

断层对硬梁包水电站主厂房围岩稳定性的影响分析

陈涛¹, 柏纪锋¹, 袁超义¹, 曹世奇², 蒲平新¹

(1. 四川华能泸定水电有限公司, 四川 泸定 626100; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要: 断层等结构面对地下洞室的稳定性起着控制性作用, 研究断层作用下的地下洞室的稳定性对工程的施工安全及支护设计具有重要意义。以硬梁包水电站为例, 分析主厂房区域的断层 F5 对其围岩稳定性的影响, 采用 Flac3D 数值模拟软件, 引入考虑开挖卸荷开裂后力学参数等效降低的岩体劣化本构模型, 对主厂房全部开挖后, 不同断面的岩体劣化特征、卸荷变形量、重分布应力特征进行对比分析。结果表明: 厂房洞室开挖完成后, F5 断层使围岩变形增大了 15%~20%, 使局部变形最大可达到 100 mm 左右, 断层影响区域岩体松弛程度相比于无断层区域明显增大。

关键词: 围岩稳定性; 断层; 岩体劣化力学模型; 地下厂房

中图分类号: TV223.3+2

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2023)01-0006-04

Analysis of the Effect of the Fault on Surrounding Rock Stability of the Main Plant of Yingliangbao Hydropower Station

CHEN Tao¹, BAI Jifeng¹, YUAN Chaoyi¹, CAO Shiqi², PU Pingxin¹

(1. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd., Luding Sichuan 626100;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430064)

Abstract: Fault and other structure planes play a dominating role in the stability of the underground cavern. The stability analysis of the underground cavern under the fault action is of great significance to the construction safety and support scheme of the project. Taking Yingliangbao Hydropower Project as an example, the influence of the fault on the surrounding rock stability was analyzed using Flac3D numerical simulation software, and a rock mass deterioration constitutive model considering the equivalent reduction of mechanical parameter after excavation unloading is introduced. After the excavation of the main plant, rock deterioration characteristics, unloading deformation modulus and stress redistribution characteristics of different sections was compared and analyzed. The results show that after the excavation of the caverns, the existence of Fault F5 created an increase of the surrounding rock deformation by 15%~20%, and the local deformation can reach about 100 mm, and the relaxation degree of rock mass in the fault affected area significantly increased compared with the non-free area without fault.

Key words: Surrounding rock stability; Fault; Rock mass deterioration mechanical model; Underground powerhouse

0 引言

为了更加合理开发利用西南地区丰富的水能资源, 改良国家能源供应结构, 我国在西南地区兴建了一大批引水发电的水电站。西南地区处于我国一二级阶梯交界处, 地质构造复杂, 断层发育, 地下洞室在建设过程中难免会遇到断层发育带。工程实践表明地下洞室中塌方、冒顶等大部分是沿结构面活动的^[1-2]。因此, 断层等结构面对地

下洞室的稳定性往往起着控制性作用, 而研究断层作用下的地下洞室的稳定性对工程的施工安全及支护设计具有重要意义。近年来, 许多学者采用现场监测^[3-4]、相似试验^[5]、数值模拟等方法研究了断层对地下工程围岩稳定性影响。其中现场监测施工难度大, 监测周期长, 且监测范围有限; 相似实验方法成本较大, 耗时长, 且对于复杂地应力条件和边界的模拟较难实现; 而数值模拟由于成本低, 效率高, 且相对快速, 获得了广泛的应用。

以硬梁包水电站地下厂房开挖为研究背景,

收稿日期: 2022-08-05
华能集团总部科技项目: HNKJ21-HF317《复杂构造背景下大型洞群物理数值仿真与动态设计研究》技术研究资助

针对硬梁包主厂房全部开挖后,采用三维数值方法分析无支护条件下主厂房整体及断层 F5 区域的围岩变形破坏,重点对比分析了主厂房不同断面及断层 F5 区域的岩体劣化特征、卸荷变形量、重分布应力特征,评估出 F5 断层对地下厂房稳定性的影响。

