大,随后趋于平缓,临近结束时位移呈现出稳定的趋势,即产生了永久位移。计算终态时,边坡水平位移分布如图3所示,从图中可以看出,在地震作用下,边坡坡面尤其是坡脚附近的水平位移较其它部位明显大得多,坡脚附近最大水平位移达 11.8 mm 。

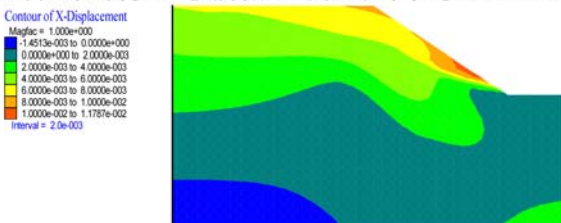


图3 计算终态水平位移云图

Fig. 3 Horizontal displacement contour in terminal state

2.2 加速度响应

为了描述地震作用下边坡加速度响应规律,定义坡体内任意一点动力响应加速度峰值PGA与坡脚O点的动力响应加速度峰值的比值为PGA放大系数。选择坡脚为基准点是为了更好地刻画坡面加速度响应规律,实际上,各工况坡脚动力响应加速度峰值较输入地震波加速度峰值已有不同程度的放大。图4(a)给出了坡面和坡体B/2处竖直方向PGA放大系数随高度的变化规律,作为对照,同时给出了1:10比尺的振动台模型试验坡面实测PGA放大系数。图4(b)给出了坡顶和坡体H/2高度处水平方向PGA放大系数变化规律。从图中可以看出,坡体加速度在竖直方向随高程增加而增大,到坡顶时急剧增大;沿坡面方向向上,

加速度峰值放大系数呈现递增趋势,在坡面下1/3附近增幅稍大,在坡肩附近急剧增大;沿坡体水平方向,从坡体远端到坡面,加速度放大系数基本呈线性增大趋势,到坡面附近增幅略有减小。

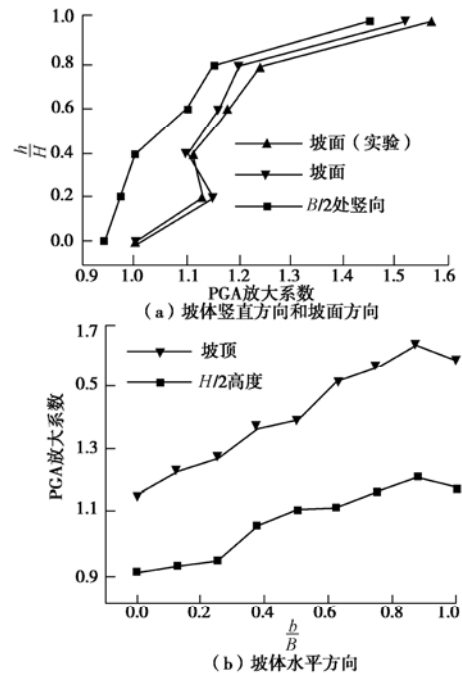


图4 边坡竖向、水平向和坡面各点PGA放大系数

Fig. 4 Coefficients of amplification for PGA of points in vertical, horizontal directions and along slope surface

2.3 地震波频谱特性与坡体的放大作用

2.2节所述加速度响应规律可归结为坡体对输入地震波的垂直放大作用和临空面放大作用,其垂直放大作用可从地震波频谱特性变化规律作出解释,临空面放大作用可从地震波在界面发生的反射现象给予探讨。

坡底输入的El Centro地震波滤去了 10 Hz 以上频段,图5给出了坡底附近L点、坡体中间M点、坡顶N点加速度反应的傅立叶谱。从图中可看出,L点加速度卓越频率在 $1\sim 6\text{ Hz}$,M点加速度卓越频率集中在 $0.5\sim 4\text{ Hz}$,N点加速度卓越频率集中在 $1\sim 2.5\text{ Hz}$,且该频段谱值放大较多。可见输入地震波经过模型土介质传播后,其频谱特性发生了明显的改变。由于土体自身材料阻尼的存在,能吸收一部分波的能量,对高频段的地震波存在滤波作用;另外土体能对地震波低频段的能量起到放大作用。坡体由下到上各点对应的加速度傅氏谱谱值在 $2.5\sim 10\text{ Hz}$ 范围内逐渐减小,在 $1\sim 2.5\text{ Hz}$ 范围内逐渐变大,使得加速度峰值沿坡体竖向在L至M点间先略有减小,而后随高程增加不断增大。

