

# 高地震烈度区堆积体边坡动力响应时程特征分析

周永江<sup>1</sup>, 王开云<sup>2</sup>, 符文熹<sup>2</sup>, 何江达<sup>2</sup>

(1. 四川省公路设计研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 考虑到在地震过程中, 工程边坡的动安全系数最小值出现在某一瞬间, 而用这个值评价边坡在地震荷载作用下的抗滑稳定性不合适宜。在简单分析地震荷载作用下边坡稳定性评价的主要方法及差异基础上, 介绍了地震动力响应时程分析法的基本原理和计算过程, 明确指出了边坡动力稳定分析时应注意的边界条件、材料参数等问题, 建立了评价动力稳定性的有限元应力法表达式。基于地震动力时程反应, 结合金安桥水电站库岸堆积体边坡工程, 用动力有限元计算获得了边坡的动力响应在空间的变化规律 (包括动应力和加速度等) 和整体稳定性, 计算成果合理地评价了其稳定性。

**关键词:** 高地震烈度; 动力响应; 地震时程分析; 动力稳定性

**中图分类号:** P642.2

**文献标识码:** A

我国西部高山峡谷地区因良好的地形地貌条件、丰富的水能资源, 是我国水能开发的重要基地。但是, 位于西部高山峡谷地区众多在建、拟建和规划的水电工程场址区, 由于特殊的大地构造环境和地质构造背景, 新构造运动强烈, 地震烈度高。地震荷载作为边坡失稳的重要因素之一, 一直是国内外工程界和学术界普遍关注的课题。目前, 边坡地震稳定性分析常用的方法有规范推荐的拟静力法、滑块分析法及动力有限元法等<sup>[1-5]</sup>。

拟静力法对地震荷载的处理通常按极端情况, 即认为边坡不同高程滑动块体同时遭受地震峰值加速度。而实际地震作用过程中, 由于地形地貌和岩体结构的差异, 边坡不同部位的峰值加速度放大效应存在差异, 同一滑块不同质点地震加速度存在相位差, 即地震荷载下边坡应力状态是不断变化的, 并且最大地震加速度时刻并不一定是动力响应最大的时刻。

滑块分析法首先假定滑动面并确定其屈服加速度值, 然后通过动力分析判定是否产生滑移, 并可估计其永久滑移位移。这一方法是基于刚体模型假定, 比较简单。

动力有限元法一般需要输入地震时程曲线和响应谱, 需求解的地震参数较多, 但特别适用边界条件及岩体结构复杂的动力问题。由于动力有限元法可以获得地震作用过程边坡的动力响应特征和稳定性系数的变化规律, 是近年来应用广、发展快的方法。动力有限元法通常采用两种方法求解: 一种是反应谱方法, 另一种是时程分析法。时程分析法计算工作量大, 计算结果的后处理也比较复杂, 但能较真实地反映边坡遭受地震作用的动力效应。

目前, 对于边坡整体动力响应规律 (如加速度、动应力等) 的研究较少, 对地震荷载作用下动安全系数的评价也未有统一的标准, 高地震烈度区的工程抗震设计仍需结合模型试验、数值模拟、地震观测资料来综合考虑。本文以云南丽江金沙江金安桥水电站库岸边坡为分析对象, 基于动力时程分析法, 针对边坡动力响应提出了一套较为全面的分析评价方法, 对类似工程有较高的参考价值。

## 1 边坡动力响应时程分析法的基本过程

### 1. 首先进行静力有限元计算, 并将静力法计算

收稿日期 (Received date): 2006-04-12; 改回日期 (Accepted): 2006-10-15.

作者简介 (Biography): 周永江 (1964-), 男 (汉族), 四川成都人, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的科研、施工、管理工作。 [Zhou Yong-jiang (1964-), Male, the Han Nationality, Born in Chengdu City, Sichuan Province. Geotechnics Engineer Majoring in Science Construction and Management on Geotechnics.]

