

大型地下厂房洞室群运行期围岩支护结构安全分析与应用

齐智勇^{1,2}, 毛延翩^{1,2}, 远 近^{1,2}, 徐 波^{1,2}, 张雨霆², 董 顺¹, 都旭煌¹, 何 军², 胡 蕾²

¹中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌

²湖北省智慧水电技术创新中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘 要

大型地下厂房洞室群在建成投运后, 面临数十年甚至上百年的服役期, 围岩 - 支护安全是确保其长期稳定运行的关键环节。本文首先分析了运行期地下厂房围岩支护结构安全分析的总体思路, 认为应从围岩变形和支护结构的总体量值规律和异常数据两方面入手开展工作。对于异常数据, 应进一步开展数值仿真和局部围岩稳定分析, 实现洞室群在运行期的安全评价。最后, 以某水电站右岸地下厂房洞室群为研究对象, 基于运行期围岩变形及支护结构受力监测数据, 结合数值模拟方法, 系统分析了围岩长期稳定性及支护结构的安全状态。研究结果表明: 主厂房围岩变形主要集中于施工期, 运行期变形量值总体较小, 蓄水运行后, 围岩增量变形有限, 表明拱坝蓄水对围岩影响有限。针对局部锚索测力计持续增长现象, 通过地质条件分析与块体稳定性复核, 确认块体安全系数满足安全要求。研究为运行期地下厂房围岩 - 支护体系的安全评价提供了数据支撑与理论依据, 弥补了既有研究对运行期长期稳定性分析的不足。

关键词

地下厂房, 围岩变形, 支护受力, 安全分析, 数值模拟, 块体稳定, 运行期监测

Safety Analysis and Applied Research on Surrounding Rock Support Structure of Large-Scale Underground Powerhouse Cavern Group during Operation Period

Zhiyong Qi^{1,2}, Yanpian Mao^{1,2}, Jin Yuan^{1,2}, Bo Xu^{1,2}, Yuting Zhang², Shun Dong¹, Xuhuang Du¹, Jun He², Lei Hu²

¹China Yangtze Power Co., Ltd. (CYPCL), Yichang Hubei

²Hubei Technology Innovation Center for Smart Hydropower, Wuhan Hubei

文章引用: 齐智勇, 毛延翩, 远近, 徐波, 张雨霆, 董顺, 都旭煌, 何军, 胡蕾. 大型地下厂房洞室群运行期围岩支护结构安全分析与应用[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1608-1614. DOI: 10.12677/hjce.2025.146173

Abstract

After a large-scale underground powerhouse cavern group is completed and put into operation, it will face a service period of several decades or even hundreds of years. The safety of the surrounding rock and support is a crucial link to ensure its long-term stable operation. Firstly, this paper analyzes the overall idea of the safety analysis of the surrounding rock support structure of the underground powerhouse during the operation period, and believes that the work should be carried out from two aspects: the overall magnitude laws of the surrounding rock deformation and the support structure, as well as the abnormal data. For the abnormal data, numerical simulation and local surrounding rock stability analysis should be further carried out to achieve the safety evaluation of the cavern group during the operation period. Finally, taking the cavern group of the underground powerhouse on the right bank of a certain hydropower station as the research object, based on the monitoring data of the surrounding rock deformation and the force of the support structure during the operation period, combined with the numerical simulation method, the long-term stability of the surrounding rock and the safety state of the support structure are systematically analyzed. The research results show that: the deformation of the surrounding rock of the main powerhouse is mainly concentrated in the construction period, and the deformation magnitude during the operation period is generally small. After the impoundment and operation, the incremental deformation of the surrounding rock is limited, indicating that the impoundment of the arch dam has a limited impact on the surrounding rock. In response to the continuous growth phenomenon of the local anchor cable dynamometer, through the analysis of the geological conditions and the review of the block stability, it is confirmed that the safety coefficient of the block meets the safety requirements. This research provides data support and theoretical basis for the safety evaluation of the surrounding rock-support system of the underground powerhouse during the operation period, and makes up for the deficiencies of the existing research on the long-term stability analysis during the operation period.