由弹性波散射理论可知,坡底垂直入射的SV波传播到坡面时将产生波场分裂现象,分解为同类型的反射SV波和新类型的反射P波(转换波),各种类型的波相互叠加形成复杂的地震波场,使得加速度峰值在坡面和坡顶靠近坡肩段急剧增大。在坡面和坡顶设置监测点,可以监测到较大的竖向加速度,充分地说明了

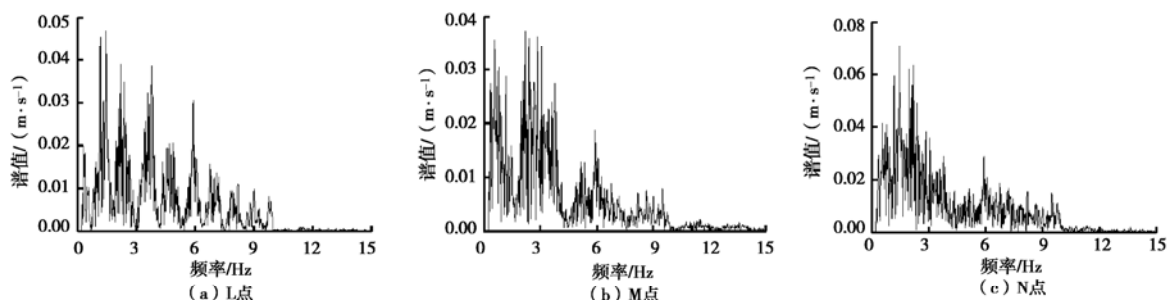


图5 边坡底面、中间和坡顶加速度的傅氏谱

Fig. 5 Fourier spectra of acceleration recorded in points in the floor, middle and top of the slope

这一现象。图6给出坡体中间M点和坡面P点的竖向加速度时程, M点竖向加速度峰值仅为输入水平地震波峰值的10%, 而P点竖向加速度峰值可以达到42%。

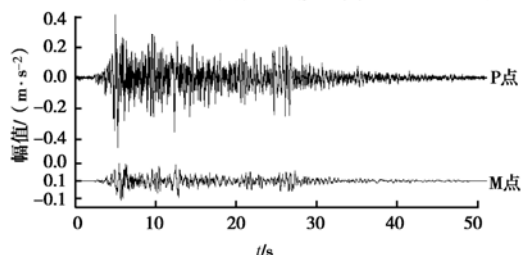


图6 坡体中间M点和坡面P点竖向加速度时程

Fig. 6 Time history of vertical acceleration recorded in middle and on surface of the slope

3 地震动参数对边坡动力响应的影响

3.1 地震波类型的影响

模拟工况M4考虑地震波类型对边坡动力响应的影响, 分别在坡底输入通麦人工波, El Centro波和Kobe波, 幅值均为 1 m/s^2 。从图7可看出, 在Kobe波作用下, 坡面加速度放大最多, El Centro波次之, 通麦人工波放大系数最小; 在Kobe波作用下, 坡体位移最小, El Centro波稍大, 通麦人工波位移最大。可见, 在不同地震波作用下, 加速度分布和坡体最大位移有明显的差异, 其原因在于地震动参数的差异。以下分别就地震动三要素(振幅、频谱、持时)的影响进行探讨。

3.2 振幅的影响

为了研究振幅对边坡动力响应的影响, 工况M1采用El Centro地震波, 幅值分别调整至1, 2, 3, 4 m/s^2 , 持时均为51.2 s。

从图8(b)可以看出, 随着振幅的加大, 坡体水平和竖向位移都呈现增大趋势。振幅为 4 m/s^2 时, 水平位移高达458 mm, 表明坡体已经失稳。

从图8(a)可看出, PGA放大系数随振幅的增大呈现明显的递减趋势。这种现象可能与土的剪应变增大, 刚度降低和阻尼增大有关。随着输入地震动强度的增加, 土体表现出明显的非线性特性, 土层的滤波作用逐渐增强, 坡面下半部分甚至出现加速度峰值减小的情况。

