

文章编号: 1673-9469(2018)02-0031-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.007

## 基于矢量和法的库水位下降边坡稳定性研究

郭子敬

(上海交通大学 船舶海洋与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了研究库水位的下降对高陡边坡稳定性及变形的影响,以锦屏一级水电站左岸边坡为例,基于饱和渗流理论,以左岸坝头滑移破坏模式为研究对象,利用矢量和稳定性评价方法研究不同库水位下降速度对锦屏一级电站左岸边坡的稳定性影响规律。研究表明:当库水位以1 m/d的速度由1 880 m高程下降至1 800 m高程时,左岸坝头滑移破坏模式的安全系数由1.214降低到1.147,且安全系数随着库水位下降趋于稳定,而当库水位下降速度达到2 m/d时,安全系数的降低速度随着库水位的下降逐渐加剧,当库水位达到1 800 m高程时,安全系数降至1.052,左岸坝头滑移破坏模式接近临界状态;库水位下降条件下坡体最大位移处发生在坝头滑移破坏模式潜在滑动面的剪出口位置。

**关键词:** 锦屏一级水电站; 库水位变化; 边坡稳定; 安全系数; 边坡位移

**中图分类号:** TV62

**文献标识码:** A

## Study on slope stability of reservoir water level falling based on Vector-Sum FoS Method

GUO Zijing

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper is to study the influence of reservoir water level changes on the stability and deformation of steep slopes. Taking the left-bank slope of Jinping hydropower station as an example, based on the saturated seepage theories, the seepage is calculated under the changes of water level. In addition, the factor of safety of the slope is worked out with the Vector-Sum FoS Method during the seepage. New findings are as follows: when the reservoir water level has a rate of 1m/d from the elevation 1880m to 800m, the safety factor of dam on the left bank of the head slip failure mode is reduced from 1.214 to 1.147, and the safety factor approaches a determined value as the water level tends to be stable. When the drawdown speed reaches 2m/d, the safety factor decreases more quickly; The maximum displacement of the slope is located at the shear outlet position of the potential sliding surface of the slip failure mode at the dam.

**Key words:** Jinping-I Hydropower Station; water level change; slope stability; safety factor; slope displacement

为了满足我国经济发展对能源的需求,加快西南区域水能资源的开发是解决能源需求问题、推进清洁能源的一项重要战略措施<sup>[1]</sup>。在大型水利水电工程建设完成后的运行期,水库两岸的坡体将不断受到库水位涨落的影响。如果处理不当,有可能导致滑坡的发生从而影响到水电站的运行。研究表明,

库水位的下降是影响边坡稳定的重要因素。目前主要通过实验或者数值模拟的方法对这一问题进行研究<sup>[2-6]</sup>。过去的研究较少考虑库水位下降速度对高陡边坡稳定性的影响,且多基于强度折减的原则采用极限平衡法和有限元法来评价边坡的稳定性。葛修润<sup>[7]</sup>认为强度折减法是一种人为设定的不真实的虚

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB013505)

作者简介: 郭子敬(1993-),男,湖北黄冈人,硕士,主要从事岩土力学方面的研究工作。

拟状态,不能很好地模拟坡体稳定的真实情况。为了更好地研究库水位变化对水利水电工程高陡边坡稳定性的影响,本文引入矢量和分析法,基于饱和渗流理论,以锦屏一级水电站左岸边坡为例,利用COMSOL Mutiphysics建立左岸边坡三维有限元数值模型,从位移和安全系数两个方面研究潜在滑移体在库水位下降时的稳定性演化规律。可为大型水利水电工程高陡边坡优化设计、安全施工和运行提供参考。

### 1 三维矢量和稳定性评价方法

矢量和法中将潜在滑移面上所有点极限抗滑剪力合力矢方向的反方向定义为整体下滑趋势方向,可表达为

$$\hat{d} = \frac{-\int_S (c - \sigma_m \tan \varphi) \hat{d}_r dS}{\|\int_S (c - \sigma_m \tan \varphi) \hat{d}_r dS\|} \quad (1)$$