1 工程概况

硬梁包梯级水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县冷碛镇境内,为《四川省大渡河干流水电规划调整报告》推荐 28 级方案中的第 14 个梯级电站,上游梯级为泸定水电站,下游为大岗山水电站。坝(闸)址距上游泸定县城约 10.8 km,距下游石棉县城约 100 km,是大渡河流域重要水电工程之一,对甘孜州社会经济发展具有重要的促进和带动作用。

1.1 厂房区域结构布置

硬梁包地下厂房洞室断面形状采用圆拱直墙形,顶拱跨度 27.20 m,岩锚吊车梁以下跨度 24.40 m,最大高度 65.70 m;安装间跨度与主机间相同,最大高度 28.30 m;副厂房毛洞断面尺寸为:跨度 24.40 m,最大高度 38.3 m。主机间、安装间和副厂房长度分别为 122.00 m、54.9 m、20.00 m,总长度为 196.90 m,沿洞轴线岩性变化较大。

1.2 断层 F5 地质特征

断层 F5 是主厂房开挖过程中揭露的主要不利结构面,其产状 $N20^{\circ}W/SW \angle 57^{\circ}$,断层面平直,断层主断带宽 2 m 左右,填充灰绿色碎粉岩,蚀变较明显,强度较低,而且现场监测变形表明断层带区域岩体变形相对较大,局部有开裂。断层主错带内岩体以碎块岩为主,少量碎裂岩,C 类蚀变为主,围岩类别为 IV~V 类,不稳定~极不稳定。

2 数值计算分析方法

该次计算采用 FLAC3D 软件,考虑到主厂房上游侧的四个压力管道,数值模型包含了高压管道结构,基于厂房区域反演得到的三维地应力场,分析无支护条件下 F5 影响区域的围岩稳定性。计算的本构模型采用了考虑岩体卸荷开裂后力学参数等效降低的岩体劣化力学模型(RDM 模型);其初始地应力条件依据实测地应力基础上的反演边界条件;其岩体力学参数主要依据设计建议值和监测数据反演,为了反映出岩体破损区范围,采用了岩体破坏度指标 RFD(值在 0~2 之间,越大表征破坏越严重)。

同时为了分析 F5 断层区域围岩稳定性,根据断层 F5 与主厂房相交的特点,在主厂房依次选取了 9 个剖面(图 1,表 1),依次分析 9 个剖面围岩的卸荷变形、最大/最小主应力和破裂区特征,多角度分析 F5 断层区域围岩稳定性。

表 1 厂房 9 个剖面基本情况

| 剖面编号 | 剖面厂横桩号 | 断面位置 | 断面是否与 F5 断层相交 |
|------|---------|--------------|---------------|
| S1 | 0+15.5 | 1 号机组轴线 | 否 |
| S2 | 0+43.5 | 2 号机组轴线 | 否 |
| S3 | 0+50.97 | 2 号高压管道轴线 | 是 |
| S4 | 0+71.5 | 3 号机组轴线 | 是 |
| S5 | 0+78.97 | 3 号高压管道轴线 | 是 |
| S6 | 0+99.5 | 4 号机组轴线 | 是 |
| S7 | 0+115 | F5 断层切过岩锚梁位置 | 是 |
| S8 | 0+120 | F5 断层切过岩锚梁位置 | 是 |
| S9 | | F5 断层与厂房相交面 | 是 |

2.1 岩体劣化本构模型

地下工程的开挖会导致岩体的应力状态的改变,这一过程会产生应力集中或卸荷作用而引起围岩应力环境劣化,导致屈服破坏。在这种围岩应力重分布及其导致的损伤破坏过程中,岩体的基本力学性质出现了显著改变。从宏观层面上

分析,可认为岩体弹性模量 E 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等是随着岩体劣化程度而改变的。

