

# 锦屏一级水电站左坝肩边坡数值模拟

林兴超<sup>1,2</sup> 王玉杰<sup>2</sup> 徐能雄<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院岩土所,北京 100044)

**【摘要】** 锦屏一级水电站左岸边坡工程地质条件复杂,特别是由控制性软弱结构面切割形成的楔形体对左岸边坡的稳定性影响较大。工程中已采用系统预应力锚索支护和抗剪洞回填对楔形体进行加固处理。为了解两种支护措施及其施工工序对楔形体稳定性的影响,采用数值模拟方法,对支护措施在不同工况条件下,边坡继续开挖进行模拟计算。通过不同工况数值模拟对比分析发现,系统锚索支护对限制塑性区发展起到了良好的效果,抗剪洞回填对限制楔形体底滑面的错动有非常明显的效果,及时进行锚索支护和回填抗剪洞是锦屏一级水电站左岸边坡在施工期乃至运行期间稳定运行的有力保证,通过控制性软弱结构面的位移变化趋势判断边坡稳定性是可行的。

**【关键词】** 锦屏一级水电站;边坡;稳定性分析;楔形体;数值模拟

**【中图分类号】** TU 413. 62; TB 115

## Numerical Simulation of "Wedge" at Left Abutment of Jinping First Stage Hydropower Station

Lin Xingchao<sup>1,2</sup> Wang Yujie<sup>2</sup> Xu Nengxiong<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering and Technical, China University of Geosciences, Beijing 100084, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**【Abstract】** There is a complex geological condition in the left bank of Jinping First Stage Hydropower Station. The wedge's stabilizing is one of the most important problems in the project which is composed of several weak layers. Support methods such as pro-stressed anchors system and shear key were adopted to ensure wedge safety. In order to research the two support methods and construction processes' influence in slope stability, the slope continue excavating with the two support methods in deferent construction processes have been used for numerical simulation. After comparison of plastic zone and variation of displacement, it is find that pro-stressed anchors system have an effect on limiting the development of plastic zone, re-filling shear keys have an effect on control the displacement of the fault f42-9 which is the bottom slip surface of the wedge. It is very important for the left bank slope stability that completed the two support methods in time. It is feasibly that to decide slope stabilizing by curves of relative displacement between two sides of typical wake layer.

**【Key words】** Jinping First Stage Hydropower Station; slope; stability analysis; wedge; numerical simulation

### 0 引言

锦屏一级水电站坝址位于四川省盐源木里两县交界、锦屏山雅砻江大河湾下游约 1.8 km 处普罗新沟与手爬沟之间 1.5 km 处的河段上。电站坝体为双曲拱坝,最大坝高 305 m,是目前世界上已建和在建的最高拱坝。水库库容  $77.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,电站装机容量 3600 MW,年发电量  $166.2 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

锦屏一级水电站左岸边坡从 2110 m 高程开始

以 1:0.5~1:0.3 的坡度下切,直至 1580 m 高程,形成一个高达 530 m 的陡边坡,其稳定性面临前所未有的挑战<sup>[1]</sup>。特别是由软弱结构面煌斑岩脉(X)、控制性断层 F<sub>42-9</sub> 和卸荷裂隙 SL<sub>44-1</sub> 切割形成的“楔形体”对边坡稳定性影响较大<sup>[2]</sup>,三组结构面产状及分布情况见图 1。随着边坡开挖的进行,“楔形体”前方大部分抗力体被挖除,使其稳定性受到较大影响。

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(50539100);国家自然科学基金项目(50509027)

**作者简介:**林兴超,1984 年生,男,硕士研究生,主要从事岩石力学试验研究及数值模拟计算方面的工作。E-mail:linxingchao1984@gmail.com

① 国家电力公司成都勘测设计院. 雅砻江一级水电站可行性研究报告[R]. 2003.

