

黄土边坡动力响应的影响效应研究*

邓龙胜^① 范文^{①②③}

(^①长安大学 地质工程与测绘学院 西安 710054)

(^②西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室 西安 710054)

(^③国土资源部岩土工程开放研究实验室 西安 710054)

摘要 根据随机地震荷载作用下黄土动三轴试验的动剪切模量表达式和试验参数编制子程序,采用 MSC. Marc 软件建立有限元模型,并基于人工合成地震动时程对黄土边坡进行动力响应分析,研究输入地震波的卓越频率、幅值以及入射角变化,对黄土边坡位移、速度、应力的动力响应,分析对响应幅值、频谱的影响效应。由研究结果可见:边坡位移、速度等响应时程的卓越频率远小于地震输入波的卓越频率,边坡岩土介质对地震波的高频成分有过滤或吸收作用;边坡的动力响应幅值极大的受地震输入波卓越频率的影响,对于给定的边坡,它将对包含某一卓越频率成分的地震动时程的动力响应异常强烈;输入地震波幅值的变化,只引起边坡动力响应幅值的线性变化,不改变边坡中响应时程的频谱特征;当地震波以一定角度入射时,边坡动力应力响应时程包含了更多的高频成分,位移和速度响应幅值随入射角的增大而减小,且越靠近坡顶减速越快,而应力响应幅值在坡顶与坡腰、坡脚处具有不同的影响规律;另外,地震荷载作用方向的改变,还对边坡动力响应放大系数有较大影响,当作用力方向非竖直时,动力响应放大系数随地震波入射角的增大而减小。

关键词 黄土边坡 随机地震波 动力响应 卓越频率 动力响应放大系数

中图分类号:TU453 文献标识码:A

RESEARCH ON DYNAMIC RESPONSE EFFECTS OF LOESS SLOP

DENG Longsheng^① FAN Wen^{①②③}

(^①College of Geological Engineering and Geomatic, Chang'an University, Xi'an 710054)

(^②Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054)

(^③Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, the Ministry of Land Resources, Xi'an 710054)

Abstract This paper is based on dynamic shear modulus formula and correlative parameters of loess gained from three triaxial tests. The tests were acted by random seismic load. A subprogram of MSC. Marc was programmed. Finite element model acted by artificial earthquake wave was built to study dynamic response of loess slope. So, the displacement, velocity and stress transformation law of loess slope were analyzed when excellent frequency, amplitude and action direction of input seismic wave was changed. The results show that excellent frequency of slope displacement, velocity response time-history is much smaller than the input wave. A large number of high frequency wave was filtered when seismic wave transmit in slope soil. And dynamic response of loess slope was affected by the predominant frequency of seismic wave strongly. A giving slope was exceptional sensitive to certain seismic wave with predominant frequency. In addition, the changing of amplitude of seismic wave could alter the dynamic response ampli-

* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金(40972181), 陕西省自然科学基金(2009JM5007)和长安大学中央高校基金(CHD2011JC172).

第一作者简介: 邓龙胜, 主要从事黄土动力特性及黄土地震滑坡方面的研究. Email: deng32120@yahoo.com.cn

tude of slope linearly, but couldn't transform the spectrum character of dynamic response of slope. The result also shows that the dynamic response time-history of slope contains more high frequency components when acting earthquake wave with certain action angle. Response amplitude of displacement and velocity reduced more quickly more close to the top when action angle increasing. Different effect law of stress response amplitude was shown in the top, middle and toe of slope. The changing of seismic wave acting direction affects dynamic response amplificatory coefficient also, which decreases with the increase of seismic wave acting angle when direction is un-vertical.

Key words Loess slope, Stochastic earthquake acceleration wave, Dynamic response, Predominant frequency, Dynamic response amplificatory coefficient

1 引言

由于地震波传播过程中的折射和反射作用,地震荷载作用下的边坡处于非常复杂的变形场和应力场中,其动力响应不仅与介质特性、边坡结构类型相关,还受输入波频谱、持时等控制,是一个非常复杂的过程。地震荷载是一种高频、变向的随机荷载,边坡的稳定系数是瞬态变化的,边坡的动力响应分析对边坡的动力稳定性研究具有重要作用^[1]。近年来对边坡动力响应开展的研究工作较多,如:祁生文等^[2]通过大量动力数值分析,研究位移、速度、加速度放大系数沿坡面的分布特点;艾畅等^[3]对顺层岩质边坡开展爆炸模型试验,研究边坡的变形破坏模式等;姜彤等^[4]研究了节理岩质边坡地震作用下的变形特征;周永江等^[5~9]结合实际工程研究了边坡动力响应的分布规律;Del Gaudio V 等^[10]、George 等^[11]和 Liu 等^[12]根据监测资料,研究了场地条件、边坡形状、地震持时、岩土特性等对边坡动力响应的影响。