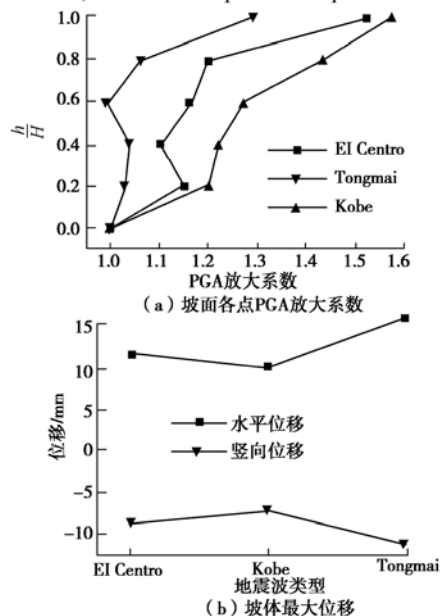


图7 不同类型地震波作用下坡面PGA放大系数/坡体最大位移

Fig. 7 Variation of coefficients of amplification for PGA along slope surface/maximum horizontal and vertical displacements under different types of input seismic waves

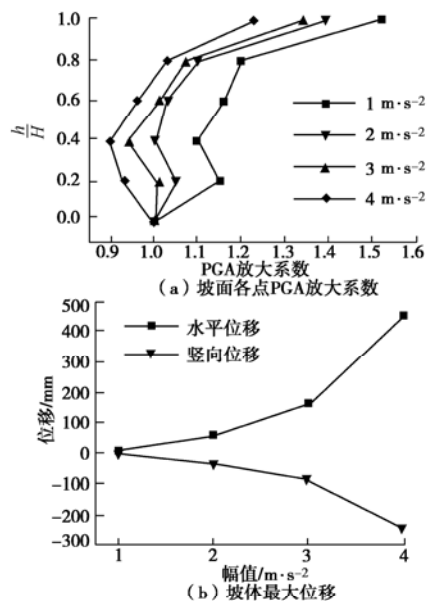


图8 不同振幅作用下坡面PGA放大系数/坡体最大位移

Fig. 8 Variation of coefficients of amplification for PGA along slope surface/maximum horizontal and vertical displacements with different amplitudes

坡体剪应变增量的变化规律可以印证这一现象。输入地震动峰值较小时,剪应变增量最大区域集中在坡脚附近的表层。随着振幅的加大,这一区域向坡体内部发展,在坡面内侧浅层形成一条剪应变增量明显增大的弧形带状区域。带状区内土的非线性特性较强,起到明显的滤波作用,使得坡面加速度峰值减小。图9给出了振幅 4 m/s^2 时计算终态的剪应变增量云图。此外,图9剪应变增量最大区域的形状和位置也表明,在地震作用下,单一均质土层边坡的破坏形态是沿着某一弧形潜在滑动面失稳,与边坡静力失稳模式相仿。

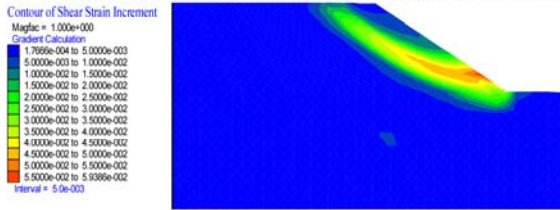


图9 振幅 4 m/s^2 时计算终态剪应变增量云图

Fig. 9 Shear-strain increment contour in terminal state while amplitudes equal 4 m/s^2

3.3 频谱的影响

为了探讨输入地震波频谱对边坡动力响应的影响,工况M2对El Centro波进行压缩,时间压缩比分别为1, $10^{1/4}$, $10^{1/2}$, $10^{3/4}$, 对应卓越频率分别为1~6, 2~11, 3~19, 5~34 Hz, 幅值均为 1 m/s^2 。从图10中可以看出,随着输入地震波频率的增加,坡面各点PGA放大系数呈现明显的下降趋势,输入El Centro原波时PGA放大系数最大。这是因为原波卓越频率最低,