为了保证开挖边坡稳定性,设计中“楔形体”采用主体工程为系统锚索的边坡支护方案,底滑面 $F_{42-9}$ 辅以抗剪洞置换加固方案。为了评价两种支护措施对“楔形体”稳定性的影响,本文采用有限差分法程序FLAC-3D对边坡开挖及支护进行了模拟,通过分析不同施工工序条件下边坡塑性区分布情况、 $F_{42-9}$ 断层上特征点位移变化规律,总结抗剪洞置换施工工序对边坡稳定性的影响,得出对施工期边坡开挖有意义的指导性意见,并探论对新的适合于类似工程的边坡失稳破坏判别准则。

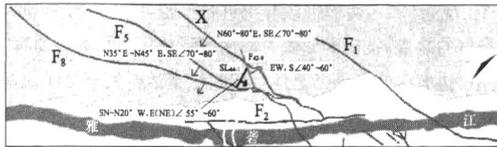


图1 左坝肩工程地质平面图

### 1 左坝肩边坡支护方案

#### 1.1 系统锚索支护

系统锚索支护实际情况与典型支护剖面图分别见图2、图3。左岸边坡主要采取系统锚索交错矩形布置和钢筋混凝土框架梁结构,其主要参数为长60m、 $\phi 28$ 和80m、 $\phi 32$ 的200t预应力锚索;网格间排距均为4m。

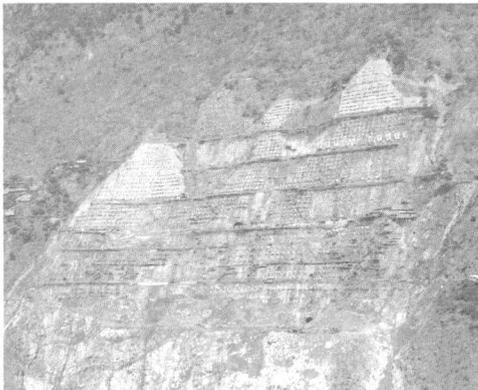


图2 锚索支护

#### 1.2 抗剪洞置换

抗剪洞置换是指将边坡中岩石质量较差的部分挖除后回填混凝土以提高该部位岩体的强度,设计中针对 $F_{42-9}$ 采取了这种支护方案,总共包含3层抗剪洞,所在高程分别为1834m、1860m和1885m。其中1834m高程抗剪洞平面布置图和典型剖面图分别见图4和图5,其余两层抗剪洞布置情况与1834m高程抗剪洞基本一致;抗剪洞主要包括抗

剪洞和键槽两部分;抗剪洞位于煌斑岩脉外侧即靠近坡面一侧 $F_{42-9}$ 与煌斑岩脉相交处附近。计算过程中通过单元的生死实现抗剪洞的开挖与回填,通过控制回填单元的材料参数模拟混凝土的回填。

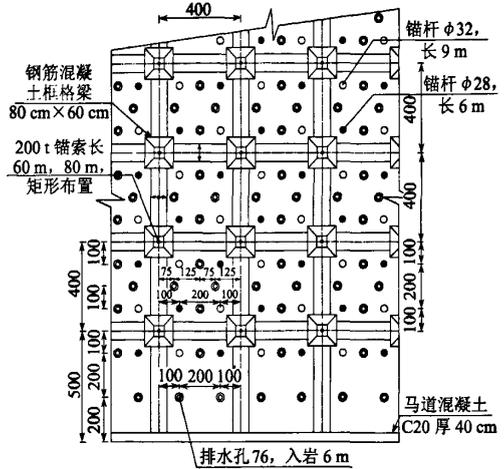


图3 典型支护剖面图

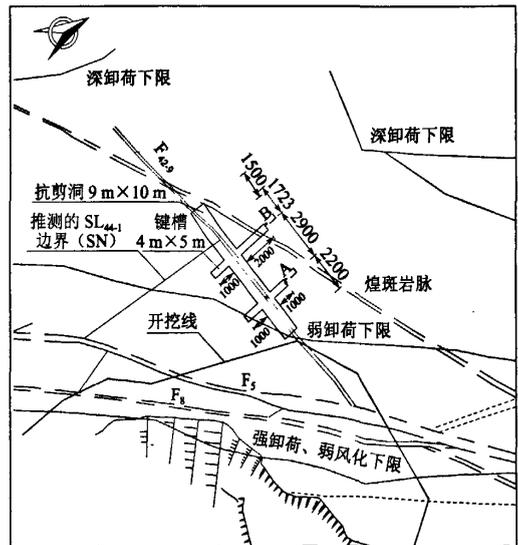


图4 高程1834m抗剪洞平面布置图

### 2 有限差分计算模型及计算条件

#### 2.1 计算模型

左坝肩楔形体有限差分模型坐标系的选取遵照右手螺旋定则;以顺河向为 $x$ 轴,指向下游为正( $N28^\circ E$ );横河向为 $y$ 轴,指向山里为正( $N62^\circ W$ ); $z$ 轴正方向铅直向上。以1885m高程平切面拱坝坝顶最高端在水平面上的投影(锦屏坐标系坐标(27732.213, 19769.956, 0))为坐标原点。建模范