以上这些工作大多是针对岩质边坡开展的,而对黄土边坡的动力响应研究工作极少。作者曾对1920年海原地震西海固一带黄土地震滑坡进行大量的调查,发现边坡的破坏程度并不随坡高的增大而增大,破坏较严重的边坡主要集中在具有相近高度单薄的矮边坡上,而这些边坡具有相同的岩土条件,因此,认为这些边坡的破坏与其自振频率及所遭遇地震波的卓越频率相关^[1]。本文采用 MSC. Marc 有限元软件,根据随机地震荷载作用下黄土的动应力-应变关系编制子程序进行计算。人工合成具有不同卓越频率、不同幅值的地震动时程作为输入激振波进行动力响应分析,研究地震荷载卓越频率、幅值对边坡动力响应的影响效应,并考虑地震输入荷载不同入射角对边坡位移、应力等的响应频率、幅值、放大系数的影响效应。

2 计算过程

在本文中,统一取坡角为 55° ,坡高为40m,坡顶后缘宽180m,坡脚前缘土体宽度为100m,坡脚以下土体厚度为30m建立模型进行分析。固定约束模型的底部,在模型的两侧施加黏性边界,坡面及顶面为自由面。其中,黏性边界是调用 MSC. Marc 中的 usprng 子程序,并在边界处设置非线性弹簧连接来实现的。由于水平地震荷载是边坡失稳的主要作用力,在计算中重点考虑水平地震加速度(图1)。

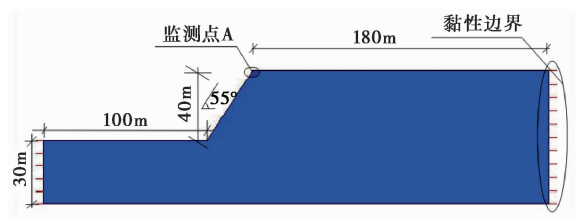


图1 计算模型及监测点

Fig. 1 The calculation mode and monitor point

黄土的动应力-应变关系根据随机地震荷载作用下动三轴试验得到的表达式进行计算^[1],见式(1)。

$$G_d = f(\sigma_d, \varepsilon_d, \sigma_0) = a \cdot p_a (1 + \frac{\sigma_d}{\sigma_0}) \left[(1 + \varepsilon_d)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_a (1 + \sigma_d)}{\sigma_0^2} \right)^3 \right]^b \quad (1)$$

式中, a 、 b 为实验参数; P_a 为大气压; σ_0 为第三主应力; σ_d 为动应力; ε_d 为动应变。剪切模量 G_d 在 MSC. Marc 有限元软件中采用 HYPELA 用户子程序来定义,阻尼矩阵根据 Rayleigh 理论考虑(表1)。

表1 材料参数的选取

Table 1 The parameter of soil

参数	弹模/MPa	容重/kN·m ⁻³	泊松比	阻尼比	a	b
取值	9	1.48	0.32	0.2	3.553	-0.275

3 边坡动力响应的卓越频率效应

3.1 不同卓越频率时程的人工合成

根据傅里叶变换,地震波可以表示为若干频率的正弦及余弦波之和,当某一频率波的振幅特别大时,则该频率为地震波的卓越频率。在人工合成随机地震波时,通过控制功率谱的形状来控制卓越频率,并通过控制包络函数形状来控制相位特征和有效持时^[1]。因此,本节在人工合成地震动时程时,控制包络函数的相关参数恒定不变,仅改变功率谱的主频段范围,据此得到不同卓越频率的地震波。

地震波的卓越周期一般在 0.1 ~ 1.0s 范围内,本节将其划分为 3 个周期段(0.1 ~ 0.5s、0.2 ~ 0.7s、0.3 ~ 1.0s),人工合成地震动时程(f0105、f0207、f031),绘制功率谱曲线及地震波时程图(图2、图3)。

