

柔性测斜仪在大型地下硐室围岩水平变形监测 分析中的可靠性研究*

石广斌¹, 李明乐¹, 孙春华², 马腾¹, 王伟峰¹

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要:随着地下硐室工程修建跨度及深度的增加,由于开挖卸荷引起的围岩变形破坏越来越严重。建设过程中围岩变形的实时监测对确保整个项目的安全运行起着至关重要的作用。不同于传统点式位移计只能对测点高程位置处进行监测,柔性测斜仪凭借其传感器灵敏度较高且各柔性节可以自由组合等优点,可以对整个布置范围内的围岩变形有更为准确且直观的监测。通过对柔性测斜仪在某大型地下硐室工程围岩收敛变形监测应用中的可靠性展开研究,并与传统点式位移计以及三维数值计算对比分析,结果表明:柔性测斜仪在硐室围岩水平收敛变形监测中具有较高的准确性,有效揭示了围岩变形趋势以及变化规律,可拓宽新型监测仪器在大型硐室工程巷道变形监测中的应用场景。

关键词:柔性测斜仪;岩体工程;变形监测;误差分析

0 引言

金属矿山巷道以及大型岩质硐室工程施工期间,其赋存环境地质构造复杂、节理裂隙发育、施工方法以及支护措施选型等因素,给巷道稳定性研究以及围岩变形预测工作带来了诸多挑战,严重影响着矿山等岩体工程的生产安全性^[1-3]。近些年来,我国非煤矿山以及隧道工程建设安全事故总体趋于好转,但事故总量仍较大,且绝大多数事故与人员伤亡是由施工过程中监测系统不完善,安全预警制度不健全造成的,为此,国家有关部门自2011年起致力于加强全国金属地下矿山以及隧道工程监测监控系统的建设工作。

工程开挖期间围岩的稳定性直接关系到施工期的安全和施工进展,从施工与运行安全的角度出发,监测分析在工程中发挥的作用日益显著^[4-5]。以往的工程实践表明,有效的监测信息可以实时获取结构与周围环境的动态变化,及时反馈于设计及施工中,为围岩变形预测提供依据,以保证施工安全,有效归纳总结监测数据对提高工程设计以及施工水平有重要的作用^[6-8]。卢洋龙等^[9]在研究锚网支护高

应力矿山巷道应用效果时,通过设置位移收敛监测仪器对巷道表面的围岩变形数据进行实时监测并拟合分析,及时掌握了开挖断面的围岩变形动态,对巷道的稳定性做出正确的评判与预测,有力保证了项目的安全生产。高谦等^[10]在梅山铁矿巷道稳定性研究过程中,通过对运输巷道长期变形监测中不同时期围岩变形速率差异的分析,归纳总结巷道开挖不同区域地质条件以及岩体质量情况,为后续巷道开挖支护工作提供可行性参考,并取得了良好的效果。

目前,在我国矿山地下巷道以及隧道等岩质工程围岩变形监测中,通常采用点式位移计、收敛计、全站仪等仪器观测开挖过程的围岩变形情况^[11-12]。随着科技的快速发展,现代变形监测正逐步实现多视角、多层次、自动化立体监测,越来越多具备高精度、低误差、安装便捷等特点的监测仪器逐步应用于岩质巷道工程围岩收敛变形监测分析中^[13-15]。

鉴于地下工程监测的必要性和迫切性,本文以陕西镇安抽水蓄能电站地下厂房硐室开挖期间围岩变形监测为例,通过选取监测断面某高程位置处多点位移计与柔性测斜仪在相同开挖阶段内的监测数

* 收稿日期: 2023-04-04

作者简介: 石广斌(1968—),男,陕西西安人,博士,教授级高级工程师,主要从事矿山边坡治理、岩质硐室工程支护工作, E-mail: sgb0316@163.com。

据进行对比分析,并结合现场观测现象与三维数值分析计算,结果验证了柔性测斜仪在本项目应用的可靠性,以期对相关洞室巷道工程建设围岩变形监测仪器选型提供可行性参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

