

# 结构面对岩质边坡地震动影响的数值模拟研究

田小甫<sup>1</sup>,孙进忠<sup>2</sup>,刘立鹏<sup>3</sup>,郑小燕<sup>1</sup>,贾雷<sup>1</sup>

(1. 北京市地质工程勘察院,北京 100048;2. 中国地质大学(北京),北京 100083;  
3. 中国水利水电科学研究院,北京 100044)

[摘要] 本文采用数值模拟的方法,利用 UDEC 软件,开展了结构面对岩质边坡地震动影响的数值模拟研究,研究内容涉及结构面产状和位置变化对岩体边坡地震动放大系数空间展布的影响。根据岩体边坡中结构面发育的一般规律,本文模型工况主要考虑与坡面相交的贯穿性结构面,模拟的主要物理对象是层面、贯穿性长大软弱结构面等。数值模拟结果表明:结构面越靠近坡顶,边坡上部的地震动响应越强烈;顺倾结构面会使坡肩部形成更强烈的地震动响应;边坡越陡,坡顶和坡肩部的地震动响应越强烈。上述规律对于岩质边坡地震稳定性分析具有指导意义。

[关键词] 岩质边坡 结构面 地震动加速度放大系数 数值模拟

[中图分类号] P642 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2012)04-0840-7

Tian Xiao-fu, Sun Jin-zhong, Liu Li-peng, Zheng Xiao-yan, Jia Lei. Numerical simulation of the influence of structural planes on seismic motion on rock slopes[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(4): 0840-0846.

## 1 引言

我国是一个地震多发的国家,而地震是边坡失稳的主要诱因之一(Keefer, 1984),例如,汶川 5.12 大地震触发了大量的边坡崩滑,带来了不可估量的损失。所以,边坡地震稳定性问题已成为岩土工程研究的热点问题(Ling *et al.*, 1997; 姚爱军等, 2003; L. Siad, 2003; 陈蜀俊等, 2004; Baker *et al.*, 2006; 史丹等, 2006; 李维光等, 2007; 祁生文, 2004, 2007)。

目前,对于边坡的地震稳定性评价主要采用拟静力法和有限滑动位移法,这两种方法都需要确定地震系数(Newmark, 1965; 洪海春等, 2005;)。地震系数  $\alpha$  定义为一点的地震动加速度  $a$  与重力加速度  $g$  的比值( $\alpha = a/g$ ),可见,边坡地震系数的确定需要明确边坡对于地震作用的响应规律。祁生文(2002, 2003)、何蕴龙等(1998)、石玉成等(1999)、徐光兴等(2008)针对边坡的地震响应问题开展了数值模拟研究,得到了一些有价值的研究成果。这些成果主要针对的是均质边坡的情况,对于存在着大量结构面的岩体边坡有待进一步研究,所以,本文采用 UDEC 软件展开了结构面对岩体边坡地震动影

响的二维数值模拟研究。为便于边坡内不同位置地震动强度的比较,研究中定义边坡岩体中一点地震动峰值加速度  $a_p$  与坡脚处地震动峰值加速度  $a_{p_0}$  之比为边坡的地震动加速度放大系数  $\xi$  ( $\xi = a_p/a_{p_0}$ )。本文研究内容主要涉及结构面产状、位置变化及与坡角组合变化对岩体边坡地震动加速度放大系数空间展布的影响。

## 2 含结构面边坡动力响应模拟方案

### 2.1 基本假定

本文在结构面对于岩质边坡动力响应规律的研究中遵循如下假定(苏生瑞等, 2003):

(1) 应力应变关系:平面应变状态;(2) 岩石材料:均匀的各向同性材料;(3) 结构面本构关系:莫尔-库伦滑动模型;(4) 入射地震波:从模型底面垂直入射的剪切波。

