

# 地震动特性对岩质边坡安全系数的影响

侯红英<sup>1,2</sup>, 郭德存<sup>3</sup>, 刘红帅<sup>4</sup>

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 中国水电工程顾问集团公司, 北京 100120; 3. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 4. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 基于显式波动有限元—极限平衡法, 探讨了可靠度动力安全系数的可信度, 研究了地震动峰值、频谱特性对岩质边坡安全系数的影响。研究表明, 可靠度动力安全系数改变了以往稳定性评价指标与风险评价脱钩的做法, 评价结果更为科学合理; 地震动峰值基本不改变安全系数时程曲线的形状, 但对安全系数的概率分布和标准差影响显著, 并且与边坡安全系数呈负相关关系; 地震动频谱特性对边坡可靠度动力安全系数的影响最大达到 25%, 不应忽视。

**关键词:** 岩质边坡; 动力安全系数; 地震动特性; 地震动峰值; 地震动频谱特性

## Effects of Input Ground Motion Characters on Safety Factor of Rock Slope

Hou Hongying<sup>1,2</sup>, Guo Decun<sup>3</sup>, Liu Hongshuai<sup>4</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. HydroChina Corporation, Beijing 100120, China; 3. Hydropower and Water Resources Planning & Design General Institute, Beijing 100120, China; 4. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Based on explicit fluctuations finite element—limit equilibrium method, the credibility of dynamic safety factor of reliability is explored, and the effects of peak and frequency of input ground motion on dynamic stability of rock slope are studied. The results show that, (a) the reliability dynamic safety factor is more reasonable, and can change the practice of decoupling the stability evaluation index and risk assessment, (b) the peak of input ground motion does not alter the shape of time history curve of safety factor, but significantly influences the probability distribution and standard deviation of safety factor, and has a negative relationship with safety factor of slope, and (c) the effect of frequency of input ground motion on reliability dynamic safety factor of rock slope can reach a maximum degree of 25%.

**Key Words:** rock slope; dynamic safety factor; character of input ground motion; peak of input ground motion; frequency of input ground motion

中图分类号: TU457; P315.3

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2012)10-0017-04

## 0 引言

目前, 国内实际岩质边坡工程地震稳定性评价通常采用拟静力法和数值分析法。拟静力法因自身的局限性存在若干不足之处; 数值分析法因其具有能够较好地考虑地震动的特性和边坡岩土体的动力特性等优点日益得到重视和推广, 以有限元法应用最广。有限元法能够给出地震过程中边坡安全系数随时间的动态变化过程, 掌握边坡安全系数的变化范围。但是, 如何用边坡安全系数时程来评价边坡的稳定性呢? 作者认为, 给出一个与静力安全系数

相当的评价指标, 直接评价边坡的地震稳定性程度, 以此作为边坡是否加固的标准, 具有重要的工程应用价值。国内学者尝试探索用边坡稳定性评价指标来表征地震作用下边坡的动力稳定性, 提出的评价指标有最小安全系数、动力等值线安全系数、最小

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40702055); 中国博士后基金(20080430884)

作者简介: 侯红英(1974—), 女, 河北遵化人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水电站工程地质咨询工作。

平均安全系数、平均安全系数、强度折减动力安全系数和可靠度动力安全系数。本文采用波动有限元—极限平衡法,研究了可靠度动力安全系数的可信度、地震动峰值和频谱特性对岩质边坡安全系数的影响。

## 1 可靠度动力安全系数

地震动时程被认为是随机过程,地震动作用下边坡动力安全系数也是一随时间变化的随机变量。以往的边坡稳定性评价指标的选取方法忽略了随机性的特性。可靠度动力安全系数的定义为

$$F_R = \mu_F - \beta \sigma_F \quad (1)$$

式中,  $F_R$  为边坡可靠度动力安全系数;  $\mu_F$  为安全系数均值;  $\beta$  为可靠性指标;  $\sigma_F$  为标准差。其中,  $\mu_F =$