Keywords

Underground Powerhouse, Surrounding Rock Deformation, Support Structure, Safety Analysis, Numerical Simulation, Block Stability, Operational Monitoring

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

在地下厂房洞室群的开挖过程中, 及时监控围岩变形能够有效掌握围岩稳定状态, 及时对支护时机和支护参数进行调整。姚强等[1]通过现场监测与数值模拟相结合的方法, 分析了开挖过程中围岩位移的时空演化特征; 董志宏等[2]分析了乌东德左岸地下厂房的施工期围岩变形, 认为支护措施显著降低了围岩松弛范围; 李志鹏等[3]探讨了猴子岩水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形与破坏特征; 周述达等[4]研究了陡倾角层状岩层大型地下厂房施工期围岩变形开裂机理。在地下洞室施工期开挖支护完成后, 变形一般在短时间内收敛。然而, 地下洞室所处地质条件复杂, 围岩的力学性质受岩体结构、地应力分布、断层裂隙等多因素影响, 使得一些洞室工程的围岩变形具有时间效应, 尤其在运行期可能因应力松弛、

地下水渗透、岩体蠕变等因素持续发展。龙小刚等[5]分析的镇安抽水蓄能电站地下厂房监测数据表明,围岩变形在开挖结束后仍需要数月甚至数年才能逐渐收敛。现有研究来看,对于进入运行期的地下厂房围岩变形分析还少有涉及,也缺少基于实测数据的洞室长期稳定评价。本文以某水电站右岸地下厂房洞室群为研究对象,开展了运行期地下厂房围岩支护结构安全分析。

2. 运行期地下厂房围岩支护结构安全分析的总体思路

运行期地下厂房围岩支护结构安全分析需以监测数据为核心,结合地质条件开展多层次评估。

2.1. 安全监测数据的长时序统计分析

安全监测数据应重点关注位移、应力、渗压等关键参数的时序演变规律。通过计算变形增量速率、对比历史极值、分析时序曲线的波动特征,判断围岩整体是否处于稳定收敛状态。需特别关注季节性或周期性荷载(如地下水位变化、温度应力)对增量变形的影响,识别是否存在加速变形趋势或累积效应。同时,需将不同监测断面、不同方向的变形数据进行空间关联分析,综合评估支护结构整体承载性能是否满足设计要求。

2.2. 安全监测数据的局部异常值分析

针对统计分析发现的局部监测异常值(如特定测点位移陡增、锚索应力持续增加等),需结合该区域地质勘察资料进行专项诊断。重点核查异常部位是否存在隐伏断层、岩脉穿插、节理密集带等不良地质构造,分析岩体结构面产状与工程开挖面的空间组合关系,判断是否发生局部块体滑移或结构面剪切错动。同时需复核支护参数与实际地质条件的匹配性,检查锚杆锚固段是否穿越软弱夹层、预应力损失是否超限、喷层是否出现剥落等现象。对于渗压异常区域,还需结合水文地质条件分析渗流路径变化,评估渗透压力对围岩稳定的影响。通过地质力学反演或数值模拟,可进一步揭示异常成因,并提出应对策略。

2.3. 局部异常监测数据的原因分析

引起监测数据局部异常的原因较多,以局部块体稳定性为例进行说明。在地下洞室施工开挖过程中,受岩体结构面和开挖面切割影响,在开挖面已形成不稳定块体。采用矢量分析法,可识别不稳定块体,计算块体安全系数,并根据安全系数容许值确定加固力及对应支护措施。在采用矢量分析法基础上,提出进一步融合三维数值分析的计算结果来评价块体的稳定性,具体思路为:

1) 判别每个块体的可动性,不可动块体可直接从稳定分析中排除;

2) 对于每个可动性块体,计算作用于块体上的合主动力 $\mathbf{r}$ 。以往分析时,常常仅考虑块体自重 $\mathbf{G}$ 作为主动力 $\mathbf{r}$ 。采用三维数值分析方法时,可将其他荷载效应的影响纳入,如渗流荷载、锚固力和地震动作引起的荷载效应,可将计入合主动力 $\mathbf{r}$ 来考虑。

3) 根据计算得到的合主动力,确定块体的运动模式。一般地,可动性块体存在三种运动模式,分别为单面滑动、双面滑动和脱离岩体运动。通过对合主动力矢量和块体面的矢量进行运算判断,即可以确定可动性块体的运动模式。

