

文章编号 0559-9342(2005)07-0039-03

# 彭水水电站船闸高边坡开挖过程的有限元仿真分析

刘先行<sup>1</sup>, 廖柏华<sup>1</sup>, 张小妹<sup>1</sup>, 杜丽惠<sup>1</sup>, 刘宁<sup>2</sup>

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 水利部, 北京 100053)

关键词 高边坡; 分步开挖; 有限元仿真; 彭水水电站

摘要 彭水水电站船闸开挖段地形地质条件较复杂, 断层分布较多, 为此应用弹塑性有限元分析方法, 采用接触力学的直接约束法模拟断层的滑移和脱开等不连续行为, 对高边坡开挖过程进行了数值仿真。通过研究对比开挖过程中岩体的变形、应力以及塑性区的大小和分布, 来评价开挖过程中边坡的稳定性和支护措施的有效性, 为高边坡开挖方案的优化和选定提供指导。

## FEM simulation on high slope's excavation process of Pengshui Hydropower Station's navigation lock

Liu Xian-xing<sup>1</sup>, Liao Bo-hua<sup>1</sup>, Zhang Xiao-mei<sup>1</sup>, Du Li-hui<sup>1</sup>, Liu Ning<sup>2</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Ministry of Water Resources, Beijing 100053)

**Key Words:** high steep slope; step by step excavation; FEM simulation; Pengshui Hydropower Station

**Abstract:** Based on the elasto-plastic FEM, numerical simulation on the high slope's excavation process of Pengshui hydropower station was performed. Direct constraint procedure, which is the most robust one among contact mechanics methods, was adopted to model the discontinuous mechanical behaviors (such as sliding and disjoining) of faults and weak interlays existing in the lithesome of the slope. The magnitude and distribution of deformation, stress and plastic yielding zone were given to evaluate the stability safety and the effectiveness of the support measures. The results and conclusions were valuable for the optimization and decision of the excavation schemes.

中图分类号 O241.82; TV223.31(2719)

文献标识码 A

## 1 船闸高边坡工程概述

彭水水电站通航建筑物按四级航道、500 t 级单机驳标准进行设计, 设计年通过能力为 460 万 t, 布置在乌江左岸, 采用一级船闸、升船机相结合的建筑物布置方案。船闸开挖段长 283.2 m, 开挖边坡的坡比一般为 1:0.3, 最大边坡高度约为 150.0 m。开挖区地形地质条件较为复杂, 断层分布较多。从上游到下游间有皱皮沟、桃子树沟、黄角树沟、番瓜地湾等冲沟, 平均地形坡度为 40°, 冲沟两侧坡面较陡。在皱皮沟与桃子树沟之间区域, 存在有  $f_1$ 、 $f_5$ 、 $f_7$ 、 $f_{36}$  等断层,  $f_1$  断层被  $f_7$ 、 $f_5$ 、 $f_{36}$  断层切割。

为了安全地进行开挖施工, 需要合理地评价这些断层对边坡稳定性的影响。本文以  $f_1$  断层所在 IV-IV 剖面(见图 1)为例, 应用弹塑性平面有限元分析方法, 采用接触力学的方法模拟断层, 对边坡的设计开挖过程进行仿真, 从开挖过程中岩体的应力、变形和塑性区的分布来分析开挖过程的安全性及支护措施的有效性。

## 2 有限元模型

### 2.1 计算网格

计算模型规定水平方向为 X 向, 由左边界至河谷中心; 规定竖直方向为 Y 向, 从 100 m 高程至自由表面。其中主要模拟了断层  $f_1$ 、 $f_5$ 、 $f_7$ 、 $f_{36}$  以及泥化夹层综合体。整个计算模型共计 1 428 个单元, 1 557 个节点。

### 2.2 材料本构模型

岩体材料采用理想弹塑性模型, 屈服准则采用 Drucker-Prager 准则。Drucker-Prager 屈服函数的表达式为:

$$F = \sqrt{3} \alpha I_1 + \sqrt{3} J_2 - \sigma_y = 0$$

式中  $I_1$  为应力第一不变量;  $J_2$  为偏应力第二不变量;  $\alpha$ 、 $\sigma_y$  均

收稿日期 2004-11-25

基金项目 国家自然科学基金面上基金资助项目(50279016)

作者简介: 刘先行(1980—), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向为岩石高边坡和土石坝工程。