$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N F(t_i)$ ,  $\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F(t_i) - \mu_F)^2}$ ,  $N$  为边坡安全系数时程离散点总数;  $F(t_i)$  为第  $i$  个时刻的边坡安全系数。

式(1)给出了考虑可靠度的边坡动力安全系数的确定方法,这种方法把安全系数的确定和风险分析紧密结合起来。用概率的观点来研究边坡动力安全系数的可靠性时,综合考虑可接受的风险和经济效果,只要可接受失效概率小于可以接受的程度,就认为所确定的边坡动力安全系数是可靠的。

当  $F(t_i)$  的概率分布服从正态分布时,  $\beta$  便和与可接受的失效概率  $P_f$  有一一对应的关系,具体参见有关文献[8]。

## 2 计算模型

本文以典型的均质岩质边坡为例,只考虑垂直坡面的水平向地震动的影响,将其简化为二维平面应变问题。对模型区域范围采用四边形4节点等参单元进行离散,并假定滑动面为折线形,即从边坡坡脚斜向上的单元对角线(由节点 P982 至坡脚点的折线)。边坡网格划分与滑面示意图见图1。静力计算采用 ANSYS 软件,左、右边界条件采用水平约束,底边界采用竖向约束;动力计算采用经过验证的程序 WPA2D,底边界和侧边界均采用二阶透射公式,其他边界为自由边界。地震动从底边界输入,并采用波场分离技术,即总波场分为入射波场和散射波场,散射波场由二阶透射公式计算得到。

模型参数直接选用经验参数,具体为:容重  $\gamma = 21\ 560\ \text{kN/m}^3$ ,弹性模量  $E = 1.375\ \text{GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.25$ ,阻尼比  $\zeta = 0.005$ 。滑动面抗剪强度参数粘聚力  $c = 80.0\ \text{kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$ 。时间步长按稳定性要求取  $\Delta t = 0.000\ 2\ \text{s}$ 。地震动输入采用 1940 年 5 月

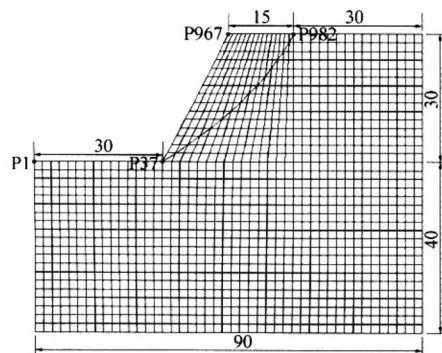


图1 边坡网格划分与滑面示意(单位: m)

18 日美国 IMPERIAL 山谷地震在 EL-Centro 台站记录到的南北向水平加速度记录,加速度时程见图2。采用 ORIGIN7.0 软件进行滤波 2 次积分(滤波下限 0.01 Hz,上限 25 Hz),得到相应的位移时程作为地震动输入,见图3。

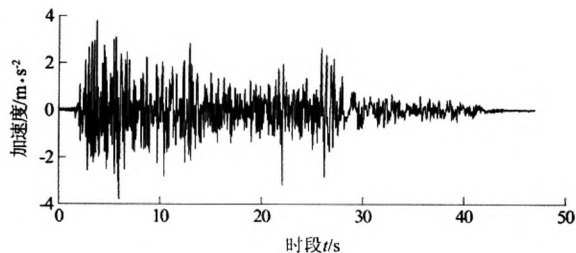


图2 加速度时程

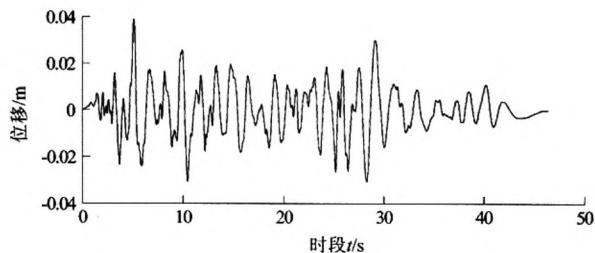


图3 位移时程

鉴于可接受的边坡判断失效概率目前尚无公认的标准。本文综合已有的相关成果,将判断失效概率确定为 0.01,其所对应的可靠性指标  $\beta$  为 2.33。安全系数以 0.01 为间隔,将安全系数的最小值和最大值分成等间隔区间,统计得到安全系数的频度分布可近似看作概率分布。