镇安抽水蓄能电站枢纽主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房及开关站等组成,地下厂房系统位于月河右岸山体中,上覆岩体厚度为 300~480 m,采用尾部式布置。洞室群中地下厂房、主变洞、尾闸洞三大洞室平行布置,间距分别为 40 m、30 m,其中地下厂房开挖轮廓尺寸(长×宽×高)为 162.5 m×26.1 m×54.5 m,主变洞为 121 m×19.5 m×21.8 m。引水、尾水洞与厂房纵轴线 70°斜交,进厂交通洞、通风兼安全洞沿厂房纵轴自厂房两端进厂;厂房与主变洞之间每台机组布置一条母线洞,主变洞两端设交通洞分别接入进厂交通洞、通风兼安全洞,具体的布置形式如图 1 所示。

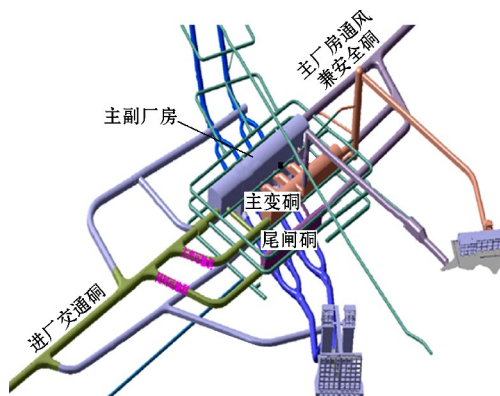


图 1 地下洞室群布置

1.2 工程地质条件及开挖方案

地下洞室群区域地表为北东向延伸的单薄山梁,地面高程为 1305~1204 m,厂房基岩为中生代印支期侵入岩,岩性为微风化至新鲜、坚硬的花岗闪长岩,岩性相对较单一。厂区无大的构造发育,地应力中等,围岩以Ⅱ至Ⅲ类为主。

本项目地下洞室群开挖主要包括地下厂房、主变室、尾闸室、母线洞以及各引水隧洞。采用分层开挖法进行施工。其中主厂房分七步开挖,施工顺序如图 2 所示,自 2019 年 6 月 6 日顶拱开始施工,至 2021 年 9 月 25 日完成洞室的开挖,主厂房开挖时间段见表 1。

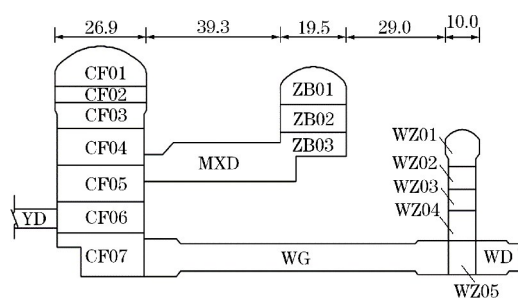


图 2 地下洞室群施工顺序(单位:m)

表 1 主厂房分层开挖时间段

施工部位	开始时间	完成时间
1 层	2019 年 6 月 6 日	2019 年 12 月 14 日
2 层	2020 年 3 月 24 日	2020 年 5 月 7 日
3 层	2020 年 6 月 3 日	2020 年 9 月 29 日
岩锚梁浇筑	2020 年 11 月 13 日	2020 年 12 月 25 日
4 层	2020 年 12 月 26 日	2021 年 4 月 20 日
5 层	2021 年 4 月 21 日	2021 年 5 月 31 日
6 层	2021 年 6 月 1 日	2021 年 7 月 18 日
7 层	2021 年 7 月 19 日	2021 年 9 月 25 日

2 监测仪器布置及数据统计分析

2.1 柔性测斜仪基本原理

柔性测斜仪也叫阵列式位移计,是基于 MEMS (微电子机械系统)传感器原理制成的三维变形监测仪器,内部由 MEMS 加速度计、温度模块以及动态模块组成,原理如图 3 所示。