因此,为了使数值模拟下研究高地应力脆性岩体力学的行为更加符合实际,使本构模型准确地反映在开挖卸荷作用下岩体突然屈服破坏与由屈服破坏所引起的岩体力学参数随着围岩破损程

度而变化这两个特征。采用描述材料屈服后塑性程度一个较好的指标:等效塑性应变 ϵ^p (1) 来反映岩体劣化程度。为描述岩体屈服破坏后力学参数的动态变化过程,可假设 E 、 C 、 φ 都是随等效塑性应变的函数(2)。在数值循环计算过程中岩体屈服后,三个基本力学参数都将随等效塑性应变变化做出动态调节。

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^p \cdot \epsilon_1^p + \epsilon_2^p \cdot \epsilon_2^p + \epsilon_3^p \cdot \epsilon_3^p)} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E(\bar{\epsilon}^p) = E_o \cdot f_E(\bar{\epsilon}^p) \\ C(\bar{\epsilon}^p) = C_o \cdot f_c(\bar{\epsilon}^p) \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_o 、 C_o 、 φ_o 依次是岩体弹性阶段的变形模量、初始黏聚力和内摩擦角; $E(\bar{\epsilon}^p)$ 、 $C(\bar{\epsilon}^p)$ 和 $\varphi(\bar{\epsilon}^p)$ 表示在一定等效塑性应变下的岩体变形模量、黏聚力和内摩擦角; $f_E(\bar{\epsilon}^p)$ 、 $f_c(\bar{\epsilon}^p)$ 、 $f_\varphi(\bar{\epsilon}^p)$ 分别表示三个力学参数的变化函数,是等效塑性应变参量的函数,可以采用线性函数,也可以选用其他函数。

2.2 岩体破坏度分析指标

在应力空间中,当应力分量作为变量时,屈服面为六维应力空间内的超曲面。若用主应力分量表示时,屈服面为主应力空间中的一个曲面,称为屈服曲面。初始屈服面或后继屈服面将应力空间分为两部分,应力点在屈服面内属弹性状态,此时屈服函数 $F(\sigma_{ij}) < 0$; 在屈服面上,材料开始屈服, $F(\sigma_{ij}) = 0$ 。因此,在分析三维主应力和三维应变空间中初始屈服面与非屈服应力点之间关系的基础上,提出了破坏度 RFD 的概念,以描述不同部位围岩的破裂程度,计算式为:

$$RFD = \begin{cases} \frac{q}{g(\theta_\sigma)\sqrt{Ap^2 + Bp + C}} & \text{峰前 Pre-peak} \\ 1 + (\epsilon_{s/t}^p)/(\epsilon_{s/t}^{p\text{-lim}}) & \text{峰后 Post-peak} \end{cases} \quad (3)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (4)$$

式中 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力; $g(\theta_\sigma)$ 为塑性势函数;A、B、C 为强度准则系数; $\epsilon_{s/t}^p$ 为当前塑性剪切/拉伸应变; $\epsilon_{s/t}^{p\text{-lim}}$ 为极限

塑性剪切/拉伸应变(典型试验曲线的残余段拐点值)。

RFD 值在 0~2 之间,当破坏度 RFD 越大,则表明该部位围岩破损越厉害。

3 F5 断层区域围岩稳定性分析

通过对更新后的模型进行计算,分析了无支护条件下,9 个剖面的围岩的卸荷变形、最大/最小主应力和破裂区特征移量。

3.1 最大变形分布特征

主厂房的 9 个剖面中,S1 和 S2 剖面断层 F5 并无相交,其余 7 个剖面均与断层 F5 有关,全部开挖完之后最大位移均发生于上游侧边墙中部,最大变形量大约在 100 mm,其中上游侧边墙变形较下游侧边墙变形普遍多 20~30 mm。整体地下厂房的最大变形应发生于厂横方向中部的上游侧。从 S9 剖面可以看出,F5 断层切过区域围岩的最大变形集中于上游侧,且下游侧变形量较小,F5 断层处的上游侧变形量最大可达到 100 mm 左右,对比 1 号机组和 4 号机组,2 号机组和 3 号机组,断层切过的机组剖面位移云图有凸点,断层对厂房和高压管道围岩变形影响较大。