4) 计算块体的安全系数,并评价块体的稳定性。对于判定为脱离岩体运动的块体,其安全系数为0。对于其他两种做滑动的块体,首先应计算得到作用在块体上的滑动力、阻滑力和粘聚力。然后根据下式计算得到安全系数:

$$f = (F_c + F_f) / F_s \quad (1)$$

为考虑其他荷载效应对块体安全程度的影响,首先采用数值分析计算得到围岩变形,再将计算成果

应用于块体稳定评价过程,即:作用在块体上的合主应力分量形式可写为 $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$ 。当主动力仅考虑块体自重 $\mathbf{G}$ 时, $\mathbf{r} = (0, 0, \mathbf{G})$ 。通过数值分析,结构面层面的应力状态以薄层单元应力的形式存储。薄层单元的应力可根据下式转换为在块体面上的斜截面应力分量 T_x , T_y 和 T_z :

$$\begin{cases} T_x = \sum_{i=1}^N (\sigma_{xi} l_i + \tau_{xyi} m_i + \tau_{xzi} n_i) \\ T_y = \sum_{i=1}^N (\tau_{xyi} l_i + \sigma_{yi} m_i + \tau_{zyi} n_i) \\ T_z = \sum_{i=1}^N (\tau_{xzi} l_i + \tau_{zyi} m_i + \sigma_{zi} n_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}_i = (l_i, m_i, n_i)$ 为层面的法向矢量, $\sigma_i = (\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}, \tau_{xyi}, \tau_{xzi}, \tau_{zyi})$ 为薄层单元的应力分量。 N 是与当前块体面所对应的薄层单元数目。则通过下式即可将块体层面应力的作用计入主动力 $\mathbf{r}$:

$$\mathbf{r} = (AT_x, AT_y, AT_z + G) \quad (3)$$

式中 A 为块体面的面积。

可以看出,根据数值计算所得的块体层面应力,可依据式(3)纳入分析块体稳定时的主动力,这就使得块体稳定评价过程能够考虑除块体自重外的附加荷载作用。同时,由于数值分析能够将各种影响块体稳定性的复杂因素影响做量化分析,因此计算得到结果更符合实际情形。与传统块体稳定分析时附加荷载的确定方法相比,也更能反映地下厂房洞室群运行期块体赋存的实际地质环境,进而准确分析引起安全系数局部异常的原因。

3. 工程应用研究

3.1. 地下厂房洞室群运行期监测数据分析

1) 围岩变形

以西南地区某电站地下厂房洞室为例,统计自运行以来的监测数据,分别从总体变形、增量变形、典型变形时程曲线方面分析运行期围岩变形特征。主厂房一般变形量值在 0~20 mm 之间,占总数的 91.3%;最大变形量为 66.00 mm (7#机上游边墙)。经统计表明(见图 1(a)),小于 5 mm 的测点占 46.1%, 5~10 mm 的测点占 23.2%, 10~20 mm 的测点占 22.00%, 20~30 mm 的测点占 5.8%, 大于 30 mm 的测点占 2.9%。

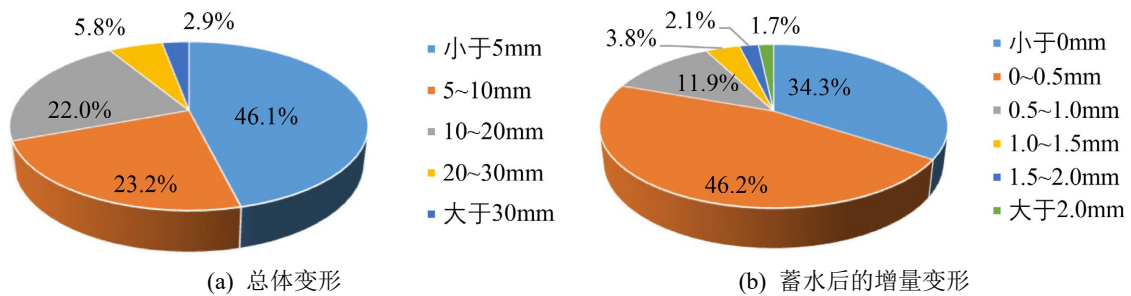


Figure 1. Distribution of surrounding rock deformation
图 1. 围岩变形分布

分析蓄水以后的多点位移计围岩增量变形(即 2020 年 1 月 14 日以后的增量变形,见图 1(b)),可知运行期围岩变形变化幅度在 -3.82 mm~4.82 mm 之间。其中,变形较小或增幅在 1.00 mm 以内的占 92.4%,增幅在 1.00 mm~2.00 mm 之间的占 5.9%,增幅在 2.00 mm 以上的占 1.7%。

根据图2,可知多点位移计的变形增长时期主要集中在2019年之前,2020年以后已基本收敛。从以上分析可知,主厂房围岩变形主要发生在施工期,施工完后经过短时间增长,目前已基本收敛。拱坝上游蓄水对地下电站影响较小。