的应力场作为动力分析计算模型的初始应力场。

2. 进行模态分析, 求得系统的固有频率和固有振型, 然后结合材料阻尼比计算瑞雷阻尼系数, 并将其作为材料常数引入动力计算模型中。

3. 给定边界条件, 输入地震时程曲线, 进行动力计算。计算时一般按弹性问题考虑, 采用 Newmark 隐式积分法求解<sup>[6]</sup>。为了充分反映地震作用效应, 一般需要同时考虑水平地震加速度和垂直地震加速度耦合作用, 根据规范<sup>[7]</sup>, 垂直向加速度  $a_v$  常按水平加速度  $a_h$  的  $2/3$  考虑。

4. 获得地震作用过程中边坡的动力响应特征和变化规律。工程中除了关心边坡各关键部位的动力放大效应以及动应力在地震历时的变化特征外, 还需整体了解地震作用过程中边坡所遭受的最大动力响应。在动力计算获得边坡不同部位加速度(或动力放大系数)以及边坡动应力的时程变化基础上, 进行统计分析, 可以获得不同部位的加速度极值及主应力极值, 通过绘制对应参数的等值线, 便可以宏观了解边坡在地震作用下的最大动力响应特征及变化规律。

5. 根据动力分析计算获得不同时刻边坡潜在滑面的动应力, 然后按照有限元抗滑安全系数计算

的方法<sup>[3]</sup>, 计算地震作用过程中不同时刻对应的动安全系数, 同时根据概率统计的方法获得相应的动安全系数均值及失稳概率, 并根据计算成果评价地震条件下边坡的稳定性。

## 2 几个值得注意的问题

### 2.1 计算模型边界条件的考虑

动力分析中计算模型边界条件的假定直接影响地震动力响应计算结果。计算模型边界条件的假定通常有如下几种: (1)除自由边界外, 其他边界均按完全不反射边界处理; (2)除自由边界外, 底部边界考虑为完全不反射边界, 水平边界考虑为完全反射边界; (3)除自由边界外, 底部边界考虑为完全不反射边界, 水平边界考虑为不完全反射边界(阻尼边界)。以上几种边界条件的示意如图 1 所示。研究表明, 上述第 (1)种边界条件计算的动力响应明显偏小; 第 (2)种边界条件动力响应明显偏大。对于第 (3)种边界, 若能较为准确地获得模型边界的阻尼特性, 便可以较为真实地反映地震作用过程的动力响应。本文实例分析中, 计算模型的边界条件按第 (3)种边界条件考虑。

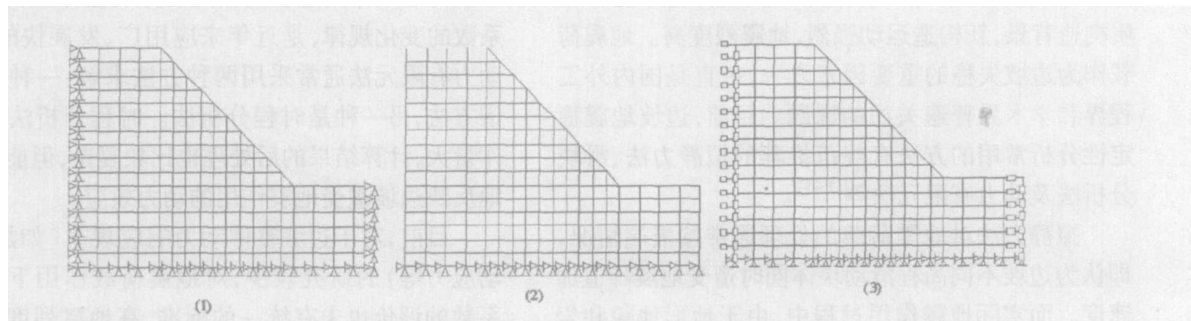


图 1 地震动力分析计算中三种边界条件示意图

Fig. 1 Three type boundaries in the analysis of dynamic computation

### 2.2 材料介质参数的选取

动力分析中, 输入的材料参数是动荷载条件下的力学参数, 一般可以通过现场(室内)动力试验获得, 或通过地震波或声波测试的波速成果换算获得。若无试验成果, 根据规范, 也可取动弹性模量  $E_d$  为静弹性模量  $E_s$  的 1.3 倍<sup>[7]</sup>, 而泊松比一般考虑不变。

