

乌东德水电站导流洞围岩变形特征与处理措施

王团乐, 刘伟强, 罗玉华, 井发坤, 覃振华

(长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:乌东德水电站共布置 5 条导流洞(其中左岸 2 条,右岸 3 条)。高、低洞洞身段断面呈城门洞型,断面尺寸分别为 12 m×16 m 和 16.5 m×24 m。2012 年 2 月乌东德水电站导流洞开始施工,落雪组因民组极薄层~薄层大理岩化白云岩、层面附绢云母构成的Ⅳ类围岩洞段按 5 层开挖,在第一层开挖过程中因民组Ⅳ类围岩洞段左顶拱普遍出现塌方,第二层和第三层开挖时,导流洞左右边墙变形位移急剧增大。通过研究导流洞Ⅳ类围岩地质条件及变形失稳模式,分析变形过程与开挖支护的关系。在此基础上优化设计方案,确保了导流洞的安全施工。

关键词:导流洞;Ⅳ类围岩;变形破坏;变形监测;乌东德水电站

中图法分类号: P642 **文献标志码:** A **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.14.002

乌东德水电站枢纽工程主体建筑物由挡水建筑物、泄水建筑物、引水发电建筑物等组成。挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,坝顶高程 988 m,最大坝高 270 m,电站总装机容量 10 200 MW。水电站共布置 5 条导流洞(其中左岸 2 条,右岸 3 条)。左岸 2 条和右岸近岸 2 条导流洞为低洞,进口高程分别分为 814.0 m 和 812.0 m,右岸山内侧高洞进出口高程分别为 830.0 m 和 824.0 m。高、低洞洞身段断面分别采用 12 m×16 m 和 16.5 m×24 m 城门洞型。2012 年 2 月乌东德水电站导流洞开始施工,因民组极薄层-薄层大理岩化白云岩、层面附绢云母Ⅳ类围岩洞段按 5 层开挖方式开挖,在第一层开挖过程中因民组Ⅳ类围岩洞段左顶拱普遍出现塌方,第二层和第三层开挖时,导流洞变形监测显示左右边墙变形位移急剧增大。

1 基本地质条件

乌东德水电站坝址河段属中山峡谷地貌,该河段基本呈对称的陡峻峡谷套嶂谷形态特征,金沙江河床高程约 800 m,枯水期水位一般 815.0 m,高程 1 050~1 200 m 以下为嶂谷,高程 1 050~1 200 m 以上为峡谷。右岸 3,4,5 号导流隧洞洞身进口走向 190°,弧形转弯后走向 156°,经再次弧形转弯,出口段走向变为

122°(图 1)。

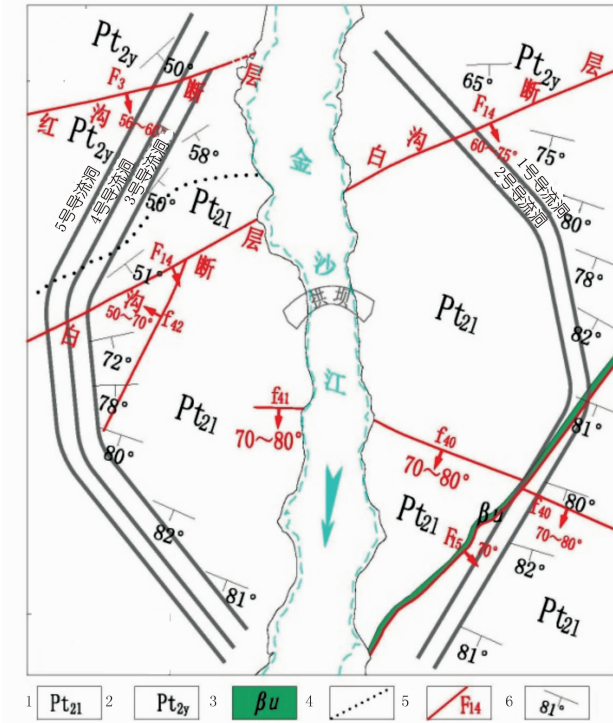


图 1 乌东德坝址区 830 m 高程地质平切示意

注:1. 中元古界会理群落雪组地层;2. 中元古界会理群因民组地层;3. 辉绿岩;4. 地层界线;5. 断层及编号;6. 岩层产状

围岩地层由褶皱基底构成,从进口至出口穿越地层依次为:前震旦系因民组(Pt_{2y})灰白色、肉红色薄层夹极薄层及互层大理岩化白云岩,层面附绢云母,落雪组(Pt_{21})薄层、中厚层、厚层灰岩,薄层大理岩化白云岩,厚层白云岩等。岩层倾向 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$,倾角一般 $45^{\circ} \sim 85^{\circ}$,倾向下游。

