

软弱岩体中深竖井围岩稳定分析及支护设计研究

谭欣 谢宜静

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v8i7.5616

[摘要] 汪清抽水蓄能电站输水系统下竖井位于深厚软弱岩体中,软弱岩体中竖井开挖深度国内罕见。本文采用FLAC-3D对汪清抽水蓄能电站下竖井进行围岩稳定计算,得出设计支护条件下的衬砌的应力、位移、围岩的塑性区范围,对设计的施工方案、施工程序和支护方式进行评价,为下竖井施工及支护设计提供参考。

[关键词] 深竖井; 围岩稳定; 支护; 正井法

中图分类号: TV **文献标识码:** A

Study on Stability Analysis and Support Design of Middle-deep Shaft in Soft Rock Mass

Xin Tan Yijing Xie

Zhongshui Northeast Survey and Design Research Co., Ltd

[Abstract] The lower shaft of the water conveyance system of Wangqing Pumped Storage Power Station is located in deep soft rock mass, and the excavation depth of the shaft in soft rock mass is rare in China. In this paper, FLAC-3D is used to calculate the stability of surrounding rock in the lower shaft of Wangqing Pumped Storage Power Station, and the stress, displacement and plastic zone range of surrounding rock under the design support conditions are obtained, and the design construction scheme, construction procedure and support method are evaluated, which provides reference for the construction and support design of the lower shaft.

[Key words] deep shaft; Surrounding rock is stable; Support; Positive well method

前言

汪清抽水蓄能电站输水系统下竖井位于软弱岩体中最深达126m,软弱岩体中竖井开挖深度国内罕见。软弱岩体中开挖深竖井,地质条件复杂,岩土体稳定性差,多呈强风化状态,岩质软弱,施工难度极大。竖井施工采用反井钻施工难度大,故采用“正井法”施工。采用适当的数值计算方法对深竖井的施工方案、施工程序和支护方式进行评价,关系着施工运行期的安全以及节点工期的实现。

1 工程概况

汪清抽水蓄能电站装机容量1800MW,为一等大(1)型工程,额定水头578m。电站承担电力系统调峰、填谷、储能、调频、调相以及紧急事故备用等任务,电站年发电量 1.642×10^9 kWh,年抽水电量 2.189×10^9 kWh,综合效率75%。吉林省汪清抽水蓄能电站由上水库、下水库、输水系统、地下厂房系统以及地面开关站等建筑物组成。

输水系统三条引水主洞平行布置,立面采用一级斜井+一级竖井布置,沿发电流向依次为上平洞、上斜井、中平洞、下竖井和下平洞。下竖井段采用钢板衬砌,衬砌为圆形断面,内径为5.4m,外包素混凝土厚度为0.65m。

输水系统下竖井段穿越第三系土门子组砂砾岩、砂岩,砂砾岩为灰色、灰白色。砂质结构,巨厚层状构造。泥质、砂质胶结,砾石成分主要为花岗岩;砂岩为灰色、灰绿色。砂质结构,厚层状构造。矿物成分主要为石英、绢云母及绿泥石等。砂砾岩、砂岩多呈强风化状态,岩质软弱。考虑到竖井开挖洞径大,且前期地应力反演结果显示整个洞室群区域以水平构造应力为主,竖井砂砾岩段开挖会出现较大的围岩变形,围岩对支护结构产生较大的围岩压力等问题。因此有必要通过对输水系统下竖井围岩稳定的三维数值模拟分析,来评价输水系统下竖井围岩稳定情况,为合理选择下竖井的施工方法、施工程序、支护方式及支护参数等提供依据。

2 下竖井开挖支护设计

汪清抽水蓄能电站下竖井开挖采用正井法施工,参照深厚覆盖层竖井施工开挖支护方案^[1~4],初拟本工程下竖井开挖支护方案为:

(1)超前注浆小导管:杆体材质:无缝钢管;水泥砂浆:M30;杆体直径:Φ42mm,壁厚3.5mm;入岩长度:4~6m;入岩方向:5°~15°;搭接长度:1m;注浆压力:0.5~1MPa。(2)开挖后立即喷5cm厚C25混凝土进行封闭;(3)排水管:排水孔孔径50mm,孔