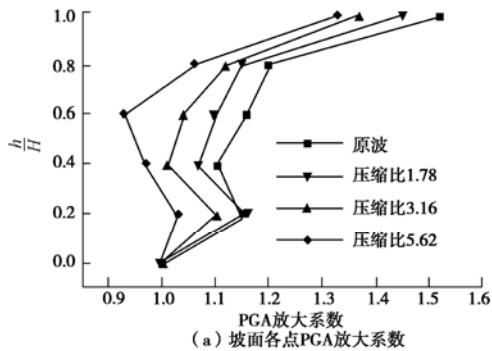


图10 不同频率地震波作用下坡面PGA放大系数/坡体最大位移

Fig. 10 Variation of coefficients of amplification for PGA along slope surface/maximum horizontal and vertical displacements with different frequencies

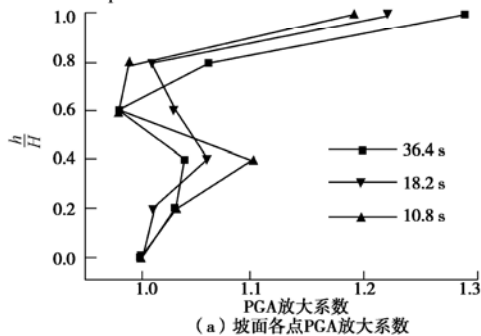


图11 不同持时地震波作用下坡面PGA放大系数/坡体最大位移

Fig. 11 Variation of coefficients of amplification for PGA along slope surface/maximum horizontal and vertical displacements with different duration

土体对其放大效应较为明显,而频率较高的地震波,其高频段的能量分布较多,土体对其滤波效应相应增强。坡体的位移随输入地震波频率的增加显著减小,如前所述,一方面是因为高频地震波的响应较小,另一方面是因为地震波压缩后持时相应缩短。

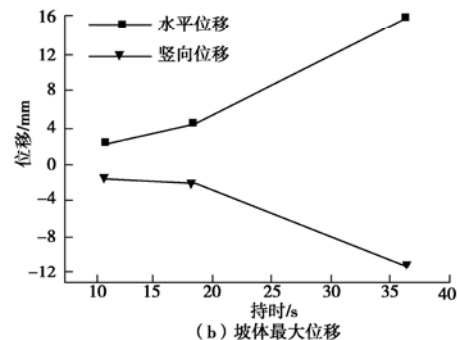
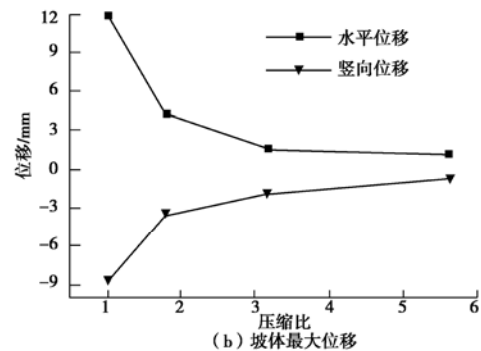
3.4 持时的影响

持时是地震动的重要参数,是导致结构破坏的重要因素。工况M3利用同一目标反应谱,变化反应谱上升段、平稳段和衰减段的持续时间,以相同的初相位合成3条通麦人工地震波,持时分别为10.8, 18.2, 36.4 s, 幅值均为 1 m/s^2 。从图11中可看出,持时对加速度峰值响应的影响并不明显,而对坡体位移的影响则十分显著,随着持时的增加,坡体位移显著增大。说明随着输入地震动能量的持续增加,边坡土体的损伤在不断的累积。

4 结论与讨论

(1) 边坡对输入地震波存在垂直放大和临空面放大作用。坡体加速度在竖直方向随高程增加而增大,到坡顶时急剧增大;沿坡面方向向上,加速度峰值放大系数呈现递增趋势;沿坡体水平方向,从坡体远端到坡面,加速度峰值放大系数也呈现增大趋势。