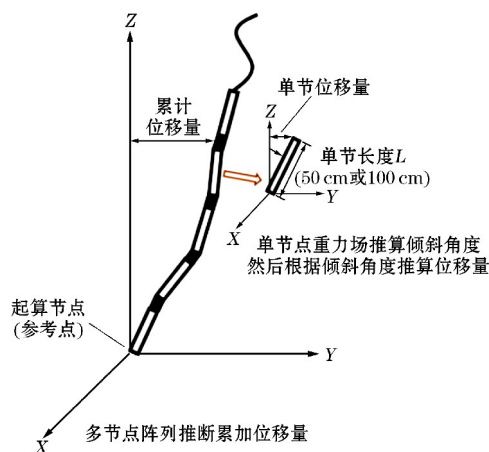


图 3 柔性测斜仪原理

本项目采用的阵列式位移计由多段微电子机械系统加速度计通过柔性连接装置串联而成,通常被安装在钻孔或套管中,随着建筑物变形带动仪器倾

角变化,进而计算对应每节测量管段的位移量,再将每节计算得到的位移累加起来反映出整条位移计的位移,连续监测建筑物的三维变形。

得益于其传感器密度高、量程大、精度高、可重复使用等优点,柔性测斜仪广泛应用于边坡滑移监测、基础沉降、水利大坝沉降及侧移、桥梁挠度监测等变形监测^[16]。

2.2 监测断面布置

地下厂房硐室群开挖跨度大、边墙高、地质条件复杂,为确保施工过程的安全,及时掌握不同开挖阶段围岩的变形规律以及支护系统的受力状态。通常

在开挖断面布置多点位移计、锚杆应力计、锚杆测力计以及锚索测力计等仪器用于全面监测围岩变形情况。

本文主要通过主厂房监测断面布置的多点位移计以及柔性测斜仪实时监测数据反映硐室围岩真实收敛变形情况。其中主厂房布置的 A1 至 A4 监测断面分别位于厂左 0+105.00 至厂右 0+34.50 位置处,如图 4 所示;A2 断面共计布置 8 套四点式位移计,分布在顶拱以及上下游边墙,如图 5 所示。本文主要对布置在 859.6 m 高程位置处的 M4-CF2-5 位移计监测数据展开统计分析。

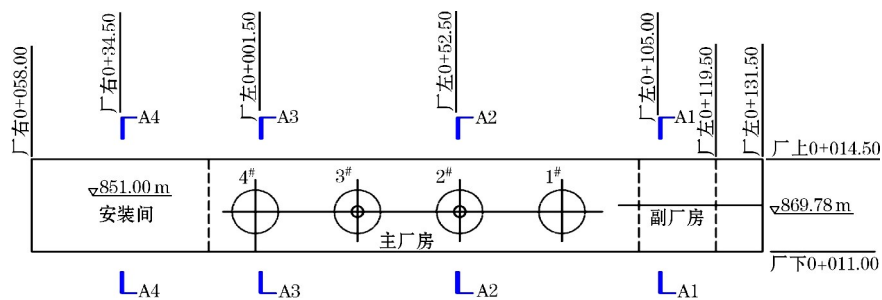


图 4 厂房主要监测断面布置

为拓宽大型岩质硐室工程建设过程中围岩变形监测仪器选型范围,本项目首次将柔性变形监测系统引入地下硐室群围岩水平收敛变形监测中,探索该仪器在大型地下硐室工程围岩收敛变形监测领域的应用效果。选择厂左 0+053.00 断面(2[#]机组中心线)上下游边墙各布置一条柔性测斜仪,自顶拱拱角至 845.50 m 高程,长度为 28 m,柔性测斜仪布置效果如图 5 所示。

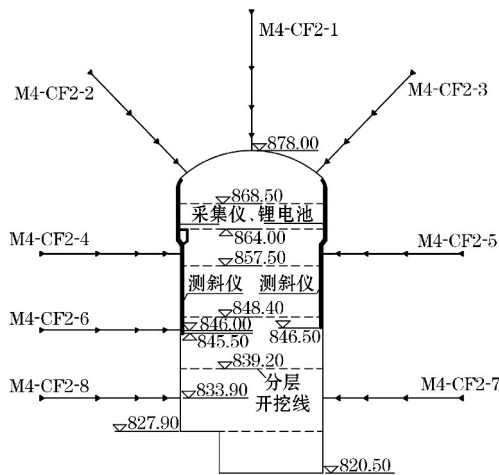


图 5 柔性测斜仪及多点位移计布置(单位:m)

