

# 多种监测方式下的地下厂房围岩变形分析

龙小刚, 薛方方, 秦鸿哲, 赵毅

陕西镇安抽水蓄能有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2022年11月21日; 录用日期: 2022年12月21日; 发布日期: 2022年12月29日

---

## 摘要

本文以镇安抽水蓄能电站地下厂房为研究对象, 结合多点位移计、柔性测斜仪等多种设施监测成果, 对开挖过程中的变形规律进行分析。结果显示, 地下厂房围岩在开挖过程中的变形分布符合高边墙的一般规律, 变形过程与现场施工节点基本吻合; 另一方面, 将柔性测斜仪应用于地下厂房变形监测中, 不仅可以提高变形监测数据的实时性, 而且具有观测精度高、观测范围广等特点, 可为工程的安全运行提供重要的依据。

## 关键词

地下厂房, 变形, 安全监测, 柔性测斜仪

---

# Deformation Analysis of Surrounding Rock of Underground Powerhouse under Various Monitoring Methods

Xiaogang Long, Fangfang Xue, Hongzhe Qing, Yi Zhao

Shaanxi Zhen'an Pumped Storage Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

This paper takes the underground powerhouse of Zhen'an pumped storage power station as the research object. Combined with multi-point displacement meter, array displacement meter and other facilities monitoring results. The deformation law of surrounding rock during excavation is analyzed. The results show that the deformation distribution of the surrounding rock of the underground powerhouse in the excavation process accords with the general law of high side wall, and the deformation process is basically consistent with the site construction node. On the other

hand, the application of array displacement meter in deformation monitoring of underground workshop can not only improve the real-time performance of deformation monitoring data, but also has the characteristics of high observation accuracy and wide observation range, which can provide an important basis for the safe operation of engineering.

## Keywords

Underground Powerhouse, Variant, Safety Monitoring, Array Displacement Meter

Copyright © 2022 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. 引言

地下厂房围岩收敛观测,是应用变形监测设施量测围岩表面两点的相对位移,即收敛值。传统收敛变形监测仪器存在效率低、精度差、测量环境恶劣等缺点。随着科技飞速发展,地下厂房围岩变形监测技术也随之更新换代:邓人文等[1]采用三维激光扫描技术对白鹤滩左岸地下厂房进行了全域扫描建模,识别、监控潜在的失稳块体;李彪等[2]引入高精度微震监测系统,分析地下厂房的微震时空演化特征,很好地反映了地下厂房施工动态对围岩的扰动情况;张科峰等[3]采用滑动测微计对深圳抽水蓄能电站地下厂房顶拱的变形进行监测,其所测的顶拱变形合理可靠,符合顶拱围岩变形的一般规律。

长期以来,岩土体的变形监测,因地质结构的复杂性以及监测技术的局限性,难以做到实时、高精度的监测。在此情况下,基于 MEMS 加速度计的阵列式位移计(SAA)应运而生,其具有高精度、高灵敏性、准分布、安装简单等优点,被广泛的应用于边坡岩土体的深层水平位移监测中,而鲜有研究人员将其应用于大跨度地下厂房的围岩变形监测中。本文以镇安抽水蓄能电站地下厂房为研究对象,选取典型监测断面安装分段式柔性测斜仪,并结合多点位移计等设施的监测结果对地下厂房围岩在开挖施工中的变形规律进行综合分析。

## 2. 工程概况

陕西镇安抽水蓄能电站位于陕西省商洛市镇安县月河镇菩萨殿村。地处西北电网负荷中心附近区域,是我国西北地区第一座抽水蓄能电站。电站总装机容量为 140 万千瓦,枢纽主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房及开关站等建筑物组成。正常蓄水位 1392.0 m,死水位 1367.0 m。地下厂房系统位于月河右岸,上覆岩体厚度 300 m~480 m,采用尾部式布置,洞室群中地下厂房、主变洞、尾闸洞三大主洞平行布置,轴线方向为 NW300.66°,间距分别为 40 m、30 m;主厂房开挖轮廓尺寸为 162.5 m × 26.1 m × 54.5 m(长 × 宽 × 高)。本文选取的典型断面为厂左 0+053(A2-A2),上游、下游边墙揭露的岩体均为花岗闪长岩,灰白色,岩体完整性一般,裂隙较发育,主要发育倾向洞内偏厂右的中陡倾角裂隙,开挖中顺该组结构面发生少量掉块,围岩类别为 III 类。

## 3. 柔性测斜仪的工作原理及特点

柔性测斜仪使用一组密实的微电子机械系统加速度计阵列和经过验证的计算程序来测量 2D、3D 变形。每个测量单元均安装有 3 个加速度传感器,当测斜仪的角度出现变化时,通过传感器的加速度值即可计算出测量单元对应轴与重力方向的夹角  $\theta$ ,再结合测量单元的长度 L,即可计算出该测量单元的位移

量。再对各段的单点位移量进行算数求和，即可得到相对于固定端点的位移量，即累计位移量。与多点位移计、收敛测点等传统观测方式相比，具有观测精度高、观测范围广(全断面连续观测)、时效性强(自动采集、上传数据)等特点(图 1)。