## 3 地震动峰值对边坡安全系数的影响

为了研究地震动峰值对岩质边坡稳定性的影响,对模型中的加速度时程按比例对峰值进行调整,不改变其地震动频谱特性和持时,调整方案为:输入地震动峰值依次调整为 EL-Centro 波峰值的 100%、90%、...、10%,分别用 A100、A90、...、A10 表

示,并将其转化为位移时程作为输入地震动(IE)。表 1 给出不同峰值地震动作用下的边坡平均安全系数( $F_M$ )、标准差( $\sigma_s$ )、可靠度动力安全系数( $F_R$ )和拟静力安全系数( $F_p$ )。从表 1 可以看出:①随着输入地震动峰值的增大,边坡安全系数的标准差同时增大,边坡可靠度动力安全系数和拟静力安全系数却随之减小,这与已有的定性认识相一致;②随着输入地震动峰值的增大,边坡平均安全系数有逐渐增大的趋势,若采用边坡动力平均安全系数作为边坡稳定性评价指标,违背物理常识,显然不合适。

表 1 不同峰值地震动作用下边坡安全系数

| IE   | $F_M$ | $\sigma_s$ | $F_R$ | $F_p$ |
|------|-------|------------|-------|-------|
| A100 | 1.58  | 0.24       | 1.02  | 1.25  |
| A90  | 1.58  | 0.21       | 1.09  | 1.28  |
| A80  | 1.57  | 0.18       | 1.15  | 1.31  |
| A70  | 1.57  | 0.16       | 1.20  | 1.34  |
| A60  | 1.57  | 0.13       | 1.27  | 1.36  |
| A50  | 1.56  | 0.11       | 1.30  | 1.39  |
| A40  | 1.56  | 0.09       | 1.35  | 1.43  |
| A30  | 1.56  | 0.06       | 1.42  | 1.46  |
| A20  | 1.56  | 0.04       | 1.47  | 1.49  |
| A10  | 1.56  | 0.02       | 1.51  | 1.52  |

图 4 和图 5 为 A100 和 A50 作用下边坡安全系数时程和分布概率。从图 4 可以看出,峰值不同而频谱特性相同的地震动作用下,边坡的安全系数时程图形基本相同,仅安全系数变化范围随地震动输入峰值增大而增大。从图 5 可以看出,不同峰值地震动输入下,其静力安全系数分布概率最大,基本上以静力安全系数为中心,近似呈正态分布。其主要原因是地震动以 0 为中心,正负随机交替所致;随着地震动峰值的增大,边坡安全系数的变化幅度增大,而静力安全系数分布概率变小。

4 地震动频谱特性对边坡安全系数的影响

以图 2 中的 EL-Centro 波的反应谱为目标谱,采用三角级数法人工合成了 10 条地震动作为随机相位 Rand,分别用 Rand1、Rand2、…、Rand10 表示。离散时间间隔  $\Delta t=0.02$  s,合成地震动强度包络线参数为:  $T_1=3$  s、 $T_2=3$  s、 $T_3=3$  s,总持时为 40.48 s。图 6 为 Rand1 和 Rand2 人工合成加速度时程。

表 2 为峰值相同而频谱不同的地震动输入下边坡  $F_M$ 、 $\sigma_s$ 、 $F_R$  和最小安全系数  $F_{MN}$ 。从表 2 可以看出,峰值相同而频谱不同的地震动输入下,边坡安全系数标准差最大为 0.24,最小为 0.12,相差达 100%;可靠度动力安全系数最大为 1.30,最小为 1.04,相差达 25%;边坡最小安全系数最大为 1.17,