2.3 柔性测斜仪监测成果分析

由图 5 可以看出,柔性测斜仪布置在主厂房上

下游边墙,监测范围覆盖主厂房开挖第 1 层至第 5 层,其整个安装过程分 3 步进行。考虑该区间范围内上边墙布置的多点位移计 M4-CF2-4 数据上存在较多缺陷,于是选择布置在下边墙 859.4 m 高程位置处的柔性测斜仪 RCX1028 测点取得的监测数据与布置在相近位置处的多点位移计 M4-CF2-5 (859.6 m) 监测数据进行对比分析。

下边墙布置的柔性测斜仪 RCX1028 测点自安装至开挖结束期间监测结果见图 6。

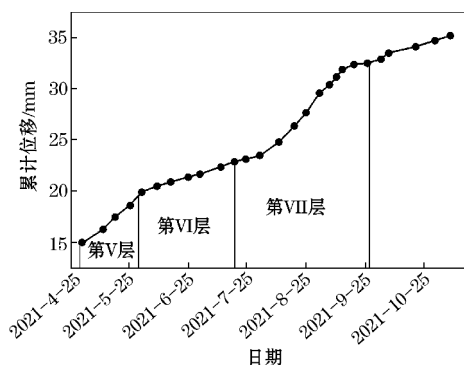


图 6 柔性测斜仪 859.4 m 高程测点累计位移变形

由图 6 可以看出,RCX1028 测点自 2021 年 5 月 1 日取得监测值 15 mm 以来,在主厂房第五层开挖期间变形速率较大,平均为 0.125 mm/d,考虑该时期内 A2 断面附近 2[#]母线硐开挖,下游墙岔硐口

处产生较大卸荷变形,对相邻区域围岩有较大扰动,因此柔性测斜仪监测速率有较大跃升;截至2021年9月25日第七层开挖结束,该测点累计变形已达32.5 mm,且仍保持缓慢增长趋势,该层开挖期间围岩变形速率出现较大幅度增长,最大变形速率达到0.2 mm/d;结合同时期现场观测,该测点附近母线硐底板出现较大宽度的裂纹,由极限平衡理论可知,主厂房硐室开挖结束,巷道边墙临空面较大,该测点区域附近有岔硐相交,属于最大应力集中区范围,由此可以得出布置在该区域范围内的柔性测斜仪对围岩位移变形趋势有较为准确的揭示,且数据保持较高的稳定性。

2.4 多点位移计监测数据统计分析

主厂房A2监测断面自顶拱至硐室底部共计布置8套多点位移计用以监测各区域围岩变形,由图4可清晰看出,上边墙布置的M4-CF2-4、M4-CF2-6与下边墙M4-CF2-5三套多点位移计监测区域与柔性测斜仪监测范围有重合。考虑多点位移计监测数据的有效性以及完整性,本文选取下边墙859.6 m高程位置处布置的M4-CF2-5位移计自2020年9月23日安装至2021年9月25日开挖结束期间所监测数据与柔性测斜仪设置在859.4 m高程位置处的RCX1028测点监测数据进行对比。

下边墙布置的多点位移计M4-CF2-5自安装至开挖结束期间监测成果见图7。

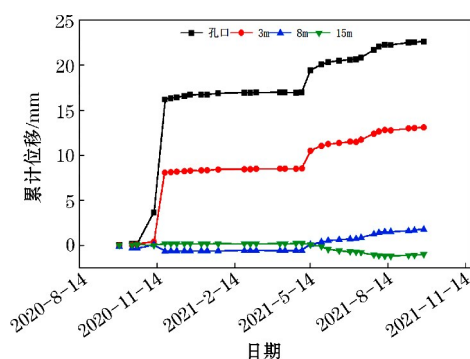


图7 多点位移计859.6 m高程测点累计位移变形

从多点位移计M4-CF2-5监测的位移曲线可以看出:2020年9月30日该监测仪器取得监测数据以来至11月23日期间快速增长,其中孔口位置处变形达到16.2 mm,3 m深处测点变形也增至8.1 mm;2021年4月21日至5月31日期间主厂房第五层开挖,多点位移计监测变形有一定幅度增长,考虑该时期内相邻岔硐开挖,对测点区域围岩扰动较大,且随着硐室断面开挖高度的增加,开挖卸荷