围:顺河向由坐标原点向上游延伸 430 m,向下游延伸 530 m;横河向由坐标原点向山里延伸 845 m;铅直向由 1380 m 高程一直延伸到 2 240 m 高程。模型考虑了  $F_5$ 、 $F_2$ 、 $F_8$ 、 $F_{42.9}$ 、煌斑岩脉、卸荷裂隙  $SL_{4+1}$  这几组地质界面,并模拟了抗剪洞、置换平洞、置换斜井等内部结构以及岩石质量分界线。整个模型由 544 472 个单元、95 373 个单元组成,计算网格图见图 6。

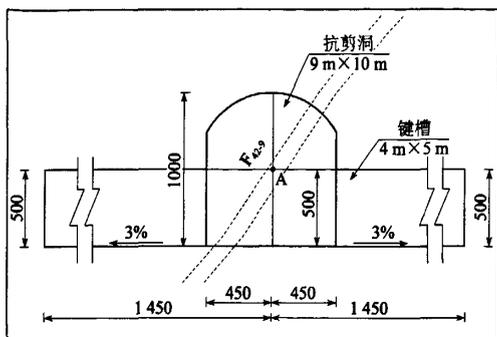


图 5 高程 1834 m 抗剪洞典型剖面图

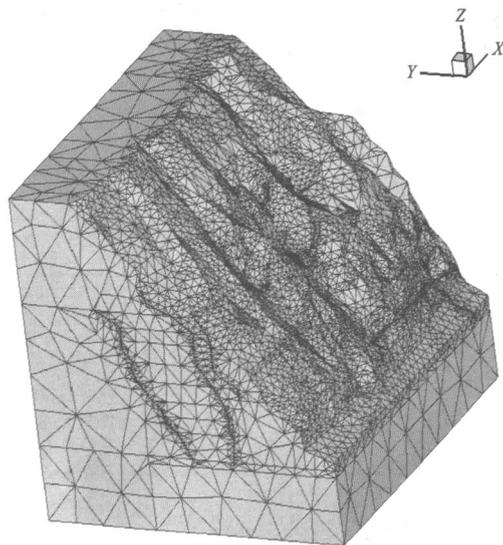


图 6 边坡有限差分模型

## 2.2 计算条件

### 1) 初始地应力及计算参数

① 初始地应力:在计算中不考虑构造应力场,采用自重应力场作为边坡岩体初始应力场。

② 计算所采用的岩体物理力学参数见表 1,参数完全依据设计院《可行性研究报告》、《锦屏一级坝基岩体质量分级表》和《坝区结构面按性状分类表》进行确定。

表 1 边坡岩体物理力学参数表

材料分类	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$
II	2800	2.00	53.47	26.0	0.25
III1	2800	1.50	46.94	11.5	0.25
III2	2800	0.90	45.57	6.5	0.30
IV1	2750	0.60	34.99	3.0	0.35
IV2	2750	0.80	38.66	2.0	0.35
软弱结构面 1680 m 以上	2600	0.02	16.7	1.1	0.35
1680 m 以下	2750	0.90	45.57	6.5	0.30

## 2) 计算工况

为了反映工程实际情况,根据实际施工情况(2007年10月1日)模拟边坡开挖到 1860 m 高程:1860 m 高程以上边坡开挖根据揽机平台及开挖马道分 7 级开挖,各级开挖到的高程分别为 2020 m、1990 m、1960 m、1915 m、1885 m 和 1860 m;锚索支护滞后边坡开挖一个台阶,当开挖到 1860 m 高程时锚索支护滞后两个台阶;1883 m 和 1860 m 高程抗剪洞分别在边坡开挖到 1915 m 和 1885 m 高程时开挖,在边坡开挖到 1885 m 和 1860 m 高程时回填。

以实际情况为基础对以下四种工况边坡继续开挖到 1825 m 高程进行模拟:

- ① 1834 m 高程的抗剪洞不回填,1860~1915 m 高程坡面不进行锚索支护;
- ② 1834 m 高程的抗剪洞回填,1860~1915 m 高程坡面不进行锚索支护;
- ③ 1834 m 高程的抗剪洞回填,1885~1915 m 高程坡面进行锚索支护;
- ④ 1834 m 高程的抗剪洞回填,1860~1915 m 高程坡面进行锚索支护。

