

# 弹性模量和泊松比对边坡稳定影响的探讨

谭洪波<sup>1</sup> 张璇<sup>2</sup> 李越川<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024

2. 水利部建设管理与质量安全中心,北京 100038)

**【摘要】** 本文利用有限元计算软件,运用强度折减法,对苏洼龙水电站厂房后边坡进行应力应变分析计算,并探讨弹性模量和泊松比对边坡应力应变及稳定安全系数的影响,得出结论:弹性模量的性质决定其对应变的影响很大,但对应力和边坡稳定安全系数影响较小;泊松比对应力和应变影响均较小,但较小的泊松比对边坡稳定安全系数影响较大。

**【关键词】** 有限元;强度折减法;弹性模量;泊松比;边坡稳定分析

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2018)07-054-05

## Discussion on the influence of elastic modulus and poisson ratio on slope stability

TAN Hongbo<sup>1</sup>, ZHANG Xuan<sup>2</sup>, LI Yuechuan<sup>2</sup>

(1. Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd., China Electric Construction Group, Beijing 100024, China;

2. Construction Management and Quality Safety Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Finite element software is utilized in the paper. Strength subtraction method is adopted for analyzing and calculating stress and strain on slopes behind Suwalong Hydropower Station workshop. The influence of elastic modulus and poisson ratio on slope stress and strain as well as stability safety coefficient is discussed. The following conclusions are obtained; the nature of the elastic modulus determines that it has severe influence on strain, and slight influence on stress and slope stability safety coefficient. The poisson ratio has slight influence on stress and strain, but smaller poisson ratio has more influence on slope stability and safety factor.

**Key words:** finite element; strength reduction method; elastic modulus; poisson ratio; slope stability analysis

传统的边坡问题依靠极限平衡法进行稳定性分析,但极限平衡法很难获得边坡的变形情况。有限元法不但满足力的平衡条件,而且考虑了材料的应力应变关系,使得计算更加精确合理。有限元强度折减法是將岩土强度参数凝聚力  $c$  和摩擦角  $\varphi$  值除以某折减

系数  $f$  得到一组新值代入有限元试算,边坡失稳时对应的折减系数  $f$  为边坡的稳定安全系数。在有限元强度折减法中,主要对强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值进行折减,但对于其他参数中的弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  的讨论还不是很详细。

本文利用有限元通用软件 ANSYS, 基于 Drucker-Prager 屈服准则 (D-P 准则), 运用有限元强度折减法对苏洼龙水电站厂房后边坡进行边坡稳定计算, 并重点分析了弹性模量和泊松比对边坡应力应变及稳定安全系数的影响。

## 1 基本原理

强度折减系数法的基本原理<sup>[1]</sup>: 抗剪强度折减系数定义为在外荷载保持不变的条件下, 边坡内岩土体所发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。即保持岩土体的重力加速度为常数, 将岩土体的强度参数  $c, \varphi$  值同时除以一个折减系数  $f$ , 得到一组新的  $c'$  和  $\varphi'$ , 然后作为新的材料参数进行试算, 当边坡处于临界状态时, 即  $f$  再稍大一些, 边坡将发生破坏, 此时对应的  $f$  值被称为边坡的安全系数, 其具体公式如下:

$$c' = \frac{c}{f} \quad (1)$$

$$\tan\varphi' = \frac{\tan\varphi}{f} \quad (2)$$

屈服条件是物体内一点进入屈服时, 其应力状态所满足的条件<sup>[2]</sup>。有限元分析方法所采用的本构模型为理想弹塑性模型, 岩土工程分析中常用的准则有摩尔-库伦准则 (M-C 准则) 和 D-P 准则, ANSYS 软件采用的是 D-P 准则, 即 M-C 不等角六边形外接圆。D-P 准则可定义为:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3)$$

式中,  $I_1$  和  $J_2$  是应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量,  $\alpha, k$  是与岩土材料强度参数有关的常数。

针对边坡有限元强度折减计算方法, 目前常用的边坡失稳判据有三种<sup>[3]</sup>, ①静力平衡计算的不收敛性; ②塑性区或者等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通状态; ③岩土体滑动块无限移动, 此时滑移面上位移发生突变且无限发展。本文在判断边坡失稳时, 考虑以上三种判据。

