

地震作用下坡面形态对岩质边坡稳定性的影响

言志信, 史 盛, 党 冰, 李 斌

(兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用 FLAC^{3D} 软件, 对三种不同形态的岩质边坡在不同强度地震荷载作用下的坡面水平方向位移进行数值模拟研究, 并将地震作用下坡面水平位移和对应的残余剪切应变增量云图进行了对比分析。结果表明: 在较小地震荷载作用下凹型坡在坡脚处的稳定性最好, 而凸型和顺直型坡在坡高约 1/5 的部位变形较大; 随着地震荷载和坡高的增加, 凹型坡在坡高约 3/5 的地方位移出现最大值; 而凸型和顺直型坡则在坡脚处出现剪应变区沿坡面向上延伸的现象。

关键词: 岩质边坡; 坡面形态; 数值模拟; FLAC^{3D}

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)02-0043-06

Influence of the Slope Shape on the Stability of Rock Slope under the Seismic

Yan Zhixin, Shi Sheng, Dang Bing, Li Bin

(School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The analysis model of horizontal displacements on three different forms of rock slope under the seismic load of different intensity was established with FLAC^{3D} and the calculated horizontal displacements were compared with residual shear strain increment cloud. The results show that the stability of concave slope at the foot of the slope is best when seismic loading is small; however, the convex slope and the straight slope from the foot of the slope to the height of 1/5 have large deformations, and the concave slope in the height of about 3/5 has the maximum deformation as seismic loading and slope height increase. In addition, it is obvious that shear strain area extends upward at the foot of the convex slope and the straight slope.

Key words: rock slope; slope shape; numerical simulation; FLAC^{3D}

爆破和地震触发边坡失稳的动力问题是岩土工程中的重要问题之一, 我国许多大型工程如南水北调西线、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都涉及多山地、多地震的地理地质环境, 不可避免地存在大量和地震作用有关的边坡稳定性问题^[1]。岩质边坡在地震作用下动力响应的影响因素很多, 归结起来有两大方面, 即边坡自身因素和地震因素。边坡自身因素有坡高、坡角、坡面形态和边坡岩土体的性质, 地震因素包括地震波的振幅、频谱和持时三方面。

目前, 国内外有大量文献对地震作用下边坡的动力响应及变形破坏进行了研究。文献[2]研究了边坡动力响应的临界高度。王存玉等^[3]对二滩拱坝模型的模拟中发现, 岩石边坡对地震波的加速度在竖直方向和水平方向上都存在放大作用。祈生文等^[4]对边坡模型进行数值分析研究, 得出边坡在动力作用下位移、速度以及加速度放大系数等直线的分布规律。张和^[5]对复合边坡在地震作用下的动力响应进行了研究。万洪^[6]研究了岩质高边坡的动力响应及其应用。文献[7-9]研究了地震作用下边坡的失稳机制, 从而为地震作

收稿日期: 2012-09-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090211110016); 云南省科技厅科技项目(云交科 2010(A)06-b)

作者简介: 言志信(1961—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事边坡工程、地下工程、爆破工程等方面的研究。

E-mail: yzx10@163.com

用下边坡稳定性分析提供依据。何蕴龙等^[10]提出了岩石边坡地震作用下的近似计算方法。文献[11]研究了地震波在边坡动力分析中的应用。但在地震作用下坡面形态对岩质边坡变形的影响研究甚少,仅文献[12]利用 FLAC^{3D} 软件研究了坡面形态对地震作用下土质边坡稳定性的影响,且对边坡形态进行了简化,采用直线组成的折形坡面来代替凸型坡和凹型坡,难免使得计算结果和实际误差较大。本文在前人研究的基础上,通过对坡面形态参数的优化来进一步研究其对边坡在地震作用下变形破坏的影响。