## 3 计算结果分析

### 3.1 塑性区分析

四种工况下边坡继续开挖后边坡塑性区分布及产生塑性屈服岩体总体积分别见图 7 和表 2。

表 2 塑性屈服岩体总体积

施工工况	开挖至 1855 m	开挖至 1825 m			
		工况一	工况二	工况三	工况四
塑性屈服岩体 总体积/万 $\text{m}^3$	40.0	49.9	48.4	45.2	42.1

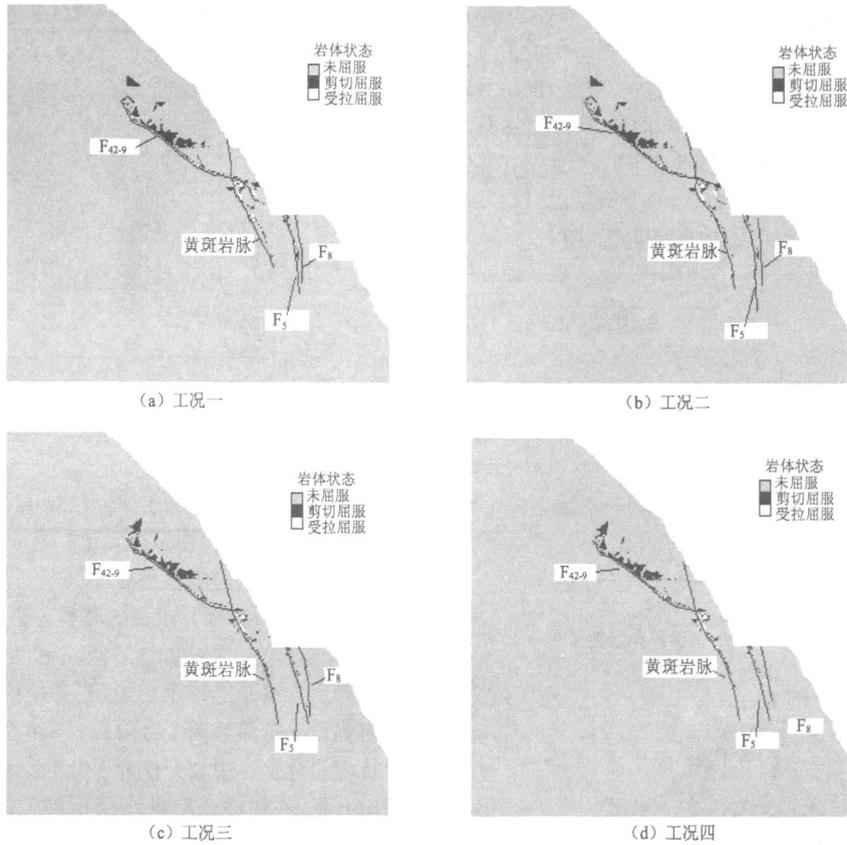


图7 四种工况下横河向纵剖面塑性区

由图7和图8、表2可知:

1)塑性屈服岩体主要集中在  $F_{42.9}$ 、 $F_5$ 、 $F_8$  断层及煌斑岩脉附近,工况一和工况二条件下,坡面附近出现塑性屈服集中区,塑性屈服岩体以拉屈服为主。

2)由不同工况塑性区对比可以发现,锚索支护的施工顺序对坡面附近塑性区影响较大,在锚索作用范围内,坡面附近岩体基本处于弹性状态;对山体内部岩体影响较小,塑性区分布情况基本不变。

3)从表2中数据可以看出,锚索支护对塑性屈服岩体总体积影响较大,抗剪洞回填对塑性屈服岩体总体积影响较小。

### 3.2 位移变化分析

为了进一步说明1834m高程抗剪洞回填施工顺序对边坡稳定性的影响,在  $F_{42.9}$  断层上不同高程位置分别取了6对特征点(每对特征点处于同一高程,分别位于断层上下两盘)进行位移变化分析,各组特征点所在高程分别为1883m、1875m、1870m、1850m、1843m、1825m。不同工况条件下,各对特征点的相对位移错动量见表3,变化曲线图见图8。