### 2.3 动安全系数的计算

工程中习惯用边坡安全系数法来评价边坡的稳定性。而动力有限元计算获得的是地震时程中不同

时刻的动力响应, 因此, 在获得各时刻潜在滑面对应单元高斯点的坐标应力后, 通过插值可以得到滑面上第  $i$  条块底部中点的坐标应力  $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$ 、 $\tau_{xyi}$ 。利用下面式 (1) 和 (2) 即可求得对应条块底部的法向应力和切向应力  $\tau_{ni}$  (即该条块的正应力和剪应力, 见图 2)

$$\sigma_{ni} = \frac{1}{2} (\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) + \frac{1}{2} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) \cos 2\alpha_i + \tau_{xyi} \sin 2\alpha_i \quad (1)$$

$$\tau_{ni} = \frac{1}{2} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) \sin 2\alpha_i - \tau_{xyi} \cos 2\alpha_i \quad (2)$$

则可以通过式 (3)求得整个滑面各时刻的抗滑安全系数

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^m (c_i + \sigma_{ni} \tan \varphi_i) l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{ni} l_i} \quad (3)$$

式中  $l_i$ : 第  $i$  条块底面长度;  $\alpha_i$ : 条块底滑面法向与  $x$  轴的夹角;  $\varphi_i$ : 滑动面的摩擦系数;  $c_i$ : 滑动面的内聚力;  $m$ : 滑动块体条分数。

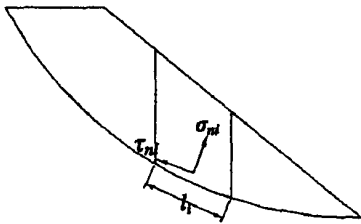


图 2 滑动面示意图  
Fig. 2 Sketch map of the sliding surface

3 工程实例分析

3.1 工程概况

金安桥水电站位于青藏高原东南侧滇西北新构造运动强烈活动部位,历史上距今最近发生的 1996-02-03 丽江大地震,震级为 7 级,震中烈度为度,震中距坝址约 45 km,对坝区最大影响烈度为度。

由于坝址区地震烈度高(基本烈度 度、设防烈度 度),坝址上游近坝左岸有一规模较大的崩塌堆积体,堆积体底面沿缓倾坡外的凝灰岩层形成台阶状,接触面风化强烈,有泥化现象,堆积体物质较松散,有架空现象,工程适应性差,对水工枢纽的布置、选择有较大影响,工程上非常关心堆积体边坡水库蓄水条件下的动力稳定性。崩塌堆积体典型剖面地质特征如图 3 对应各介质材料物理力学参数如表 1 所示,根据规范<sup>[7]</sup>,边坡介质材料的阻尼比取为 0.05。

输入的基岩水平地震加速度以设计院提供的时程曲线为依据进行采样。采集的水平地震加速度  $a_h$  时程曲线如图 4 所示,其中,峰值加速度按照金安桥边坡工程基本地震烈度 度考虑,则  $a_{hmax} = 0.185\text{ g} = 2.413\text{ m/s}^2$ ,地震历时 29.74 s,单位时间步长  $\Delta t = 0.02\text{ s}$  输入的基岩垂直向加速度  $a_v$  按水平加速度的 2/3 考虑。

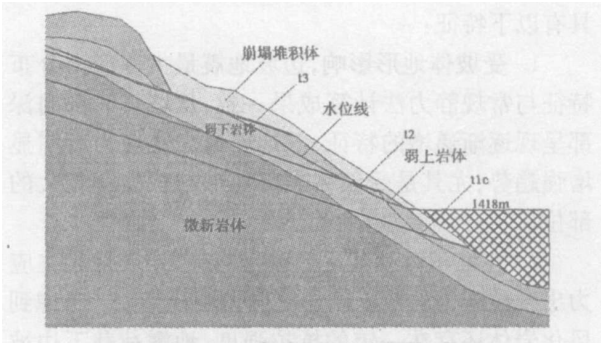


图 3 边坡正常蓄水工况剖面示意图  
Fig. 3 Section sketch of slope

表 1 不同材料物理力学参数  
Tab 1 Physical and mechanical parameters of different materials

编号	介质材料	重度 $\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	动弹模 $E_d$ (GPa)	泊松比 $\mu$	$c'$ (MPa)	$f'$
1	玄武岩 (微新)	28	13.5	0.25	0.9	1.25
2	玄武岩 (弱下)	28	13.5	0.26	0.65	1.10
3	玄武岩 (弱上)	27	8.25	0.27	0.4	0.80
4	堆积体	24	0.25	0.33	0	0.70
5	凝灰岩 $t_{1c}$	24	0.4	0.28	0.4	0.7
6	凝灰岩 $t_2$	24	0.4	0.28	0.09	0.50
7	凝灰岩 $t_3$	24	0.4	0.28	0.12	0.50
8	堆积体与基岩接触带	24	0.25	0.33	0.04	0.50

