

# 小湾电站进水口高边坡稳定性研究

黄俊, 梅明荣, 任青文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了确定小湾电站边坡的最小安全系数, 利用 UTEXAS2 软件对进水口正面、侧面共 7 个剖面进行了分析计算, 对侧面采用圆弧搜索法计算安全系数, 给出最危险滑移线; 对正面边坡, 根据其缓倾角断层和陡倾角结构面, 采用非圆弧搜索法对指定滑面进行计算, 将最危险的  $f_3$  断层及  $g_{m89-8}$  断层与各陡倾角结构面进行组合, 得出当  $f_3$  与陡倾角结构面  $f_{12}$  进行组合时, 在剖面 6 处安全系数最小的结论。

**关键词:** 边坡稳定; 进水口; 安全系数; 小湾电站

**中图分类号:** TU432

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2003)04-0020-03

小湾电站地下厂房进水口位于大椿树沟右侧山坡。进水口平台开挖后将在大椿树沟左右两侧形成高边坡。右侧主要为平台后侧边坡(正面边坡), 坡高约 150 m; 左侧为平台侧面边坡, 坡高约 130 m。边坡高大, 地势陡峭, 正面边坡走向为  $N40^\circ W$ , 开挖面倾向为  $50^\circ$ , 平均坡度为  $78^\circ$ 。

进水口侧面边坡的稳定性主要取决于岩土强度, 不受结构面控制, 破坏形式主要为顺层滑移型和倾倒性质的崩塌破坏。

影响进水口边坡稳定的主要结构面是 NWW 向和近 SN 向的中缓倾角结构面, 以及 NWW 向和近 SN 向陡倾角结构面。它们相互切割、组合, 可能构成对边坡稳定不利的楔体。

地面高程 1130 m 以下的大椿树沟下游侧有部分基岩裸露, 其余地段多被坡、崩积层所覆盖。强风化带发育较深, 最大深度约 30 m。

坝址地段无 1 级断层分布, 2 级断层仅有  $F_7$ , 其破碎带总宽 18.6 ~ 37 m, 主裂面宽度一般为 0.8 ~ 2.5 m, 与坝踵之间最近距离约 50 m。3 级断层主要有  $F_3, F_{11}, F_{10}, F_5, F_{20}$  5 条。其余均为 4 级以下结构面, 这些结构面除  $f_3$  和  $g_{m89-8}$  为中缓倾角外, 其余均为陡倾角结构面。电站进水口地段正面岩质边坡稳定性主要由结构面及其强度指标控制, 其可能的变形破坏类型为顺层滑移型(平面和楔体); 其次, 表层一定厚度范围内尚有由卸荷而产生的滑移型和倾倒型失稳。下面的分析中, 取剖面 4, 5, 6, 7 为进水口正面边坡剖面, 剖面 1, 2, 3 为进水口侧面边坡剖面。

## 1 计算方法及软件

UTEXAS2 软件是对二维边坡稳定性进行分析计算的一种软件, 该程序基于条分法的思想。尽管条分法主要是用来分析土质边坡的, 但对于下列情况, 也可使用条分法: 其一是较为均质的边坡, 如由土壤、砂、卵石、砾石等组成的天然边坡或人工边坡(均质土坝、砂壳坝等), 由于这类边坡的最危险剪切面的形状和圆弧相差不远, 同时在临界剪切面附近安全系数  $k$  的变化不是很灵敏, 故可假定剪切面为圆弧面, 而采用毕肖普法; 其二是关于由基岩构成的天然边坡问题, 此类边坡的剪切面主要由基岩中的软弱构造面决定, 边坡的稳定性取决于构造面的产状和其上的抗剪指标, 而对于风化破脆的基岩边坡, 发生浅层滑动时, 其滑面也往往是某种软弱面, 如覆盖于基岩的接触面、表层顺坡裂隙等。此时可将滑动体划成若干竖向条块进行计算, 本文正是利用 UTEXAS2 软件对此类情况进行分析。

UTEXAS2 程序中有 4 种计算边坡稳定的方法可供选择, 即毕肖普法、斯宾塞法、工程师军团法和罗厄法。根据不同情况, 可选用不同方法, 若不作任何设定, 默认方法为斯宾塞法。对于具体的边坡情况, 若边坡材料没有断层, 则有简单圆弧法和圆弧搜索法 2 种方式进行选择。简单圆弧法是在滑面大致确定的情况下, 输入圆心和半径(或圆心和圆弧上一点)来计算此时边坡稳定安全系数的。圆弧搜索法则是在滑面不确定的情况下, 先根据滑动体按圆弧滑面