### 2.2 模型工况选择

岩体中结构面的分布具有不确定性,而且其发育的规模和特征也有很大的不同,考虑现实中所有情况下结构面对于岩质边坡动力响应影响存在着很

[收稿日期] 2011-11-21; [修订日期] 2012-02-21; [责任编辑] 郝情情。

[第一作者] 田小甫(1982年—),男,博士,从事三维地质建模和边坡地震稳定性分析方面的工作。E-mail: tianxiaofu2002@126.com。

大的困难。为了突出主要矛盾,考虑岩质边坡中结构面发育的一般情况,本文主要研究与坡面相交的贯穿性结构面,用以模拟边坡岩体中的层面、贯穿性长大软弱结构面等。在边坡模型中布置一条与坡面相交的贯穿性结构面,考虑坡角、结构面与坡面交点的位置、结构面刚度以及结构面倾角这些参数的变化对边坡动力响应的影响。模型示意图如图 1 所示。图中: $x$  为边坡水平长度, $H$  为边坡高度, $h$  为结构面与坡面交点位置高度, $\beta$  为坡角, $\gamma$  为结构面倾角, $f$  为入射地震波频率, $t$  为振动时间。模拟中主要关注结构面附近加速度放大系数等值线的分布与坡肩放大系数的量值。

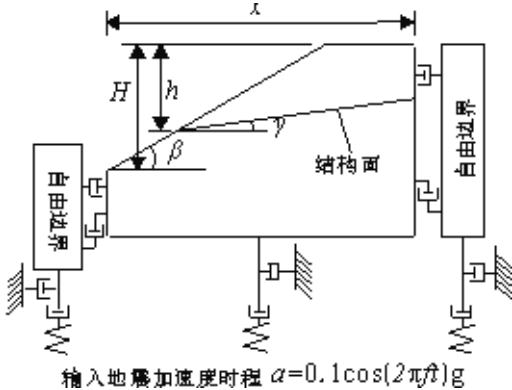


图 1 边坡动力响应分析模型示意图

Fig. 1 Sketch showing an analytical model for slope dynamic response

2.3 模型边界条件与参数选取

为了消除截断边界对于应力波的反射效应,模型底面边界采用粘滞边界,模型两侧采用自由场边界(祁生文等,2003)。为便于边坡内不同位置地震动强度的比较,引入本文开始定义的无量纲参数,边坡地震动加速度放大系数  $\xi$ 。为了全面了解边坡各个部位的动力响应,利用程序自带的 FISH 语言编制了自动布置监测点的函数,记录计算过程中监测点上地震动加速度的变化过程,并自动计算每个监

测点上地震动加速度的最大值。计算持续时间应该保证入射地震波传播到坡顶并发生反射叠加作用,待波场稳定后再进行加速度最大值的提取。各种工况模型参数按表 1 选取。

2.4 地震荷载

地面地震动过程一般以水平方向振动为主,频率成分复杂,地震动加速度主频一般在 2 ~ 10 Hz。为了进行一般规律性研究,本次数值模拟地震动力荷载输入采用水平向简谐振动剪切波,从模型底部边界垂直入射。首先确定输入地震动加速度时程,然后对其进行积分转化成速度时程,再将其转化成应力时程从边界输入。选择加速度振幅为 1 m/s<sup>2</sup>、频率为 5 Hz 的简谐水平地震动作为输入地震荷载,进行边坡地震动响应的数值模拟研究。

同一测点上地震动的位移、速度或加速度均随输入地震荷载的强度的增加而增加,三者的强弱变化一致,在边坡中的强弱分布形式相同(祁生文,2002;刘红帅,2006)。所以,在边坡地震响应数值模拟中可选用地震动加速度放大系数来表示边坡地震动响应强度的分布。

3 贯穿性结构面对于岩质边坡动力响应的影响

3.1 结构面位置

在高度  $H$  为 60 m、坡角  $\beta$  为 60°的边坡中设置一条切向刚度  $k_s$  为 0.1 GPa/m 的水平结构面,结构面与坡面交点高度分为 10 m,20 m,30 m,40 m 四种情况,以此研究结构面位置变化对于边坡动力响应的影响,模拟结果如图 2 和图 3 所示。由图 2 可见,加速度放大系数等值线密集分布区域总是集中在结构面附近,说明结构面对于边坡动力响应有明显的控制作用。当结构面位置较低时( $h = 10$  m,20 m),边坡响应加速度放大系数的最大值发生在在结构面以上靠近坡面的一定范围内;当结构面位置向坡顶面方向移动时,放大系数较高量值圈闭位置逐渐向