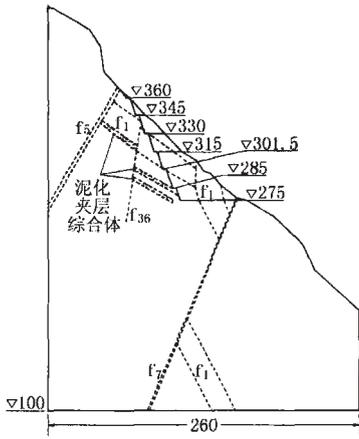


图1 IV-IV剖面开挖及断层模拟示意(单位:m)

为 Drucker Prager 准则的参数, 计算中可根据 Drucker-Prager 准则等面积圈确定, 分别为:

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin\phi}{\sqrt{2}\sqrt{3} \pi (9 - \sin^2\phi)}, \quad \sigma_3 = \frac{6\sqrt{3} \cos\phi}{\sqrt{2}\sqrt{3} \pi (9 - \sin^2\phi)}$$

计算所用材料物理力学参数由长江设计院提供(见表1)。

表1 岩体材料物理力学参数

| 岩体名称        | 天然容量<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 变形模量<br>(GPa) | 泊松比 $\nu$ | 摩擦系数 $f$ | 粘聚力 $c$<br>(MPa) |
|-------------|------------------------------|---------------|-----------|----------|------------------|
| 灰质白云岩       | 27.0                         | 30            | 0.28      | 1.25     | 1.0              |
| 断层 $f_1$    | 27.0                         | 6             | 0.32      | 0.6      | 0.1              |
| 断层 $f_5$    | 27.0                         | 7             | 0.3       | 0.4      | 0.05             |
| 断层 $f_7$    | 27.0                         | 6             | 0.3       | 0.4      | 0.1              |
| 断层 $f_{36}$ | 27.0                         | 6             | 0.3       | 0.3      | 0.05             |
| 泥化夹层        | 26.8                         | 20            | 0.32      | 1.0      | 1.0              |

### 2.3 断层的模拟

IV-IV 断面存在断层  $f_1$ 、 $f_5$ 、 $f_7$ 、 $f_{36}$  以及泥化夹层综合体等(见图1)。这些断层和夹层在开挖过程中可能出现滑移、脱开等不连续现象, 成为边坡开挖中边坡失稳的主要因素。目前, 对于断层的模拟主要有接触面单元法和接触力学的方法。接触面单元法是在断层的位置设一无厚度单元或薄层单元, 当判断单元的法向应力为拉应力时, 通过折减单元的法向和切向刚度来模拟接触面的脱开。接触力学的方法是将断层两侧的岩体看成独立的可变形体, 通过施加无穿透约束条件来保证两个变形体不发生重叠。目前常用的接触模拟方法有拉格朗日乘子法、罚函数法及直接约束法等<sup>[1]</sup>。其中, 直接约束法的稳定性较好, 在水工建筑物有限元计算领域目前已应用于施工缝、面板缝的接触处理, 且均已取得良好的效果<sup>[2,3]</sup>。本文采用 Marc 软件提供的直接约束法来模拟断层和泥化夹层。

岩石层间裂隙的摩擦特性同岩石的粗糙程度、岩石的强度、断层的发育程度等众多因素有关。本文采用了如下的滑动摩尔-库仑摩擦模型:

$$f_i \leq -\mu \cdot f_n \cdot t$$

式中,  $f_i$  为切向摩擦力,  $f_n$  为接触节点法向反力,  $\mu$  为摩擦系数,  $t$  为滑动速度方向上的切线单位矢量。计算中定义的接触变形体摩擦系数见表2。

表2 接触体抗滑摩擦系数

| 岩体名称         | $f_5$ | $f_{36}$ | 泥化夹层 |
|--------------|-------|----------|------|
| 抗滑摩擦系数 $\mu$ | 0.3   | 0.4      | 0.45 |

### 2.4 开挖过程仿真

根据长江设计院提供的初步开挖施工方案, 在 285、301.5、315、330、345、360 m 高程分别设有马道, 开挖以 6~7 m 为一步, 共通过 14 步完成。各步开挖对应的高程见表3。

表3 各步开挖对应的高程 m

| 步骤 | 高程  | 步骤 | 高程    |
|----|-----|----|-------|
| 1  | 360 | 8  | 315   |
| 2  | 352 | 9  | 310   |
| 3  | 345 | 10 | 305   |
| 4  | 340 | 11 | 301.5 |
| 5  | 335 | 12 | 285   |
| 6  | 330 | 13 | 280   |
| 7  | 322 | 14 | 275   |