3.2 RFD 分布特征

厂房整体的围岩破裂区主要集中于下游侧边墙母线洞口及基坑下游突出台体部位,这应该是下游侧交叉洞室造成的,全部开挖完后上游侧的围岩破裂较大区域是拱顶,厂房上游侧边墙的围岩破裂深度一般为 3~4 m 左右,S4、S6、S7 剖面图显示 F5 切过上游边墙的区域破裂特征明显。根据 S9 剖面显示 F5 切过区域上游边墙岩锚梁以下都出现 $RFD > 2$ 的红色区域,说明破裂程度严重,破裂区深度大于 5 m。F5 断层处上游侧的最大破裂区发生于与 3 号高压管道交叉区域,最大的围岩破裂深度可达 5~6 m。

3.3 主应力分布特征

主厂房整体最大应力集中的区域主要位于厂房上游侧拱肩,厂房上游侧拱肩的最大应力值约为 35~40 MPa,下游侧边墙母线洞口及基坑下游突出台体部位卸荷明显,出现大范围 0.5~1 MPa 的拉应力区。F5 断层切过区域的最大应力集中主要位于下游侧,最大值约为 35~40 MPa。厂房整体在上下游中部及洞室交叉部位均出现约为

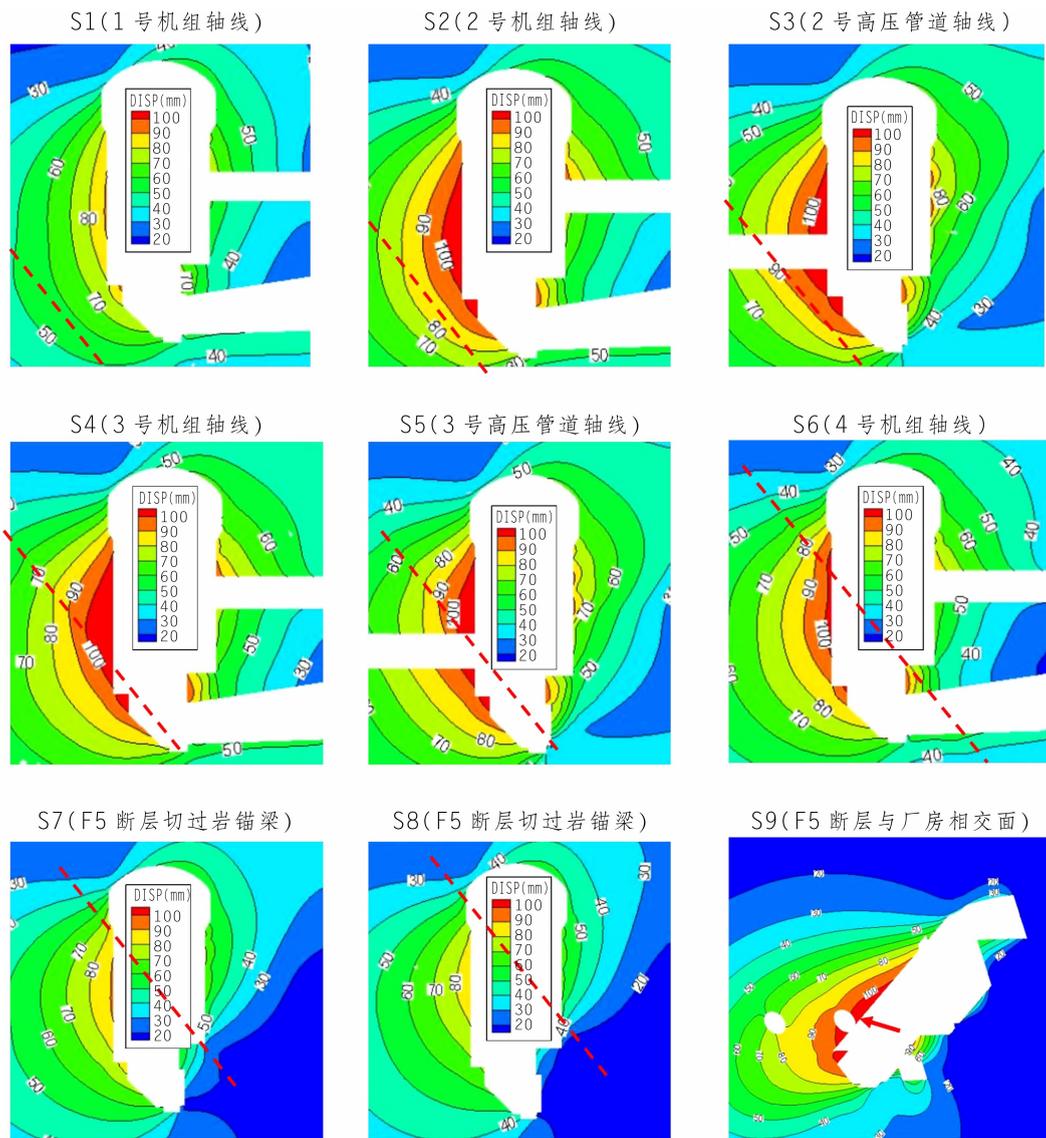


图1 主厂房全部开挖完后9个剖面的变形分布特征

1 MPa的拉应力。F5断层在上游侧中部出现约为1 MPa的拉应力。

4 结语

采用Flac^{3D}软件,分析了断层F5对硬梁包水电站厂房围岩无支护条件下稳定性的影响。