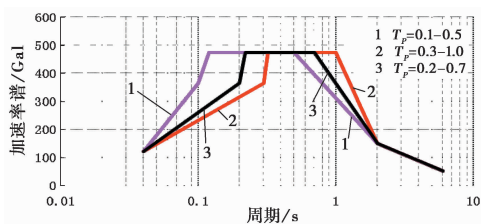


图2 功率谱曲线

Fig. 2 The distribution of power spectrum

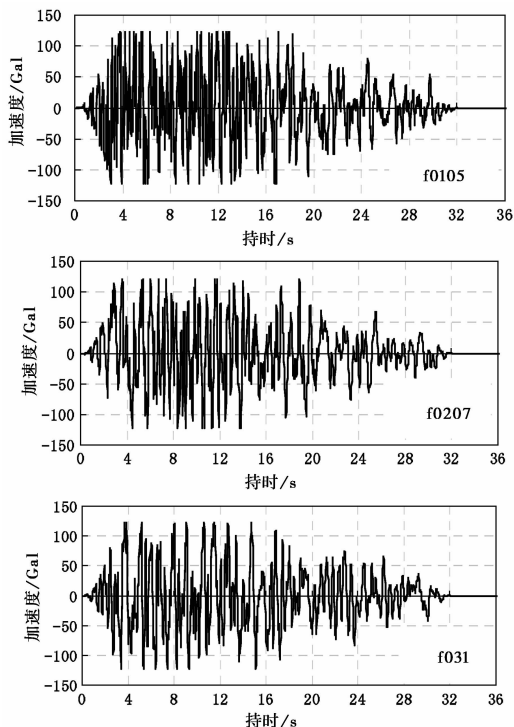


图3 不同卓越频率的时程曲线

Fig. 3 Different predominant frequency seismic wave

3.2 卓越频率的影响效应

图4~图7给出了不同卓越频率的地震波作用下,边坡A点的位移、速度、剪应力,以及水平向应力的响应曲线。

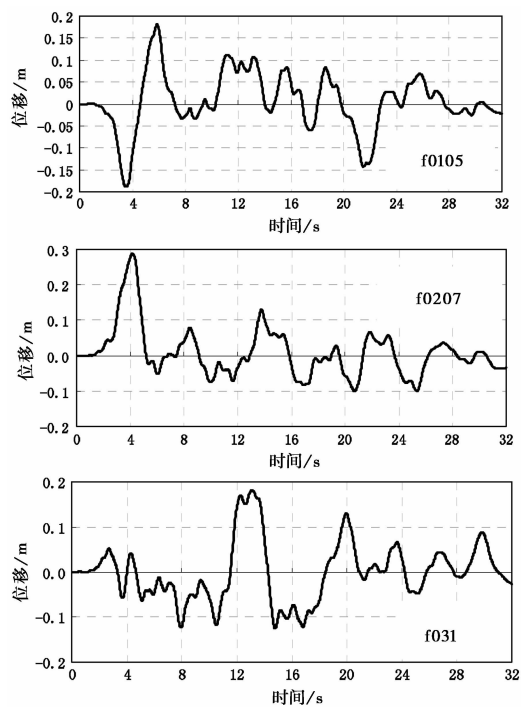


图4 不同卓越频率A点水平位移时程曲线

Fig. 4 X-displacement of A in different frequency

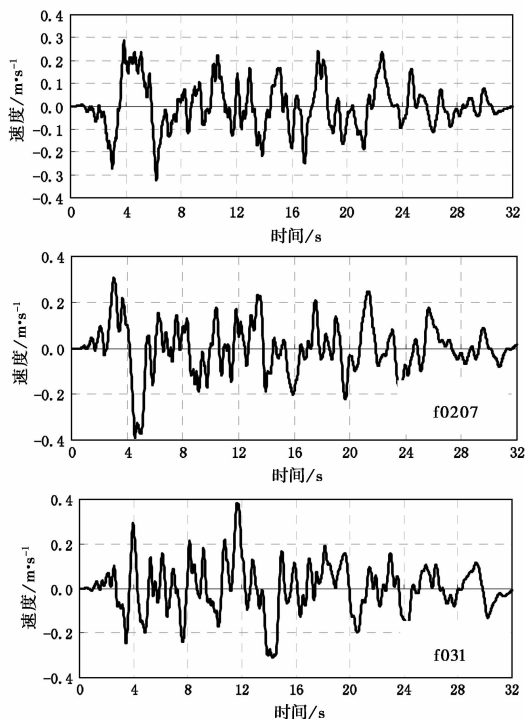
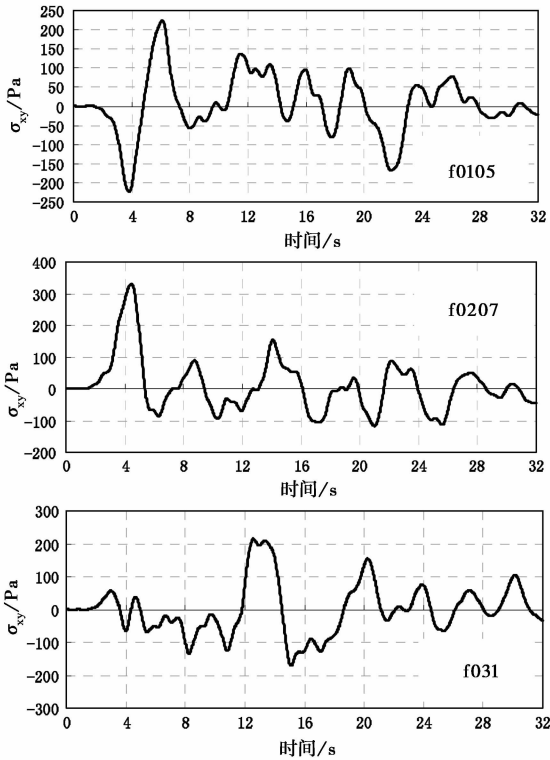
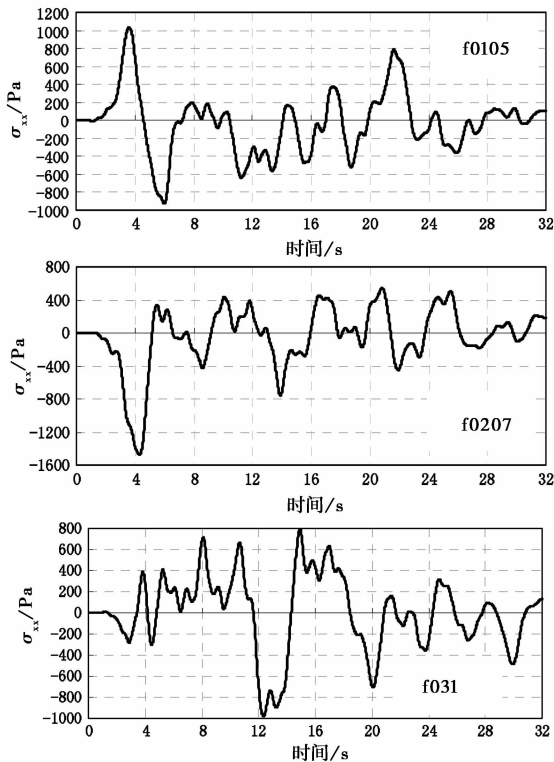