深3m, 孔内插入PVC排水管, 排水管外侧钻孔后包裹土工布。(4) 系统锚杆: 自钻式注浆锚杆^[5], 长6m, 入岩5.9m, 间距1.5m*1.5m。(5) 挂钢筋网: 直径8mm, 间距20cm*20cm^[6]。(6) 钢支撑: HM150, 间距0.5m, 钢拱架之间用钢筋焊接连接。(7) 复喷混凝土20cm厚。(8) 每2m一段进行C30W8钢筋混凝土衬砌60cm厚。

3 竖井计算

3.1 应力释放系数

隧道开挖是空间与时间组成的四维变化问题, 随着掌子面向前推进, 围岩压力逐步释放, 这一过程被称为掌子面效应, 已有学者研究了III类、IV类和V类围岩应力释放系数与掌子面的位置关系^[7], 参见图1。可见对于IV级围岩, 在掌子面位置附近的应力释放系数约为50%~60%。本项目砂砾岩段围岩基本为IV类, 考虑到支护的及时性, 故在数值模拟时假定围岩应力释放系数为50%时, 模拟喷射混凝土、锚杆和钢拱架的初期支护作用。

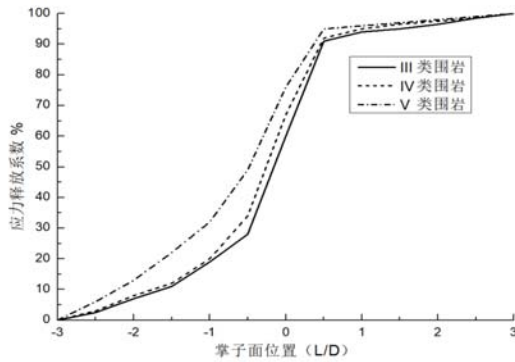


图1 应力释放系数随掌子面位置的关系

3.2 模拟假设

应力释放50%时, 打设锚杆、喷射混凝土, 将钢拱架的作用等效到喷射混凝土中。钢拱架作用主要通过将弹性模量折算到喷射混凝土中, 其等效计算方法为:

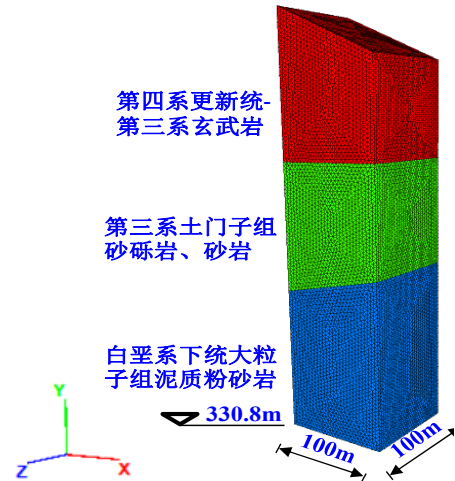
$$E = E_0 + S_g \frac{E_g}{S_c}$$

式中, E 表示折算后混凝土等效弹性模量; E_0 表示素混凝土弹性模量; S_g 表示钢筋或钢拱架的横截面积; E_g 表示

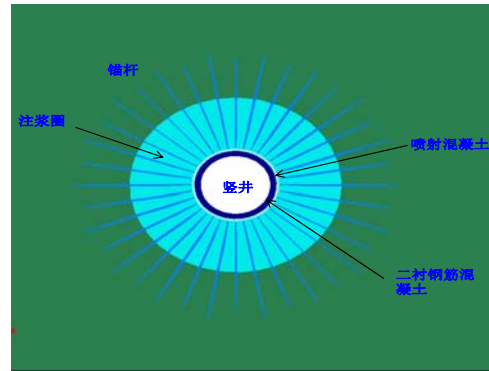
钢筋或钢拱架的弹性模量; S_c 表示混凝土的截面积。

3.3 数值模型、本构模型和力学参数

采用三维仿真软件FLAC-3D, 建立竖井开挖支护的三维数值计算模型, 竖井位于模型中心, 三维数值计算模型的单元总数56.17万个, 节点数21.61万个, 模型考虑了三种围岩、注浆圈、竖井开挖, 以及喷射混凝土、锚杆和二衬支护。锚杆支护采用Cable单元模拟, 围岩、初喷混凝土和二次衬砌采用实体单元模拟。模型范围及各模拟对象参见图2。