表 1 模型物理力学参数表  
Table 1 Physical parameters of the model

| 参数      | 符号     | 数值                     | 参数   | 符号      | 数值       | 参数      | 符号        | 数值       |
|---------|--------|------------------------|------|---------|----------|---------|-----------|----------|
| 块体密度    | $\rho$ | 2500 kg/m <sup>3</sup> | 泊松比  | $\nu$   | 0.2      | 横波速度    | $V_s$     | 2886 m/s |
| 体积模量    | $K$    | 27.7 GPa               | 阻尼比  | $\zeta$ | 3%       | 结构面黏聚力  | $c$       | 2 MPa    |
| 剪切模量    | $G$    | 20.8 GPa               | 纵波速度 | $V_p$   | 4714 m/s | 结构面内摩擦角 | $\varphi$ | 40°      |
| 结构面切向刚度 | $k_s$  | 0.1 GPa/m              |      |         |          |         |           |          |

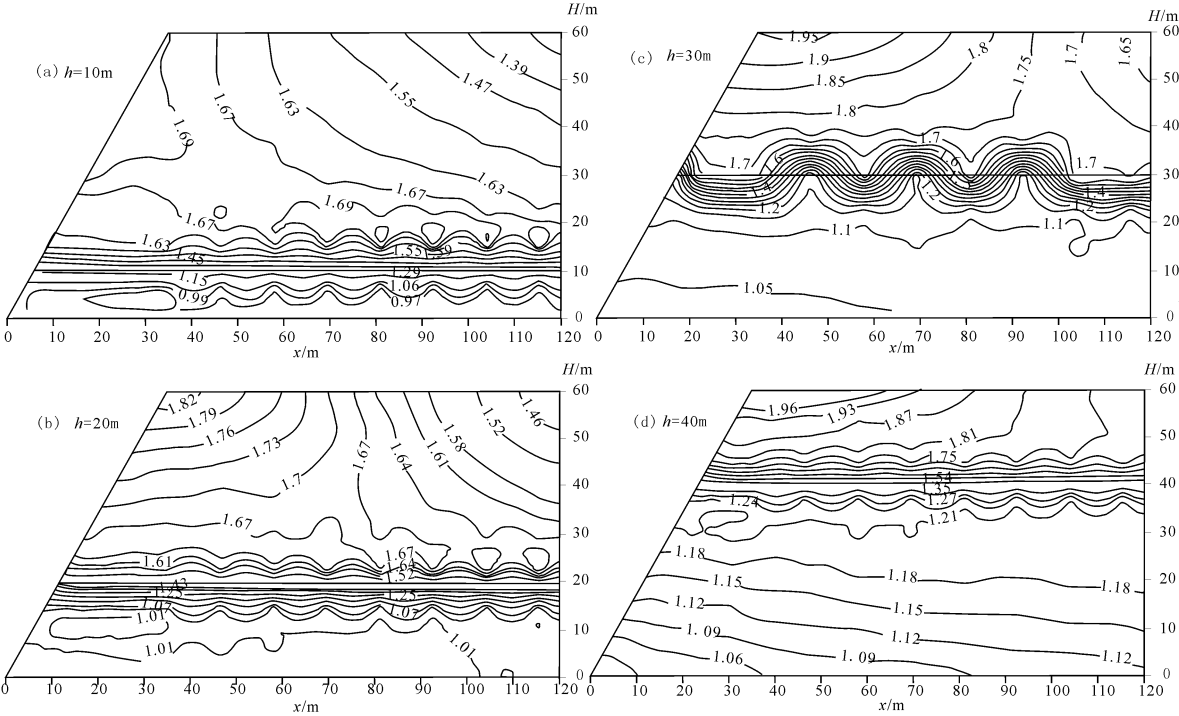


图 2 结构面位置对边坡动力响应(加速度放大系数  $\xi$  分布)的影响 ( $H=60\text{ m}, \beta=60^\circ, \gamma=0^\circ, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

Fig. 2 Influence of structural plane position on the distribution of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration of slope ( $H=60\text{ m}, \beta=60^\circ, \gamma=0^\circ, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

上移动,最后加速度放大系数最大值在坡顶出现。结构面以上坡体加速度放大系数向坡内方向迅速减小,加速度最大值总是出现在坡面附近。结构面距坡顶面的距离越近,坡肩的加速度放大系数的量值越大,呈现单调增加的关系,如图 3 所示。总的来说,结构面位置对于边坡的动力响应影响比较显著,结构面越靠近坡顶面,边坡肩部的动力响应就会越强,反映了地震波在坡顶面、坡面与结构面之间反射叠加形成的地震动放大效应。所以,对于岩质边坡而言,浅表层的结构面与深层发育的结构面相比更容易造成边坡在地震荷载作用下的失稳。