## 2 工程背景

### 2.1 工程概况

苏洼龙水电站位于四川省甘孜藏族自治州和西藏自治区昌都藏族自治州的界河上, 总库容 6.96 亿  $\text{m}^3$ , 多年平均流量 929  $\text{m}^3/\text{s}$ , 总装机容量 1200MW。水电站左岸引水发电系统包括引水系统、地面厂房系统和尾水建筑物。其中地面厂房系统位于一片缓坡地带, 为岸边式地面厂房。

### 2.2 地质条件

厂房工程区周围均有覆盖层发育, 上下游侧及坡顶部与冰水泥石流堆积的碎石土相接, 坡下部与河床冲洪积砂卵石层相接, 冰水泥石流堆积碎石土厚度约 8~22m, 上游侧稍薄, 顶部及下游侧稍厚。各土层对应的地质力学参数见表 1。

表 1 各土石层物理力学参数

地层序号	地层名称	天然密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	弹性模量/MPa	泊松比
①	冰水堆积块碎石土层	2.35	21	35	50	0.35
②	强风化黑云斜长花岗岩	26.0	200	40	$10^3$	0.3
③	弱风化黑云斜长花岗岩	27.0	500	42	$10^4$	0.2

选取厂房后边坡某地质剖面为分析对象, 开挖边坡高约 40m, 上一级边坡高 20m, 坡比为 1:1, 马道宽 3m, 下一级边坡高 20m, 坡比为 1:0.5, 地质剖面如图 1 所示。

## 3 计算分析

### 3.1 计算模型

根据选用的厂房后边坡地质剖面, 运用有限元分析软件, 采用四节点等参单元, 建立边坡计算模型。开

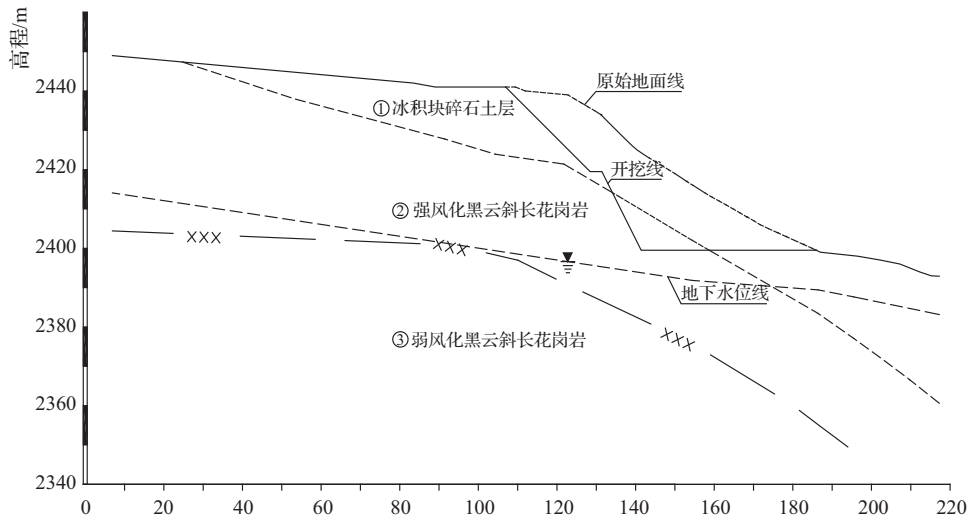


图1 边坡地质剖面

挖边坡高40m,模型坡顶到左侧边界为100m,坡脚到右侧边界为60m,左侧竖向边界高80m,考虑合理的网格划分,开挖前单元总数12902,节点总数13036,开挖后单元总数12108,节点数10141,左右及底部边界为链杆约束边界。开挖后有限元网格模型如图2所示。

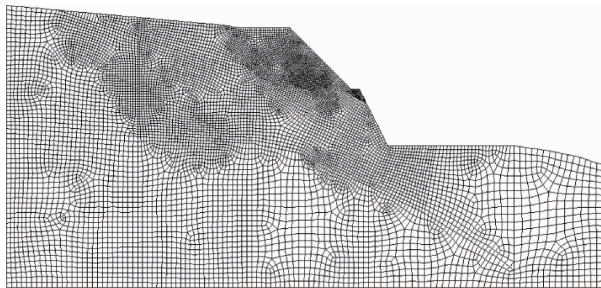


图2 开挖后有限元网格模型

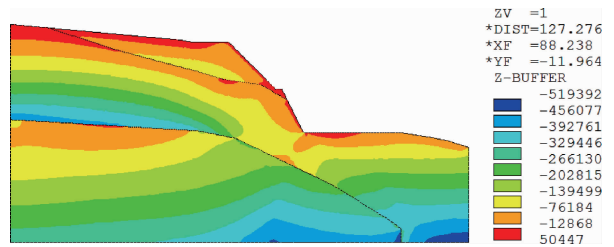


图4 开挖后边坡最大主应力云图(单位:N)