最小为 0.98,相差达 19%。

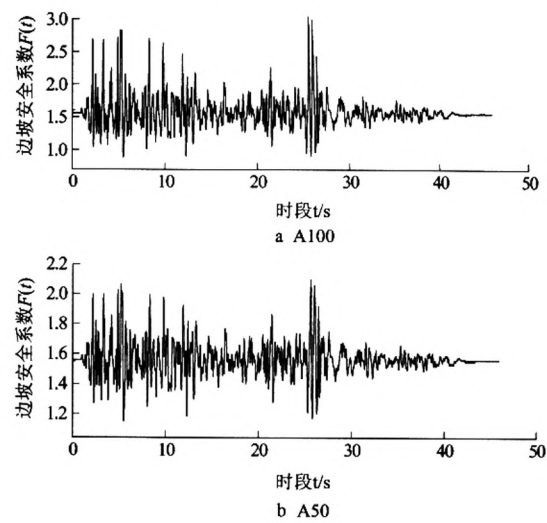


图 4 边坡安全系数时程

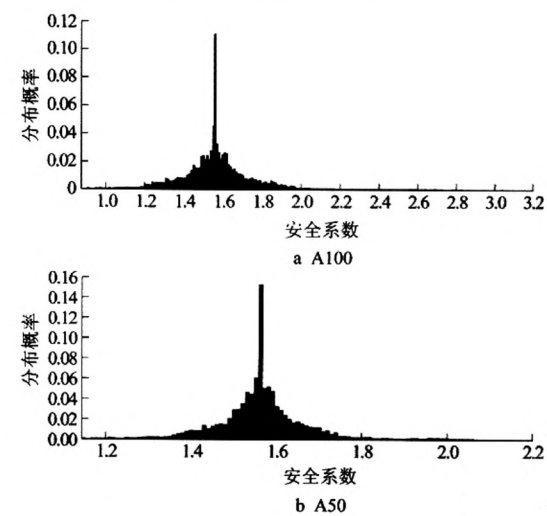


图 5 边坡安全系数概率分布

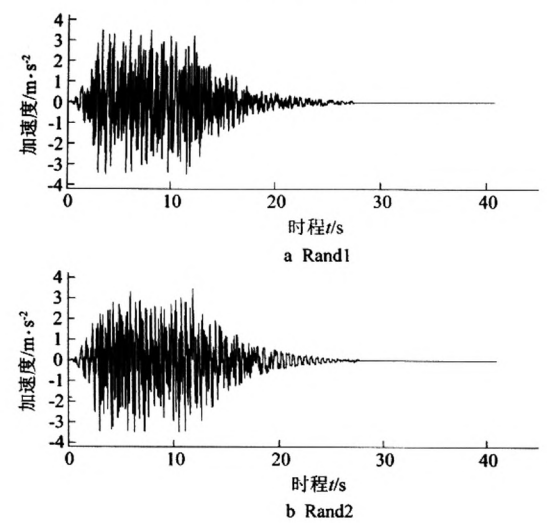


图 6 人工合成加速度时程

表2 不同频谱地震动作用下边坡安全系数

| Rand | $F_M$ | $\sigma_s$ | $F_R$ | $F_{MIN}$ |
|------|-------|------------|-------|-----------|
| R1   | 1.58  | 0.18       | 1.17  | 1.10      |
| R2   | 1.60  | 0.23       | 1.06  | 1.01      |
| R3   | 1.60  | 0.24       | 1.04  | 0.98      |
| R4   | 1.57  | 0.16       | 1.21  | 1.11      |
| R5   | 1.57  | 0.15       | 1.22  | 1.09      |
| R6   | 1.57  | 0.15       | 1.22  | 1.10      |
| R7   | 1.60  | 0.24       | 1.04  | 1.00      |
| R8   | 1.60  | 0.24       | 1.04  | 1.02      |
| R9   | 1.57  | 0.12       | 1.30  | 1.17      |
| R10  | 1.58  | 0.18       | 1.16  | 1.08      |