其中  $\hat{d}_r$  为潜在滑面  $S$  上任一点的抗滑剪应力方向,取为整体下滑趋势方向在该点切平面上投影方向的反方向。

定义  $\sigma_s$  为滑面  $S$  上任一点的应力张量,则任一点的法向应力  $\sigma_n$  和切向应力  $\sigma_\tau$  为:

$$\sigma_n = (\sigma_s \cdot \hat{n}) \hat{n} \quad (2)$$

$$\sigma_\tau = \sigma_s - \sigma_n \quad (3)$$

则潜在滑面上的抗滑力合力在下滑趋势反向上的投影可表示为

$$R = \int_S \sigma_s' \cdot (-\hat{d}) ds \quad (4)$$

上式中最大抗滑应力矢量

$$\sigma_s' = \sigma_\tau' + \sigma_n' \quad (5)$$

其中最大抗剪力

$$\sigma_\tau' = -(c - \sigma_n \tan \varphi) \hat{d}_r \quad (6)$$

根据作用力与反作用力的关系,抗滑法向应力

$$\sigma_n' = -\sigma_n \quad (7)$$

潜在滑面上的下滑力合力在下滑趋势上的投影

可表示为

$$T = \int_S (\sigma_s' \cdot \hat{d}) ds \quad (8)$$

最终得到矢量和法安全系数为

$$K = \frac{R}{T} = \frac{\int_S (\sigma_s' \cdot (-\hat{d})) ds}{\int_S (\sigma_s' \cdot \hat{d}) ds} \quad (9)$$

## 2 锦屏一级水电站左岸边坡概况

### 2.1 地质模型及结构面之间的关系

模型以大坝为中心,同时考虑雅砻江两岸边坡。由于左岸边坡的地质情况复杂,以左岸边坡为主要

研究对象。模型顺河向以大坝为中心,两侧边界距大坝均为500m,总长度1000m;横河向以河流为中心,两侧边界各距中心900m,总长度1800m;模拟高程从1300m至2700m,总模拟高度为1400m。坝区岩石主要由普通大理岩、角砾状大理岩、变质砂岩、粉砂质板岩、绿片岩及煌斑岩脉组成。主要涉及结构面包括煌斑岩脉X、断层f2、f5、f8和f42-9、层间挤压错动带和深部裂隙SL44-1,其中主要断面的位置关系如图1所示。

### 2.2 边界条件

根据锦屏一级电站边坡水文地质情况的描述<sup>[8]</sup>,边坡内部的地下水位与河谷内河水位基本一致,边界条件的情况如下:模型底部设置为不透水边界,上游边界的地下水位高度与库水位高度保持一致,下游边界地下水位保持与下游水位相同,为1640m,河谷两侧边界的地下水位按线性关系由上游边界过渡到下游边界,大坝及最高蓄水高程1880m以下开挖面由于进行防水处理,设置为不透水边界,各边界条件设置情况如图2所示。假设地下水渗流过程符合Darcy定律。本文主要研究库水位下降对边坡稳定性的影响,所以在计算过程中仅考虑上游坡体。

### 2.3 失稳模式

根据周钟等<sup>[9]</sup>研究,锦屏一级水电站左岸坝头变形拉裂岩体变形特征较为明显,但在地貌上没有明显的边界。在天然状态下左岸坝头变形拉裂岩体的最大可能整体失稳模式可归为楔型体滑移破坏模式,下文中统一简称为“左岸坝头滑移破坏模式”,所在位置如图3所示。为了研究库水位下降对左岸坝头滑移破坏模式附近的变形的影响,选取通过该

