

# 小湾水电站进水口正面边坡稳定性分析

陈 砺, 李开德, 祁豫疆, 陈 旭

(国家电力公司昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650041)

**摘要:**通过对小湾水电站进水口正面边坡的岩性、构造、岩石及岩体的物理力学性质及可能的变形破坏机制进行分析, 运用 CSMR 边坡岩体分类方法及计算方法评价其在电站施工期和运行期的稳定性, 为进水口边坡的设计、处理和支护提供基础资料。

**关键词:**边坡; CSMR 边坡岩体分类; 小湾水电站

**中图分类号:** TV671

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1006-7647(2001) 07-0050-03

云南省澜沧江小湾水电站位于澜沧江中游, 水库是澜沧江中、下游河段梯级电站的龙头水库。选定双曲拱坝坝型, 最大坝高 292 m, 水库总库容量为  $149.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 总装机容量为 4 200 MW, 多年平均发电量为  $188.8 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。引水发电系统布置在右岸, 采用地下式厂房方案。进水口正面边坡走向  $N40^\circ W$ , 分上、下两段开挖(以闸门井平台高程 1 245 m 为界), 进水口(拦污栅)平台建基面高程 1 140 m。

## 1 基本地质条件

电站进水口位于大椿树沟下游侧山坡, 地形坡度约  $44^\circ$ , 沿引水隧洞轴线方向地形坡度为  $38^\circ \sim 41^\circ$ 。高程 1 130 m 以下有部分基岩裸露, 其余地段多被坡、崩积层覆盖。

进水口地段出露的地层主要为时代不明的中-深变质岩系和第四系地层。基岩岩性主要为黑云花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩夹多层薄层状片岩, 片岩在风化卸荷带中易软化成为软弱夹层。第四系地层主要为坡积层和崩积层。

进水口地段分布有 II 级断层  $F_7$  及 III 级断层  $F_3$ 。 $F_7$  产状为近  $EW, N \angle 74^\circ \sim 90^\circ$ , 主裂面宽度为 1.28 m ~ 5.65 m, 由灰白色断层泥、泥化糜棱岩及角砾岩组成, 破碎岩体总宽度为 20.8 ~ 37.0 m, 主要由碎裂岩及碎块岩组成。 $F_3$  产状为  $N80^\circ E, NW \angle 80^\circ \sim 90^\circ$ , 破碎带宽 0.5 ~ 2.5 m, 由多个泥化糜棱岩及断层泥组成的主裂面构成, 单条宽度 0.5 ~ 10 cm, 裂面之间一般为角砾岩和碎裂岩。该部位 IV 级结构面发育, 主要为小断层(f)及挤压面( $g_m$ )。平硐中共揭露 112 条, 按优势产状可分为两组: ①  $N65^\circ \sim 85^\circ W, NE \angle 70^\circ \sim$

$90^\circ$ , 属顺层挤压错动面, 大部分顺片岩夹层发育, 破碎带一般在两壁附近有厚数厘米连续分布的断层泥和糜棱岩, 其它部分为碎裂岩夹岩屑和泥膜, 平均间距 3.85 m; ②  $SN$ , 近直立, 多属张性, 主要由碎块岩及少量糜棱岩和不连续泥膜组成, 平均间距 11 m。中缓倾角 IV 级结构面不发育, 根据勘探成果, 规模较大的 IV 级结构面主要为  $f_3$ , 整体产状为  $N75^\circ \sim 90^\circ W, NE \angle 40^\circ \sim 45^\circ$ , 宽 20 ~ 35 cm, 由角砾岩、糜棱岩及断续的泥膜组成, 面波状起伏, 局部表现为张性, 可见有石英晶体发育。

V 级结构面-节理发育, 按优势产状可分为 3 组: ①  $N5^\circ \sim 15^\circ E, NW \angle 85^\circ \sim 90^\circ$ ; ②  $N70^\circ \sim 80^\circ W, NE \angle 75^\circ \sim 85^\circ$ ; ③  $SN, N \angle 32^\circ \sim 45^\circ$ 。