3.2 坡面与结构面

在高度为 60 m 的岩质边坡中设置一条高度为 30 m 的水平结构面,坡角  $\beta$  分为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ$  四种情况,用以模拟研究坡角变化对含结构面边坡地震动力响应的影响,模拟结果如图 4 和图 5 所示。

在图 4 中可以看出坡面和结构面对边坡地震响应的控制作用。坡面对边坡地震响应的控制作用体现在两个方面:一方面是加速度放大系数等值线与坡面的几何关系-无论坡角如何变化,近坡面一定范围内加速度放大系等值线均与坡面交汇;另一方面是加速度放大系数等值线圈闭的位置-坡角较缓

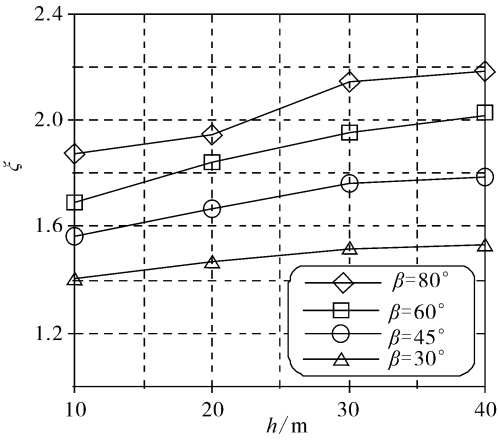


图 3 不同坡角( $\beta$ )边坡坡肩加速度放大系数  $\xi$  随结构面位置  $h$  的变化图( $H=60\text{ m}, \gamma=0^\circ, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

Fig. 3 Variation of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration on slope shoulder with different slope angles  $\beta$  vs. the position  $h$  of structure plane ( $H=60\text{ m}, \gamma=0^\circ, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

时,结构面之上坡体内地震动加速度放大系数等值线的高值圈闭在斜坡面上(图 4(a)),而坡面较陡时,结构面之上的加速度放大系数高值圈闭会向坡顶坡肩部转移(图 4(b),(c),(d))。离开坡面一