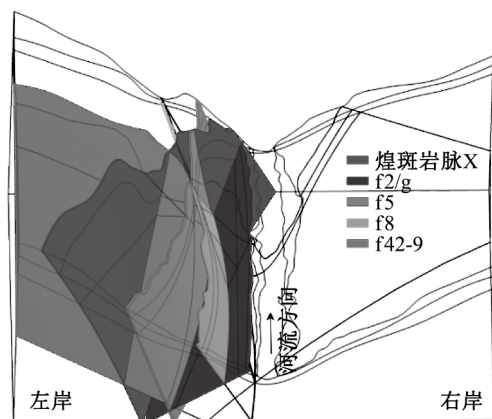


图1 各结构面之间的关系

Fig.1 The position relation between each structural plane

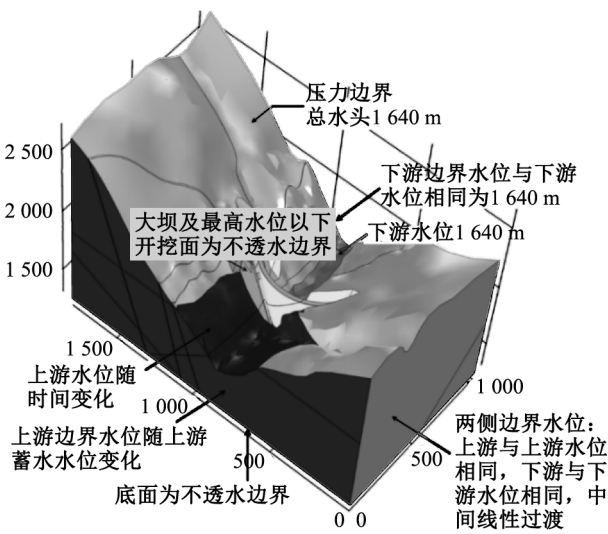


图 2 蓄水模拟数值模型边界条件

Fig.2 Boundary condition of simulated numerical model of water storage

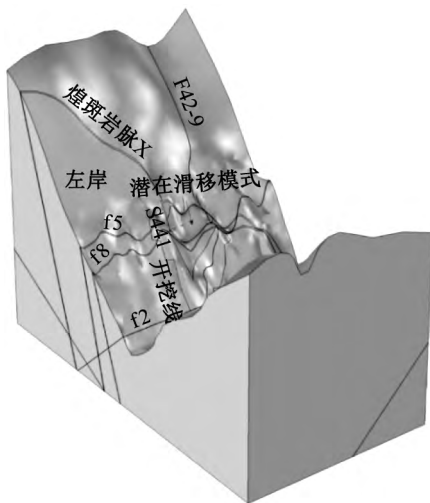


图 3 左岸坝头滑移破坏模式的位置

Fig.3 The position of slip failure mode in the left bank

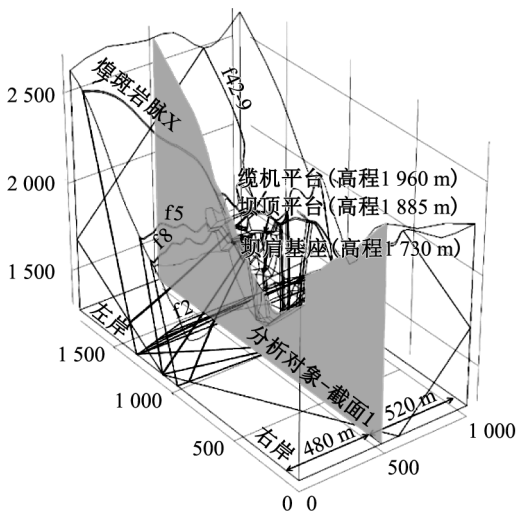


图 4 用于分析的截面 1 所在位置

Fig.4 The location of the section 1 for analysis

滑移破坏模式中心的横河向截面作为研究对象，其位置如图 4 所示，为了方便，后文中称之为截面 1。

### 3 库水位下降过程中边坡安全稳定性的演化

#### 3.1 库水位下降过程中的安全系数变化规律

锦屏一级拱坝正常蓄水位 1 880 m，死水位 1 800 m，电站运行期，库水位将在 1 880~1 800 m 之间涨落。分别按 1 m/d 和 2 m/d 的速度计算库水位由 1 880 m 下降至 1 800 m 的水位变化过程对边坡安全稳定性的影响。