1 边坡动力分析模型

自然界中各类形态复杂的边坡大都可归结为凸、凹和顺直三种基本类型或者它们的组合形式。为了分析简便,本文选取三种最基本的边坡进行研究。边坡的计算模型尺寸如图 1 所示,其中顺直边坡的坡度取 1 : 1.5,凸型和凹形坡的坡度按照坡脚处坡面的切线设计,取凸型坡的坡度为 1 : 1.25,凹型坡的坡度为 1 : 1.75。对边坡进行建模,然后运用 FLAC^{3D} 分别计算不同强度地震荷载作用下边坡的变形情况。

1.1 模型材料和地震波

自然界中边坡受地质背景、岩体结构类型、地层岩性组合、地形地貌以及水文地质条件的影响^[13]。如果在数值模拟中综合考虑边坡岩土体这些因素,将会使问题变得异常复杂。本研究重点探索在地震荷载下坡面形态对边坡变形的影响,因此,假定边坡由均质各向同性的弹性材料构成,且忽略渗流作用。本构模型采用弹塑性模型,破坏准则选取 Mohr-Coulomb 准则。岩体的物理力学参数取自文献[14],动弹模量为 8000 MPa,泊松比 0.3,密度为 2650 kg · m⁻³。祈生文等^[4]通过对震动作用下边坡的动力响应规律研究得出,真实地震波和简谐波的差别不大,故在边坡的底部施加一垂直向上的剪切波作用,其加速度时程为:

$$\alpha = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

其中:A 为地震波的振幅;T 为地震波的周期;t 为地震波的持续时间。

1.2 边界条件

FLAC^{3D} 在求解动力问题时,边界条件的设置分为远置人工边界、静态边界和自由场。远置人工边界在处理地震波的能量问题时主要利用静力学原理,此时,边界对地震波既不吸收也不传播而是完全反射。在动力计算中,波的能量这样被限制会使最终计算结果误差很大。如果使其对最终结果的影响变小,就需要把模型的边界设置得足够远,模型的范围取得足够大,才能减小边界的反射。但是,模型范围过大会使数值计算无法进行。本研究模型底部采用黏滞边界,即在边界的法向和切向各设置一个黏滞壶。为了代替远场区域对模型四周的作用,在模型的四周设置了自由场,如图 2 所示。

地震荷载在黏滞边界上输入时需要将速度时程转变为应力时程:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= -2(\rho C_s) V_s \\ C_s &= \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: σ_s 为剪应力; V_s 为质点切向速度; C_s 为介质的 S 波速; ρ 为介质密度。将式(1)先转化成速度时程,再

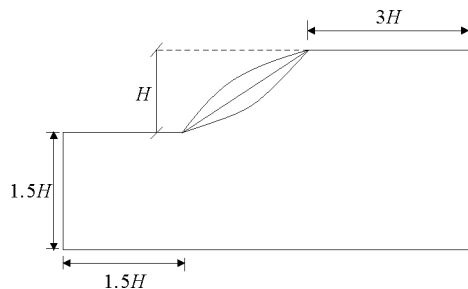


图 1 边坡设计剖面图

Fig. 1 Design section of the slope

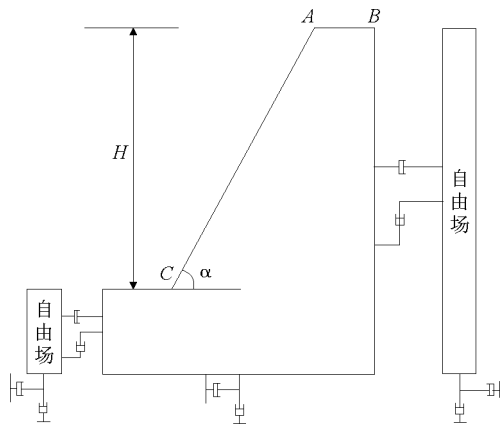


图 2 边坡动力学数值模型图

Fig. 2 Slope model for dynamic analysis

通过式(2)转化成相应的应力历程。

1.3 动力持时的确定

持时的影响主要表现在波的传播过程当中。如果边坡的尺寸较大,而动力计算的持时太短,波就不能达到边坡的顶部,此时边坡内部的波场分布就没有达到稳定状态。为了与真正的动力响应规律相符,动力的持时必须达到使坡内的波场趋于稳定。

