

# 硬梁包水电站引水隧洞蚀变岩体特性及 开挖支护研究

王 伟<sup>1</sup>, 梁存绍<sup>2</sup>, 邱鸿志<sup>2</sup>, 王禹超<sup>2</sup>, 杜奇龙<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 硬梁包监理中心, 四川 泸定 626100;

2. 四川华能泸定水电有限公司, 四川 泸定 626100)

**摘 要:**硬梁包水电站引水隧洞地质条件复杂, 洞室开挖断面大, 围岩蚀变强烈。在开挖过程遇到了辉绿构造蚀变、高岭土化蚀变、钾长石化蚀变、绿泥石及绿帘石化面蚀变, 其中以 2 号施工支洞 2 号引水隧洞上游连续 110 m 全断面高岭土蚀变岩体最为有特点。通过硬梁包水电站引水隧洞 C II 标高岭土蚀变岩开挖为例, 重点介绍蚀变岩性特点、开挖方式、支护措施、以及过程中遇到的问题及采取的针对性支护措施, 为今后遇到类似蚀变岩开挖提供参考建议。

**关键词:**引水隧洞; 高岭土蚀变岩体; 开挖方式; 支护措施

中图分类号: P614

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2023)01-0109-04

## Research on Altered Rock Mass Characteristics and Excavation Support of Headrace Tunnel of Yingliangbao Hydropower Project

WANG Wei<sup>1</sup>, LIANG Cunshao<sup>2</sup>, QIU Hongzhi<sup>2</sup>, WANG Yuchao<sup>2</sup>, DU Qilong<sup>2</sup>

(1. China Northwest Water Conservancy Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd.,

Yingliangbao Supervision Center, Luding Sichuan 626100;

2. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd., Luding Sichuan 626100)

**Abstract:** The headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project has complex geological conditions, large excavation section and strong alteration of surrounding rock mass. During the excavation process, diabase tectonic alteration, kaolin alteration, potassium feldspar alteration, chlorite and chlorite surface alteration were encountered, among which the continuous 110 m full-section kaolin altered rock mass at the upstream of the 2# construction adit of the 2# headrace tunnel was the most characteristic. Taking the excavation of kaolin altered rock of the headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project as an example, this paper introduces the characteristics of alteration lithology, excavation methods, support measures, problems encountered in the excavation and targeted support measures, which could provide reference for similar altered rock excavation in the future.

**Key words:** Headrace tunnel; Kaolin altered rock mass; Excavation method; Supporting measures

## 1 工程概况

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县境内, 为四川省大渡河干流最新规划 28 级方案的第 14 级电站, 上游为泸定水电站, 下游梯级衔接大岗山水电站。引水隧洞为两条平行布置, 中心间距为 60 m, 最大开挖洞径为 16.68 m, 平均洞长 14.37 km, 最大坡比  $i=0.001192$ , 衬砌后内径 13.1 m, 是目前在建地质条件复杂、洞室跨度较大、难度系数较高的长引水式电站。

## 2 引水隧洞地质条件

工程区位于青藏高原东南缘向四川盆地过渡地带, 川滇南北向构造带北端与北东向龙门山断褶带、北西向鲜水河断褶带和金汤弧形构造带的交接复合部位。区域地质构造背景复杂。引水线路布置于德威闸址~观音崖段之间的大渡河左岸山体中, 埋深 130~625 m, 沿线冲沟多为泥石流沟, 全线隧洞地层岩性主要为晋宁—澄江期花岗岩、花岗岩、闪长岩, 属元古界康定(岩)群(Pt1K)咱里岩组, 各岩系在空间上相互伴生, 总体形态呈规模较大的等轴面状展布的岩基状, 与基底层状变质岩系呈侵入关系。现已揭露的围岩表明, 工