图 5 为两个降水速度下不同库水位时的安全系数。从图中可以看出，在库水位以 1 m/d 的速度下降时，左岸坝头滑移破坏模式的安全系数随着库水位的下降而降低，并随着库水位的下降而趋于平缓，在库水位降低到 1 800 m 时，安全系数由 1.214 降低至 1.147，降幅为 5.52%。

当库水位以 2 m/d 的速度下降时，安全系数的降低速度明显比 1 m/d 时快，并且安全系数的降低在一定高度(图中显示为 1 864 m)时，安全系数的下降速度进一步加快，整体而言安全系数与库水位高度几乎成线性关系。最终库水位由 1 880 m 下降至 1 800 m 时，安全系数由 1.214 降低至 1.052，降幅为 13.34%。

无论库水位下降速度为 1 m/d 还是 2 m/d，在库水位下降的初始阶段，安全系数的变化速度接近，而在 1 m/d 的情况下，安全系数的变化速度逐渐减小并趋于 0，而 2 m/d 时安全系数的变化速度越来越大。虽然在库水位下降速度为 2 m/d 时，库水位到达 1 800 m 时的安全系数仍然大于 1，但是其安全系数的下降速度呈加速状态，对本文选取的左岸坝头

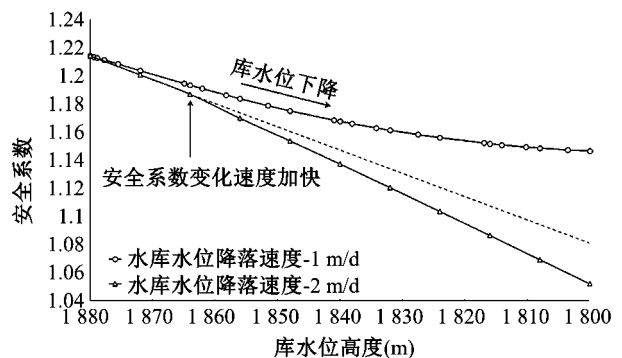


图 5 库水位降落速度为 1m/d 和 2m/d 时不同库水位的安全系数

Fig.5 Safety factors of different reservoir water levels when the reservoir water level landing speed is 1m/d and 2m/d

滑坡破坏模式更为不利, 所以库水位下降速度不宜超过 2 m/d。

### 3.2 库水位下降过程中边坡的变形演化规律

在库水位下降速度分别为 1 和 2 m/d 的情况下, 对边坡的变形的影响规律相近。比较而言, 下降速度为 2 m/d 时对边坡的安全稳定性更为不利, 故取下降速度为 2 m/d 的情况下对边坡的变形规律的影响进行分析。选取横河向截面研究边坡沿横河向和竖向的变形规律。

由图 6(a) 可以看出, 当库水位以 2 m/d 的速度下降至 1 840 m 时, 库水位变化对左岸边坡的变形影响范围较大, 影响深度达几百米。随着库水位的下降, 左岸边坡的整体变化趋势为向河谷一侧变形, 并产生一定的回弹。边坡表面处的变形较大, 随着深度的加深, 变形量逐渐减小, 距边坡表面距离超过 500 m 的区域内, 边坡变形几乎不受库水位变动的影响。最大位移处发生在坝头滑坡破坏模式潜在滑面的剪出口位置, 为 15.3 mm, 当在断层 f5 和 f8 外侧的阻滑体向河谷内侧发生较大变形时, 对 f5 后侧被 f42-9、煌斑岩脉和深部裂隙 S144-1 切割出来的块体的阻滑作用将明显减弱, 由此减小了潜在滑面上的抗滑力, 并且, 整个滑坡破坏模式的前端向边坡外的变形大于后部, 产生了沿着潜在滑动方向上的拉力, 由此增大了潜在滑面上的下滑力, 这是导致在库水位下降时坝头滑坡破坏模式的安全系数