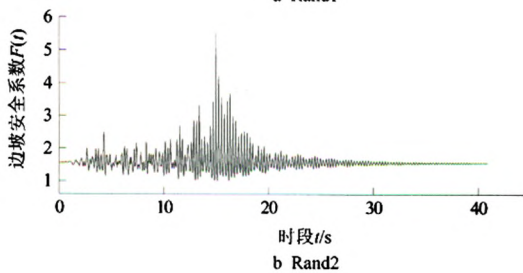
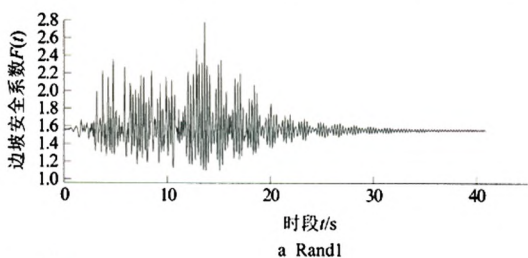


图7 边坡安全系数时程

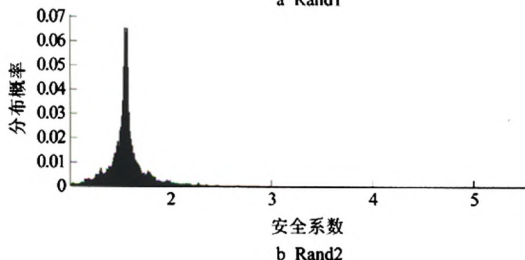
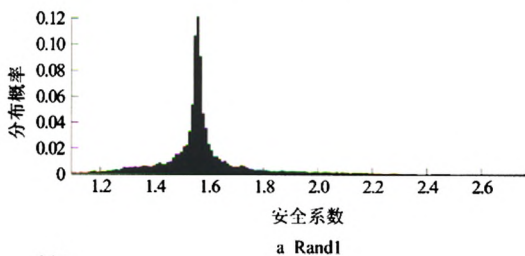


图8 安全系数概率分布

图7和图8分别为Rand1和Rand2输入下的边坡安全系数时程及安全系数概率分布。从图7和图8可以看出,峰值相同而频谱特性不同的地震动输入下,边坡安全系数时程曲线完全不同,变化幅度

明显不同,概率分布变化幅度明显。由此可见,输入地震动频谱特性对边坡稳定性的影响显著。在实际计算中,必须考虑输入地震动频谱特性的影响。

## 5 讨论

边坡可靠度动力安全系数是建立可靠性理论基础上的,与刘汉龙等(2003)的研究成果相比,理论基础相对严密,在一定程度上减少了经验性的成分。地震动峰值对边坡安全系数的影响规律与李海波等(2009)的研究成果基本相同。对于地震动频谱特性,本文所采用的是基于相同的目标谱的地震动,包含多种频率成分,边坡可靠度动力安全系数相差最大达25%;而李海波等采用的是谐波,为单一频率,在低频部分(0.1~5.0 Hz)安全系数随频率增加增大幅度较大,在高频部分(5.0~20.0 Hz)则变化幅度较小,地震动卓越频带往往集中在低频部分,由此间接反映出两者的成果大体一致。

## 6 结语

(1) 可靠度动力安全系数作为边坡地震稳定性指标,克服了平均安全系数违背物理常识、拟静力安全系数较粗糙的不足,使评价结果更科学合理,并且改变了以往稳定性评价指标与风险评价脱钩的做法,符合工程可靠度设计的发展方向。

(2) 地震动峰值基本不改变安全系数时程曲线的形状,但对安全系数的概率分布和标准差影响显著,且与边坡安全系数呈负相关关系。边坡可靠度动力安全系数随地震波峰值的增大而减小,其减小的幅度随地震波峰值的增大而增大。