进水口地段岩体风化以表层均匀风化为主, 夹层风化现象不明显。强风化岩体底界铅直埋深 11.16 ~ 29.86 m, 弱风化岩体底界铅直埋深 22.86 ~ 42.67 m。在角闪斜长片麻岩分布地段有少量全风化岩体, 其水平厚度一般为 3 ~ 5 m。该部位岸坡卸荷作用较强烈, 强卸荷带岩体一般厚 5 ~ 10 m, 局部厚 20 ~ 30 m, 卸荷带岩体底界水平埋深 20 ~ 60 m。卸荷裂隙按成因可分为岸边剪切裂隙和卸荷拉张裂隙。因临空面不同, 分别形成两组不同方向的岸边剪切裂隙, 一组倾向河谷, 产状近  $SN, E \angle 32^\circ \sim 45^\circ$ , 一组倾向大椿树沟, 产状  $N68^\circ \sim 90^\circ W, NE \angle 30^\circ \sim 45^\circ$ 。在强风化岩体和弱风化上段岩体中卸荷裂隙一般延伸较长, 张开并充填岩屑或次生泥, 在弱风化下段岩体和微风化岩体中一般延伸较短, 多闭合或微张。

进水口地段地下水主要为基岩裂隙潜水, 潜水位埋深 27 ~ 50 m。

作者简介: 陈砺(1969—), 男, 河南濮阳人, 工程师, 主要从事水文地质与工程地质研究。

## 2 变形失稳机制

小湾水电站进水口边坡岩体结构类型主要为次块状-块状结构,其稳定程度受结构面及其强度指标控制。研究表明,进水口边坡变形失稳型式有:

a. 平面型滑动破坏。由于进水口边坡部位缓倾坡外的结构面走向与边坡走向夹角多大于 $20^\circ$ ,且其延伸长度有限,故不存在整体平面型滑动的可能。平面型滑动破坏主要以近 SN,  $E\angle 32^\circ \sim 45^\circ$  或  $N68^\circ \sim 85^\circ W$ ,  $NE\angle 30^\circ \sim 45^\circ$  的卸荷裂隙、挤压面及节理为底滑面,近 SN 或近 EW 向陡倾角结构面为切割面,向开挖临空方向的滑移式崩塌或小型平面型滑动。

b. 楔形体滑动破坏。有两种组合形式:① 由 SN,  $E\angle 32^\circ \sim 45^\circ$  和  $N68^\circ \sim 90^\circ W$ ,  $NE\angle 30^\circ \sim 45^\circ$  两组卸荷裂隙、节理构成的楔形体滑动变形破坏,② 由  $f_3$  与走向 NNE 陡倾角的 IV 级结构面或 SN,  $E\angle 32^\circ \sim 45^\circ$  卸荷裂隙组合构成的楔形体滑动变形破坏。

## 3 计算参数选择

根据枢纽区进行的 13 组岩体现场抗剪试验、9 组结构面现场抗剪试验及 2 组  $f_3$  原状样室内中型剪切试验,综合考虑各种影响因素,给出结构面及边坡岩体力学指标建议值,详见表 1 和表 2。

表 1 边坡岩体力学指标建议值

| 分带       | 结构面抗剪强度 |                 | 岩桥抗剪强度 |                 | 中缓倾角结构面连通率/% |       |
|----------|---------|-----------------|--------|-----------------|--------------|-------|
|          | $f$     | $c'/\text{MPa}$ | $f$    | $c'/\text{MPa}$ | 倾河床          | 倾沟谷   |
| 强风化或强卸荷  | 0.38    | 0.042           | 0.9    | 0.4             | 90~100       | 70~90 |
| 弱风化上段,卸荷 | 0.48    | 0.048           | 1.0    | 0.5             | 70~90        | 60~70 |
| 弱风化下段,卸荷 | 0.54    | 0.054           | 1.1    | 0.6             | 50~70        | 40~60 |
| 弱风化下段    | 0.62    | 0.074           | 1.2    | 1.3             | 40~50        | 30~40 |
| 微风化,卸荷   | 0.55    | 0.060           | 1.1    | 0.9             | 50~60        | 40~50 |
| 微风化,新鲜   | 0.70    | 0.120           | 1.4    | 1.7             | 30~40        | 25~30 |

表 2 结构抗剪强度建议值

| 结构面类型             | 峰值强度      |                 | 残余强度      |
|-------------------|-----------|-----------------|-----------|
|                   | $f$       | $c'/\text{MPa}$ | $f$       |
| 无充填节理             | 0.60~0.70 | 0.08~0.13       | 0.55~0.63 |
| 有少量泥、绿泥石、高岭石膜充填节理 | 0.45~0.55 | 0.045~0.06      | 0.38~0.50 |
| 岩屑夹泥型             | 0.40~0.50 | 0.04~0.055      | 0.30~0.40 |
| 泥夹岩屑型             | 0.25~0.35 | 0.02~0.035      | 0.20~0.30 |