(1)分析无支护条件下含F5断层洞室稳定性可知,F5断层增大了围岩变形15%~20%,局部变形最大可达到100 mm左右,整体地下厂房的最大变形位于厂横方向中部的上游侧。

(2)厂房洞室开挖完成后,F5断层穿越区域围岩最大松弛(破损)深度达到5~6 m,相对无断层影响下增大了2~3 m,断层影响区域岩体松弛程度明显增大,故断层出露区域宜精细开挖、及时

支护。

(3)断层对厂房围岩稳定性影响最大的不利区域主要集中在F5与2号、3号高压管道交叉口区域、F5断层穿越厂房下部的机窝区域、断层在厂房高边墙中下部出露区域,易引起该区域围岩开挖卸荷后的局部塌方、掉块、变形相对较大等稳定性问题,以及支护结构荷载偏大、喷层开裂等问题,故建议追踪该断层出露位置,适当增加预应力锚杆和小吨位锚索支护。

参考文献:

- [1] 王开,弓培林,张小强,等.复采工作面过冒顶区顶板断裂特征及控制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10): 2080-2088. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.0526.

(下转第25页)

况,对于承包人积极采取措施并实现工程建设目标的前提下,发包人依据地方建设主管部门发布的有关政策或按照《计价规范》第 9.8 条物价变化的规定,与承包人双方协商、合理分担风险。

