

抽水蓄能电站软弱岩层竖井施工稳定性分析

张怡果^{1,2}

1.华北水利水电大学水利学院 河南 郑州 450045

2.郑州市建筑设计研究院有限公司 河南 郑州 450045

【摘要】：本文基于某抽水蓄能电站工程地质参数，利用有限差分软件 FLAC3D 建立竖井三维数值模型，模拟了钻爆法分步开挖及初期支护（锚杆+喷射混凝土）与二次衬砌（钢筋混凝土）的施工全过程。模拟结果表明：及时施作初期支护能有效控制竖井开挖期围岩变形，抑制塑性区发展；二次衬砌承担了后期主要的围岩压力，其应力水平在设计允许范围内；现有的开挖、喷锚和二衬支护设计可以满足软弱岩层（砂砾岩段）安全施工的要求。

【关键词】：抽水蓄能电站；竖井施工；数值模拟；FLAC3D；围岩稳定性

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.023

1 引言

随着新能源大规模并网，抽水蓄能电站在电力系统中调节负荷、保障电网安全稳定的作用日益凸显^[1]。竖井是电站输水系统、通风系统及交通联系的核心垂直通道，其施工难度高、风险大^[2]。传统经验设计方法难以精确预测深埋、大直径竖井在复杂地质条件下的围岩变形与应力演化规律。数值模拟技术凭借其强大的计算分析能力，能够精细刻画施工过程中的岩体-支护结构相互作用机理，为优化设计和施工决策提供科学依据^[3,4]。

目前关于隧洞开挖支护方面的数值模拟研究工作较多，并取得了不错的成果。FLAC3D 三维快速拉格朗日差分分析软件，作为一款专为岩土力学分析而开发的软件，具有丰富的弹塑性本构模型，能够准确的模拟材料的屈服、塑性流动、软化及大变形，特别是对于分析弹塑性材料、大变形及模拟施工过程等问题具有良好的效果。由于该软件拥有解决复杂力学问题能力，其应用范围十分广泛，由最初的岩土工程和采矿工程领域逐步扩展到了土木工程、水利工程、交通运输工程和石油等诸多领域。作为一款有限差分分析软件，在模拟围岩塑性破坏和流动性时，与有限元法利用的“离散集成法”相比，该软件利用的是更为合理、准确的“混合离散法”；另外，其采用显式微分方程求解，使得非线性和线性本构关系在算法上一致，同时，显式算法不需要形成刚度矩阵，求解速度快且对计算机配置要求不高。

考虑到 FLAC3D 的上述优势，目前较多的隧洞开挖支护数值模拟研究工作均采用此软件来展开，如文献^[5]通过 FLAC3D 软件对逆台阶法开挖稳定性进行数值模拟分析，模拟结果与工程实践表明，在极小覆岩厚度条件下，采用逆台阶法先行开挖下台阶可额外为上台阶提供开挖临空面，从而有效减少上台阶爆破扰动对上覆围岩力学性能和完整度的影响，充分保护上覆围岩的承载能力。文献^[6]为了解决深井软岩巷道变形破坏严重及支护困难的问题，以铜辉铜矿深井脉外运输软岩巷道为研究对象，采用 FLAC3D 对深井软岩巷道围岩稳定性及布置方案进