下降的主要原因。

由图 6(b) 可以看出, 库水位进一步下降至 1 800 m 高程时, 对左岸边坡变形的影响范围进一步扩大, 最大位移仍发生在坝头滑坡破坏模式潜在滑面的剪出口位置, 但是其量值由 15 mm 增加到 24.7 mm。

### 4 结论

1) 库水位下降速度为 2 m/d 时的安全系数的下降速度明显高于 1 m/d; 且 2 m/d 时的变化速度随着水位下降而增加, 在水位达到 1 880 m 时安全系数接近 1, 因此库水位以 2 m/d 的速度下降时更容易引起失稳破坏。

2) 库水位下降过程中最大位移发生在坝头滑坡破坏模式潜在滑面的剪出口位置; 库水位下降时坝头滑坡破坏模式安全系数下降的主要原因是整个滑坡模式的前端向边坡外的变形大于后部, 产生了沿着潜在滑动方向上的拉力从而增大了潜在滑面上的下滑力。

3) 库水位下降对边坡的影响范围不仅限于库水位波动的区间, 在水位以下的坡体也会受到影响。

#### 参考文献:

[1] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013(6): 1081-1093.  
[2] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华等. 水位升降条件下牵引式

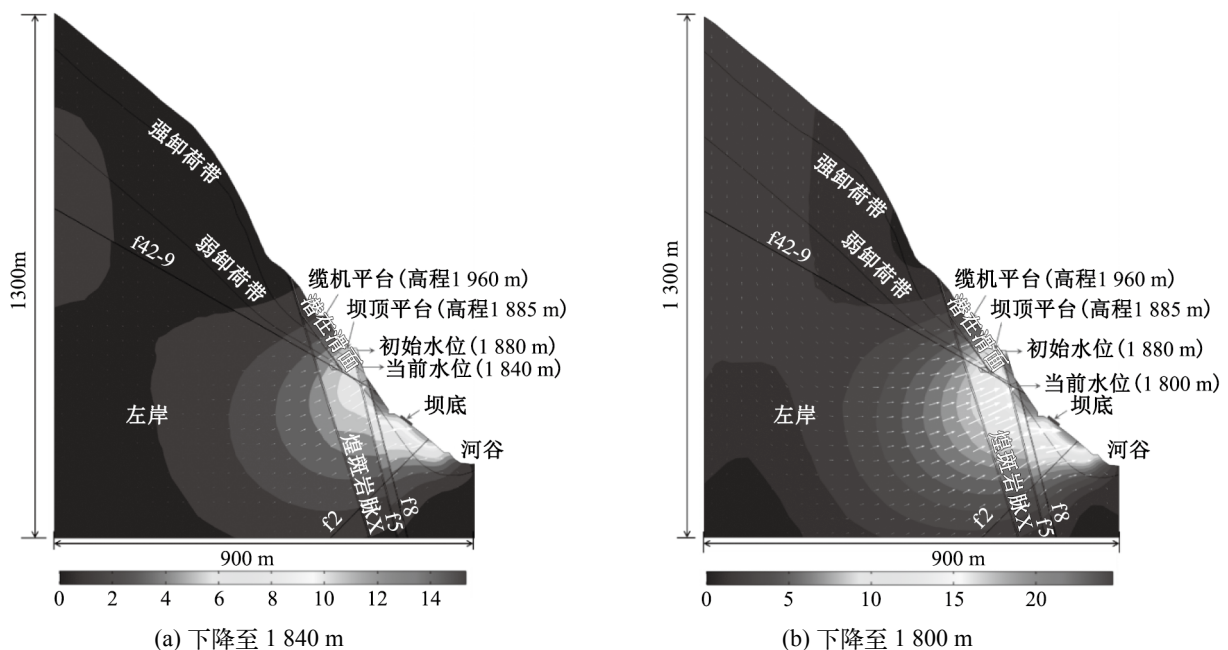


图 6 库水位以 2 m/d 的速度下降时左岸的位移云图 (单位: mm)