(3) 地震动频谱特性对边坡安全系数影响显著。峰值相同而频谱特性不同的地震动输入作用下,边坡安全系数标准差相差最大达100%,可靠度动力安全系数相差最大达25%,边坡最小安全系数相差最大达19%。

## 参考文献:

- [1] AI-Homoud A S, Tahtamoni W W. Reliability analysis of three-dimensional dynamic slope stability and earthquake-induced permanent displacement[J]. Soil dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(2): 91-114.
- [2] 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): 553-560.
- [3] Seed H B. Stability of earth and rockfill dams during earthquakes [C]//Embankment-dam Engineering(Casagrand Volume). New York: John Wiley and Sons, Inc., 1973.
- [4] 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): 117-120.
- [5] 赵剑明, 陈宁, 常亚屏. 地震作用下土石坝 (下转第66页)



事故门控制单元组成;承船厢 LCU 子站由一个本地站、4 个船厢液压站控制单元、船厢上游卧倒门控制单元、船厢下游卧倒门控制单元和空压密封装置控制单元组成;驱动 LCU 子站由一个本地站、制动远程 IO 子站、均衡远程 IO 子站、充水阀控制单元、泄水阀控制单元和下游快速事故门控制单元和浮筒锁定控制单元等组成;公用 LCU 子站由一个本地站和多个辅机设备控制单元组成。

4 个 LCU 子站的主要设备(CPU、电源等)都采用冗余配置,并都采用 LCU 直接上网方式与上位机通讯。

## 5 控制系统实现

### 5.1 计算机主控层的实现

升船机上位监控软件在美国 WonderWare 公司的 InTouch10.1 组态环境下自主开发,具有访问权限设置及安全闭锁、升船机系统运行控制与监视、数据采集及数据库管理、故障报警与事故追忆、报表管理及打印、机构动作超时保护、专家提示及事故指导、双机热备、各子站时间同步、网络状态诊断、故障工况仿真和系统自诊断等功能。

数据服务器选用美国 Microsoft 公司的 SQL Server2008 数据库管理软件,客户端软件通过 C++ 语言自主开发而成,该软件可以实现历史运行数据查询、工作报表生成及打印等功能。

### 5.2 现地控制系统的实现

水力式升船机现地控制系统主要由上闸首、承船厢、驱动和公用 4 个 LCU 子站和各子站下辖的相关设备电气控制单元。

#### 5.2.1 现地子站的构成

上闸首、承船厢、驱动和公用 LCU 子站的构成基本相同,网络结构如图 2 所示。可编程控制器(PLC)均选用施耐德电气公司生产的 Modicon Quantum Unity 热备系统产品,PLC 通过双机热备实现控制过程无扰动切换,通过冗余远程 IO 网络(图中 RIO 网络)实现与本站 IO 的通讯,通过冗余 NOE 模块实现与主干光纤环网的数据交换,通过 MB+网络实现和本站所控设备控制单元的通讯。另外,每个 LCU 子站均设有 10 英寸全彩色人机交互界面,人机界面通过 RS485 总线实现和主、备 CPU 的实时通讯,在 CPU 从主用切换到备用时,人机界面与 PLC 的通讯不中断。

#### 5.2.2 设备控制单元的构成

设备控制单元主要负责升船机现地设备的状态监测、流程控制、故障保护及与上级 LCU 子站的的数据交换。PLC 均选用施耐德公司生产的 Modicon

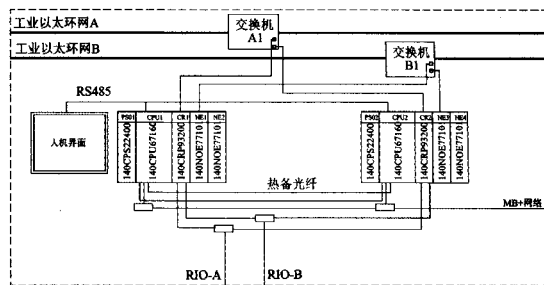


图 2 现地 LCU 子站网络结构示意图

Premium Unity 系列产品,CPU 通过 MB+网络实现和上级 LCU 子站的通讯,通过 RS232 网络实现和本地人机界面的数据通讯,通过人机界面可以实现对现地设备的状态监视和控制操作。