行了研究。文献^[7]利用 FLAC3D 数值模拟软件，测算了在不同工况下的大断面浅埋式偏压隧洞施工条件对洞口边坡稳定性的影响，结合研究成果对隧洞开凿工艺的研究给出了指导性建议。文献^[8]利用 FLAC3D 软件对边坡的安全性进行了定量分析，经过大量的网格模型构建和对边界条件的计算，得出了在自重应力下的内部应力、位移和最大剪应变增量云图等，并把得出的安全系数值和极限平衡法进行了比较，结果有限差分方法所计算的安全系数值略偏小。文献^[9]以成兰铁路某小径距偏压隧道为研究背景依托，采用 FLAC3D 软件，利用强度折减法，研究小径距偏压隧道及其边坡的力学特性及稳定性，结果表明：小径距偏压隧道所在边坡坡顶的水平方向应力的低值区范围大于边坡坡底；小径距偏压隧道中的左侧隧道的水平方向应力主要集中在拱顶位置，右侧隧道则主要集中在拱顶和拱底；水平方向位移最大值出现在小径距隧道的拱顶位置和边坡下坡腰的坡面相互贯通位置范围内。文献^[10]以某高速铁路隧道下穿边坡工程为依托，采用 FLAC3D 软件对隧道开挖过程中围岩、边坡的应力和位移变化进行了数值模拟研究，根据数值模拟结果分析了隧道开挖对边坡稳定性的影响。研究结果表明：隧道开挖对边坡的位移影响明显，在开挖完成后拱顶处于临空状态时边坡和围岩的稳定性受到的影响最大。文献^[11]结合进出口段隧道围岩和进出口滑坡的工程地质问题，采用 FLAC3D 软件对隧洞进出口滑坡在隧洞动态施工条件下和暴雨情况下的稳定性问题展开了重点探讨。研究结果表明：隧道施工、暴雨和地震活动对松多隧道进出口段滑坡稳定性有较大影响，将导致滑坡由目前稳定状态逐渐发展成欠稳定状态。文献^[12]采用 FLAC3D 软件对某隧道岩体的位移场、应力场、剪切应变增量进行了模拟分析，并对边坡坡角、坡高和隧道埋深等一系列单个因素下围岩稳定的敏感性模拟做了进一步分析。综上所述，目前采用 FLAC3D 软件对隧洞开挖支护施工过程进行数值模拟研究的工作较多，但大多数工作针对的为公路或者铁路隧洞，而针对水工隧洞竖井开挖支护的研究工作相对较少。水工隧洞竖井与公路或者铁路隧洞在受力方面又有显著区别，竖井

受力主要以深部岩体的自重压力为主，为垂直受力，而公路或者铁路隧洞则以侧向围岩压力为主，为水平受力，因此本文旨在通过一个典型的抽水蓄能电站输水隧洞竖井开挖支护施工方案，系统展示数值模拟在抽水蓄能电站竖井施工过程分析与稳定性评价中的应用，为其他类似工程的开挖和支护施工提供一些借鉴和帮助。

2 工程背景与模型建立

2.1 工程概况

某在建抽水蓄能电站，其输水系统的第二级竖井洞径8.4m，竖井区域岩性主要为第四系更新统-第三系玄武岩、第三系土门子组砂砾岩、砂岩，以及白垩系下统大粒子组泥质粉砂岩，局部位于燕山期晚期花岗岩中，该二级竖井段的布置及岩性分布参见图1。其中第三系土门子组砂砾岩、砂岩段，岩性较为软弱，考虑到竖井洞径开挖大，并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，故竖井砂砾岩段开挖可能会出现较大的围岩变形，以及对支护结构产生较大的围岩压力等稳定性问题。因此有必要对该二级竖井围岩的稳定情况进行三维数值模拟分析，以为后续施工过程中采取适当的工程措施，以及合理选择施工方法、施工程序、支护方式、必要的加固措施及支护参数等提供依据，并为工程运行期间各工况下结构安全稳定提供技术支持，从而使工程的设计达到既经济又安全的目的。

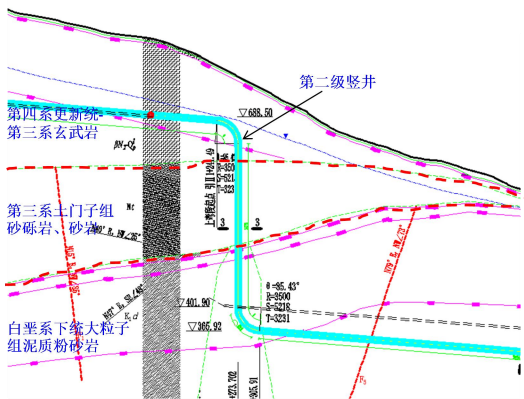


图1 第二级竖井段布置及周围岩性分布图

2.2 数值模型构建

采用FLAC3D软件建立三维模型，竖井位于模型中心，模型X方向为沿输水系统轴线方向，X方向长度为100m，指向下游为正；Y向为竖直方向，模型底部高程为330.8m，顶部到地表，数值向上为正；Z方向为垂直输水系统轴线方向，Z方向长度为100m；采用六面体单元精细化划分网格，竖井周围网格加密。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、初喷混凝土和二衬衬砌采用实体单元模拟。模型范围及各模拟对象参见图2。模型的初始条件与边界为：施加重力加速度（9.8 m/s²），模型底部固定（z方向），四周施加法向位