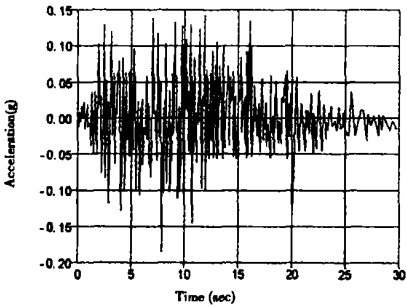


图 4 水平向地震加速度时程曲线  
Fig 4 Level seismic acceleration time history

3.2 边坡地震荷载作用效应及稳定性

限于篇幅,边坡关键部位的动位移、速度、加速度和动应力时程响应,本文未做进一步分析,在此仅讨论分析堆积体边坡蓄水工况地震作用下的主应力和加速度极值分布特征和规律(图 5~8)。

3.2.1 地震荷载作用下的动应力分布特征

分析表明,地震作用下边坡的主应力极值分布

具有以下特征:

1. 受坡体地形影响, 边坡地震最大主应力分布特征与常规静力法计算成果一致, 从坡体表部向深部呈现逐渐递增的特征, 但地震最大主应力有明显增强趋势, 尤其是受坡体表部地形起伏变化较大的部位。

2. 在堆积体及其下部风化岩体, 地震最小主应力出现拉应力的范围明显比静力法计算大。考虑到风化岩体还存在一定的抗拉强度, 地震荷载下边坡的拉破坏将主要发生在堆积体内部及附近的风化岩体中。

3. 在断层和凝灰岩夹层等不连续面附近, 边坡地震动应力有明显中断突变特征, 这主要与结构面力学参数显著低于其周围岩体所致。

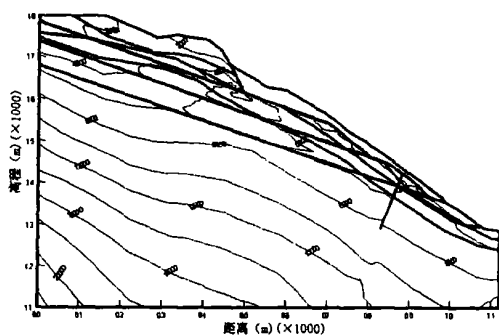


图 5 最大主应力极值  $\sigma_1$  (kPa) 等值线图

Fig. 5 Contour map of the major Stress extreme value

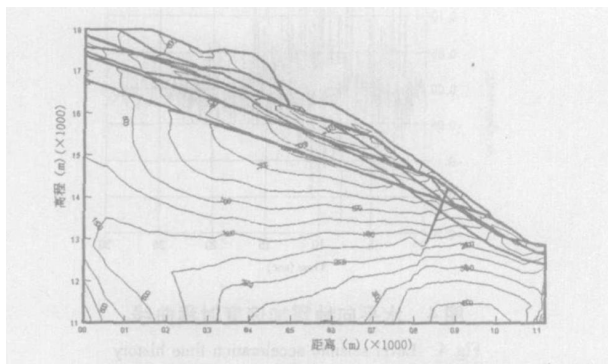


图 6 最小主应力极值  $\sigma_3$  (kPa) 等值线图

Fig. 6 Contour map of the minor Stress extreme value

### 3.2.2 地震荷载作用下的加速度分布特征

分析表明, 边坡的水平向和垂直向的相对加速度具有以下特征: 边坡从下至上, 水平加速度和垂直加速度递增, 即沿高程存在一定放大效应, 且在坡顶处相对加速度最大。在堆积体坡面形成极值中心, 由于堆积体变形参数很低, 在堆积体中的加速度变

化梯较大。地震荷载作用下的水平加速度极值一般在  $5.0 \sim 6.0 \text{ m/s}^2$ , 垂直加速度极值一般在  $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}^2$ 。