## 6 结 语

该电气控制系统已经在景洪水电站水力式升船机工程上得到成功验证,目前已经完成了现场的单机调试、分系统调试和无水联合调试等阶段的各项调试工作,实践证明本系统完全满足水力式升船机运行监控的要求,网络层次分明、站点设置合理、配置性价比高、性能稳定可靠。

## 参考文献:

- [1] 张蕊,章晋雄,吴一红,等.水力浮动式升船机输水系统仿真分析[J].水利学报,2007,38(5):624-629,636.
- [2] 刘金堂,曹以南,凌云,等.景洪水力式升船机设计研究[J].水力发电,2008,34(4):43-45.
- [3] 易春辉,雷志宏.岩滩升船机主提升电气控制系统应用与研究[J].红水河,1999(4):42-45.
- [4] 张生权.高坝洲升船机电力拖动与计算机监控系统设计[J].三峡大学学报(自然科学版),2002,24(4):213-216.
- [5] 石晓俊,廖沛霖,易春辉.高坝洲升船机计算机监控系统上位机系统设计与实现[J].水电自动化与大坝监测,2006(3):15-17.
- [6] 石晓俊,易春辉,刘锦.景洪水电站水力式升船机事故工况分析及应对策略研究[J].水力发电,2011,37(10):69-72.

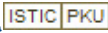
(责任编辑 高 瑜)

~~~~~

(上接第 20 页)边坡抗滑稳定性分析[C]//环境岩土工程理论与实践.上海:同济大学出版社,2002.

- [6] 吴兆营,薄景山,刘红帅,等.岩体边坡地震稳定性动安全系数分析方法[J].防灾减灾工程学报,2004,24(3):237-241.
- [7] 李海波,肖克强,刘亚群.地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2385-2394.
- [8] 刘红帅,唐立强,薄景山,等.确定岩质边坡地震安全系数的新方法[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(9):1007-1011.
- [9] 陈祖煜.土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

(责任编辑 杨 健)

作者: [侯红英](#), [郭德存](#), [刘红帅](#), [Hou Hongying](#), [Guo Decun](#), [Liu Hongshuai](#)  
作者单位: [侯红英, Hou Hongying \(西南交通大学, 四川成都610031; 中国水电工程顾问集团公司, 北京100120\)](#), [郭德存, Guo Decun \(水电水利规划设计总院, 北京, 100120\)](#), [刘红帅, Liu Hongshuai \(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨, 150080\)](#)  
刊名: [水力发电](#)   
英文刊名: [Water Power](#)  
年, 卷(期): 2012, 38(10)

## 参考文献(9条)

1. [Al-Homoud A S; Tahtamoni W W](#) Reliability analysis of three-dimensional dynamic slope stability and earthquake-induced permanent displacement 2000(02)
2. [刘汉龙; 费康; 高玉峰](#) 边坡地震稳定性时程分析方法 2003(04)
3. [Seed H B](#) Stability of earth and rockfill dams during earthquakes 1973
4. [薄景山; 徐国栋; 景立平](#) 上边坡地震反应及其动力稳定性分析 2001(02)
5. [赵剑明; 陈宁; 常亚屏](#) 地震作用下土石坝边坡抗滑稳定性分析 2002
6. [吴兆营; 薄景山; 刘红帅](#) 岩体边坡地震稳定性动安全系数分析方法 2004(03)
7. [李海波; 肖克强; 刘亚群](#) 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析 2007(12)
8. [刘红帅; 唐立强; 薄景山](#) 确定岩质边坡地震安全系数的新方法 2009(09)
9. [陈祖煜](#) 土质边坡稳定分析-原理@方法@程序 2003

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_slfd201210005.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_slfd201210005.aspx)