导流洞段发育的断层有 F_3 、 F_{14} 、 f_{42} 等,褶皱基底因民组(Pt_{2y})薄层地层中多见揉皱现象(图 2)。



图 2 Pt_{2y} 地层典型照片(4 号导流洞桩号 0+230 附近底板)

导流洞洞身段远离岸边,均位于地下水位之下。导流洞揭露 Pt_{2y} 、 Pt_{21} 薄层大理岩化白云岩和薄层灰岩地层中渗滴水较严重。

2 右岸导流洞Ⅳ类围岩洞段工程地质条件

右岸导流洞 Pt_{2y} 极薄层大理岩化白云岩与绢云母条带相间分布;受白沟断层影响,右岸导流洞上游 Pt_{2y} 地层由江边与金沙江大角度相交(夹角约 80°),向山里则地层走向发生偏转,走向与金沙江夹角变小,且 Pt_{2y} 与 Pt_{21} 地层界线向下游偏移,3 号导流洞 Pt_{2y} 地层洞段长 510 m;4 号导流洞 Pt_{2y} 地层洞段长 657 m;5 号导流洞 Pt_{2y} 地层洞段长 700 m。导流洞段因民组岩层倾向 $110^{\circ} \sim 140^{\circ}$,倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,岩层走向与洞轴线呈小角度相交($10^{\circ} \sim 30^{\circ}$),地层倾向左壁(靠江侧),岩体中揉皱微发育,岩体劈理化严重。

该洞段岩体渗滴水严重。根据现场物理力学试验及工程类比^[1-5],该处岩体物理力学参数建议取值如表 1。

3 开挖方式及破坏变形特点

3.1 开挖及支护

右岸 3 号和 4 号导流洞 Pt_{2y} 薄层-极薄层大理岩化白云岩地层构成的Ⅳ类围岩洞段,开挖断面为 $19.9 \text{ m} \times 27.2 \text{ m}$,5 号导流洞开挖断面为 $14.8 \text{ m} \times 18.6 \text{ m}$ 。3 号和 4 号导流洞Ⅳ类围岩洞段总体分 5 层开挖施工,Ⅰ层开挖高度为 9.0 m,Ⅱ~Ⅳ层开挖高度均为 4.5 m,Ⅴ层开挖高度为 4.70 m(图 3)。5 号导流洞分两层开挖,Ⅳ₂ 类围岩洞段分 3 层施工,开挖时Ⅰ层开挖高度为 9.0 m,Ⅱ,Ⅲ层开挖高度分别为 4.5、5.1 m。

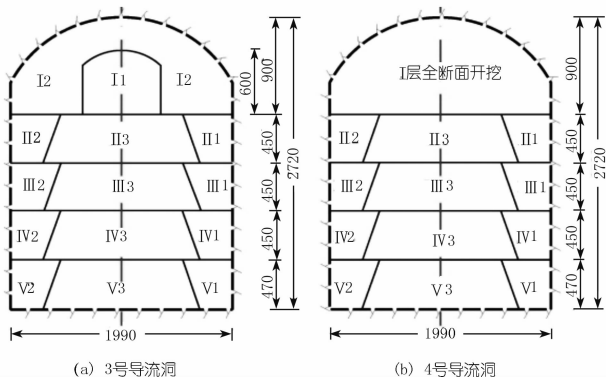


图 3 导流洞Ⅳ类围岩开挖示意(单位:cm)

3 号和 4 号导流洞Ⅳ类围岩 Pt_{2y} 地层洞段初期支护采用系统喷锚+钢支撑,喷钢纤维混凝土(后期改为粗纤维混凝土)厚 25 cm;系统锚杆 $\Phi 28$, $L=6.0/9.0 \text{ m}$,间排距 $1.25 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$ 。进口渐变段永久支护采取 3.0 m 厚钢筋混凝土封闭式衬砌,其余Ⅳ类围岩洞段采取衬砌厚度 1.5 m 全断面钢筋混凝土衬砌。