移约束（x，y方向），顶部为自由面。围岩和注浆圈采用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型，锚杆、喷射混凝土和二衬采用弹性模型。根据地质勘查与室内试验，设定岩体密度、弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角等参数，具体如下表1所示。在建模过程中，按照设计的施工方案，即每个循环步，竖井开挖2m；紧跟竖井开挖，打锚杆，挂网、架设钢支撑，喷射混凝土；进行钢筋混凝土衬砌；进行下一个循环，共59个循环步骤，拟模拟段竖井全长118m。模拟关键步骤为：1）初始地应力平衡。2）分步开挖：模拟自上而下分段开挖（每段约2m高），共分59步完成。3）初期支护：在每段开挖后立即“激活”该段的锚杆和喷射混凝土层单元。4）二次衬砌：待该段竖井的初期支护完成且围岩变形初步稳定后，“激活”该段的钢筋混凝土衬砌单元。5）下一段开挖模拟。

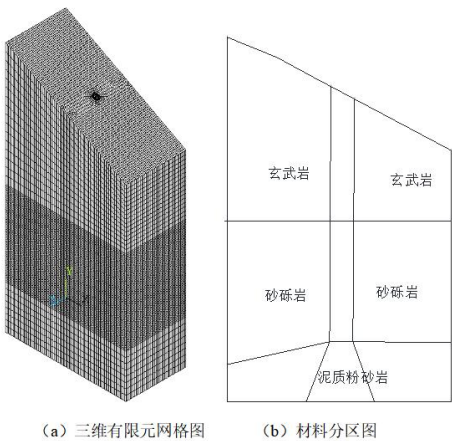


图2 竖井开挖三维有限元网格图及材料分区图

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	2.28	5.00	0.35	0.40	28.80
砂砾岩	2.20	1.00	0.38	0.20	21.80
泥质粉砂岩	2.23	2.00	0.36	0.50	30.96
注浆圈围岩参数	2.20	1.15	0.37	0.21	22.89
喷射混凝土 (C25)	2.36	28.15	0.167	/	/
二衬混凝土 (C30W8 钢筋 混凝土)	2.40	30.00	0.20	/	/
锚杆 (HRB-φ25 螺纹锚杆)	7.80	210	/	/	/

3 模拟结果与分析

根据前文所述方法建模，并完成整个开挖循环，即整个竖井直井段开挖完毕后，图3显示了开挖段水平位移、竖向位移、塑性区及最大主应力分布情况；图4为初支、二衬以及锚杆的最大主应力分布图。

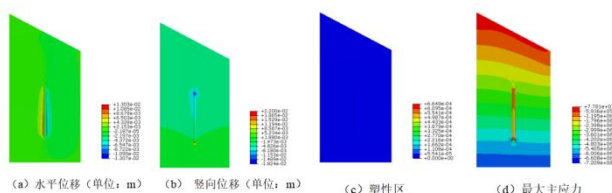


图3 竖井直井段开挖完毕后典型剖面围岩位移、塑性区及最大主应力分布图(应力单位: Pa)

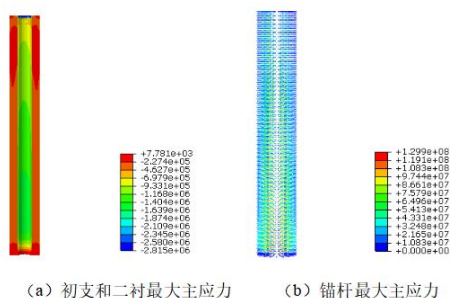


图4 竖井直井段开挖完毕后初支、二衬以及锚杆最大主应力(单位: Pa)