图5 不同卓越频率坡顶水平速度时程曲线

Fig. 5 X-velocity of A in different frequency

图6 不同卓越频率坡顶 σ_{xy} 时程曲线Fig. 6 σ_{xy} of point A in different frequency图7 不同卓越频率坡顶 σ_{xx} 时程曲线Fig. 7 σ_{xx} of point A in different frequency

由图4~图7可见,A点位移、速度等响应时程的卓越频率远小于输入波的卓越频率,这表明地震波在传播过程中,边坡岩土体介质吸收或过滤了大量的成分。由于这种对高频波的过滤和吸收作用,使得不同卓越频率输入波作用下边坡中A点的位移、速度、应力等响应时程的卓越频率相差较小。输入激振波包含有多个峰值点,而A点的位移、速度、应力响应时程则只有一个峰值点,且峰值点略滞后于输入激振波的幅值变化最大值点。另外,边坡中A点速度响应时程比位移及应力响应时程具有更大的卓越频率。

表2 A点位移、速度及应力响应最大值

Table 2 Max displacement, velocity and stress of A

	位移/m	速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	σ_{xx} /Pa	σ_{xy} /Pa
f0105	0.181	0.287	1031	217.45
f0207	0.48	0.4	1477	330
f031	0.181	0.313	982	214

表2给出了不同卓越频率时程作用下,A点的响应幅值。由表2可见,当遭受卓越周期为0.2~0.7s的地震波作用时,边坡的响应显著增大,说明地震波的卓越频率对边坡的破坏有较大影响。因此,在地震的近场区,由于地震波中包含大量的高频成分,矮边坡的破坏程度远大于高边坡的破坏程度,在远场区则相反。

4 地震波幅值的影响效应

人工合成西吉县喜家湾滑坡场地50a超越概率10%的地震波,并以此作为基本波形(图8),分别将加速度峰值缩放为0.2g、0.6g,对边坡动力响应进行研究。

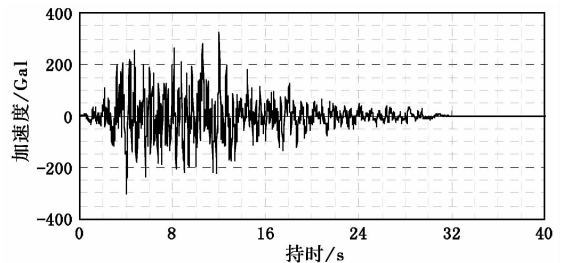


图8 场地未来50a超越概率10%加速度时程曲线

Fig. 8 The seismic wave of the field with 10% exceedance probability in the following 50 years

图9~图12分别给出了峰值为0.2g、0.6g地震荷载作用下,边坡中位于坡顶的监测点A的位移、速度、剪应力、水平向应力响应时程曲线。由图可见,随着输入地震波幅值的增大,A点的位移、速度以及应力幅值在增大,而响应时程的频率成分相同,说明输入波幅值的改变,不改变边坡响应时程的频率,只引起边坡响应幅值的变化。