收稿日期: 2022-08-05

程区蚀变岩类型多样,既有早期的热液蚀变、构造蚀变,又有后期的风化蚀变,蚀变岩发育特征复杂,强度低,遇水易软化,易产生变形甚至坍塌,施工难度大,安全风险突出。

从现场实际揭露的围岩地质条件来看,2号引水隧洞桩号2+899 m~2+789 m段共110 m为全断面高岭土化蚀变岩体,围岩为浅红色花岗岩,C-D类蚀变,软岩~土状,散体结构,且揭示有多条辉绿岩脉断层,均片理化,泥化蚀变,局部线状流水,以V类围岩为主,围岩自稳能力极差。

### 3 高岭土化蚀变岩体特性

硬梁包水电站引水隧洞工程所揭露的蚀变主要为围岩蚀变,是指在热液矿床的形成过程中,围岩受到流体和热液的作用影响所发生的各种交代变质作用。围岩蚀变的种类很多,如云英岩化、高岭土化、钠长岩化和碳酸岩化等。硬梁包水电站引水隧洞开挖过程中主要遇到钾长石化蚀变、辉绿岩构造蚀变、高岭土化蚀变、绿泥石、绿帘石化面蚀变。笔者主要介绍全断面高岭土化蚀变岩体。

高岭土俗称“观音土”,是近地表条件下的低温热液交代蚀变作用,属于黏土化的一种。在不同成分、不同温度的溶被作用下,原岩的矿物成分和化学成分,甚至结构、构造发生改变形成的新一类岩石。其强度、变形特性分别受蚀变程度、风化程度及岩石性质共同影响,表现为:随蚀变程度的增强,抗压强度、抗剪强度及模量值降低,峰值应变量及泊松比则增加。蚀变作用以降低岩石的黏聚力为主,水对蚀变岩的作用也是以黏聚力为主,随蚀变程度的增加,水的弱化作用增强。高岭土化蚀变花岗岩具散体结构,强度极低,变形性强,遇水后崩解呈砂土状,围岩自稳能力极差,往往直接影响岩石的工程地质性质,其吸水后的岩石体积膨胀可达十几倍,反复吸水和脱水将使岩石快速崩解,直接影响工程建设。

## 4 引水隧洞蚀变岩体开挖及支护

### 4.1 蚀变岩体开挖方式

硬梁包水电站引水隧洞采用新奥法施工,主要遵循“管超前、严注浆、短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤量测”的原则,在分台阶开挖时,开挖的高度根据施工机械来确定<sup>[1-2]</sup>,分层高度以有足够的喷混凝土、挂网、钢支撑及锁脚锚杆施工空间

为原则,采取上下台阶预留核心土法开挖。因开挖跨度大,最大开挖直径超16 m,属于特大断面开挖,且围岩地质条件差,高岭土自稳时间短、时间效应明显、易产生较大的塑性变形、开挖后需及时支护<sup>[3-4]</sup>。为尽量减少对围岩的扰动,以缩短围岩应力松弛时间及开挖面的裸露风化时间。主要采用机械和人工开挖,在上台阶两侧拱脚位置必要时辅以弱爆破。在上台阶顶部120°超前支护实施完成后,环向开挖上部弧形导坑,预留上台阶核心土。核心土长度为3~5 m,宽度宜为开挖洞径的1/2~1/3,开挖循环进尺不超1 m。

上台阶开挖完成后,为避免围岩长时间暴露产生变形掉块,及时初喷5~7 cm厚混凝土快速封闭,以增强围岩自稳能力,使围岩变形得到有效控制以避免变形过度坍塌失稳,并及时实施了挂钢筋网片、钢拱架及锁脚锚杆支护,最后复喷混凝土至设计厚度后。但在施工过程中发现,钢拱架发生了局部沉降变形,侵占混凝土结构线。根据对全断面高龄土蚀变洞段松弛圈深度检测,最大松弛深度达3.8 m。因受上台阶空间限制,无法及时实施系统锚杆支护,同时锁脚锚杆角度偏差也比较大,导致上台阶开挖后围岩发生一定松弛。在后续开挖过程中,为避免围岩松弛变形侵占结构,针对全断面高龄土开挖实际预留了30~50 cm变形量。