为了确定动力持时,取计算模型中高度为 150 m、地基深度为 225 m 的顺直边坡为例来说明。对于所选用的地震波,从地基地部输入传播到坡顶需要 0.35 s,所以计算中动力持时不能小于 0.35 s。

1.4 数值模拟工况

为了研究坡面形态在不同强度地震作用下对边坡变形的影响,边坡高度取 40,90 和 150 m。地震波振幅取 0.1g, 0.3g, 0.5g, 0.6g (g 为重力加速度,下同);周期取 0.1, 0.2, 0.4 s 进行模拟,如表 1。为了分析不同工况下坡面水平位移在沿坡面向上的分布规律,在模型中沿坡面向上设置不同的监测点。其测点的布置是高度为 40 m 的边坡从坡脚起,每隔 8 m 高程设置一个测点,90 m 的边坡从坡脚起,每隔 18 m 高程设置一个测点,150 m 的边坡从坡脚起,每隔 30 m 高程设置一个测点。

表 1 数值模拟工况表

Tab. 1 Numerical simulation condition

工况	坡型	坡高/m	振幅/g	周期/s
1-3	凸	40	0.1,0.3,0.5	0.2
4-6	凸	40	0.6	0.1,0.2,0.4
7-9	顺直	40	0.1,0.3,0.5	0.2
10-12	顺直	40	0.6	0.1,0.2,0.4
13-15	凹	40	0.1,0.3,0.5	0.2
16-18	凹	40	0.6	0.1,0.2,0.4
19-21	凸	90	0.1,0.3,0.5	0.2
22-24	凸	90	0.6	0.1,0.2,0.4
25-27	顺直	90	0.1,0.3,0.5	0.2
28-30	顺直	90	0.6	0.1,0.2,0.4
31-33	凹	90	0.1,0.3,0.5	0.2
34-36	凹	90	0.6	0.1,0.2,0.4
37-39	凸	150	0.1,0.3,0.5	0.2
40-42	凸	150	0.6	0.1,0.2,0.4
43-45	顺直	150	0.1,0.3,0.5	0.2
46-48	顺直	150	0.6	0.1,0.2,0.4
49-51	凹	150	0.1,0.3,0.5	0.2
52-54	凹	150	0.6	0.1,0.2,0.4

2 计算结果分析

2.1 不同坡面形态的水平方向位移随高程的变化规律

计算工况 1-54 得到三种不同形态的边坡沿坡面向上各个测点水平方向位移随高程的变化规律统计图。图 3,图 4,图 5 分别是坡高为 40,90 和 150 m 的不同形态的边坡沿坡面向上各测点在地震波周期一定