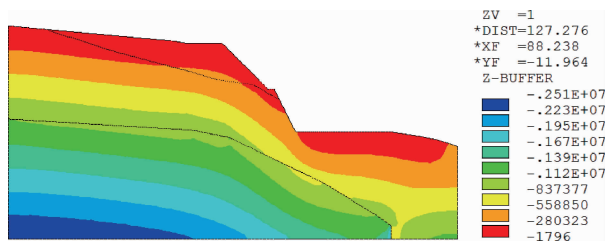


图5 开挖后边坡最小主应力云图(单位:N)

### 3.2 开挖边坡稳定计算

基于材料参数表1,对厂房后边坡按平面应变进行应力应变分析计算,开挖后边坡的合位移、最大主应力、最小主应力和等效塑性应变如图3~图6所示。

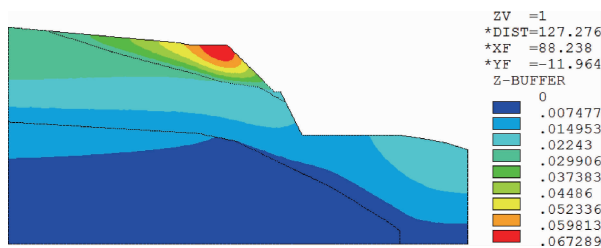


图3 开挖后边坡合位移云图(单位:m)

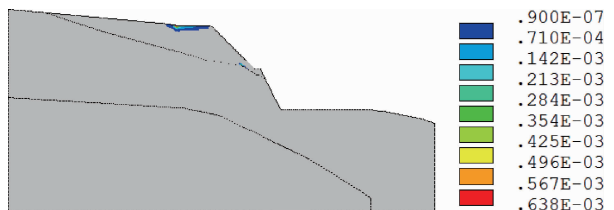


图6 开挖后边坡等效塑性应变云图

由计算结果可以看出,当边坡开挖完成以后,边坡向开挖临空区变形,上部的冰水堆积块碎石土层区域变形最大,最大位移为0.067m;坡脚位置最大应力为0.651MPa;开挖后坡顶后20m处出现局部塑性屈服区,马道内侧7m处也出现小范围塑性屈服区。

采用强度折减法,对开挖后的边坡进行应力应变计算,选取具有代表性的三个节点,统计其合位移变化规律,如图7所示。塑性区贯通时的等效塑性应变如图8所示。有限元计算不收敛、节点特征位移突变和塑性区贯通作为失稳判据时的各边坡稳定安全系数如表2所列。

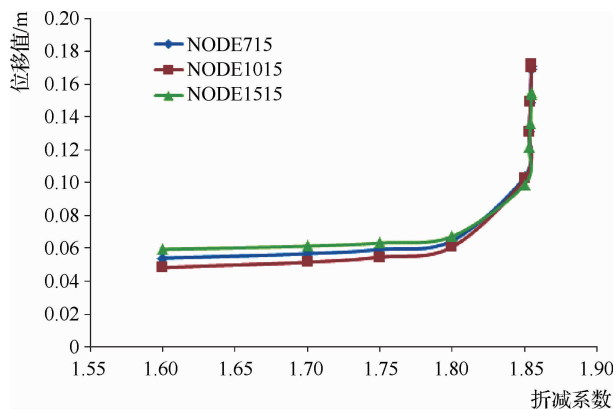


图7 节点合位移统计

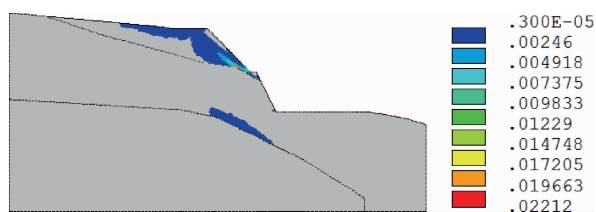


图8 塑性区贯通时的等效塑性应变云图 ( $f=1.79$ )