滑动时的圆心所处的大致范围,选取 9 个点进行计算,然后对安全系数最小的点再取一个范围,重新算出 9 个点的安全系数,并取最小值,如此不断搜索下去,直到找到最小安全系数为止.若边坡材料中有明显的断层,则由于边坡沿断层滑动的可能性较大,故此时可将各断层指定为滑面,即将 UTEXAS2 中的底滑面设为指定滑面,采取非圆弧指定滑面进行计算.

UTEXAS2 软件不仅提供了上述方法,而且还能对滑动体受力情况进行设定,如是否考虑孔隙水压,是否考虑地震荷载及后缘水张力等.对非均质边坡,或者由于风化使得边坡各层的材料有所区别时,可通过材料特性中的粘聚力  $c$ ,内摩擦角  $\varphi$ ,容重  $\gamma$  进行设定,不仅如此,UTEXAS2 软件还能设定最大迭代次数和初始迭代安全系数  $k$ ,以及对边坡加固后的安全系数进行计算.该软件在计算安全系数的同时,还能附带计算出各条块底面中心点的正应力(包括有效正应力)和剪应力<sup>[1,2]</sup>.

2 岩体物理力学参数及计算工况

依据所提供的地质资料和科研试验成果,采用的进水口及岩土物理力学参数见表 1.

表 1 进水口及岩土物理力学参数采用值

| 岩层位置     | 峰值强度/MPa |      | 残余强度<br>/MPa | 倾角                  |                 |
|----------|----------|------|--------------|---------------------|-----------------|
|          | 结构面      | 岩桥   |              | $\varphi'/(^\circ)$ | $c'/\text{MPa}$ |
| 强风化强卸荷带  | 0.42     | 0.90 | 0.35         | 29.4                | 0.15            |
| 弱风化上段卸荷带 | 0.48     | 1.00 | 0.45         | 35.5                | 0.25            |
| 弱风化下段卸荷带 | 0.54     | 1.05 | 0.50         | 39.4                | 0.35            |
| 弱风化下段    | 0.62     | 1.20 | 0.58         | 45.4                | 0.91            |
| 微风化卸荷带   | 0.55     | 1.10 | 0.50         | 41.3                | 0.56            |
| 微风化新鲜带   | 0.70     | 1.43 | 0.63         | 51.8                | 1.35            |

岩体天然容重  $26.3\text{ kN/m}^3$ ,饱和容重  $26.7\text{ kN/m}^3$ ,堆积体边坡岩(土)体力学参数值为:崩塌堆积物  $\varphi' = 40^\circ$ ,  $c' = 0.04\text{ MPa}$ ,由于边坡前面为大椿树沟,故  $\varphi'$ ,  $c'$  均按倾沟选取.

表 2 是关于各种工况的组合情况,“+”号表示施加该种荷载.其中工况 1,2,3,4 是针对剖面 1,2,3 进行组合的,而工况 5,6,7 是针对剖面 4,5,6,7 进行组合的.考虑到工程中的实际情况,分别对有无静水压力、地震惯性力和后缘水张力的情况进行了分析计算.

表 2 工况组合情况

| 计算工况组合 | 荷载   |        |       |       |
|--------|------|--------|-------|-------|
|        | 滑体自重 | 地下静水压力 | 地震惯性力 | 后缘水张力 |
| 1      | +    |        |       |       |
| 2      | +    |        | +     |       |
| 3      | +    | +      |       |       |
| 4      | +    | +      | +     |       |
| 5      | +    | +      |       |       |
| 6      | +    | +      | +     |       |
| 7      | +    | +      | +     | +     |

3 成果分析

利用 UTEXAS2 软件对剖面 1~7 处边坡的稳定性进行了分析,由于剖面 1,2,3 处于进水口的侧面,且没有顺层向的软弱层,前面有大椿树沟,故可将不同风化层的粘聚力和内摩擦角按倾沟方向选取.针对剖面 1,2,3 处边坡没有明显滑面,选取斯宾塞法对此 3 处剖面边坡的最小安全系数进行圆弧搜索,并对考虑含水与不含水和有否地震力的情况分别进行了计算.由于边坡表面压力对岩质边坡的影响较小,所以没有考虑有表面力的情况.