### 3.2.3 边坡动安全系数

不同滑动模式 (见图 2) 的稳定性计算成果见表 2 相应的动安全系数时程变化见图 9。计算成果表明, 边坡的整体稳定性均较高, 动力抗滑安全系数最小值 1.12 大于设计规定的控制标准 1.05。对于局部组合块体, 出现失稳概率 16% 的组合块体 (表 2 编号 4)。考虑到局部组合块体的规模较小, 即使在地震荷载作用下发生失稳下滑, 也不会产生较大的涌浪而对枢纽建筑的安全带来影响, 只需局部加固处理即可。

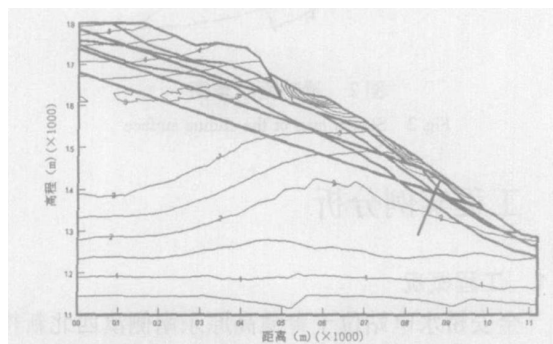


图 7 相对加速度极值  $a_x$  ( $\text{m/s}^2$ ) 等值线图 ( $\text{m/s}^2$ )

Fig. 7 Contour map of the relative acceleration extreme value on x-direction ( $\text{m/s}^2$ )

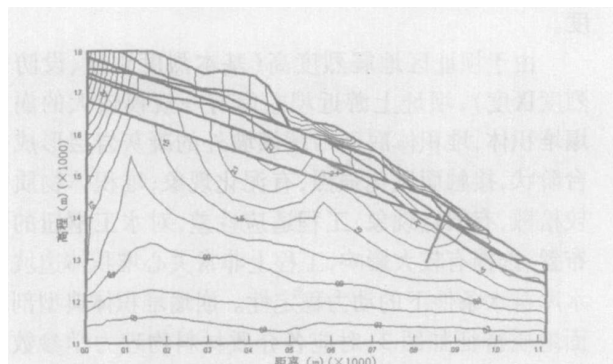


图 8 相对加速度极值  $a_y$  ( $\text{m/s}^2$ ) 等值线图 ( $\text{m/s}^2$ )

Fig. 8 Contour map of the relative acceleration extreme value on y-direction ( $\text{m/s}^2$ )

## 4 结 论

1. 边坡动力有限元分析时, 要全面真实地了解地震效应, 需采用地震时程分析法, 且水平边界应按阻尼边界 (不完全反射边界考虑), 材料参数应取动

力荷载条件下的力学参数。

2. 根据不同时刻对应的边坡应力状态, 按照有限元应力积分法获得的动安全系数评价边坡地震条件下的稳定性时, 还需结合边坡的动应力、加速度和放大系数的时空变化特征等进行综合评判。

表 2 不同滑动模式稳定性分析成果

Table1 Calculation results of stability for various combination failures

编号	滑动模式说明	地震初	最小值	最大值	平均值	失稳概率(%)
1	堆积体整体滑动, 滑动面为堆积体接触带、t3 t2和 t1c	1. 556	1. 120	2. 416	1. 560	0
2	局部滑动位于 β上部, 滑动面为堆积体接触带和 β	1. 793	1. 186	4. 484	1. 781	0
3	局部滑动介于 β和 α之间, 滑动面为堆积体接触带和 t2	1. 250	0. 834	1. 964	1. 247	6. 67
4	局部滑动介于 α和 t1c之间, 滑动面为堆积体接触带和 t1c	1. 148	0. 717	2. 378	1. 153	16. 00