表2 边坡稳定安全系数

边坡失稳判据	有限元计算不收敛	特征位移突变	塑性区贯通
边坡稳定安全系数 $f$	1.86	1.85	1.79

由计算结果可以看出,有限元计算不收敛、特征位移突变和塑性区贯通作为判据时,各边坡稳定安全系数为1.86、1.85、1.79,大于规范要求值(A类I级边坡1.25~1.30),故本计算边坡剖面整体稳定。

### 3.3 弹性模量和泊松比对边坡计算的影响

为探讨弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  对边坡应力应变及稳定安全系数的影响,针对冰积块碎石土层的材料参数,基于单因素控制法则,考虑弹性模量和泊松比的合理取值范围,首先进行弹性模量分别为  $0.1E_0$  和  $10E_0$  时的边坡稳定计算,计算结果见表3和图9~图10,然后进行泊松比为  $\mu_0 - 0.1$  和  $\mu_0 + 0.1$  时的边坡稳定计算,计算结果见表4和图11~图12。

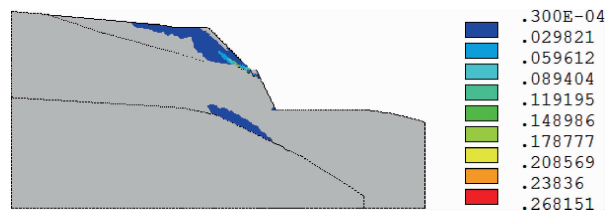


图9 等效塑性应变云图 ( $E=5\text{MPa}, \mu=3.50, f=1.80$ )

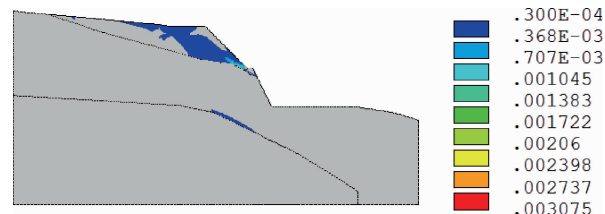


图10 等效塑性应变云图 ( $E=500\text{MPa}, \mu=3.50, f=1.75$ )

表3 弹性模量对边坡分析的影响

弹性模量/MPa	最大位移/m	坡脚最大应力/MPa	边坡稳定安全系数 $f$		
			计算不收敛	位移突变	塑性区贯通
5	0.537	0.566	1.85	1.85	1.80
50	0.067	0.651	1.86	1.85	1.79
500	0.028	0.565	1.86	1.86	1.75

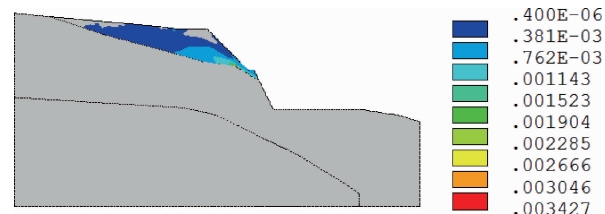


图11 等效塑性应变云图 ( $E=50\text{MPa}, \mu=2.50, f=1.50$ )

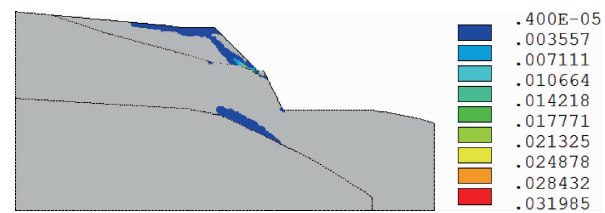


图12 等效塑性应变云图 ( $E=50\text{MPa}, \mu=4.50, f=1.79$ )

由表3可以看出,弹性模量相差10倍时对应的坡脚最大应力差值约为13%,因此弹性模量对应力计算影响很小;由于弹性模量本就是变形能力的指标,故三种弹性模量对应的最大位移相差较大,但弹性模量较大时,位移与应力并不对应成比例关系;此外,弹性模量的变化对边坡稳定安全系数影响很小,但弹性模量较大时,塑性区较易形成贯通,计算中弹性模量取值500MPa时,塑性区在1.75的折减系数下即达到贯通