根据现场对中缓倾角节理几何参数的大量量测资料(测线法),建立其分布特征的定量统计模型,用节理岩体网络模拟方法,确定中缓倾角节理组在不同剪切方向上的连通率,并考虑与部分陡倾角结构面的组合关系,结合枢纽区中缓倾角结构面连通率实测资料进行综合分析,建议中缓倾角结构面连通率值见表 1。

## 4 边坡稳定性分析

### 4.1 CSMR 边坡岩体分类方法

用“八五”科技攻关成果边坡岩体分类方法对进水口正面边坡进行稳定性评价,将边坡岩体分为 3 个带:强风化或强卸荷带、弱风化卸荷带及微风化-新鲜岩体带,对各带逐项评分,结果见表 3。

表 3 进水口正面边坡 CSMR 评价

| 部位       | RMR 评分 | 城高修正系数 $\xi$ | 结构面条件系数 $\lambda$ | CSMR 评分 | 稳定性评价 |
|----------|--------|--------------|-------------------|---------|-------|
| 强风化或强卸荷带 | 25.2   | 1.2          | 1.0               | 16.24   | 很差    |
| 弱风化卸荷带   | 56.2   | 1.1          | 0.8               | 52.62   | 一般    |
| 微风化-新鲜岩体 | 79.5   | 0.9          | 0.7               | 64.75   | 好     |

注:①  $\text{CSMR} = \xi \cdot \text{RMR} + \lambda \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4$ , 修正系数  $F_1, F_2, F_3, F_4$  分别取 0.5, 0.8, -60, 10; ② 评价中未考虑地应力的影响; ③ 评价中未考虑特定结构面的组合。

### 4.2 定位楔形体稳定分析

着重研究  $f_3$  断层与近 SN,  $E\angle 32^\circ \sim 45^\circ$  的卸荷裂隙组合形成的潜在楔形体的稳定性。 $f_3$  断层的抗剪强度指标为:  $\varphi = 22^\circ$ ,  $c = 0.04 \text{ MPa}$ ; 考虑连通率后卸荷裂隙的抗剪强度指标为:  $\varphi = 28^\circ$ ,  $c = 0.15 \text{ MPa}$ 。利用三维楔形体稳定分析程序计算其安全系数为 1.173。同时对卸荷裂隙不同连通率下的强度指标进行了敏感性分析,计算结果见表 4。

表 4 卸荷裂隙强度敏感性分析计算结果

| $\varphi$  | $c = 0.10 \text{ MPa}$ | $c = 0.12 \text{ MPa}$ | $c = 0.15 \text{ MPa}$ | $c = 0.18 \text{ MPa}$ | $c = 0.20 \text{ MPa}$ |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $25^\circ$ | 1.040                  | 1.088                  | 1.162                  | 1.238                  | 1.288                  |
| $28^\circ$ | 1.054                  | 1.101                  | 1.173                  | 1.246                  | 1.296                  |
| $30^\circ$ | 1.066                  | 1.112                  | 1.182                  | 1.254                  | 1.303                  |

### 4.3 随机楔形体稳定分析

根据现场对结构面几何参数的大量量测资料(测线法),建立各组结构面分布特征的定量统计模型,运用 Baecher 模型生成节理岩体三维网络模型,根据结构面的不同组合,找出所有的随机楔形体(包括小型平面型滑动组合)并计算其安全系数,统计安全系数小于 1.0 的随机楔形体的分布深度。分析结果表明:不考虑施工平台,在  $f_3$  断层附近,随机楔形体规模不大,不稳定随机楔形体多出现在深度 4 m 以内;考虑施工平台及  $f_3$  断层,不稳定随机楔形体多出现在深度 15 m 以内,一般不超过 20 m。

## 5 结 论

通过对进水口边坡在电站施工期和运行期的稳定性分析和计算,可以得出以下结论:

a. 进水口边坡属岩质边坡,其可能的破坏形式主要有:以卸荷裂隙为底滑面的滑移式崩塌或小型平面型滑动;由两组卸荷裂隙组合成的楔形体滑动;

由  $f_3$  与 NNE 向陡倾角 IV 级结构面或一组卸荷裂隙组合成的楔形体滑动。

b. CSMR 边坡岩体分类方法结果表明:强风化或强卸荷岩体分布地段边坡稳定条件差,弱风化卸荷岩体分布地段边坡稳定条件一般,微风化-新鲜岩体分布地段边坡稳定条件好。

c. 定位楔形体稳定分析结果表明:由  $f_3$  与一组卸荷裂隙构成的楔形体安全系数较低,其稳定性对

卸荷裂隙的  $c$  值较敏感。

d. 随机楔形体稳定分析结果表明:进水口边坡开挖后,不稳定随机楔形体多出现在深度 15 m 以内,一般不超过 20 m。

e. 在水库蓄水后,结构面的强度将会降低,水位骤降也会影响边坡的稳定,因此,必须考虑适当的处理措施,增加进水口边坡的稳定性。

(收稿日期:2001-07-01 编辑:张志琴)