(a) 三维模型尺寸



(b) 俯视图

图2 三维数值计算模型范围、围岩及各种支护

围岩和注浆圈本构模型为莫尔-库仑弹塑性模型, 锚杆、喷射混凝土和二衬采用弹性模型。模型地应力场采用前期地应力反演结果。各种围岩和结构的力学参数参见表1。

表1 围岩与支护结构力学参数

岩性或结构	密度 / (g/cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/°
玄武岩	2.38	8.00	0.28	0.80	34.99
砂砾岩	2.20	1.00	0.38	0.20	21.80
泥质粉砂岩	2.25	3.00	0.30	0.50	30.96
注浆圈-玄武岩段	2.38	8.00	0.28	0.80	34.99
注浆圈-砂砾岩段	2.20	1.00	0.38	0.20	21.80
注浆圈-泥质粉砂岩段	2.25	3.00	0.30	0.50	30.96
喷射混凝土	2.41	28.15	0.20	/	/
二衬混凝土	2.45	30.00	0.20	/	/
素混凝土	2.45	30.00	0.20	/	/
锚杆	7.80	210.00	/	/	/

3.4 地应力场模拟

根据前期洞室群及竖井区域地应力反演的边界条件, 考虑本模型在坐标方向和模型尺寸上的差异, 分别经过坐标变换和

考虑模型尺寸修正,得到适合本模型的位移速度边界。考虑到本模型地表坡度较陡,位移速度施加在高高程一侧,低高程一侧不施加位移速度,高高程一侧X方向施加的挤压位移为0.04m,Z方向施加的挤压位移为0.0017m,ZX方向的剪切位移为0.0011m(逆时针方向),重力加速度计算值仍为 10.35936m/s^2 ,计算得到的竖井区域模型地应力场。

在玄武岩段竖井围岩最大主应力矢量方向为近于X轴方向,水平构造应力占主导地位,在砂砾岩段和泥质粉砂岩段,最大主应力矢量方向近于Y轴方向,自重应力占主导地位,最大水平应力与竖向应力比值随埋深逐渐减小,这一结果与钻孔实测数据及传统认识的随埋深增加最大水平应力与竖向应力比值逐渐减小的规律相符。

随着埋深增加,竖井围岩最大主应力和最小主应力均呈逐渐增加趋势。在玄武岩段最大主应力在 $4.5\sim 4.7\text{MPa}$,最小主应力约为 $2.1\sim 2.3\text{MPa}$ 。自玄武岩段进入砂砾岩段,最大主应力减小,最大主应力的最小值约为 3.2MPa ,之后随埋深增加,至砂砾岩底部增大至约 6.0MPa ,砂砾岩段最小主应力约为 $2.2\sim 3.8\text{MPa}$ 。泥质粉砂岩段最大主应力在 $6.0\sim 8.2\text{MPa}$,泥质粉砂岩段最小主应力从砂砾岩段先减小,后随埋深逐渐增大,最小主应力在 $3.1\sim 4.0\text{MPa}$ 。

3.5 外水压力

本项目也将考虑竖井运行期的情况,此时在二衬内部再施加一个厚度为65cm的素混凝土衬砌。模拟竖井运行期在外水作用下支护结构的受力情况,将外水压力作用到围岩和初支之间,分析初支、二衬和素混凝土衬砌的应力和变形情况。

4 计算结果及分析

无支护情况下,砂砾岩段围岩径向位移随埋深增加逐渐增大,径向位移从约12mm逐渐增大至约 $130\sim 135\text{mm}$,最大值在砂砾岩段下部,同样地竖向位移也随埋深逐渐增加,从约5mm逐渐增大至约53mm。竖井围岩塑性圈深度也从6.5m增加至约13.5m。整个洞壁周围最大主应力和最小主应力均急剧减小至不足1MPa,但未有拉应力出现。计算结果表明,无支护情况下,砂砾岩段围岩变形过大,需要足够的支护措施才能保证围岩稳定。