状态,明显小于其他相应安全系数值。

表4 泊松比对边坡分析的影响

泊松比	最大位移/m	坡脚最大应力/MPa	边坡稳定安全系数 $f$		
			计算不收敛	位移突变	塑性区贯通
0.25	0.073	0.555	1.69	1.68	1.50
0.35	0.067	0.651	1.86	1.85	1.79
0.45	0.059	0.595	1.86	1.86	1.79

由表4可以看出,泊松比相差0.1时,对应的坡脚最大应力差值约为14%和8%,因此弹性模量对应力影响较小;三种泊松比对应的最大位移相差亦不大,且位移值与泊松比成负相关;此外,泊松比较大时,泊松比的变化对边坡稳定安全系数影响很小,但是泊松比较小时,泊松比对边坡稳定安全系数影响较大,一方面,由图11可以看出,塑性区达到贯通状态时塑性区范围较大,另一方面,相应边坡稳定安全系数明显较小,计算中泊松比取值0.25时,边坡稳定安全系数明显小于其他两组相应系数值。

## 4 结论

a. 本计算边坡整体稳定,边坡开挖后,上部冰水

(上接第60页)信号,直接停止电机运转。

### 5.3 闸门开度控制仪参与启闭控制过程

升闸过程:当上位计算机发出开启闸门信号时,PLC控制系统控制电机上升,当闸门上升经过搁门器,至搁门器刚刚落下时,开度仪发出停机信号,电机停转,接着PLC控制系统发出下降命令,闸门开始下降,当闸门下降搁置到搁门器上,使钢丝绳处于不受力状态时,开度仪再次发出停机信号,电机停转,升闸操作过程结束。

闭闸过程:当上位计算机发出关闭闸门信号时,PLC控制系统首先控制电机上升(而不是下降),闸门上升一定高度,搁门器解锁,开度仪发出停机信号,电机停转,接着PLC控制系统发出下降命令,闸门下降,直至关闭到位,开度仪再次发出停机信号,电机停转,结束闭闸过程。

### 5.4 闸门开度控制仪性能参数及应用范围

性能参数:显示、控制分辨率为1cm;测量控制范

围-9.99~29.99m;控制精度 $\pm 1$ cm;通讯方式RS485,采用Modbus通讯协议;通讯波特率可设置级,默认9600bps;通讯地址可设置为1-99;所有控制点参数均可设置;断电数据保持,数据异常提醒。

b. 弹性模量的性质决定了其对应变的影响很大,但是对应力和边坡稳定安全系数影响较小,且弹性模量较大时,塑性区较易形成贯通。

c. 泊松比对应力和应变影响均较小。泊松比较大时,泊松比对边坡稳定安全系数影响很小;但泊松比较小时,相应塑性区贯通时边坡内部的塑性区范围较大,且边坡稳定安全系数较小。

d. 本文计算分析了苏洼龙水电站厂房后边坡的应力应变及边坡稳定安全系数,并探讨了弹性模量和泊松比对边坡应力应变及稳定安全系数的影响,得到了一些定性的结论,还需要进一步探索本构模型中各因素之间的相互影响,从理论机制上寻找更多的依据。◇

## 参考文献

- [1] 何松晟,高玮,汪磊.边坡稳定分析的强度折减法应用[J].武汉工业学院学报,2010,29(4):74-77.
- [2] 陈明祥.弹塑性力学[M].北京:科学出版社,2007.
- [3] 郑颖人,赵尚毅,宋雅坤.有限元强度折减法研究进展[J].后勤工程学报,2005(3):1-6.

围-9.99~29.99m;控制精度 $\pm 1$ cm;通讯方式RS485,采用Modbus通讯协议;通讯波特率可设置级,默认9600bps;通讯地址可设置为1-99;所有控制点参数均可设置;断电数据保持,数据异常提醒。

应用范围:凡是电机运转与闸门开度为线性关系的启闭机均可适用,包含各类卷扬式启闭机和螺杆式启闭机。对于液压式启闭机仅需更换传感器样式,主机通用。

## 6 闸门开度控制仪应用效果

闸门开度控制仪,自2015年初研制成功安装至焦港闸自动化控制系统中,实现了闸门开度各控制点的数字化,其与PLC控制系统和上位机,完全替代原系统开度传感器和机械式限位开关相结合的控制方式。闸门开度控制仪自正式投入运行至今已有两年多,运行十分可靠,控制精度高,完全满足升卧式闸门启闭全过程的精准控制要求。◇