### 2.5 边界条件及工况

边界条件为: 在两侧边界及底面加法向约束。由于地下水位较低, 均在开挖边坡最低高程以下, 故忽略其影响。

为了分析加固措施的有效性, 考虑两个计算工况。计算工况1为在开挖过程和完成后都不采取支护措施。计算工况2为在开挖过程中进行锚索及时支护, 考虑施工过程的复杂性, 每开挖 15 m 高程进行一次支护。锚索的单孔设计荷载为 1500 kN, 方向沿水平方向向下倾斜, 倾角约为 15°。在 330 m 高程以上, 锚索穿过  $f_5$  断层锚固在坚硬岩体上, 330 m 高程以下, 锚索穿过泥化夹层区, 锚固在坚硬岩体上。锚索的平均间距为 6 m, 共 12 根。

## 3 计算结果

### 3.1 变形

两种工况下边坡变形示意如图2所示, 边坡开挖过程中位移最大值比较见表4。

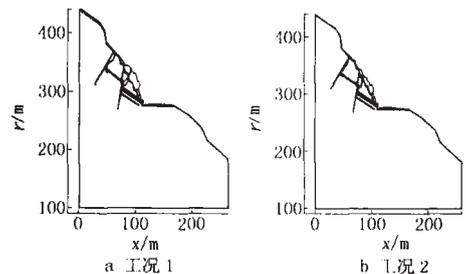


图2 断面开挖完成后边坡变形示意

支护措施对岩体变形的大小和分布都有一定影响。未支护情况下  $f_5$  断层以上部分岩体发生沉降,  $f_5$  断层以下岩体在开挖边坡表面出现回弹。在开挖至 315 m 高程以前, 水平变形最大值发生在 300 m 高程  $f_1$  断层处; 当边坡开挖至 315 m 高程以下时, 水平变形最大值发生在 315~330 m 高程之间的边坡表面, 至开挖完成后, 水平位移最大值为 14.8 mm, 沉降最大值为 9.3 mm。支护后, 岩体的水平变形和沉降均减小, 开挖完成后, 水平位移最大值为 8.5 mm, 沉降最大值为 5.6 mm。

表 4 边坡开挖最大变形值比较

| 高程/m  | 工况 1 条件下的最大变形值/mm |     |     | 工况 2 条件下的最大变形值/mm |     |     |
|-------|-------------------|-----|-----|-------------------|-----|-----|
|       | 水平                | 沉降  | 回弹  | 水平                | 沉降  | 回弹  |
| 360   | 2.7               | 1.3 | 1.2 | 2.7               | 1.3 | 1.2 |
| 345   | 5.5               | 2.8 | 3.0 | 5.5               | 2.6 | 3.0 |
| 330   | 6.3               | 4.2 | 3.1 | 6.1               | 3.2 | 3.2 |
| 315   | 7.9               | 5   | 3.6 | 5.6               | 3.4 | 3.8 |
| 301.5 | 10.9              | 6.3 | 4.6 | 7.0               | 3.9 | 4.6 |
| 285   | 13.0              | 7.7 | 4.6 | 7.6               | 4.4 | 4.6 |
| 275   | 14.8              | 9.3 | 4.6 | 8.5               | 5.6 | 4.6 |

断层对边坡开挖过程中变形影响很大。开挖完成后, 水平方向的变形主要集中在  $f_5$  断层、泥化夹层和  $f_{36}$  断层所包含的区域。这部分岩体发生较大位移变形, 为潜在的滑坡体(见图 3)。在该潜在滑坡体边界上选取 5 个代表点(见图 3 中的 A、B、C、D、E), 这 5 个点的位移变化过程见图 4、5。从图 4、5 中可以看出, 该潜在滑坡体存在临空面, 沿着断层和软弱夹层的倾向发生较大的变形。各代表点水平位移和总位移变形值随开挖的进行变大。未考虑支护时, 开挖完成后 A、B 两点水平位移为 3~4 mm, 总位移变形为 6~8 mm; C 点水平位移变形为 4.5 mm, 总变形为 9 mm(C 点位移变形较其他点大, 与 C 点处于断层  $f_1$  与  $f_{36}$  交叉处有关); D、E 两点所处的岩面在开挖完成前未临空, 而在开挖完成后, 位移变形迅速增加。考虑支护后, 潜在滑坡体的位移变形得到有效控制, 开挖完成后, 滑坡体上 5 个代表点 A、B、C、D、E 的水平变形值均小于 4 mm。