5 号导流洞Ⅳ类围岩 Pt_{2y} 地层洞段初期支护采用系统喷锚+钢支撑,喷钢纤维混凝土厚 20 cm;系统锚杆 $\Phi 28$, $L=6.0/9.0 \text{ m}$,间排距 $1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$;钢支撑采用 $\Phi 1.0 \text{ m}$ I20b 工字钢,间距 75 cm。进口渐变段永久支护采取 2.5 m 厚钢筋混凝土封闭式衬砌,其余Ⅳ类围岩洞段衬砌厚度 1.2 m 的全断面钢筋混凝土。

表 1 因民组岩体(石)及层面的物理力学参数建议值											
项目	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	岩石饱和 抗压强度/ MPa	软化 系数	岩体容许 承载力/ MPa	岩体变形参数/GPa		泊松比	岩体抗剪强度(垂直于层面)/MPa			岩体抗拉 强度/MPa
					变形模量	弹性模量		抗剪断		抗剪	
								f'	c'	f	
岩体	26.6	30 ~ 40	< 0.60	1.5 ~ 2.0	1 ~ 2	2 ~ 5	0.33 ~ 0.35	0.5 ~ 0.7	0.2 ~ 0.4	0.3 ~ 0.5	0.05 ~ 0.1
层面							0.5 ~ 0.6	0.08 ~ 0.1	0.4 ~ 0.5		

3.2 变形破坏特点

右岸导流洞开挖过程主要表现为左顶拱处的垮塌和下卧过程中右边墙出现的顺层滑移破坏以及大断面Ⅳ类围岩的塑性变形特征。

(1) 垮塌变形及顺层滑移破坏。上层开挖过程中尚未实施临时支护,3~5号导流洞左顶拱侧及左侧边墙上部沿线表现为垮塌破坏,下卧开挖时右侧边墙(山里侧)产生顺层滑移失稳(图4)。3号导流洞左顶拱塌方有10处,4号导流洞左顶拱塌方13处,5号导流洞左顶拱塌方8处,塌方深度一般1.5~2.5 m,最大塌方深度达9.5 m。右侧下卧开挖过程中出现多处顺层滑移破坏。

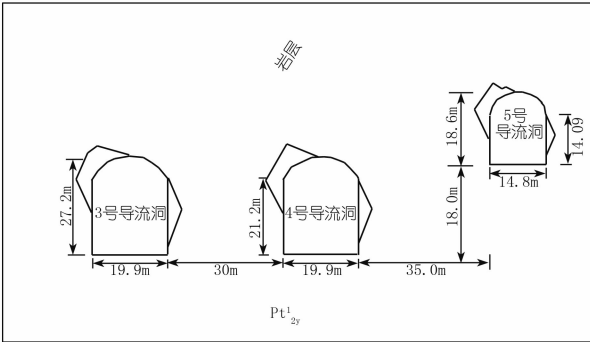


图4 右岸导流洞Ⅳ类围岩洞段破坏模式

(2) 开挖卸荷。右岸导流洞因民组洞段开挖尺寸大,在分层开挖过程中出现卸荷松弛。在因民组洞段共做物探声波检测孔44个,孔深6.0~9.0 m的钻孔有13个,孔深在10.0~20.0 m的钻孔有6个,孔深在20.0~30.0 m的钻孔有25个,总进尺1 034.8 m。物探声波测试成果表明,导流洞开挖前 Pt_{2y} 地层洞段岩体声波平均值一般为3 800~4 500 m/s;松弛岩体声波平均值一般为2 800~3 400 m/s,声波降低0.72~0.75倍。3号导流洞和4号导流洞Ⅰ层开挖后(即开挖高度9 m),顶拱松弛深度一般为3.0~4.6 m,松弛带声波一般为3 305 m/s;左拱座松弛深度3.0~4.0 m,右拱座松弛深度2.4~3.4 m。当3号和4号导流洞完成Ⅳ层开挖后,3号与4号中隔墙3号导流洞一侧卸荷深度一般7.0~9.6 m,4号导流洞一侧卸荷深度为6.8~11.0 m;