对两侧边墙的扰动逐渐增大,加剧了这一时期内的围岩变形速率。截至主厂房开挖结束,该多点位移计孔口处最大监测变形为22.6 mm,3 m深处变形为13.1 mm。

3 三维数值模拟分析

3.1 硐室模型及力学参数

本文采用有限元分析软件ANSYS、MIDAS建立地下厂房硐室群三维模型并进行数值计算分析,计算采用以Mohr-Coulomb强度准则为屈服函数的理想弹塑性模型。硐室三维模型如图8所示,计算参数见表2。

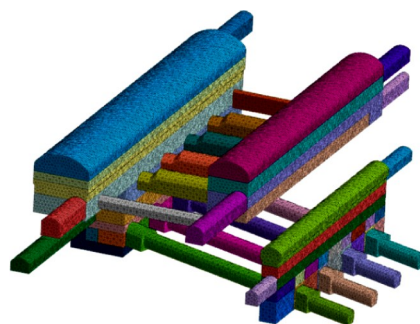


图8 地下硐室群三维数值分析模型

表2 岩体物理力学参数

变形模量 E_0/GPa	泊松比 μ	岩体抗剪断强度		备注
		抗剪断摩擦因数	黏聚力/MPa	
12.98	0.27	1.085	1.098	II、III类围岩 低值的加权 平均值

3.2 硐室开挖围岩变形分析

结合本项目现场开挖支护设计方案,进行三维有限元数值计算分析,考虑到文中所选取柔性测斜仪RCX1028测点与多点位移计M4-CF2-5监测数据主要源自主厂房下边墙859 m高程位置附近。于是选定该地下硐室三维模型中第四层至第七层开挖结束期间A2断面(厂左0+52.5)数值计算结果作为对比,具体的计算结果如图9所示。

由三维有限元数值计算结果可以看出,随着硐室开挖,巷道围岩总体朝向开挖临空面变形,上下边墙部位变形较大,以水平变形为主。第四层开挖结束,下边墙最大变形为16.17 mm,出现在860.5 m高程附近的岩锚梁位置处;至2021年7月18日第六层开挖结束,下边墙受到开挖扰动影响的范围逐渐增大,柔性测斜仪RCX1028测点位置(859.4

m)处的计算变形为 28.6 mm,考虑该时期内 2[#]母线硐的开挖对邻近硐室围岩变形影响较大,且与现场同期观测现象有较高的吻合,因此计算变形增长速率过快符合实际变化规律;随着硐室开挖高程的降低,下部开挖对上部围岩端墙变形影响逐渐减弱,截至第七层开挖结束,该测点位置处围岩最大水平收敛变形为 33.8 mm,与图 6 柔性测斜仪 RCX1028 测点同期内监测数据保持较高的一致性。