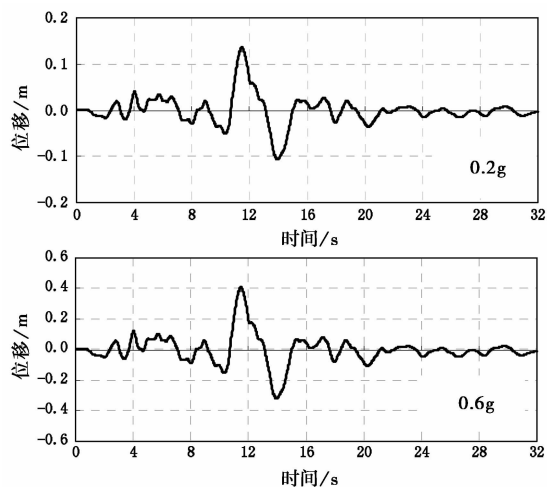


图9 不同幅值坡顶水平位移时程曲线

Fig. 9 X-displacement dynamic response of point A

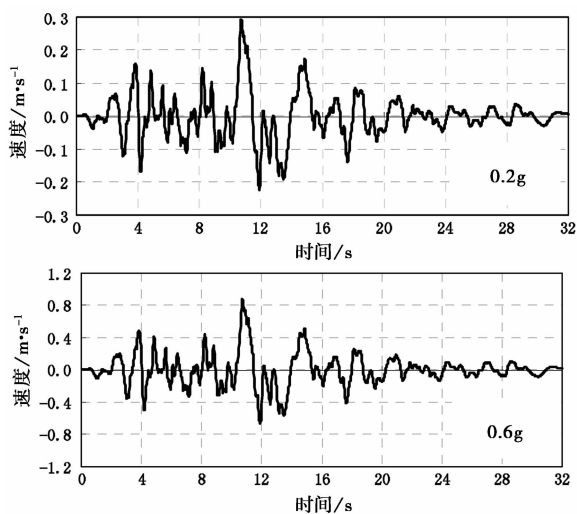


图10 不同幅值坡顶水平速度时程曲线

Fig. 10 X-velocity dynamic response of point A

5 地震波入射角的影响

将图8所示地震波的幅值考虑为0.6g作为入射波,方向与水平向夹角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ,研究地震波入射角对边坡动力响应的影响(分别选坡顶、坡腰、坡脚为监测点A、B、C)。

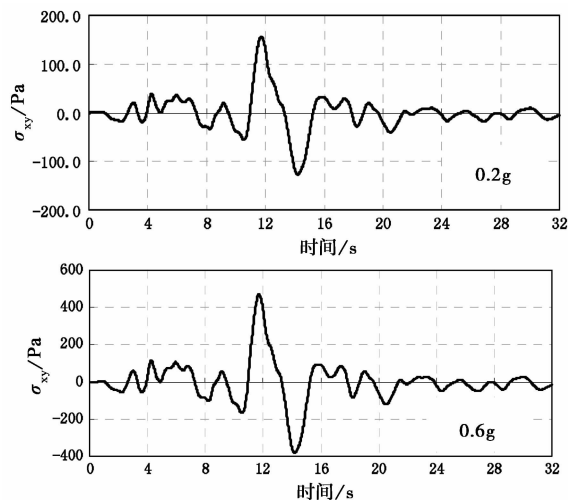


图11 不同加速度幅值坡顶 σ_{xy} 时程曲线

Fig. 11 σ_{xy} dynamic response of point A

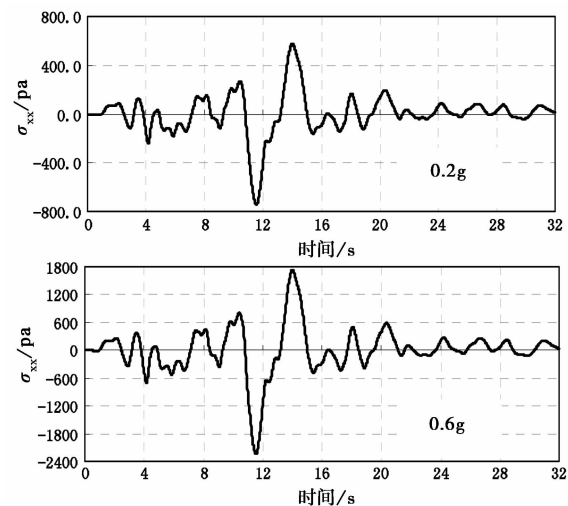


图12 不同加速度幅值坡顶 σ_{xx} 时程曲线

Fig. 12 σ_{xx} dynamic response of point A

5.1 对响应频率的影响

根据计算结果,当地震波以不同入射角激振时,边坡中同一监测点的响应频率基本相同,但和水平激振时有一定差异,故仅给出入射角为 45° 时A点的响应时程曲线(图13)。将图13与图9~图12相应曲线进行对比可见,位移和速度响应曲线与水平激振时的频率成分相同,水平激振时的应力响应时程曲线包含更多的高频成分。可见,地震作用下边坡的应力响应时程的频率成分与输入波的作用方向相关。