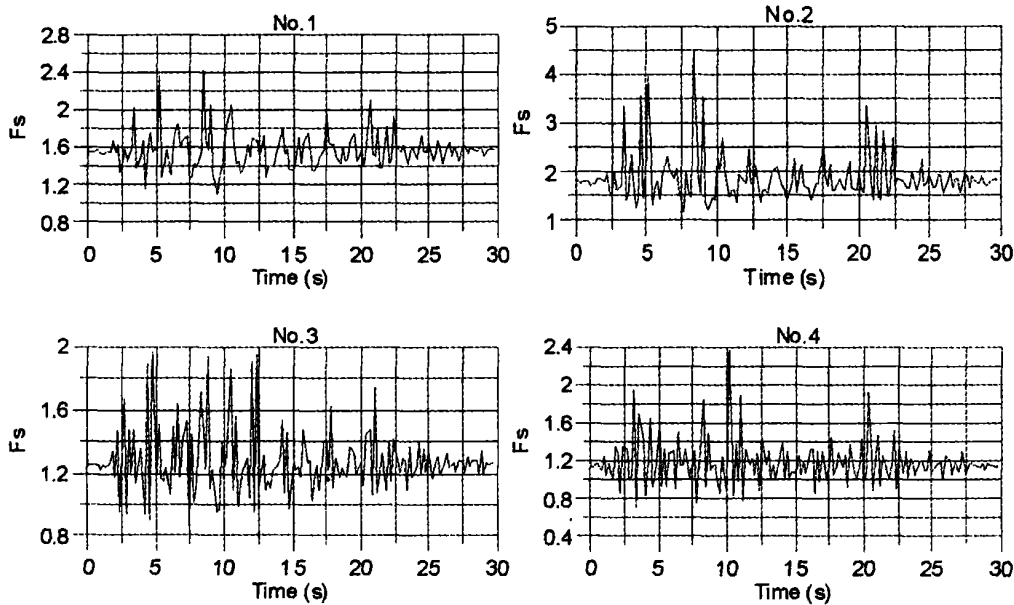


图 9 不同滑动模式稳定性系数时程变化

Fig 9 Time history curve of stability for various slides

参考文献 (References)

[ 1 ] Chen Ling-ling Chen Min-zhong Q ian Sheng-guo. Stability analysis of high-slope rocky slope under earthquake loads[ J]. *Journal of Yangtze River Science Research Institute*, 2004, 21 (1): 33~ 35 [陈玲玲, 陈敏中, 钱胜国. 岩质陡高边坡地震动力边坡稳定分析 [ J]. 长江科学院院报, 2004 21 (1): 33~ 35]

[ 2 ] TangHong-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 [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]

[ 3 ] 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 [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]

[ 4 ] Bo Jing-shan XuGuo-dong Jing Li-ping. Seismic response and dynamic stability analysis of soil slopes[ J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21 (3): 116~ 120 [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]

[ 5 ] Qi Shen-wen. The analysis and application of slope dynamic response [ D]. Beijing Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences 2002. [祁生文. 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, 2002. ]

[ 6 ] Zhu Bo-fang The Finite Element Method Theory and Application (the 2nd Edition) [ M]. Beijing China Publication of Water Resources and Hydropower [朱伯芳. 有限单元法原理与应用 (第二版) [ M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998 ]

[ 7 ] Specifications for seismic design of hydraulic structures ( SL203-97) [ S]. 水工建筑物抗震设计规范 (SL203-97) [ S].

# Analysis on Time History Dynamic Response of a Rockfall-type Slope under High Earthquake Intensity

ZHOU Yongjiang<sup>1</sup>, WANG Kaiyun<sup>2</sup>, FU Wenxi<sup>1</sup>, HE Jiangda<sup>2</sup>

(1. Sichuan Highway Design and Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract** The minimum stability safety factor occurs at one moment during the process of earthquake for a engineering slope. It is unsuitable to evaluate the dynamic stability of the actual engineering slope under the seismic load by using this value. In this paper the basic methods to evaluate the dynamic stability of the engineering slope under earthquake loads and their differences are analyzed first. The basic principles and computational process of seismic time-dependent dynamic response are introduced. The key problems such as boundary conditions and material dynamic parameters are pointed out. And the stability safety factor of the engineering slope based on FEM stress method is built up. Then, on the basis of seismic time-dependent dynamic analysis of a reservoir slope of Jinnangqiao hydropower station, adopting the statistical analytical method, the dynamic extremum change (including the major stress extreme value, the minor stress extreme value, the relative acceleration extreme values on horizontal and vertical direction *et al.*) on the computational model are got. Then, adopting FEM stress method, the dynamic stability safety factor change are got also. According to the dynamic response feature and stability safety factor change, the dynamic stability of the example slope is evaluated reasonably.

**Key words** high earthquake intensity; dynamic response; seismic time history analysis; dynamic stability