(上接第 37 页)

仙人洞总长 900 余 m,计划开发利用的约有 240 m,面积达 250 m<sup>2</sup>。仙人洞由上、中、下三层洞穴组成,上洞长 30 m,面积 26 m<sup>2</sup>,顶部悬挂有“骆驼”、“佛像”等各种造型的钟乳石;中洞总长 55 m,面积 65 m<sup>2</sup>,发育有 4 个厅,厅内石笋、石钟乳发育,壁上布满“石葡萄”,洞底钙华铺地;下洞总长 130 余 m,面积 156 m<sup>2</sup>,除了可见“石帘”、石钟乳及各种造型的滴水外,最具特色的是有多处响水坝。在离下洞出口约 40 m 处的一响水坝为洞内最低点,洞内水流由此进入暗河,形成潺潺流水响声,令人心旷神怡,洞底流水深约 30 cm,终年不断。洞内发现有隋、唐、五代、宋、元、明瓷器片及明代釉陶壶。

青龙洞洞长 150 余 m,由上下两层洞穴组成,其洞径较大,均在 4 m 以上,最大可达 13.5 m,高在 10 m 以上。洞内曲境幽静,“山、石、廊、庙”琳琅满目,一应俱全,颇具苏州园林色彩。又如玉柱洞,洞长 30 m,洞高约 2 m,洞顶小钟乳石遍布,常年滴水,且随降水量的多少而变化。

此外,茅山地区溶洞人类利用的历史悠久,化石丰富。在洞内采集了大量的古脊椎动物化石,时代均为中更新世至晚更新世之间。洞内还发掘了许多有价值的考古文物。值得一提的是华阳洞,据记载曾是三茅祖师修炼得道的圣地,具天下“第一福地第八洞天”之称,华阳洞洞名石刻便是北宋政治家、文学家、书法家苏东坡的真迹。在华阳洞内发现了鹿、斑鬣狗、棕熊、水牛、小动物牙齿等化石以及唐朝至明朝时期的筒瓦、铁鎏金龙片、金圈、瓷器盖等文物。

## 4 结 语

茅山地区的岩溶洞穴是该地区岩石、构造(特别是新构造)、气候、水文等因素的综合作用的结果,具有介于南方湿润气候型和北方亚湿润气候型岩溶地区之间的苏南地区岩溶区的发育特征:①岩溶发育主要受构造影响,结构简单,具成层性,且具有一定

的方向性;②岩溶发育受地貌影响,溶洞发育高度普遍大于宽度;③溶洞在不同的灰岩段内发育程度存在差异。同时茅山地区岩溶洞穴如仙人洞、华阳洞等具有一定的规模,洞内发育各种造型的钟乳石,景色优美,且依山傍水,距南京、镇江、常州均为 60 ~ 70 km,水陆交通便利,具有良好的旅游开发价值。

(收稿日期:2001-09-19 编辑:熊水斌)

(上接第 39 页)

## 5 结 语

现行岩石(体)力学严格来讲应属于加载岩石(体)力学范畴,而岩体工程开挖形成的二次应力场中,切向应力表现为加载,径向应力表现为卸载。从力学本质上来分析主要是卸载。岩体工程在加载与卸载条件下,其力学特性有本质区别。因此在岩石(体)力学分析研究中首先应划分加载区域和卸载区域,加载方向与卸载方向,加载与卸载的力学状态,然后在研究卸荷岩体工程地质特征的基础上,建立不同的物理力学模型,采用不同的物理力学参数,才能合理地分析卸荷工程岩体的强度与变形特征。卸荷岩体非线性模型的应用过程中关于开挖释放荷载的计算一直存在算法上的争议,本文从新的角度计算开挖面上的应力,精度较高。

卸荷工程岩体的研究是岩体力学研究的新领域,其地质特征、力学参数、本构模型与计算方法的研究亟待进一步加深与完善,卸荷岩体的动力特性、渗流场与应力场的耦合等问题有待进一步补充。

## 参考文献:

- [1] 郑颖人. 岩土塑性力学基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [2] 哈秋龄. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

(收稿日期:2001-07-08 编辑:马敬峰)