(0.2 s) 时位移在不同振幅地震波作用下的分布规律。

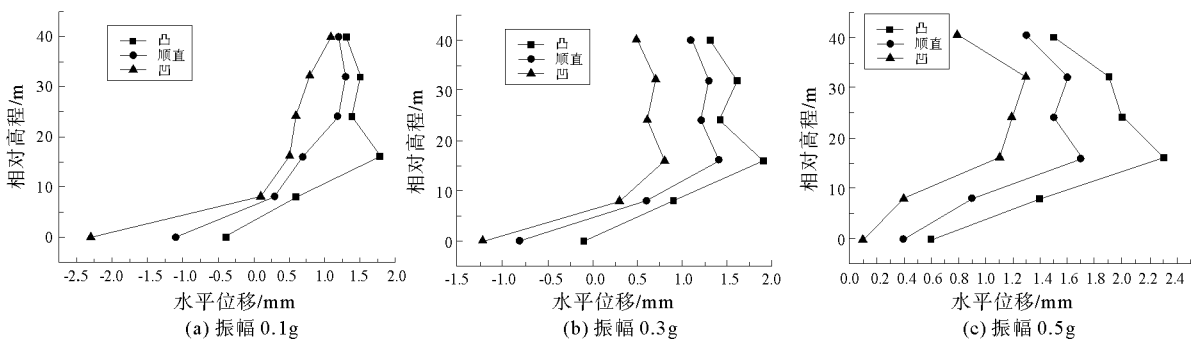


图 3 40 m 高的边坡在不同振幅下位移和高程的关系图

Fig. 3 Relation between elevation and displacement in different amplitude of the 40-meter-high slope

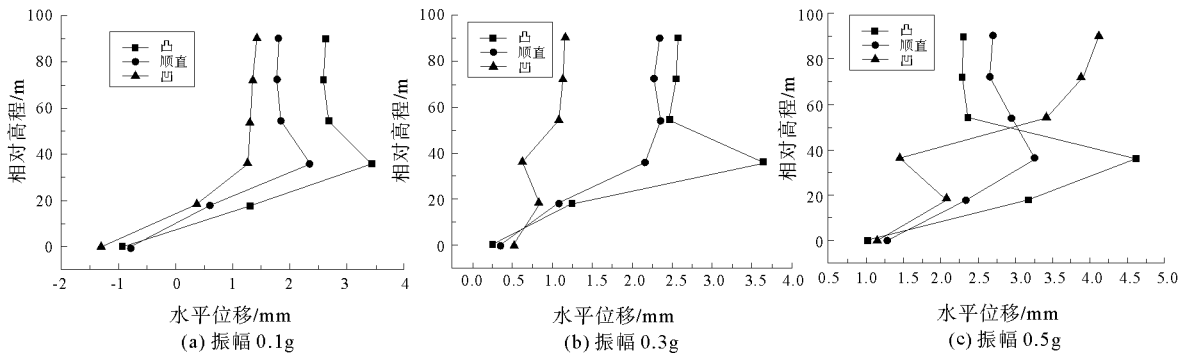


图 4 90 m 高的边坡在不同振幅下位移和高程的关系图

Fig. 4 Relation between elevation and displacement in different amplitude of the 90-meter-high slope

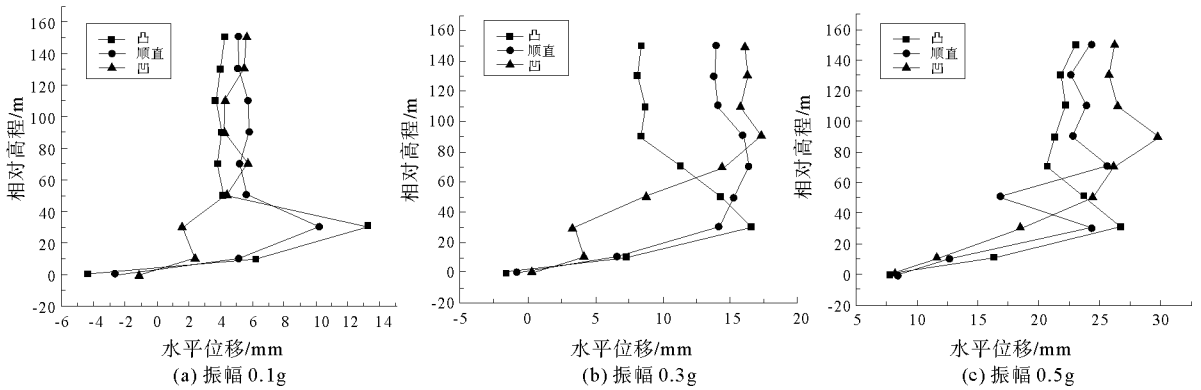


图 5 150 m 高的边坡在不同振幅下位移和高程的关系图

Fig. 5 Relation between elevation and displacement in different amplitude of the 150-meter-high slope