东北大学针对硬梁包水电站引水隧洞蚀变岩特殊地质条件,模拟做了水岩耦合作用下引水隧洞蚀变岩时效变形规律与衬砌支护动态设计研究,对全断面高岭土化蚀变洞段预留核心土尺寸进行了优化。通过模拟试验,发现高岭土蚀变洞段上台阶开挖揭露后,收敛变形应力使掌子面受到挤压,应力方向集中的结构面将会出现滑落与坍塌,坍塌的岩体呈碎块状或碎屑状。在核心土的上、下底长度及高度选择对比试验中,发现将核心土高度取3 m,上底长度取6 m,下底长度取9 m时对掌子面挤压变形控制效果最好。同时采取及时对开挖面喷5~7 cm混凝土快速封闭是非常有必要的,能够有效抑制开挖面坍塌。

### 4.2 蚀变岩体支护措施

硬梁包水电站引水隧洞蚀变洞段施工期支护采用永临相结合的方式,支护措施主要包括超前

小导管、钢拱架、系统锚杆、系统挂网、喷混凝土。开挖后支护方案施工顺序:初喷混凝土→钢拱架→挂网→锁脚锚杆→喷混凝土→系统锚杆,并针对不同的围岩类别采取有针对性的加强超前支护,同时为减小围岩暴露时间,防止围岩短期内出现松弛变形,系统支护要求紧跟开挖掌子面。钢拱架之间采用型钢连接,形成联合支护结构使围岩形成一个整体,增加了围岩的自拱效应,使围岩处于三轴受压状态,增加了围岩的抗压强度<sup>[5]</sup>。

(1)超前小导管。超前小导管采用  $\phi 42$  mm、 $\delta=3.5$  mm 的钢管加工而成,每根长度为 5.0 m,尾部焊套箍,顶部端头做成锥形,管壁按梅花型布钻小孔,孔眼直径  $\phi 6\sim 8$  mm,间距为 10~20 cm,距离管口 100 cm 长度范围内不钻孔。

IV 类围岩:顶拱 120°范围轮廓线外设置 1 排超前小导管,环向间距 40 cm,外倾 10°~15°交错布置,各排超前小导管沿主洞轴线方向搭接长度为 1.5 m。V 类围岩(高岭土蚀变岩段)顶拱 120°范围轮廓线外设置 1 排超前小导管,环向间距 20~30 cm,外倾 10°~15°交错布置,各排超前小导管沿主洞轴线方向搭接长度为 2.5 m。

小导管注浆前对开挖面及距掌子面 5 m 范围内边、顶拱喷 5 cm 厚混凝土封闭,注浆压力 0.1~0.5 MPa,必要时可在孔口处设置能承受规定的最大注浆压力和水压的止浆塞,确保注浆质量满足设计及规范要求。

(2)钢拱架。钢拱架选用 I20a 工字钢加工制作成型,支撑间距 0.75 m~1.25 m,在开挖面初喷 5 cm 混凝土后架设,每榀拱架设置 16 根  $\phi 25$ 、 $L=4.5$  m 锁脚锚杆,沿钢拱架两侧交替布置,入岩长度 4.1 m,锁脚锚杆外露端顶部弯折 0.2 m 与钢支撑翼缘双面焊接牢固,钢拱架与壁面紧密接触,与围岩的空隙用喷射混凝土填充密实。对于高岭土蚀变洞段,底拱 120°范围采取网喷支护,钢拱架封闭成环,在 240°左右两侧位置各布置一排 9 m 钢管桩支护,间排距 1.5 m,与水平夹角 45°~60°,且设置槽钢腰带或工字钢腰带与钢管桩焊接形成整体进行加强支护。