5号导流洞分3层开挖,第一层开挖后顶拱松弛深度1.8 m,左右边墙松弛深度为2.6 m,开挖完成底板松弛深度为0.8~2.4 m。

(3) 施工过程中变形不收敛。3号和4号导流洞分层下卧开挖至第Ⅳ层和第Ⅴ层时,完成初期支护后仍出现变形不收敛。3号导流洞3个监测断面的监测成果见表2。4号导流洞3个监测断面的监测成果见

表3。3号导流洞0+430桩号右侧拱座变形最大,最大达80.46 mm。4号导流洞0+500桩号左侧边墙变形位移最大达73.57 mm。在采取加强支护措施后,变形收敛。

表2 3号导流洞多点位移计监测成果

桩号	部位	位移/mm	监测时段/(年.月.日)
0+260	拱顶	34.76	2012.12.01~2015.04.24
	左侧边墙	73.77	2013.03.13~2015.04.24
	右侧边墙	35.92	2013.03.13~2015.04.24
0+355	左拱座	26.63	2013.07.17~2014.12.27
	左侧边墙	24.88	2013.07.17~2015.04.24
	右拱座	9.92	2013.07.19~2015.04.24
0+430	右侧边墙	46.79	2013.07.19~2015.04.24
	左侧边墙中部	55.15	2013.06.09~2015.04.24
	左侧边墙底部	47.14	2013.05.21~2015.04.24
	右侧拱座	80.56	2013.06.08~2015.04.24
	右侧边墙中部	79.24	2013.06.05~2015.04.24
	右侧边墙底部	75.76	2013.05.22~2015.04.24

表3 4号导流洞多点位移计监测成果

桩号	部位	位移/mm	监测时段/(年.月.日)
0+300	顶拱	1.88	2012.11.28~2015.04.24
	左侧边墙	32.6	2013.03.13~2014.05.09
	右侧边墙	20.37	2013.03.13~2013.08.19
0+500	顶拱	1.77	2012.11.26~2014.12.11
	左侧边墙	73.57	2013.01.11~2014.05.09
	右侧边墙	64.61	2013.01.11~2015.04.24
0+550	顶拱	11.2	2012.11.29~2014.12.11
	左侧边墙	50.51	2013.01.11~2014.06.20
	右侧边墙	71.07	2013.01.11~2014.06.20

4 加强支护措施与变形控制

针对右岸导流洞上游 Pt_{2y} 地层薄-极薄层大理岩化白云岩变形不收敛问题,在实施Ⅳ类围岩系统喷锚支护的基础上(即系统喷锚+钢支撑或钢筋拱肋),喷25 cm厚钢纤维混凝土;并布设系统锚杆 $\Phi 28$, $L=6.0/9.0$ m,间排距1.25 m \times 1.25 m)。针对3~4号导流洞因民组洞段变形不收敛,对该洞段利用Flac3D进行数值分析,然后采取了如下加强支护措施(图5)。

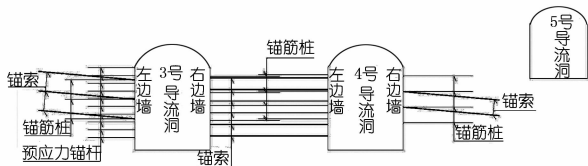


图5 3~4号导流洞Ⅳ类围岩段支护措施示意

(1) 3号导流洞左边墙。1~3排锚筋桩(3 ϕ 32或2 ϕ 36, $L=18\sim 12$ m,间距2.0 m),局部布置125 kN

预应力锚杆($L = 12\text{ m}$, 间排距 2.0 m), 1 ~ 3 排预应力锚索(预应力 $1\ 000\text{ kN}$, $L = 25 \sim 30\text{ m}$, 间距 $3.0 \sim 4.0\text{ m}$)。