3.1 围岩位移场演化

对软弱岩层,砂砾岩段开挖模拟完成后,竖井井壁出现向井内临空面的径向收敛位移。最大位移发生在竖井下部区域,最大值为8~13mm。竖井洞壁围岩竖向位移最大值约为18~22mm,主要位于开挖段两端,竖井洞壁顶端出现向下的沉降位移,洞壁顶端出现向上的隆起位移,模拟结果符合一般的物理规律。总体上,围岩位移小于规范允许的30mm常规控制标准^[3]。

参考文献:

- [1] 郑齐峰,吴喜艳.浅谈抽水蓄能电站地下厂房结构布置.水电自动化与大坝监测[J].2018,004(005):31-4,65.
- [2] 刘建兵,杨志勇,饶李,王树英,方克军,王卓,et al.超深竖井服务隧道多断面施工物流组织优化.隧道与地下工程灾害防治[J].2024,6(04):38-49.
- [3] 杜红亮,常小兵,傅鹤林,姚涛.深大竖井开挖稳定性数值模拟分析.科技通报[J].2024,40(09):93-8.
- [4] 王少卿.大尺寸竖井开挖过程稳定性数值模拟分析.建设监理[J].2023(08):105-8.
- [5] 王建辉,高萌,王润生,阳凯,黄长鑫,张连震,et al.极小覆岩厚度条件下地铁隧道逆台阶法开挖稳定性分析.隧道建设(中英文)[J].2023,43(4):690-7.
- [6] 夏德威,冷坤鹏,张镇铄,侯永强.基于FLAC3D数值模拟的软岩巷道围岩稳定性及布置方案研究.矿业研究与开发[J].2020,40(12):92-9.
- [7] 张彦飞,陈浩.浅埋偏压大断面隧道洞口段边坡稳定性分析.公路交通科技:应用技术版[J].2017(4):221-3.
- [8] 任强.有限差分法在岩质高边坡稳定性分析中的应用[D].大连:辽宁师范大学,2018.
- [9] 陈行,田明杰,周鹏发,陈文宇.基于FLAC3D的小径距偏压隧道及边坡的力学特性及稳定性分析.四川建筑[J].2018,38(2):126-7.
- [10] 柳墩利.隧道开挖对边坡稳定性的影响规律.铁道建筑[J].2018,58(7):68-71.
- [11] 邢军,董小波,贺晓宁.隧道洞口滑坡工程地质问题与变形机理研究.灾害学[J].2018,33(A01):14-7+29.
- [12] 袁慧鹏.某隧道进口边坡稳定性研究[D].拉萨:西藏大学,2020.

3.2 围岩应力场与塑性区

从图3(d)可以看出,随着埋深增大,注浆圈围岩最大主应力总体呈增大趋势,这是因为随着埋深增大,竖井围岩受到的自重压力越大造成的,但是竖井开挖后洞壁围岩的最大主应力量值变化不大,基本都在3~6MPa左右。而从图3(c)塑性区分布图,可以看出开挖段由于初支和二衬的支护作用,基本无塑性区产生,说明设计所采用的支护方案是合理可行的。

3.3 支护结构受力特征

初支喷射混凝土和二衬混凝土受到的最大压应力约为2.8MPa;初支和二衬无拉应力产生。根据规范,C25喷射混凝土的抗压强度设计值为11.9MPa,而C30混凝土的抗压强度设计值为14.3MPa,因此,初支和二衬的应力满足规范要求。锚杆主要承受拉力,最大轴力出现在锚杆中部或穿过潜在滑动面的位置,最大轴力约129.9MPa,低于其设计承载力400MPa。锚杆有效调动了深部岩体的承载能力。因此,设计所采用的锚杆布置方案也是合理可行的。

4 结论

本文利用FLAC3D软件成功实现了对某抽水蓄能电站软弱层竖井施工全过程的精细数值模拟,模拟结果清晰表明,及时施作高质量的初期支护(锚杆+喷层)是控制竖井开挖期围岩变形、防止局部失稳的核心。支护提供了足够的围压,有效减小了围岩变形,现有的开挖、喷锚和二衬支护设计可以满足软弱岩层(砂砾岩段)安全施工的要求,开挖支护设计方案合理可行。