图 1 是对剖面 2 处的边坡进行圆弧搜索所得最小安全系数时的滑移线.从表 3 可以看到当考虑地震力时各剖面安全系数最小,其中剖面 2 处工况 4 的安全系数最小.但总体安全系数都大于 1,偏安全,故在进水口侧面边坡可不考虑采取加固措施.

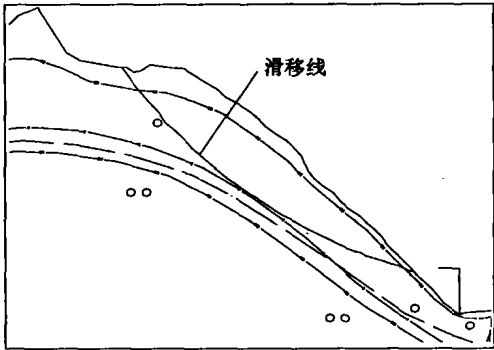


图 1 剖面 2 处滑移线

表 3 不同工况下剖面 1,2,3 边坡滑动时最小安全系数

| 剖面 | 最小安全系数 |       |       |       |
|----|--------|-------|-------|-------|
|    | 工况 1   | 工况 2  | 工况 3  | 工况 4  |
| 1  | 1.466  | 1.359 | 1.454 | 1.375 |
| 2  | 1.500  | 1.296 | 1.485 | 1.261 |
| 3  | 1.427  | 1.269 | 1.420 | 1.269 |

剖面 4,5,6,7 处边坡位于进水口正面.由于中缓倾角断层较多,特别是断层  $f_3$  顺坡向,极易滑动.这几个剖面若是滑动必然沿着陡倾角结构面和缓倾角结构面的组合面进行,此时使用 UTEXAS2 软件可选罗厄法,并采用非圆弧法,根据各组合结构面将滑动体分成若干竖向条块进行分析即可.本文对这几个剖面也分含水与不含水,是否考虑地震系数,是否考虑后缘水张力几种情况进行了分析.

表 4 是关于剖面 4 的组合情况及其计算结果,该层缓倾角软弱面主要是  $G_{m89-8}$  和  $f_1$ ,和陡倾角结构面  $f_6$  构成滑面.尽管剖面 4 处还有 3 级断层  $F_3$ ,但由于其处于坡底,且坡角较大,所以可不予考虑.从表中的数据可知,计算所得最小安全系数为 1.548,故可判断该处边坡安全度较大.

表4 剖面4处边坡结构面组合时的安全系数

| 计算工况 | 安全系数(结构面组合)       |             |
|------|-------------------|-------------|
|      | $g_{m89-8} + f_6$ | $f_1 + f_6$ |
| 5    | 2.437             | 1.797       |
| 6    | 2.138             | 1.548       |
| 7    | 2.138             | 1.548       |

在剖面5,6,7中由于出现了断层 $f_3$ ,考虑其滑动的可能性较大,为了使计算结果与实际相符,将 $f_3$ 断层设为一狭长软弱带,宽度取为1m,指定滑面取为沿此软弱带上边缘,然后与陡倾角进行组合。

表5是关于剖面5处的结构面组合情况及其计算结果,该处陡倾角结构面有4个,缓倾角结构面仍然主要是 $g_{m89-8}$ 和 $f_3$ 。从计算所得结果可知,对于同一组合结构面,考虑地震荷载时,安全系数明显减小;而对于考虑后缘水张力的情况,对计算结果显然没有影响,这是与实际情况相符的。在相同荷载作用下,结构面进行组合时,断层(特别是 $f_3$ )越长,安全系数越小,当 $f_3$ 与 $f_{12}$ 进行组合时,得到最小安全系数,特别是当考虑地震荷载时,安全系数只有0.888,小于1,因而需要采取加固措施。

表5 剖面5处边坡结构面组合时的安全系数

| 计算工况 | 安全系数(结构面组合) |       |             |             |             |                |
|------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|----------------|
|      | $g_{m89-8}$ | $f_1$ | $f_3 + f_6$ | $f_3 + f_2$ | $f_3 + f_5$ | $f_3 + f_{12}$ |
| 5    | 1.676       | 2.070 | 1.814       | 1.734       | 1.353       | 1.069          |
| 6    | 1.471       | 1.829 | 1.546       | 1.482       | 1.135       | 0.888          |
| 7    | 1.471       | 1.829 | 1.546       | 1.482       | 1.135       | 0.888          |