如图 3、图 4 和图 5 所示,凹型坡在坡脚处的稳定性比凸型和顺直型的要好,由此可以看出在相同强度的地震作用下坡脚处的变形情况和坡比有关。地震波振幅较小时,随着坡高的增加,凸型和顺直型坡在坡脚处位移最大。当地震波振幅增大时,随着坡高的增加,凹型坡的位移在坡高约 3/5 处最大,可能由于地震波在坡内传播时最先达到凹型坡面,波经过坡面反射后入射波和反射波相叠加,在岩体中就形成强弱相间的应力波,这会使岩体的振动增强。图 4 是 90 m 高的边坡,当振幅为 0.1g 时,在约坡高 1/5 的地方,凸型坡位移最大,顺直型次之,凹型坡最小,这是因为在静力作用下,坡脚处凹型坡的稳定性最好,顺直型坡次之,凸型坡最差,所以,当较小地震荷载作用时边坡这种静态的稳定情况基本保持不变。图 5 是坡高为 150 m 时,随着振幅的增大,水平位移随高程出现律动性,这和地震波在边坡内部发生干涉作用有关。

图 6—图 8 是在地震波振幅一定(0.6g)时,高度为 40,90 和 150 m 的不同形态的边坡沿坡面向上各测点的位移在不同周期地震波作用下的分布规律。

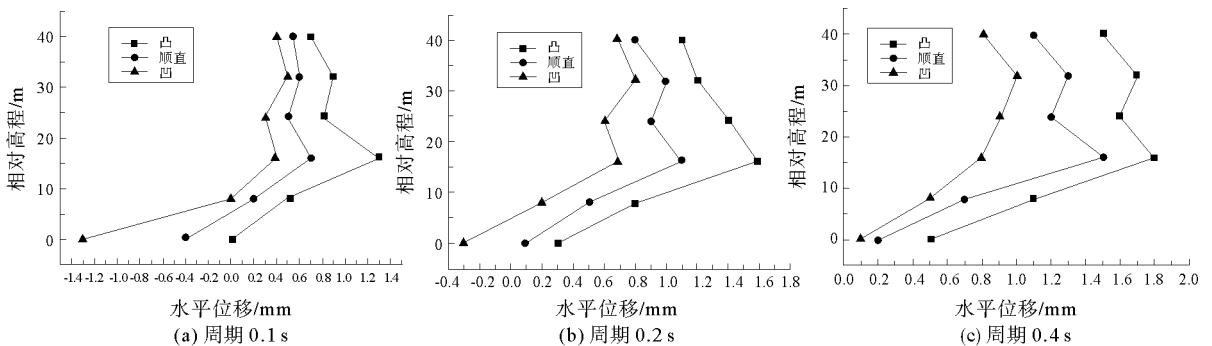


图 6 40 m 高的边坡在不同周期下位移和高程的关系图

Fig. 6 Relation between elevation and displacement in different cycle of the 40-meter-high slope