周转材料租用费:按实际延长的租赁时间和租赁价格据实计算,但只有投标文件中注明为租赁的材料才能计算此费用,由发包人承担。

疫情期间材料价格上涨费用:按国家权威机构发布的价格指数进行年度调差,不单独进行价格补差。对合同中规定不做调整或规定不明确的,参照人工费上涨处理方式。

施工机械(船舶)租赁费:按实际延长的租赁时间和租赁价格据实计算,但只有投标文件中注明为租赁的机械才能计算此费用,由发包人承担。

疫情期间施工机械、船舶租赁费等价格上涨费用:按国家权威机构发布的价格指数进行年度调差,不单独进行价格补差^[5]。

4.2.5 计费时间

根据现场实际防疫情况,从项目所在地政府将疫情防控级别调整为三级响应后,疫情防控措施对日常生活的影响已经非常小,可以认为疫情基本结束。防疫增加费用计费时间应当定为三级响应开始后两个星期内结束(主要考虑隔离人员隔离时间一般为 14 d)。在此时间之后所发生的疫情防控措施费用可在施工合同的安全文明施工措施费中开支。

5 结 语

新冠肺炎疫情影响下的合同变更及索赔管理是造价管理中的一个新课题,从目前国家、行业、

地方等发布的政策文件来看,还没有一个统一的标准。本着依法合规、公正合理、事实求是原则,对新冠肺炎疫情影响下的合同变更及索赔处理的法律及政策依据、合同条款、行业规范进行了梳理,对疫情影响造成的费用增加的具体构成进行了分类分析,对各类费用的补偿原则、计费方式方法进行了说明。攻克时艰、人人有责,对此次新冠疫情所导致的各类费用细项子目及计费原则所做的粗略探讨,供工程参建各方参考、指正。

参考文献:

- [1] 谭敬慧.《建设工程施工合同(示范文本)使用指南》(2017 版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [2] 张水波,何伯森.《FIDIC 新版合同条件导读与解析》(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3] 《建设工程工程量清单计价规范》(2013)[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部.
- [4] 吴佐民,潘敏.《新冠疫情事件的工期与费用索赔指南》[M]. 中国建筑工业出版社出版,2020.
- [5] 鲁斌.《水利水电工程合同管理中变更索赔的风险与对策》[J]. 企业改革与管理,2019(23):40-41.

作者简介:

- 乔 曙(1982-),男,江苏淮安人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,硕士,从事项目合同管理工作;
- 骆 然(1972-),男,湖北阳新人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,学士,从事项目合同管理工作;
- 王禹超(1990-),男,四川三台人,四川华能泸定水电有限公司,助理工程师,学士,从事项目合同管理工作;
- 钟宝仪(1997-),男,四川资阳人,四川华能泸定水电有限公司,助理工程师,学士,从事项目合同管理工作;
- 苏浩文(1998-),男,重庆永川人,四川华能泸定水电有限公司,助理工程师,学士,从事项目合同管理工作。

(责任编辑:吴永红)

(上接第 9 页)

- [2] 张建聪,江权,郝宪杰,等.高应力下柱状节理玄武岩应力-结构型塌方机制分析[J]. 岩土力学,2021,42(09):2556-2568+2577. DOI:10.16285/j.rsm.2021.0194.
- [3] 杨会军,胡春林,谋文武,等.断层及其破碎带隧道信息化施工[J]. 岩石力学与工程学报,2004(22):3917-3922.
- [4] 杨金虎.慈母山隧道穿越断层破碎带开挖支护技术分析[J]. 地下空间与工程学报,2011,v.7;No.49(2):361-365+384.
- [5] 王爱文,潘一山,李忠华,等.断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(9):2486-2492. DOI:10.16285/j.rsm.2014.09.020.

作者简介:

- 陈 涛(1977-),男,吉林辽源人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,学士,从事水利水电工程方面工作;
- 柏纪锋(1975-),男,四川开江人,四川华能泸定水电有限公司,高级经济师,学士,从事水电工程建设管理工作;
- 袁超义(1981-),男,河南南阳人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,硕士,从事水利水电工程管理工作;
- 曹世奇(1999-),男,江西赣州人,中国科学院武汉岩土力学研究所,硕士,主要从事深部岩体工程稳定性分析工作;
- 蒲平新(1998-),男,四川巴中人,四川华能泸定水电有限公司,学士,从事水利水电工程管理工作。(责任编辑:吴永红)