5.2 对响应幅值的影响

图14~图16给出监测点A、B、C在不同入射角

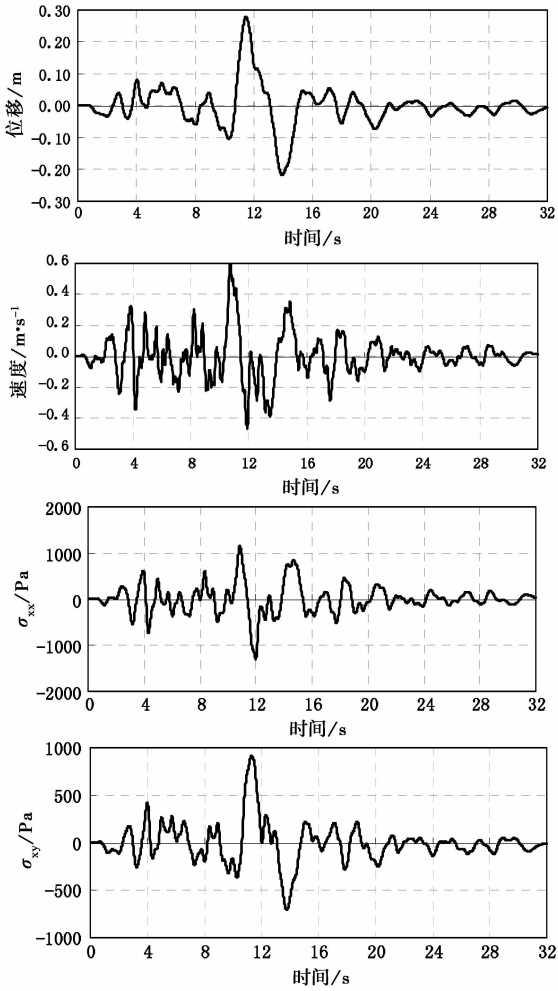


图 13 入射角 45° 时 A 点时程曲线

Fig. 13 Dynamic response of A in 45° striking angle

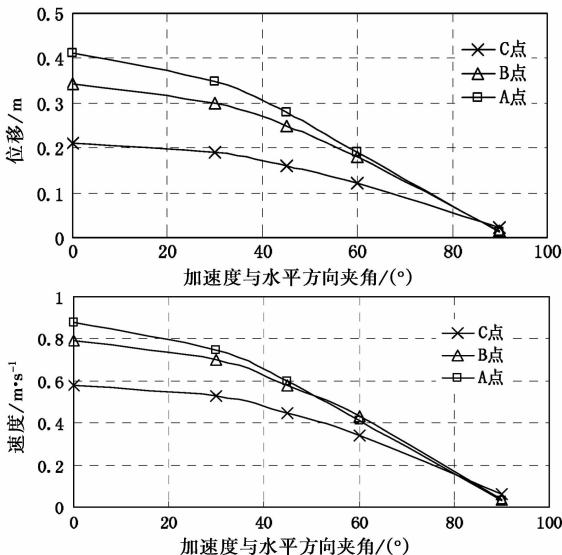


图 14 不同入射角监测点位移和速度幅值曲线

Fig. 14 Distribution of amplitude of displacement, velocity in different striking angle