(3)系统支护。① IV 类围岩:原开挖断面半径为 7.5 m;顶拱 240°范围系统锚喷支护, $\phi 28$  mm 砂浆锚杆  $L=6$  m 与  $\phi 32$  mm 砂浆锚杆  $L=$

9 m,间排距 1.5 m 长短交替交错布置,外露 50 cm,喷 C25 混凝土,厚 15 cm;挂  $\phi 6$  mm 钢筋网,间排距 15 cm。经优化后调整为开挖断面半径为 7.62 m, $\phi 28$  mm 砂浆锚杆  $L=6$  m,间排距 1.25 m $\times$ 1.2 m,并在顶拱 120°和底拱 240°位置各设置一根  $\phi 32$  mm、 $L=9$  m 砂浆锚杆,外露 30 cm,喷 C25 混凝土,厚 27 cm,其余参数不变。② V 类围岩:原开挖断面半径为 7.7 m;顶拱 240°范围系统锚喷支护, $\phi 28$  mm 砂浆锚杆  $L=6$  m 与  $\phi 32$  mm 砂浆锚杆  $L=9$  m,间排距 1.2 m 长短交替交错布置,外露 50 cm,喷 C25 混凝土,厚 15 cm;挂钢筋网  $\phi 6$  mm,间排距 15 cm。经优化后调整为开挖断面半径为 7.82 m, $\phi 28$  mm 砂浆锚杆  $L=6$  m,间排距 1.2 m $\times$ 0.75 m,并在顶拱 120°和底拱 240°位置各设置两根  $\phi 32$  mm、 $L=9$  m 砂浆锚杆,外露 30 cm,喷 C25 混凝土,厚 27 cm,其余参数不变。

#### 4.3 存在的问题及处理措施

(1)存在的问题。2 号施工支洞 2 号引水隧洞上游 2+852.75 m~2+841.75 m 段为 V 类围岩,围岩为灰白色花岗岩,C-D 类蚀变,软岩~土状,散体结构,掌子面全断面高岭土化蚀变。因围岩条件差,施工过程中该洞段顶拱部分钢拱架出现整体沉降变形。

(2)处理措施。① 为防止钢拱架进一步沉降变形,及时采用石渣料回填反压上台阶已开挖洞段。② 桩号 2+852.75~2+841.75 m 段顶拱 180°范围内进行固结灌浆处理,采用水灰比 1:1 纯水泥浆,灌浆压力为 0.5~0.6 MPa,通过固结灌浆使顶拱范围形成固结圈。③ 由于钢拱架沉降变形已侵占衬砌混凝土断面达 50 cm 左右,需拆除变形拱架,拆除变形拱架按照“拆一榀,处理一榀,隔榀或逐榀换拱”的原则施工,严禁多榀拱架同时拆除,同时换拱现象。④ 在顶拱 120°和 180°左右两侧位置各布置一排 9 m 钢管桩支护,间排距 1.5 m,与水平夹角 45°~60°,并设置槽钢腰带或工字钢腰带与钢管桩焊接形成整体进行加强支护。⑤ 加强围岩施工期变形观测,每间隔 2 m 埋设一组观测点,每间隔 4~6 h 测量记录一次,及时对测量数据进行分析围岩变形趋势和累计变形量。

## 5 总结与建议

(1)特大断面引水隧洞开挖应结合揭露围岩地质条件,及时调整开挖方式,尤其是碎裂结构及蚀变岩洞段建议采用台阶预留核心土法开挖。将核心土高度取3 m,上底长度取6 m,下底长度取9 m时对掌子面挤压变形控制效果最好。

(2)针对Ⅳ类、Ⅴ类围岩及不良地质洞段采取超前小导管进行超前支护时,建议小导管搭接为每循环小导管长度的2/3,按上仰10°和15°错开间隔布置,力求同一断面上有两层超前小导管在棚护。