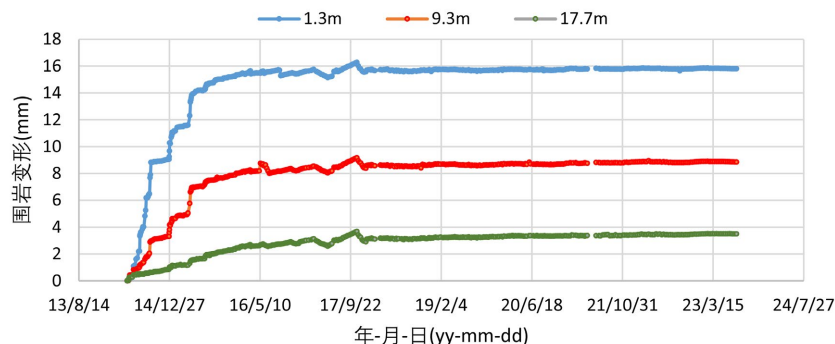


Figure 2. Time history curve of surrounding rock deformation

图2. 围岩变形时程曲线

2) 锚杆应力分析

主厂房系统锚杆锚固力一般小于100 MPa,最大锚固力为312.8 MPa;相比于蓄水前,锚杆应力增量锚杆应力变幅分布在-23.55 MPa~18.63 MPa之间。蓄水后,锚杆应力变化幅度较小,表明拱坝上游蓄水对右岸地下厂房影响较小。

3) 锚索受力分析

主厂房锚索锚固力一般小于2500 kN;相比于蓄水后,当前锚固力减少的占27.8%,增加0~50 kN的占50.6%,增加50~100 kN的占13.9%,增加大于100 kN的占7.6%。锚索受力除受温度变形有一定波动、极个别仍在增长以外,2021年以后大部分锚固受力基本已趋于收敛。

3.2. 运行期围岩-支护结构异常数据分析

根据前述梳理,可知绝大部分支护措施的监测受力均处于稳定状态,但个别部位的测值仍在缓慢增长。图3为一锚索测力计的受力监测时程曲线。可见,进入运行期后,其仍处于缓慢增长阶段。针对该问题,进一步结合地质条件,分析了该测力计周边的工程地质条件,发现该锚索正好位于施工期揭示的主厂房边墙块体上,见图4。可见,导致该锚索测力计缓慢增长的主要原因是结构面切割形成的块体,需要对该块体的稳定性进行复核分析。

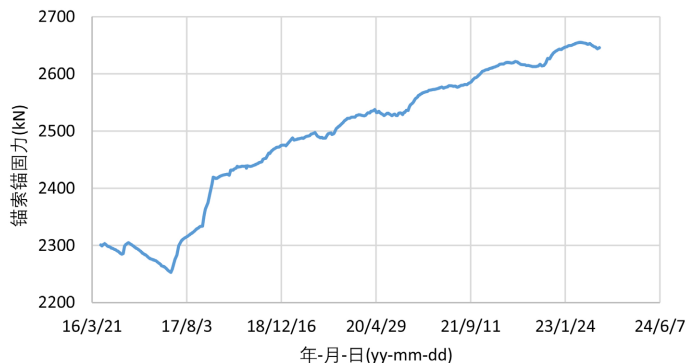


Figure 3. Time history curve of anchor cable dynamometer monitoring

图3. 锚索测力计监测时程曲线

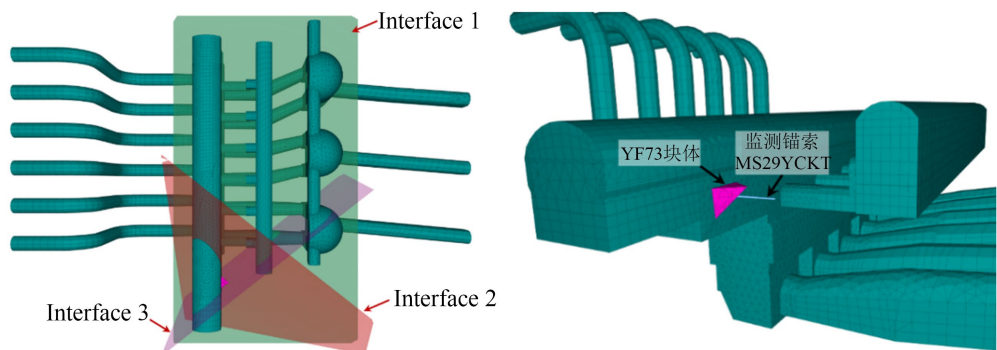


Figure 4. Block positions in numerical model
图 4. 数值模型中的块体位置

3.3. 围岩安全复核分析

为复核该块体的稳定性，通过如下思路进行：首先，对块体与围岩间结构面的参数进行校核，然后对通过校核的结构面参数进行弱化分析，计算不同降强条件下块体的安全系数，从而对该块体目前的安全状态进行评估。