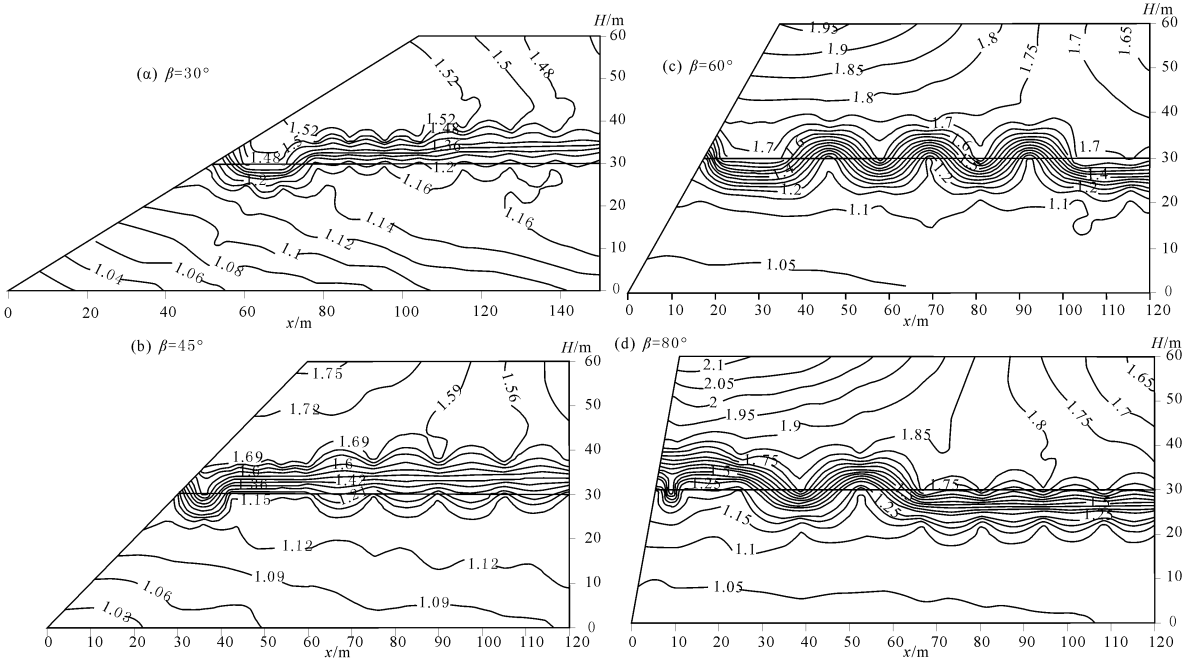


图 4 坡角  $\beta$  变化对边坡动力响应(加速度放大系数  $\xi$  分布)的影响( $H=60\text{ m}, \gamma=0^\circ, h=30\text{ m}, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

Fig. 4 Influence of slope angle  $\beta$  on the distribution of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration of slope ( $H=60\text{ m}, \gamma=0^\circ, h=30\text{ m}, k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

定距离后,加速度放大系数等值线转向沿结构面方向分布,并呈现节律性放大现象,这反映了结构面对边坡地震响应的控制。

的变化呈显著的正相关关系,即坡角越大,坡肩加速度放大系数越大,这与均质边坡的动力响应规律相同。

综上所述,坡角的变化对含水平结构面的边坡的坡肩地震响应有明显影响,坡角越大,坡肩的加速度放大系数越大。因此,在岩性、构造等地质条件相同的情况下,高陡边坡比平缓边坡更容易发生地震稳定性问题。

3.3 结构面倾角

相对于坡面而言,结构面一般分为顺倾( $\gamma > 0^\circ$ )、水平( $\gamma = 0^\circ$ )和反倾( $\gamma < 0^\circ$ )三种结构面形式。在坡高 60 m、坡角 60°的岩质边坡中高度 30 m 处设置一条剪切刚度  $k_s$  为 0.1 GPa/m 的结构面,选取结构面倾角  $\gamma$  分别为 30°, 20°, 10°, 0°, -10°, -20°, -30° 的七种结构面产状来研究结构面倾角对于边坡动力响应的影响,模拟结果如图 6、图 7 所示。

由图 6 可以看出,结构面对边坡地震动响应的影响主要表现为两个方面:一是结构面自身对边坡地震动的局部影响;二是结构面产状变化对边坡岩体地震动响应分布的改变。前者显而易见,结构面附近的等值线密集带沿结构面成条带状分布,地震动加速度放大系数变化的梯度方向总体上与结构面正交,说明在模型设置刚度条件下,结构面对边坡地

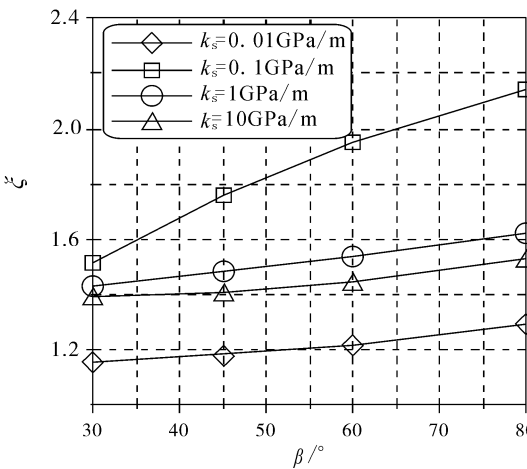


图 5 不同结构面刚度  $k_s$  边坡坡肩处加速度放大系数  $\xi$  随坡角  $\beta$  的变化( $H=60\text{ m}, h=30\text{ m}, \gamma=0^\circ$ )

Fig. 5 Variation of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration on slope shoulder with different stiffness  $k_s$  of structural plane vs. slope angle  $\beta$  ( $H=60\text{ m}, h=30\text{ m}, \gamma=0^\circ$ )