(2) 边坡土体对输入地震波的低频部分存在放大作用,对高频部分存在滤波作用;边坡临空面对入射地震波存在反射作用。坡肩在这两种因素的共同作用下,加速度响应显著增大。



(3) 地震作用后, 边坡将产生一定的永久位移, 该位移在坡脚附近最大, 其数值可以作为判别边坡是否失稳的一个重要依据。

(4) 在不同地震动参数的地震波作用下, 坡面加速度峰值放大系数随输入地震波振幅、卓越频率的增加呈现明显的递减趋势; 地震波的持时对加速度峰值响应影响不大。

(5) 在不同地震动参数的地震波作用下, 坡体位移随输入地震波振幅、持时的增加显著增大, 随输入地震波卓越频率的增大而减小。

(6) 随着输入地震波振幅的加大, 坡体剪应变增量最大区域从坡面表层向坡体内部发展, 破坏时在坡面内侧浅层形成一条剪应变增量明显增大的弧形带状区域。说明在地震作用下, 单一均质土层边坡的破坏模式仍然是沿着某一弧形潜在滑动面失稳。

值得指出的是, 边坡在地震作用下的动力响应是一个十分复杂的问题, 同时影响边坡动力响应的因素多种多样。本文的结论基于一个均质土体材料的概化边坡模型, 没有考虑边坡形态、坡体材料等的影响, 因此对边坡在地震作用下的动力响应特征和变化规律还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 薄景山, 徐国栋, 景立平. 土边坡地震反应及其动力稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 116 - 120. (BO Jing-shan, XU Guo-dong, JING Li-ping. Seismic response and dynamic stability analysis of soil slopes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 116 - 120. (in Chinese))
- [2] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553 - 556. (LIU Han-long, FEI Kang, GAO Yu-feng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553 - 556. (in Chinese))
- [3] LIN Meei-ling, WANG Kuo-lung. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test[J]. Engineering Geology, 2006, 86(2, 3): 118 - 133.
- [4] 唐洪祥, 邵龙潭. 地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1318 - 1324. (TANG Hong-xiang, SHAO long-tan. Finite element analysis on slope stability of earth-rock dam under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1318 - 1324. (in Chinese))
- [5] 周永江, 王开云, 符文熹, 何江达. 高地震烈度区堆积体边坡动力响应时程特征分析[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 93 - 98. (ZHOU Yong-jiang, WANG Kai-yun, FU Wen-xi, HE Jiang-da. Analysis on time history dynamic response of a rockfall-type slope under high earthquake intensity[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 93 - 98. (in Chinese))
- [6] 祁生文. 单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 518 - 523. (QI Sheng-wen. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 518 - 523. (in Chinese))
- [7] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 李亮, 程绍革. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验——试验结果分析[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 164 - 170. (CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, DU Xiu-li, LI Liang, CHENG Shao-ge. A large-scale shaking table test for dynamic soil-metro tunnel interaction: Analysis of test results[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(1): 164 - 170. (in Chinese))
- [8] 李海波, 马行东, 李俊如, 戴会超, 肖克强. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 358 - 362. (LI Hai-bo, MA Xing-dong, LI Jun-ru, DAI Hui-chao, XIAO Ke-qiang. Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 358 - 362. (in Chinese))
- [9] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 赵法锁. 利用 FLAC^{3D} 分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2730 - 2733. (LIU Chun-ling, QI Sheng-wen, TONG Li-qiang, ZHAO Fa-suo. Stability analysis of slope under earthquake with FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2730 - 2733. (in Chinese))
- [10] 陈占军, 朱传云, 周小恒. 爆破荷载作用下岩石边坡动态响应的 FLAC^{3D} 模拟研究[J]. 爆破, 2005, 22(4): 8 - 13. (CHEN Zhan-jun, ZHU Chuan-yun, ZHOU Xiao-heng. FLAC^{3D} simulation for dynamic response of rock slope under explosion[J]. Blasting, 2005, 22(4): 8 - 13. (in Chinese))
- [11] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 李朝红. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624 - 632. (XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, LI Zhao-hong. Large-scale shaking table model test on the dynamic characteristics and seismic responses of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624 - 632. (in Chinese))