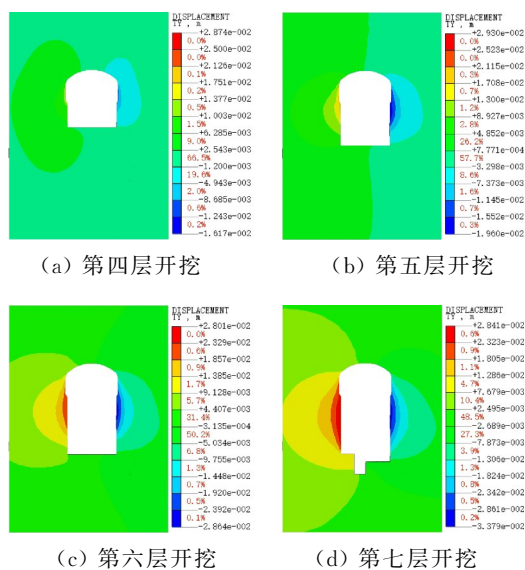


图 9 地下硐室开挖围岩水平变形

4 结论

(1) 使用柔性测斜仪在该项目地下硐室围岩水平变形监测中已正常工作近 6 个月,仪器埋设情况良好,各测点监测数据正常且符合一般变化规律,选定测点在各开挖阶段内所测数据及变化速率与传统监测仪器统计数据基本相同,且与该硐室三维数值模拟计算结果保持高度一致。结合该仪器现场安装布置稳定及数据采集便捷等优点,因此,使用柔性测斜仪在大型硐室工程围岩变形监测分析应用中具有较高的适用性,可拓宽该仪器在大型硐室以及巷道变形监测中的应用。

(2) 本文研究所选取的 M4-CF2-5 多点位移计自安装至开挖结束期间内所监测围岩最大变形为 22.6 mm,对测点区域围岩变形破坏情况有较为准确的展示,但考虑该断面顶拱以及端墙布置的多个仪器在硐室开挖过程中受施工影响造成仪器受损、数据传输中断等现象,给围岩变形监测工作带来诸

多不便,因此,使用该仪器在大型硐室工程围岩变形监测应用中存在一定的弊端。

(3) 通过三维数值模拟分析可以得出,主厂房 A2 断面围岩变形最大值为 33.8 mm,各开挖阶段边墙围岩变形效果以及最大值点与柔性测斜仪监测结果保持高度一致,且与现场观测较为符合,从侧面印证了柔性测斜仪在本项目围岩变形监测应用中的可靠性以及准确性。为该仪器在大型地下硐室工程变形监测分析中的应用提供了可靠经验。

参考文献:

- [1] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
- [2] 王田龙,陈从新,夏开宗,等.基于监测数据的陡倾结构金属矿山下盘岩层移动机制研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1409-1426.
- [3] 过江,古德生,罗周全.地下矿山安全监测与信息化技术[J].安全与环境学报,2006(增刊1):170-172.
- [4] 邢万波,汤雪峰.大型地下厂房洞室群监测反馈分析与安全评价技术现状及发展趋势[J].水电站设计,2014,30(2):1-6.
- [5] 钱七虎,戎晓力.中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J].岩石力学与工程学报,2008(4):649-655.
- [6] 王者超,李术才,陈卫忠.分岔隧道变形监测与施工对策研究[J].岩土力学,2007(4):785-789.
- [7] 李取生,薄福利,丁希阳,等.深部软岩巷道变形特性及其控制支护技术研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(4):8-14.
- [8] 李宏男,高东伟,伊廷华.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].力学进展,2008(2):151-166.
- [9] 卢洋龙,刘佳朋,马丁.高应力矿山锚网支护巷道围岩变形监测与分析[J].施工技术,2014,43(1):109-113.
- [10] 高谦,王保学,杨同,等.矿山运输巷道围岩变形监测分析及在施工中的应用[J].中国矿业,1997(3):56-59.
- [11] 张国盛,林安栋.矿井监测监控系统的发展历史及趋势[J].煤炭技术,2009,28(2):8-9.
- [12] 卢振龙,卢国斌.矿井监测监控概述[J].煤炭技术,2008(11):85-86.
- [13] 陈菲,邓建辉,魏进兵,等.杆式多点位移计监测资料可靠性分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):897-902.
- [14] 付建党,张源源,史英男.利用新型两用多点位移计测算围岩深部位移的方法研究[J].煤炭工程,2014,46(5):81-83.
- [15] 李国儒,康建峰.边坡变形柔性测斜仪自动化监测系统在水利工程中的应用[J].水利水电快报,2023,44(3):107-110.
- [16] 李果,王毅,吴铸,等.基于柔性测斜装置的滑坡大变形误差识别与修正[J].人民长江,2016,47(4):74-78.