由图 5 可知,坡肩加速度放大系数相对于坡角



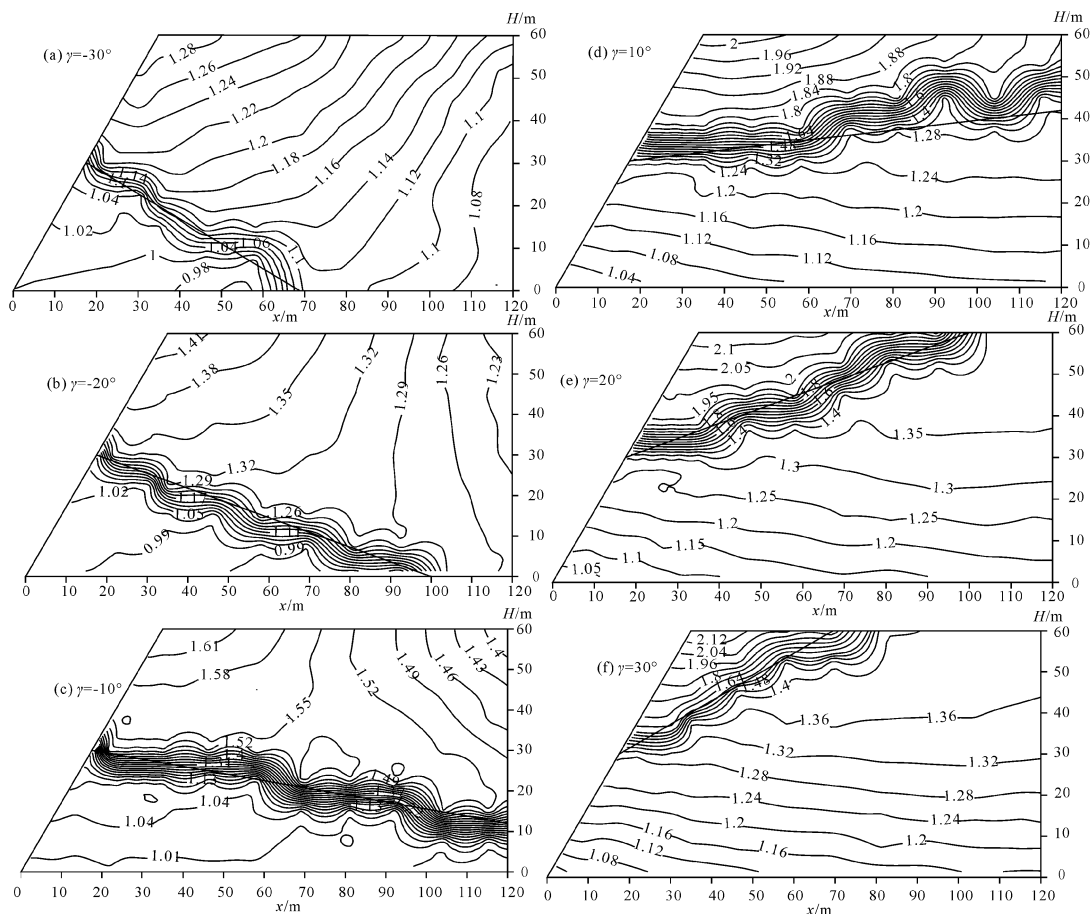


图 6 结构面倾角  $\gamma$  对边坡动力响应 (加速度放大系数  $\xi$  分布) 的影响 ( $H=60\text{ m}$ ,  $\beta=60^\circ$ ,  $h=30\text{ m}$ ,  $k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

Fig. 6 Influence of dip angle  $\gamma$  of a structure plane on the distribution of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration of slope ( $H=60\text{ m}$ ,  $\beta=60^\circ$ ,  $h=30\text{ m}$ ,  $k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

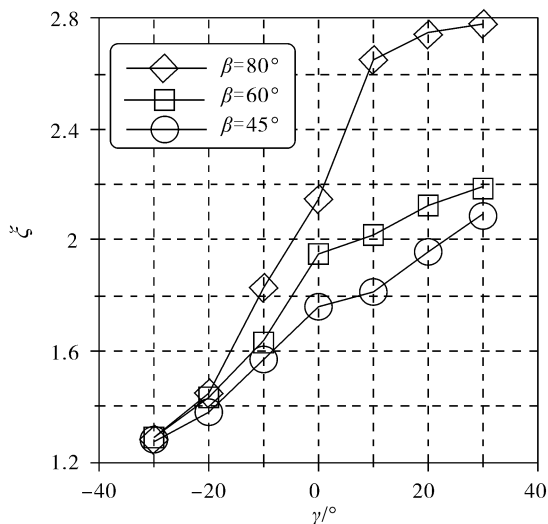


图 7 不同坡角  $\beta$  边坡坡肩处加速度放大系数  $\xi$  随结构面倾角  $\gamma$  的变化 ( $H=60\text{ m}$ ,  $h=30\text{ m}$ ,  $k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