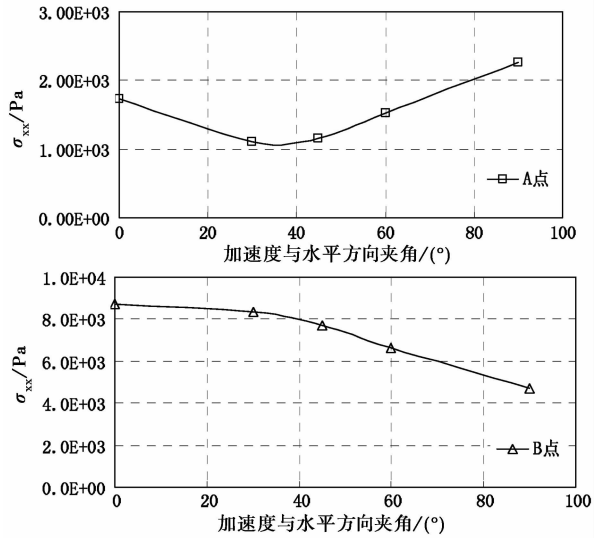


图 15 各监测点 σ_{xx} 幅值变化曲线

Fig. 15 Distribution of amplitude of σ_{xx} in different striking angle

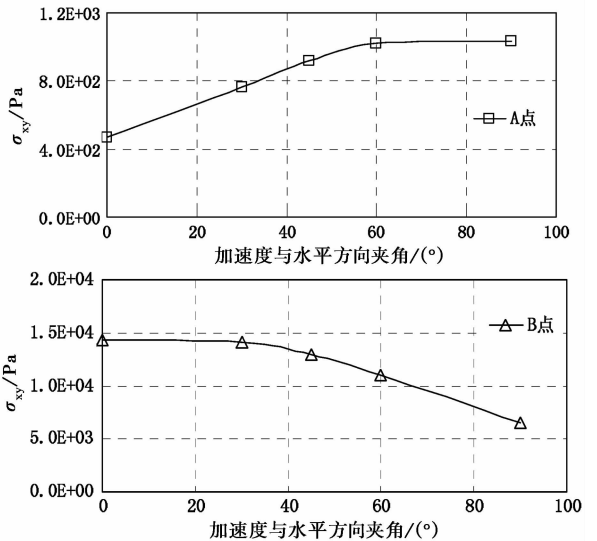


图 16 各监测点 σ_{xy} 幅值变化曲线

Fig. 16 Distribution of amplitude of σ_{xy} in different striking angle

地震波作用下,水平位移、速度及应力响应时程幅值的变化曲线。

由图 16 可见, A、B、C 各点水平位移和速度响应的幅值随夹角的增大而减小,且衰减速度不同,靠近坡顶处衰减较快。在同一夹角地震荷载作用下,靠近坡顶处具有更大的位移和速度响应,且随着夹角的增大,两点间响应的差值逐渐减小。

A 点的 σ_{xx} 和 σ_{xy} 随夹角的变化规律不同, σ_{xx} 随着夹角的增大先减小后增大,而 σ_{xy} 则随夹角的增大而增大。B 点(C 点变化规律同 B 点)的 σ_{xx} 和 σ_{xy} 均

随夹角的增大而减小,减小速率以 30° 为界,前段较小,后段较大且基本线性减小。

5.3 对响应放大系数的影响

设地震响应放大系数 $\xi = f(h)/f_0$, 其中, f_0 为坡脚处的位移、速度等, $f(h)$ 为距离坡脚高度为 h 处的位移、速度等对应值, 并设坡高为 H , 位置系数 $\delta = h/H$, 则可得不同入射角地震荷载作用下的 ξ - δ 关系曲线 (图 17 ~ 图 20)。

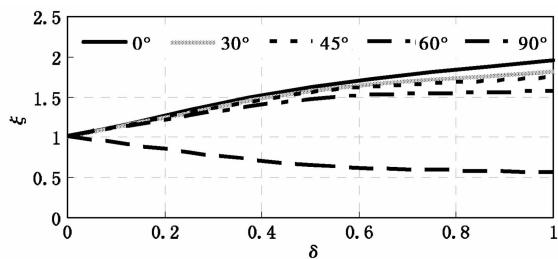


图 17 不同入射角时水平位移随 δ 变化曲线

Fig. 17 Distribution of x-displacement ξ and δ in different striking angle

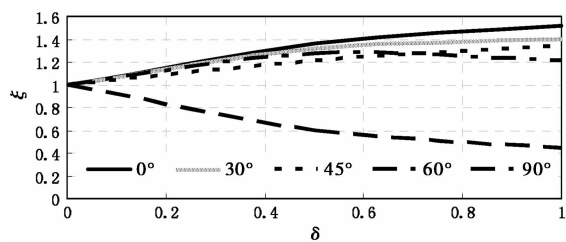


图 18 不同入射角时速度随 δ 变化曲线

Fig. 18 Distribution of x-velocity ξ and δ curve in different striking angle

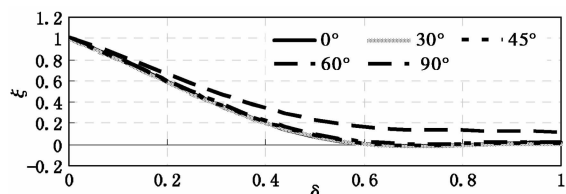


图 19 不同入射角时水平应力随 δ 变化曲线

Fig. 19 Distribution of x-stress ξ and δ curve in different striking angle

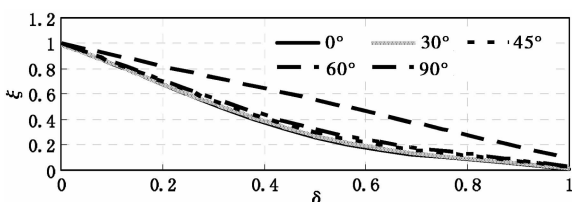


图 20 不同入射角时剪应力随 δ 变化曲线

Fig. 20 Distribution of shear stress ξ and δ in different striking angle

由图可见,当地震荷载入射角为 90° 时,边坡位移、速度及应力的动力响应放大系数 ξ 随 δ 的增大而减小,但减小的速率有一定差异,剪应力放大系数 ξ 随 δ 的增加线性减小,其他参数则随 δ 的增加非线性减小。