表6和表7是关于剖面6和剖面7处边坡的结构面组合情况,与表4中的组合大致相似,由计算结果不难发现,在剖面6上,沿 $f_3$ 与陡倾角 $f_{12}$ 滑动时,有着更小的安全系数,从地质剖面情况来看,笔者认为,这主要是由于6号剖面断层坡度较大的缘故。从表5,6,7中数据还可以看到,在与 $f_3$ 的各种组合情况中,断层的长度越大,则安全系数越小,对于剖面7而言,在断层 $f_2$ 与 $f_3$ 处有改变,这主要是由于坡面在断层 $f_3$ 处坡度有着明显的改变而造成的。

表6 剖面6处边坡结构面组合时的安全系数

| 计算工况 | 安全系数(结构面组合) |       |             |             |             |                |
|------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|----------------|
|      | $g_{m89-8}$ | $f_1$ | $f_3 + f_6$ | $f_3 + f_2$ | $f_3 + f_5$ | $f_3 + f_{12}$ |
| 5    | 1.827       | 2.312 | 1.620       | 1.396       | 1.145       | 0.998          |
| 6    | 1.593       | 2.054 | 1.384       | 1.187       | 0.970       | 0.836          |
| 7    | 1.593       | 2.054 | 1.384       | 1.187       | 0.970       | 0.836          |

表7 剖面7处边坡结构面组合时的安全系数

| 计算工况 | 安全系数(结构面组合) |             |             |             |                |             |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
|      | $f_1$       | $f_3 + f_6$ | $f_3 + f_2$ | $f_3 + f_5$ | $f_3 + f_{12}$ | $f_3 + f_7$ |
| 5    | 1.503       | 1.612       | 1.461       | 1.643       | 1.451          | 1.324       |
| 6    | 1.403       | 1.377       | 1.249       | 1.407       | 1.240          | 1.127       |
| 7    | 1.403       | 1.377       | 1.249       | 1.407       | 1.240          | 1.127       |

从以上计算所得数据可知,边坡沿陡倾角滑面与缓倾角断层 $f_3$ 所形成的组合结构面滑动的可能性较大,特别是断层 $f_3$ 与 $f_{12}$ 构成的组合面,滑动块体较大,计算的安全系数小于1,明显处于不安全的状态,较易滑动,因而需要采取加固措施。

## 4 结 论

a. 本文利用UTEXAS2软件对小湾电站进水口边坡稳定性进行了分析,分析结果表明,在考虑地震力、后缘水张力及孔隙水压的情况下,进水口正面边坡沿缓倾角结构面 $f_3$ 与各结构面进行组合时所得安全系数较小,特别是在剖面6处,与陡倾角断层 $f_{12}$ 和 $f_3$ 组合时所得安全系数更小,此处块体处于不稳定状态。

b. 由地质剖面图可以看到,在剖面6处断层 $f_3$ 与 $f_{12}$ 组合时有最小的安全系数,因此可以判断滑动体沿断层 $f_3$ 在深层有首先滑动的趋势。笔者认为,在考虑地震等荷载作用下,对进水口正面边坡断层 $f_3$ 处采取深层加固,是可以达到安全度要求的。

c. 本文仅对进水口正面和侧面边坡进行平面稳定性分析,没有考虑水位骤降的情况,这有待于进一步深化分析。

## 参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1995.
- [2] 华东水利学院,成都科技大学.岩石力学[M].北京:水利电力出版社,1993.

(收稿日期:2002-09-10 编辑:熊水斌)

## ·简讯·

### 中国水利学会 2003 学术年会将在深圳召开

中国水利学会将于2003年10月在深圳召开2003学术年会,本届年会的主题是:“水与现代化”。征文范围包括水利基础性科学、应用科学、管理科学、高新技术在水利中的应用、水利边缘学科和各类软科学成果。征文内容要求扣紧主题,着眼于本世纪水利科学的难点、热点问题,强调瞄准国内外水利科学研究和技术管理的前沿,强调科技成果向生产力的转化,鼓励创新和面向基层,充分体现水和水利科技在实现现代化和建设小康社会中的重要作用。

征文联系:100053 北京白广路二条2号 中国水利学会学术交流部

(本刊编辑部供稿)