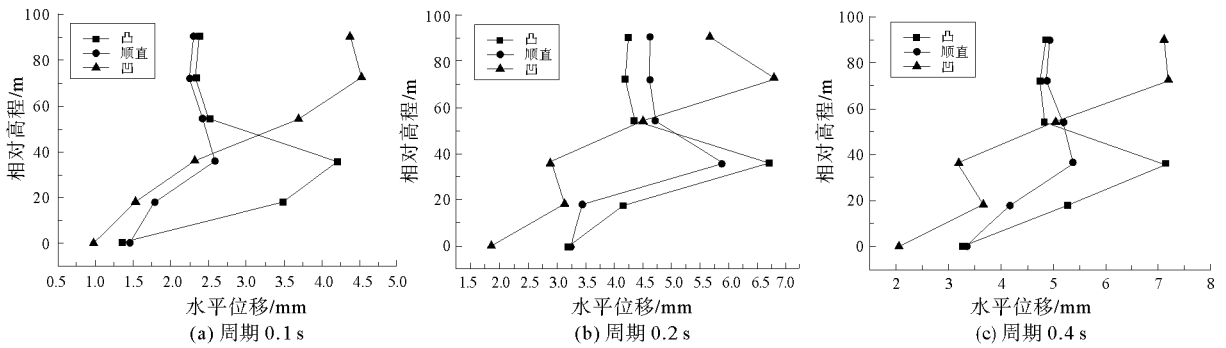


图 7 90 m 高的边坡在不同周期下位移和高程的关系图

Fig. 7 Relation between elevation and displacement in different cycle of the 90-meter-high slope

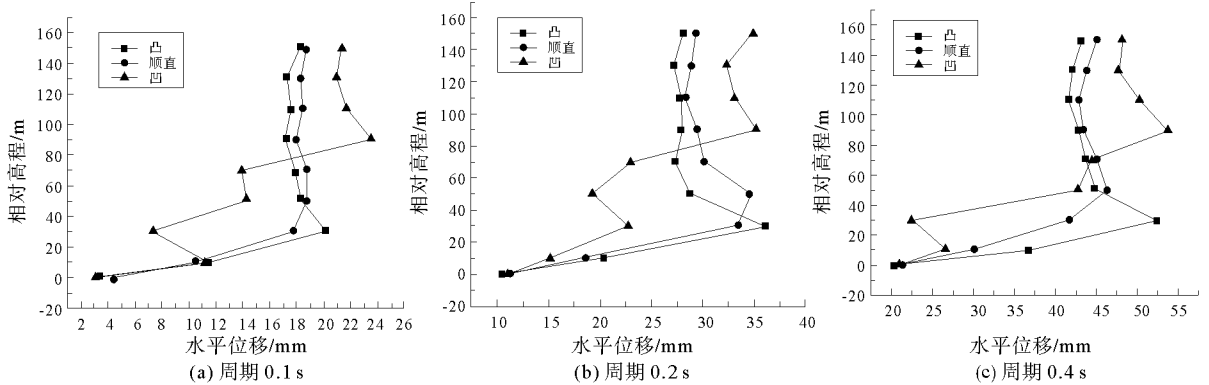


图 8 150 m 高的边坡在不同周期下位移和高程的关系图

Fig. 8 Relation between elevation and displacement in different cycle of the 150-meter-high slope

由图 6—图 8 可以看出,当地震波周期较小时,随着坡高的增加,凸型坡在坡脚部位位移最大。当地震波周期变大时,随着坡高的增加,凹型坡的位移同样出现了变化,在坡高约 3/5 的地方出现最大值。由图 6 和图 7 看出,当坡高较小时,在地震波振幅一定,随着周期的增加其坡面测点水平位移增加。在坡高约 1/5 的地方,凸坡的位移量最大,顺直坡次之,凹坡最小。在坡高约 3/5 的地方,凹坡的位移量最大,顺直坡次之,凸坡最小。由图 8 得出,坡高为 150 m 时,随着周期的增加,水平位移增大幅度明显提高,位移随高程的分布状态较 40 m 和 90 m 要紊乱,可能由于在地震力的作用下边坡表面岩土体产生破坏,导致动荷载传递异常。但在坡高约 1/5 的地方,凸坡的位移量最大,顺直坡次之,凹坡最小。在坡高约 3/5 的地方,凹坡的位移量最大,顺直坡次之,凸坡最小。

2.2 不同坡型的残余剪切应变增量

边坡的失稳最先是沿着剪切应变最大的部位发生的。本文通过 FLAC^{3D}对三种不同形态的边坡进行模拟,得出振幅为 0.6g,周期为 0.4 s 的地震波作用下坡高 150 m 的三种类型的边坡在动力作用结束时的残余剪切应变增量云图,如图 9 所示。