在考虑设计支护作用下,应力释放系数为50%,砂砾岩段围岩径向位移最大值为13.14mm,竖向位移最大值为9.21mm,塑性圈深度最大约为1.70m。围岩最大主应力在 $3.50\sim 5.00\text{MPa}$,最小主应力在 $1.90\sim 2.50\text{MPa}$,支护显著改善了围岩应力状态,提高了围岩承载能力,约束了围岩位移。初支最大主应力一般为 $3.50\sim 9.00\text{MPa}$,二衬最大主应力一般为 $2.50\sim 6.00\text{MPa}$,锚杆应力最大值为 33.65MPa 。初支、二衬、锚杆主应力均小于设计值,围岩径向相对位移与洞径之比在设计要求范围内,现有支护措施可以保证竖井围岩稳定。

运行期主要分析在外水压力作用下,初支、二衬和内部65cm素混凝土的应力情况。本次模拟在有支护状态的基础上,在竖井内部添加65cm厚的素混凝土,然后在围岩和初支间施加外水压力,其中各层围岩的外水压力折减系数参见表2。

表2 各层围岩外水压力折减系数

	外水压力折减系数 β_e
玄武岩段	0.6
砂砾岩、砂岩段 Nt	0.7
泥钙质粉砂岩段 K1d	0.6

计算得到砂砾岩段的外水压力随埋深在 $0.35\sim 1.26\text{MPa}$,应力梯度为 5.89kPa/m ,以法向压力方式施加在围岩和初支之间的公共圆柱界面上,然后通过等效节点力来体现其作用。随埋深增加,最大主应力逐渐增大,最大主应力约为 $6.0\sim 17\text{MPa}$,其中主应力较大值主要出现在两个循环初支交界部位,在剖面上厚度也较小。在剖面上初支最大主应力最大,二衬、素混凝土依次减小,如534.58m剖面最外侧初支最大主应力约为 $11\sim 15\text{MPa}$,二衬约为 $4\sim 9\text{MPa}$,素混凝土小于 4MPa 。各部位最大主应力均小于设计值,预计支护结构在运行期可以保证竖井安全平稳运行。需说明的是,在实际的施工过程中,二衬一般连续浇筑,初支的整体性也相对较好,预计实际运行过程中,支护应力小于本计算值。

总体而言,设计支护方案提供了足够的围压,有效减小了围岩变形,现有开挖方式、喷锚和二衬支护设计可以满足砂砾岩段安全施工的要求。

5 结语

在汪清抽水蓄能电站工程中,对输水系统下竖井采用FLAC-3D程序进行围岩稳定分析,对支护设计进行评价,为深厚软弱岩层采用正井法开挖深竖井的支护设计提供了有效参考,为以后同类型结构设计提供了有价值的参考和借鉴经验。

参考文献

- [1]施召云,刘雪峰,武晓杰.溪洛渡水电站深覆盖层土体中大型竖井开挖锚固技术[J].施工技术,2010,39(11):86-89.
- [2]樊航三,王金田,蔡荣生.溪洛渡左岸出线竖井覆盖层正井施工技术初探[J].陕西水利,2009,(06):78-79.
- [3]蔡荣生,刘永胜,张坤.复杂地质条件下深厚覆盖层竖井施工工法[J].水利建设与管理,2011,31(10):16-18.
- [4]孙强.复杂地质条件下竖井开挖稳定性及参数优化[J].水电能源科学,2018,36(04):123-125.
- [5]李俊鹏,段小强,闫小虎.开挖过程中隧洞围岩应力释放规律的数值研究[J].水利与建筑工程学报,2007,5(4):4.
- [6]NB/T 10391-2020,水工隧洞设计规范[S].
- [7]李俊鹏,段小强,闫小虎.开挖过程中隧洞围岩应力释放规律的数值研究[J].水利与建筑工程学报,2007,5(4):4.

作者简介:

谭欣(1992--),男,汉族,辽宁省凌源市人,硕士研究生,工程师,从事水利水电工程设计工作。

谢宜静(1991--),女,汉族,辽宁省盖州市人,硕士研究生,工程师,从事水利水电工程设计工作。