当地震荷载作用方向非竖直向上时,位移、速度响应的放大系数随 δ 增大而增大,增大的速率逐渐减小,且夹角较大时, ξ 值较小;剪应力、水平应力放大系数 ξ 随 δ 的增大而减小并趋于零,且不同夹角同一 δ 时的 ξ 值相差较小。

可见,地震荷载作用方向的改变,对边坡动力响应的放大系数有较大影响。

6 结 论

(1) 边坡位移、速度等响应时程的卓越频率远小于输入时程的卓越频率,边坡岩土介质对地震波的高频成分有过滤或吸收作用。边坡的动力响应受地震波卓越频率的控制,对于一个给定的边坡,它将对包含一定卓越频率地震波的响应异常强烈,强震作用下边坡的破坏程度与其所遭受地震动波的频率成分相关。

(2) 输入地震波幅值的变化,只引起边坡动力响应幅值的线性变化,不改变响应时程频谱特征。

(3) 地震荷载入射角对边坡的动力响应影响较大。入射角的变化改变边坡应力响应时程的频率成分,而位移和速度响应幅值随入射角的增大而减小,应力响应幅值在坡顶与坡腰和坡脚处具有不同的影响规律。另外,地震荷载作用方向的改变,对边坡动力响应放大系数有较大影响,当作用力方向非竖直时,动力响应放大系数随地震波入射角的增大而减小。

参 考 文 献

- [1] 邓龙胜. 强震作用下黄土边坡的动力响应机理和动力稳定性研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
Deng Longsheng. Study on the Response and Stability Mechanics of Loess Slope in Environment of Strong Earthquake. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [2] 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), 2003, 33(增): 28~40.
Qi Shengwen, Wu Faquan, Sun Jinzhong. Study on the dynamic response characteristic of slope. Science in China, Ser. E, 2003, 33(S): 28~40.
- [3] 艾畅, 冯春, 李世海, 赵安平. 地震作用下顺层岩质边坡动力响

- 应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1825 ~ 1832.
- Ai Chang, Feng Chun, Li Shihai, Zhao Anping. Experimental research on dynamic response of consequent rock slope under seismic loading. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1825 ~ 1832.
- [4] 姜彤, 赵彦彦, 王忠福. 边坡动力响应的非线性特征分析[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(1): 125 ~ 129.
- Jiang Tong, Zhao Yanyan, Wang Zhongfu. Analysis on nonlinear characteristics of a slope under seismic loads. World Earthquake Engineering, 2010, **26**(1): 125 ~ 129.
- [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 Yongjiang, Wang Kaiyun, Fu Wenxi, He Jiangda. Analysis on time history dynamic response of a pockfall-type slope under high earthquake intensity. Journal of Mountain Science, 2007, **25**(1): 93 ~ 98.
- [6] 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**(3): 116 ~ 120.
- Bo Jingshan, Xu Guodong, Jing Liping. Seismic response and dynamic stability analysis of soil slopes. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, **21**(3): 116 ~ 120.
- [7] 金亮星, 李建. 高速铁路路堑岩质边坡的动力响应分析[J]. 振动工程学报, 2008, **21**(4): 354 ~ 358.
- Jin Liangxing, Li Jian. Dynamic response analysis of cutting rock slope under high speed train vibration load. Journal of Vibration Engineering, 2008, **21**(4): 354 ~ 358.
- [8] 周剑, 张路青, 王学良. 水平层状岩体边坡动力响应中的结构面效应研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(3): 352 ~ 358.
- Zhou Jian, Zhang Luqing, Wang Xueliang. Effect of structural plane on dynamic response of rock slopes with horizontal strata. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(3): 352 ~ 358.
- [9] 言志信, 曹小红, 张刘平, 张海东. 地震作用下黄土边坡动力响应数值分析[J]. 岩土力学, 2011, (增2): 610 ~ 614.
- Yan Zhixin, Cao Xiaohong, Zhang Liuping, Zhang Haidong. Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake. Rock and Soil Mechanics, 2011, (s2): 610 ~ 614.
- [10] DEL Gaudio V, Wasowski J. Advances and problems in understanding the seismic response of potentially unstable slopes. Eng. Geol. 2010, doi: 10.1016/j.engeo.2010.09.007.
- [11] George D. Bouckovalas, Achilleas G. Papadomotiou. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, **25**(7 ~ 10): 547 ~ 558.
- [12] YQ Liu, HB Li, J Zhao. UDEC simulation for the dynamic response of a rock slope subject to explosions. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**: 474.