Fig. 7 Variation of amplification coefficient  $\xi$  of seismic acceleration on slope shoulder with different slope angle  $\beta$  vs. dip angle  $\gamma$  of structural plane ( $H=60\text{ m}$ ,  $h=30\text{ m}$ ,  $k_s=0.1\text{ GPa/m}$ )

震动的分布有显著的控制作用。对于后者,比较图 6(a) ~ (f) 可以看到结构面产状变化对边坡地震动响应分布的影响规律。结构面产状变化使得结构面、坡面和坡顶面对地震波的反射方向发生变化,进而引起地震波能量汇聚位置变化,最终表现为地震动加速度放大系数等值线分布的空间变化。在结构面的上部,随着结构面倾角由反倾到顺倾的变化,结构面、坡面和坡顶面所围空间越来越小,地震动能量的汇聚程度越来越高,而且能量汇聚的中心部位始终是在坡面与坡顶面交点附近的坡肩部位,坡肩部位地震动加速度放大系数变化是一个单调增加的过程。可见,与反倾结构面相比,顺倾结构面会使坡肩部的地震动得到明显加强,顺倾倾角越大,坡肩部的地震动放大作用越显著。从工程安全上来说,顺倾结构面边坡的地震动加速度放大系数要大于水平结构面和反倾结构面边坡,所以,在地震力的作用下,顺倾结构面边坡的稳定性问题将更为突出。

4 结论

- (1) 结构面位置对边坡的动力响应影响比较显著。结构面位置越靠近坡顶面,边坡上部的动力响应就会越强。
- (2) 结构面倾角对边坡动力响应影响显著。随着结构面由反倾到顺倾的变化,坡肩地震动单调增加,随着结构面倾角的增加,顺倾边坡的地震稳定性会越趋恶化。
- (3) 坡角对结构面以上边坡体的地震动加速度放大系数的分布有显著影响。坡角较缓时,结构面之上的坡体内地震动加速度放大系数等值线的高值圈闭在斜坡面上;而坡角较陡时,结构面之上的加速度放大系数高值圈闭会向坡顶坡肩部转移,坡角越大坡肩的加速度放大系数越大。

[References]

Chen Shu-jun, Dang Xiao-ying, Zen Xin-chuan, Luo Deng-gui. 2004. Seismic stability analysis of slope at north bank of Fengjie Changjiang River Bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(4): 657-662 (in Chinese with English abstract)

He Yun-long, Lu Shu-yuan. 1998. A method for calculating the seismic action in rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 20(2): 66-68 (in Chinese)

Hong Hai-chun, Xu Wei-ya. 2005. Review on the stability of rock slopes under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(suppl): 4827-4835 (in Chinese with English abstract)

Keefer D V. 1984. Landslides caused by earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 95(4): 406-421

L. Siad. 2003. Seismic stability analysis of fractured rock slopes by yield design theory[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23: 203-212

Li Wei-guang, Zhang Ji-chun. 2007. Equivalent static stability study on rock mass bedding slope under blasting[J]. Journal of Mountain Science, 25(2): 184-189 (in Chinese with English abstract)

Ling H. I, Cheng, Alexander H. D. 1997. Rock Sliding Induced by Seismic Force[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 4(6): 1021-1029

Liu Hong-shuai. 2006. Study on analysis method of rock slope seismic stability[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; 30-36 (in Chinese with English abstract)

Newmark N. M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. Geotechnique, 15(2): 139-160

Qi Sheng-wen, Wu Fa-quan, Liu Chun-ling, Ding Yan-hui. 2004. Engineering Geology Analysis on stability of slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(16): 2792-2797 (in Chinese with English abstract)

Qi Sheng-wen, Wu Fa-quan, Sun Jin-zhong. 2003. Study on dynamic response of the slope[J]. Science in China Series E, 33(Sup.): 28-41 (in Chinese with English abstract)

Qi Sheng-wen. 2002. Dynamic response analysis of slope and the applied research[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences; 40-45 (in Chinese with English abstract)