(3)针对特殊地质条件洞段,建议采用TRT地震波成像技术及地质钻机超前钻探等进行超前地质预报,并制定对应的开挖支护方案以指导现场施工。

(4)应根据地质预报或超前勘探孔信息成果,如不良地段长度超过15 m宜采用大管棚加钢支撑的支护方式,以预防洞室发生较大坍塌和保障洞室安全稳定。

(5)针对受风化或地下水影响较大的蚀变岩体,在开挖后及时喷射5~7 cm厚混凝土快速封闭是必要的,对于Ⅳ类、Ⅴ类围岩破碎且蚀变的洞段建议采用喷钢纤维混凝土封闭。

(6)建议对已支护工字钢洞段(围岩破碎、裂隙发育、断层等)结合不同的围岩条件有针对性地进行预固结灌浆处理,预固结灌浆参数建议灌浆孔间排距按3 m×3 m、孔深4.5 m,水灰比1:1,灌浆压力0.5 MPa左右控制,以进一步保障在下半洞开挖前上半洞的稳定,同时也将会减少锚杆孔塌孔注装的难度和概率。

(7)建议不良地质段增加锚筋桩、预应力锚杆、锚索等深层支护措施,并与钢支撑、管棚形成

足够的受力结构体系,以预防减小下半洞开挖支护过程中洞室变形、坍塌风险。

## 6 结语

水电站工程建设中引水隧洞开挖支护是关键,尤其是不良地质洞段的开挖,应选择科学合理开挖支护方式。由于引水隧洞地下施工环境特殊,所以,要充分考虑施工中存在的安全风险。引水隧洞作为工程的主要环节,在其开挖和支护施工中应该受到足够重视,有效提高水电站工程施工效率和质量的同时,实现对最低的成本投入取得更高效的建设效果,实现更大的价值。

### 参考文献:

- [1] 张朝磊.水电站引水隧洞开挖及支护施工技术[J].河南建材,2020(1):3-6.
- [2] 苟元军.水电站引水隧洞开挖及支护的施工技术[J].黑龙江水利科技,2018,46(11):167-169.
- [3] 王建.引水隧洞软岩洞段变形拱架换拱施工浅议[J].水利技术监督,2022(11):226-229.
- [4] 陈汉宝.软岩大跨度长引水隧洞施工支护与地质预报[J].资源环境与工程,2009(05):142-146.
- [5] 季毛伟.软岩隧洞围岩及支护结构稳定性分析[J].《工业建筑》2018年全国学术年会论文集(中册):242-246.

### 作者简介:

王伟(1984-),男,四川绵阳人,中国水利水电建设工程咨询西北有限公司,工程师,学士,从事土建监理工作;  
梁存绍(1974-),男,四川成都人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,学士,从事水电工程建设管理工作;  
邱鸿志(1997-),男,四川汶川人,四川华能泸定水电有限公司,助理工程师,学士,从事水利水电工程方面工作;  
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;  
杜奇龙(1998-),男,四川成都人,四川华能泸定水电有限公司,助理工程师,学士,从事水利水电工程方面工作。

(责任编辑:吴永红)

(上接第75页)

- [4] 张舫,王艺青,王楠.水利水电工程建设征地移民安置问题及对策分析[J].区域治理,2018,(44):44-47.
- [5] 苏秀华.水利水电工程移民长期实物补偿机制与新农村建设相结合研究[J].中国人口资源与环境,2015,25(4):116-119.

### 作者简介:

孙志敏(1982-),男,甘肃宁县人,本科,高级工程师,从事征地移民及水利水电工程施工与管理工作;

李晨浩(1980-),男,云南泸西人,研究生,高级工程师,从事水电工程管理工作;  
彭景(1975-),男,四川乐山人,本科,助理工程师,从事征地移民及水利水电工程施工与管理工作;  
杨树仁(1981-),男,四川凉山州人,本科,助理工程师,从事征地移民及水利水电工程施工与管理工作;  
张帆(1996-),男,四川南充人,本科,助理工程师,从事征地移民及水利水电工程施工与管理工作。

(责任编辑:吴永红)