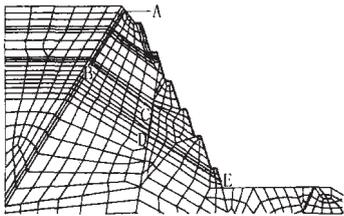


图 3 潜在滑坡体

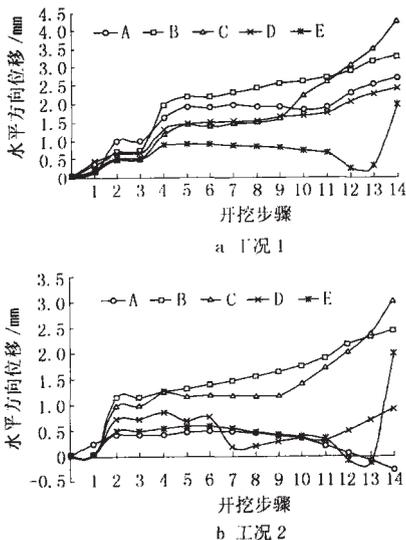


图 4 滑坡体代表点分步开挖水平位移变形

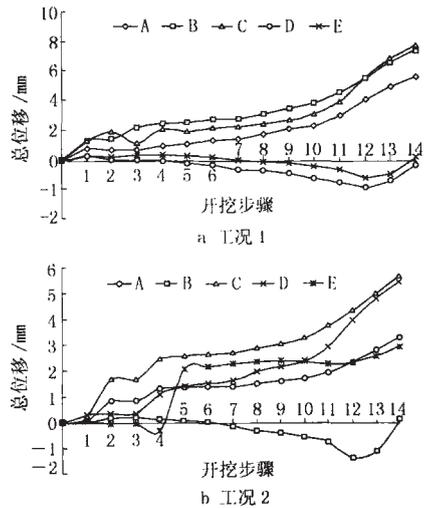


图 5 滑坡体代表点分步开挖总位移变形

### 3.2 应力

开挖完成后, 潜在滑坡体为拉应力区,  $f_{36}$  断层与泥化夹层交叉处出现拉应力集中, 拉应力最大值发生在该部位。未考虑支护措施时, 拉应力值在 0~1.5 MPa 之间; 考虑支护措施后, 拉应力基本消失。

### 3.3 塑性区分布

可通过塑性区的大小和分布来评价边坡的整体稳定性。未考虑支护措施时, 在开挖过程中, 从第 9 步开始  $f_1$  断层出现塑性屈服区, 从开挖边坡向内延伸, 开挖至 12 步时, 与  $f_5$  断层塑性区贯通, 开挖完成后  $f_1$  与  $f_5$  断层出现大面积的塑性屈服区。而考虑支护措施后, 在开挖的过程中  $f_1$ 、 $f_5$  断层塑性屈服区显著减小。开挖完成后  $f_5$  断层顶端屈服区消失,  $f_1$  与  $f_5$  断层屈服贯通区消失,  $f_1$  断层仅在 301.5~315 m 高程出现面积不大的塑性屈服区。

## 4 结论

(1) 在边坡的开挖过程中, 易在断层的交叉处发生滑坡, 特别是当断层在开挖完成后处于临空面时, 岩石体的变形会发生很大变化。

(2) 直接约束法是模拟岩体边坡断层的简便、有效的方法。断层交叉部位是拉应力和塑性区分布集中的地方, 在边坡开挖中需给予特别注意。

(3) 在岩石高边坡开挖过程中, 及时的应力支护效果是明显的。通过预应力锚索支护, 可有效地减小滑坡体的变形值和塑性区面积。

### 参考文献:

- [1] MSC.Software. Marc User Manual Volume I[X]: Theory Manual, 2003.
- [2] 杜丽惠, 邓良军, 等. 水口水电站厂坝接触分析[J]. 水力发电, 2003, 29(1): 24-27.
- [3] 张丙印, 师瑞峰, 王刚. 高面板堆石坝面板脱空问题的接触力学分析[J]. 岩土工程学报, 2003 (3): 361-364.
- [4] 杜丽惠, 张小妹, 等. 水布垭地下厂房开挖施工过程的数值仿真分析[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 26-29.