表3 四种工况下各对特征点相对位移错动量

特征点所在高程	1883 m	1875 m	1870 m	1850 m	1843 m	1825 m
开挖到1860 m	9.18	7.45	6.65	6.31	5.79	1.94
工况一	9.61	9.23	9.08	8.73	7.35	5.28
工况二	9.40	8.53	7.90	7.25	5.81	2.24
工况三	9.32	7.90	7.01	6.71	5.80	2.13
工况四	9.27	7.74	6.65	6.46	5.80	1.99

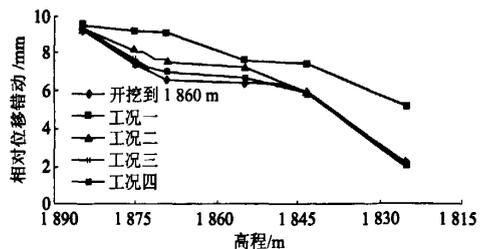


图8 四种工况下各对特征点相对位移错动量变化曲线

由表3和图8可知:

1)在工况四条件下边坡继续开挖,位移变化错动量变化最小,1870m高程以下关键点位移错动量与开挖到1860m高程时基本没有发生变化;

2)在工况一条件下边坡继续开挖,位移错动量变

化明显大于其它三种工况,处于1825 m高程的这组关键的位移错动超过了5 mm,而其它三种工况下边坡继续开挖为2 mm左右

3)在工况二、三和四条件下边坡继续开挖(1834 m高程抗剪回填),处于1843 m和1825 m高程的两组关键点间的位移变化很小,均在0.3 mm以内。这说明了1834 m高程抗剪洞的回填对其附近断层岩体起到了很好的锁固作用。

目前数值模拟计算主要是通过强度折减法求得工程上所关心的安全系数,而在强度折减法中边坡失稳判据的问题直接影响计算结果的准确性,很多学者对边坡失稳判据的问题进行过研究,但到目前为止尚未形成统一认识。目前边坡失稳判据主要有三种:①计算过程中迭代不收敛;②边坡关键部位位移发生突变;③潜在滑裂面塑性区贯通<sup>[3-11]</sup>。

本文图8中可以看出,工况一条件下边坡底滑面整体位移变化不同于其他工况,各对关键点间位移错动量的变化较小,如果各对关键点间位移错动量的变化趋于零,即楔形体底滑面发生平动时,可以认为边坡失稳。因此,类似于锦屏一级水电站左岸这种具有控制性软弱结构面的边坡工程,通过控制性结构面的位移变化趋势判断边坡稳定性是可行的。

#### 4 结论

锦屏一级水电站左岸边坡工程地质条件复杂,特别是以煌斑岩脉为后缘面、 $F_{42-9}$ 为底滑面、卸荷裂隙 $SL_{44-1}$ 为侧缘面的楔形体的稳定性问题对边坡的稳定性影响较大。通过对不同工况条件下边坡继续开挖的数值模拟分析可以得到以下结论。

1)边坡塑性区岩体总体积较小, $F_{42-9}$ 两盘位移错动量由高到低呈逐渐变小的趋势,说明边坡整体稳定。

2)锚索支护对坡面附近塑性区影响较大,抗剪洞回填为控制楔形体底滑面的错动起到了重要作用。

3)抗剪洞回填工序对楔形体底滑面位移错动量

的影响最大,因此回填抗剪洞的时机的选择对边坡稳定性影响较大。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈祖煜,周建平,杨泽艳,等. 中国典型工程边坡:水利水电工程卷[M]. 北京:水利水电出版社,2008.
- [2] 周 钟,巩满福,雷承弟. 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(25):2298-2304.
- [3] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡和岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [4] 赵尚毅,郑颖人,时为民,等. 有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [5] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等. 关于强度折减法有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学,2005,26(8):1345-1348.
- [6] 连镇营,韩国城,孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):407-411.
- [7] 栾茂田,武亚军,年延凯. 强度折减法有限元方法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [8] 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,2005.
- [9] 贾苍琴,黄茂松,王贵和. 非饱和非稳定渗流作用下土坡稳定分析的强度折减有限元法[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1290-1296.
- [10] 武亚军,栾茂田,年延凯. 基于塑性区开展评判边坡稳定性强度折减弹塑性有限元法[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社,2003.
- [11] 郑颖人,胡文青,王敬林. 强度折减有限元法及其在隧道与地下洞室工程中的应用[J]. 现代隧道技术,2004(增):239-243.

收稿日期:2008-12-12