Fig.6 The displacement cloud of the left bank when the water level of the reservoir drops (下转第 48 页)

- 面的细观研究[J].岩石力学与工程学报, 2007(Z1): 3196-3202.
- [12] 马宗源, 徐清清, 党发宁. 碎石土地基动力夯实的颗粒流离散元数值分析[J]. 工程力学, 2013, 30(Z1): 184-190.
- [12] 王皆伟, 王汝恒. 土动力本构模型初探[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(5): 84-89.
- [13] JI Shunying, HAYLEY H S. Effect of contact force models on granular flow dynamics[J]. Journal of engineering mechanics-asce, 2006, 132(11): 1252-1259.
- [14] 关正美, 石伟强. 动三轴试验研究土的动剪切模量和阻尼比[J]. 山西建筑, 2005, 31(20): 91-92.
- [15] 廖红建, 李涛, 马宗源, 等. 黄土骨干曲线模型比较分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(Z2): 17-21.
- [16] 张永兴, 丁玉琴, 陈建功. 基于双曲正切函数的土动力非线性本构模型[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 166-171.

(责任编辑 王利君)

- (上接第34页) 滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2018(2): 1-9.
- [3] 徐文杰, 王立朝, 胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(7): 1491-1498.
- [4] 罗红明, 唐辉明, 章广成等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008(5): 687-692.
- [5] 王力, 王世梅, 杨贝贝. 库水位变动条件下土-水特征曲线对滑坡稳定性计算结果的影响研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2012(3): 10-14.
- [6] 卢博, 郭永成, 赵二平, 等. 库水位变化和降雨条件

下边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2017(2): 54-59.

- [7] 葛修润. 抗滑稳定分析新方法——矢量和分析法的基本原理及其应用[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010: 26-44.
- [8] 薛翊国. 锦屏一级水电站左岸渗流模型分析与高边坡稳定性评价[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [9] 周钟, 巩满福, 雷承第. 锦屏一级水电站左坝肩边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(11): 2298-2304.

(责任编辑 王利君)

(上接第38页) 计算结果验证了一期加固工程的失稳现象出现的原因。通过采用水泥搅拌桩加固方案, 在不同置换率情况下, 合理地改变加固范围可以使边坡安全稳定系数达到规范标准。

#### 参考文献:

- [1] 杜春梅, 李守德, 柯倩雯, 等. 水泥土连拱抗滑墙加固软基边坡机理研究[J]. 科学技术与工程, 2016(26): 257-263.
- [2] 孙明霞, 张念, 肖建峰, 等. 水泥土搅拌桩在某堤防滑坡处理中的应用[J]. 人民黄河, 2016(01): 120-121.
- [3] 李守德, 柯倩雯, 王恒, 等. 水泥土搅拌桩连拱抗滑墙加固软土地基边坡模型试验及数值分析[J]. 科学技

术与工程, 2014(35): 281-285.

- [4] 刘建华, 胡晓东. 水泥深层搅拌桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 湖南交通科技, 2003(1): 17-18.
- [5] 郭连营, 戚蓝. 粉喷桩处理海河堤岸滑坡应用实例分析[J]. 海河水利, 2004(6): 46-48.
- [6] 顾长存, 刘胜松. 堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定性分析及应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005(3): 330-334.
- [7] 陈东, 何开胜. 港口堆场的失稳滑动原因和治理方案设计[J]. 水运工程, 2005(10): 31-33.
- [8] 吕春峰. 航道驳岸软基处理深搅桩施工质量抽检评定方法的实践[J]. 水运工程, 2008(8): 153-157.

(责任编辑 王利君)