(2) 3 ~ 4 号导流洞中隔墙(3 号导流洞桩号 $0 + 050 \sim 0 + 561$ 段, 4 号导流洞桩号 $0 + 120 \sim 0 + 631$ 段) 大部分布置 6 排对穿锚索(预应力 $1\ 000 \sim 1\ 500\text{ kN}$, 间距 $3, 6\text{ m}$,), 其中 3 号导流洞桩号 $0 + 427 \sim 0 + 450$ 段为 3 排对穿锚索(预应力 $1\ 500\text{ kN}$, 间距 $3.0 \sim 6.0\text{ m}$), 4 排锚筋桩($3\phi 32$, $L = 18\text{ m}$, 间距 2.0 m); 3 号导流洞桩号 $0 + 561 \sim 0 + 664.94$ (4 号导流洞桩号 $0 + 631 \sim 0 + 675$) 段为 2 排对穿锚索(预应力 $1\ 000\text{ kN}$, 间排距 $4.0\text{ m} \times 10.0\text{ m}$), 4 号导流洞桩号左壁中部布置 1 排 18 m 长锚筋桩。

(3) 4 号导流洞桩号 $0 + 000 \sim 0 + 070$ 段左边墙与 3 号导流洞明渠内侧边坡之间布置 8 排对穿锚索(预应力 $1\ 500\text{ kN}$, 间排距 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$) 及 3 排对穿锚筋桩。4 号导流洞 $0 + 070 \sim 0 + 675$ 右边墙 2 ~ 4 排锚筋桩($3\phi 32$ 或 $2\phi 36$, $L = 18\text{ m}$, 间距 2.0 m), 预应力锚索 1 ~ 2 排(预应力 $1\ 000 \sim 1\ 500\text{ kN}$, $L = 25 \sim 30\text{ m}$, 间距 $3.0 \sim 4.0\text{ m}$)。

经过对 3 ~ 4 号导流洞 Pt_{2y} 地层部位及附近洞段加强支护后, 该洞段围岩均处于稳定, 该部位在混凝土衬砌前洞内所有监测仪器显示的数据表明, 洞室围岩均处于收敛状态, 处理效果较好, 隧洞结构安全。

5 结 语

乌东德水电站右岸 3, 4 号导流洞 Pt_{2y} 地层洞段开挖断面 $19.9\text{ m} \times 27.2\text{ m}$, 2 号导流洞之间岩柱厚度 30.0 m 。围岩由 Pt_{2y} 薄层夹极薄层及互层大理岩化白云岩(层面附绢云母) 构成, 岩层走向与洞轴线小角度相交。开挖过程主要表现为左顶拱处的垮塌和下卧过程中右边墙出现的顺层滑移破坏, 以及大断面 IV 类围岩的塑性变形。经分析计算后, 对因民组洞段围岩采取加强支护措施后, 围岩变形收敛。乌东德水电站导流洞已于 2014 年 12 月先后过流, 过流后洞室变形监测成果表明, 围岩稳定。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. 水力发电工程地质勘察规范(GB50287 - 2006) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [2] 郑颖人, 朱合华, 方正昌, 等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Engineering Geology Field Manual [M]. Ann Arbor: University of Michigan Library, 1998.
- [4] Richard E. Goodman. Introduction to Rock Mechanics (Second Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [5] 陈祖安, 彭土标, 郝绮霞, 等. 中国水力发电工程: 工程地质卷 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

(编辑: 赵凤超)

Deformation characteristics of surrounding rock of diversion tunnels of Wudongde Hydropower Station and treatment measures

WANG Tuanyue, LIU Weiqliang, LUO Yuhua, JING Fakun, QIN Zhenhua

(Sanxia Exploration and Survey Co. , Wuhan 430074, China)

Abstract: Five diversion tunnels, 2 on the left bank and 3 on the right, are built in Wudongde Hydropower Station. In an U - type shape, the profile sizes of the high and low tunnels are $12\text{ m} \times 16\text{ m}$ and $16.5\text{ m} \times 24\text{ m}$ respectively. During excavation started at February, 2012, the tunnel sections in the IV surrounding rock composed of Luoxue and Yinmin formations marked by extra - thinly and thinly bedded marble dolomite and sericite on the top of the bed are divided into five layers. The left vault of the sections in the IV surrounding rock composed of Yinmin formation often collapsed during excavation of the first layer. The deformation monitoring of the tunnels revealed that deformation displacement of the left and right side walls increased drastically during the excavation of the second and third layers. Through analysis of the geological conditions and the failure modes of the IV surrounding rock, the relation between the deformation process and the excavation support, the design scheme is optimized so as to ensure the safe construction of the diversion tunnels.

Key words: diversion tunnels; IV surrounding rock; deformation failure; deformation monitoring; Wudongde Hydropower Station