结合图 8(c)和图 9 可以看出,150 m 高的边坡在强度较高的地震荷载作用下,凸型和顺直型坡的剪应变区从坡脚沿坡面向上延伸。由此可见,凸型和顺直型坡在地震作用下的破坏首先在坡脚处产生较大剪应变后导致的浅层滑动。凹型坡在坡面斜率突变的地方出现剪应变集中区,和图 8(c)中凹型坡出现最大位移的部位相吻合。

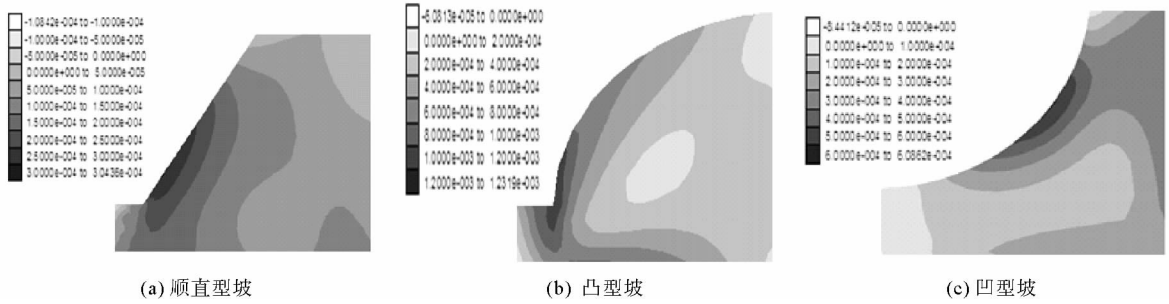


图 9 边坡残余剪应变增量云图

Fig. 9 The residual shear strain increment cloud of the slope

3 结论

- 1) 三种坡面形态各异的岩质边坡在地震荷载作用下变形破坏部位各不相同, 在地震作用下岩质边坡的变形破坏和坡面形态密切相关。
- 2) 在较小地震荷载作用下凹型坡在坡脚处的稳定性最好, 而凸型和顺直型坡在坡高约 1/5 的坡脚部位变形较大。随着地震荷载和坡高的增加, 凹型坡在坡高约 3/5 的地方位移出现最大值, 而凸型和顺直型坡出现剪应变区从坡脚处沿坡面向上延伸的现象。
- 3) 地震荷载达到一定值时, 凸型和顺直型坡的破坏方式是在坡脚处最先产生剪应变集中, 从而引起浅层滑动。而凹型坡则是在变坡点部位产生破坏。

参考文献:

- [1] 柴红保, 曹平, 林杭. 竖直向上传播剪切波作用下边坡动力响应规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(4): 1079-1084.
Chai Hongbao, Cao Ping, Lin Hang. Dynamic response laws of slope under vertical shear wave[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(4): 1079-1084.
- [2] 祈生文. 单面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 Shengwen. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 518-523.
- [3] 王存玉, 王思敬. 地震条件下二滩水库岸坡稳定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 5-74.
- [4] 祈生文, 伍法权. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学: E 辑, 2003, 33(增 1): 28-40.
Qi Shengwen, Wu Faquan. Study on dynamic responses of slope[J]. Science in China: Series E, 2003, 33(S1): 28-40.
- [5] 张和. 震动作用下复合边坡动力响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2008: 31-55.
- [6] 万洪. 岩质高边坡动力响应分析及其应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 35-56.
- [7] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553-556.
Liu Hanlong, Fei Kang, Gao Yufeng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553-556.
- [8] 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 Hunxiang, Shao Longtan. 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.
- [9] 周永江, 王开云, 符文熹. 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, et al. Analysis on time history dynamic response of a rock fall-type slope under high earthquake intensity[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 93-98.
- [10] 何蕴龙, 陆述远. 岩石边坡地震作用近似计算方法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 66-68.
He Yunlong, Lu Shuyuan. A method for calculating the seismic action in rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 66-68.