依据上述思路，首先采用施工期围岩稳定动态反馈分析模型及相关反演参数对右岸地下电站进行了开挖过程的数值模拟，监测锚索的施加时机是块体所在开挖分层的所有支护措施施加完成之后。针对锚索的数值模拟结果显示，在右岸主厂房开挖完成时的锚固力为 2306.2 kN，与同一时间的锚索锚固力的实际监测值 2301.6 kN 基本符合。

在对 YF73 块体与围岩间结构面参数(粘聚力与摩擦系数)的弱化(即降低结构面的抗剪强度)分析中，共考虑了 0、10%、20%、……、100%，共 11 个降强系数。通过降强系数对 YF73 块体与围岩间结构面的参数进行折减，可以控制结构面阻碍块体滑动的能力大小。不同降强系数下，锚索的锚固力大小可见图 5。

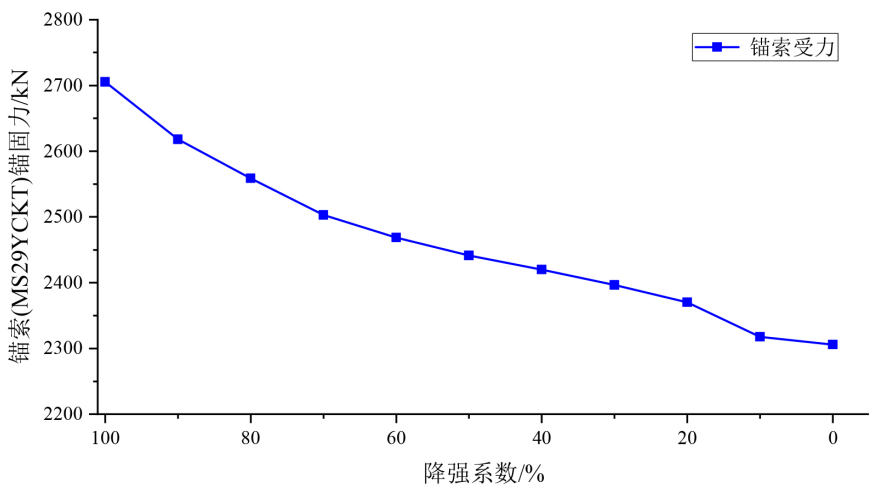


Figure 5. Changes in monitoring anchor anchorage force under different reduction coefficients
图 5. 不同降强系数下监测锚索锚固力的变化

在上述锚索受力的变化过程中，经复核，块体的安全系数一直稳定在 2.25 左右，没有出现变化，且大于块体最小安全系数要求。因此，该部位的围岩稳定性仍可以得到保证。

综合分析,认为是块体结构面的力学参数在运行期发生了一定的弱化,导致穿过该块体的锚索受力发生增长。但是,从块体安全系数一直保持稳定的分析结果判断,因结构面力学参数弱化而损失的阻滑力,应是转移到了锚索结构上,由此发生了锚索受力增大的情形。

4. 结论

1) 研究案例分析表明,地下厂房围岩变形主要发生于施工期,运行期变形已基本收敛,蓄水未引发显著增量变形,表明支护措施有效控制了围岩松弛与时效变形。

2) 锚杆应力与锚索受力总体稳定,局部异常数据源于岩石块体结构面切割,但经复核其安全系数高于规范要求,支护体系整体可靠性较高。基于数值模拟与块体矢量分析法的复核验证了结构面参数降强对安全系数的影响,为类似工程中复杂地质条件下块体稳定性评价提供了可行路径。

基金项目

国家自然科学基金项目(NO. U2340228);此成果由长江电力股份有限公司资助(合同编号:Z152302046)。

参考文献

- [1] 姚强,杨兴国,刘勇林,等.大型地下厂房洞室群施工期围岩变形分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1164-1169.
- [2] 董志宏,钮新强,丁秀丽,等.乌东德左岸地下厂房洞室群施工期围岩变形特征及反馈分析[J].岩土力学,2018,39(S2):326-336.
- [3] 李志鹏,徐光黎,董家兴,等.猴子岩水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形与破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11):2291-2300.
- [4] 周述达,丁秀丽,裴启涛,等.陡倾角层状岩层大型地下厂房施工期围岩变形开裂机理研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(6):90-98.
- [5] 龙小刚,薛方方,秦鸿哲,赵毅.多种监测方式下的地下厂房围岩变形分析[J].应用物理,2022,12(12):635-643.