Qi Sheng-wen. 2007. Evaluation of the permanent displacement of rock mass slope considering deterioration of slide surface during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 29(3): 452-457 (in Chinese with English abstract)

R. Baker, R. Shukha, V. Operstein, S. Frydman. 2006. Stability Charts for pseudo-static slope stability analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26: 813-823

Shi Dan, Chen Yun-sheng, Han Xin, Chen gang. 2006. The evaluation of seismic dynamic stability of rock slope[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 34(2): 147-152 (in Chinese with English abstract)

Shi Yu-cheng, Wang Lan-min, Zhang Ying. 1999. Effects of Overburden Thickness And Topography of Loessial Sites on Earthquake Ground Motion[J]. Northwestern Seismological Journal, 21(2): 203-207 (in Chinese)

Su Sheng-rui, Zhu He-hua, Wang Shi-tian, Stephansson Ove. 2003. Effect of physical and mechanical properties of rocks on stress filed in the vicinity of fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(3): 370-377 (in Chinese with English abstract)

Xu Guang-xing, Yao Ling-kan, Li Zhao-hong, Gao Shao-ning. 2008. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30(6): 918-923 (in Chinese with English abstract)

Yao Ai-jun, Su Yong-hua. 2003. A method for stability of slope engineering with complicated rock-mass[J]. China Civil Engineering Journal, 36(11): 34-37 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

陈蜀俊, 党晓英, 曾心传, 罗登贵. 2004. 奉节长江大桥北岸在地震荷载作用下的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 23(4): 657-662.

何蕴龙, 陆述远. 1998. 岩石边坡地震作用近似计算方法[J]. 岩土工程学报, 20(2): 66-68

洪海春, 徐卫亚. 2005. 地震作用下岩质边坡稳定性分析综述[J]. 岩石力学与工程学报, 24(suppl): 4827-4835

李维光, 张继春. 2007. 地震作用下顺层岩质边坡稳定性的拟静力分析[J]. 山地学报, 25(2): 184-189

刘红帅. 2006. 岩质边坡地震稳定性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所; 30-36

祁生文, 伍法权, 刘春玲, 丁彦慧. 2004. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 23(16): 2792-2797

祁生文, 伍法权, 孙进忠. 2003. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学(E 辑, 科学技术), 33(增刊): 28-41

祁生文. 2002. 边坡动力响应分析及应用研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所; 40-45

祁生文. 2007. 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移研究[J]. 岩土工程学报, 29(3): 452-457

石玉成, 王兰民, 张 颖. 1999. 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, 21(2): 203-207

史 丹, 陈蕴生, 韩 信, 陈 刚. 2006. 岩质边坡地震动力稳定性研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 34(2): 147-152

苏生瑞, 朱合华, 王士天, Stephansson Ove. 2003. 岩石物理力学性质对断裂附近地应力场的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 22(3): 370-377

徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 高召宁. 2008. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 30(6): 918-923

姚爱军, 苏永华. 2003. 复杂岩质边坡锚固工程地震敏感性分析[J]. 土木工程学报, 36(11): 34-37

Numerical Simulation of the Influence of Structural Planes on Seismic Motion on Rock Slopes

TIAN Xiao-fu<sup>1</sup>, SUN Jin-zhong<sup>2</sup>, LIU Li-peng<sup>3</sup>, ZHENG Xiao-yan<sup>1</sup>, JIA Lei<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100048, China;

2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

**Abstract:** Numerical simulation with software UDEC is conducted to study the influence of structural planes on the earthquake motion on rock slopes. . The study deals with the influence of varying attitudes and positions of structure planes on the amplification of earthquake motion on rock slopes. According to general situations of structure planes developing in rock slopes, this study focuses on penetrating structural planes intersecting with the slope surface. And the primary objectives of simulation are strata layers and long penetrating weak structural planes. The results show that the closer the structural plane to the top surface of the slope, the stronger the earthquake response of the slope is. The structural plane downward to the slope surface will cause stronger earthquake motion on the upper slope body than that caused by structural planes horizontal or anti-dip to the slope surface. A steeper slope surface can produce stronger earthquake motion on the top or shoulder of the slope. The laws above mentioned will be valuable references to the earthquake stability analysis of rock slopes.

**Key words:** rock slope, structural plane, amplification coefficient of seismic motion, numerical simulation