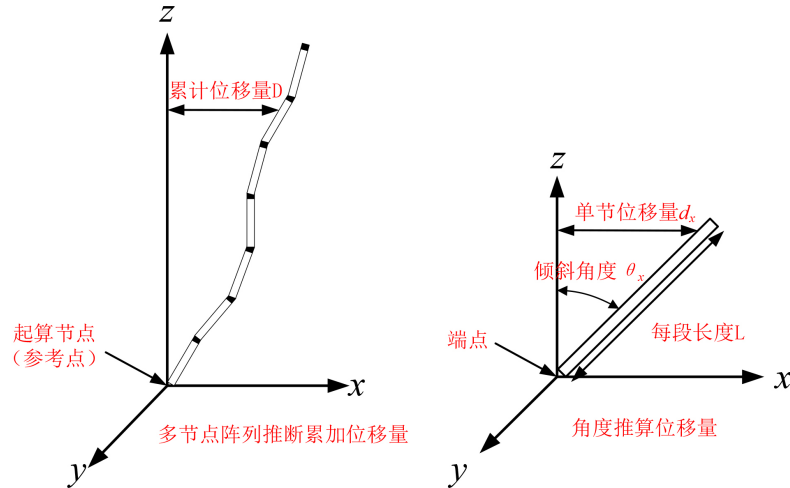


Figure 1. Schematic diagram of working principle of flexible inclinometer  
图 1. 柔性测斜仪工作原理示意图

#### 4. 监测设施布置

##### 4.1. 柔性测斜仪

采用 2 种方式紧随开挖进度固定柔性测斜仪：① 采用“U 型卡箍”及膨胀螺栓固定在围岩表面或喷锚混凝土表面；② 在喷锚混凝土上开挖沟槽，安装仪器、挂尼龙网后回填砂浆。上游侧柔性测斜仪 RCX1、下游侧柔性测斜仪 RCX2 的安装长度分别为 28 m (上游侧拱角~845.5 m)、27 m (上游侧拱角~846.5 m)，安装示意图见图 2。

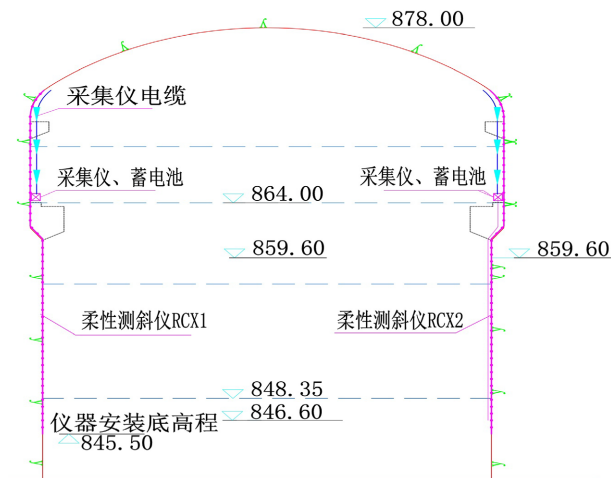


Figure 2. Installation diagram of A2-A2 profile flexible inclinometer in workshop  
图 2. 厂房 A2-A2 剖面柔性测斜仪安装示意图

### 4.2. 其他传统仪器

厂房 A2-A2 剖面除布设柔性测斜仪外, 还布设了若干传统监测设施, 包括四点位移计 8 套(顶拱 3 套、上游侧 3 套、下游侧 2 套)、锚索测力计 5 套(顶拱 1 套、上游侧 2 套、下游侧 2 套)、锚杆测力计 3 支(均位于顶拱)、锚杆应力计 5 套(上游侧 3 套、下游侧 2 套)。监测布置如下所示(图 3)。

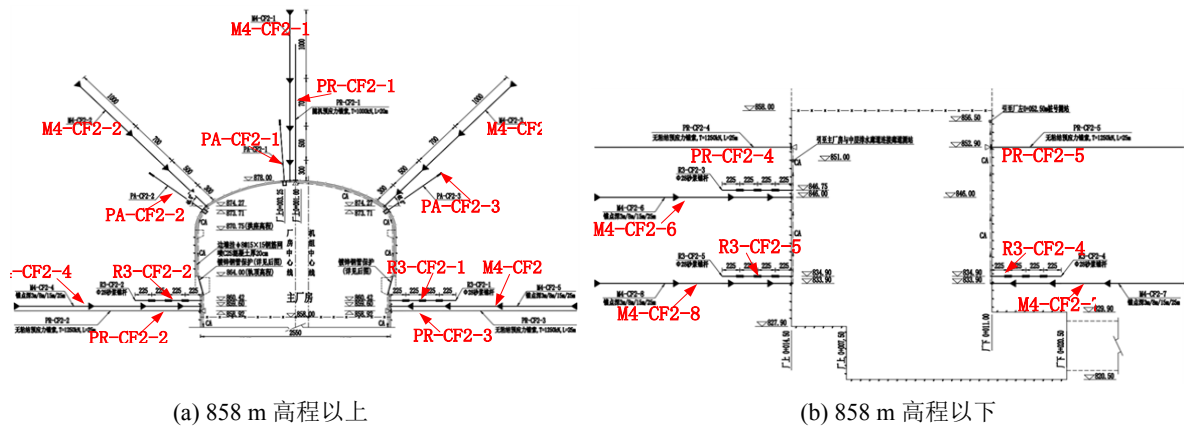


Figure 3. Plant A2-A2 profile monitoring facilities layout diagram  
图 3. 厂房 A2-A2 剖面监测设施布置示意图

## 5. 监测成果分析对比

### 5.1. 柔性测斜仪

柔性测斜仪安装后, 选择不受周边施工影响的时段, 监测数据能够连续稳定时的测值作为基准值。以最顶部的测点作为起算点, 进而计算出各高程测点的累计位移量。

以下游边墙为典型部位, 对主厂房下游边墙围岩在施工过程中的变形规律进行分析。

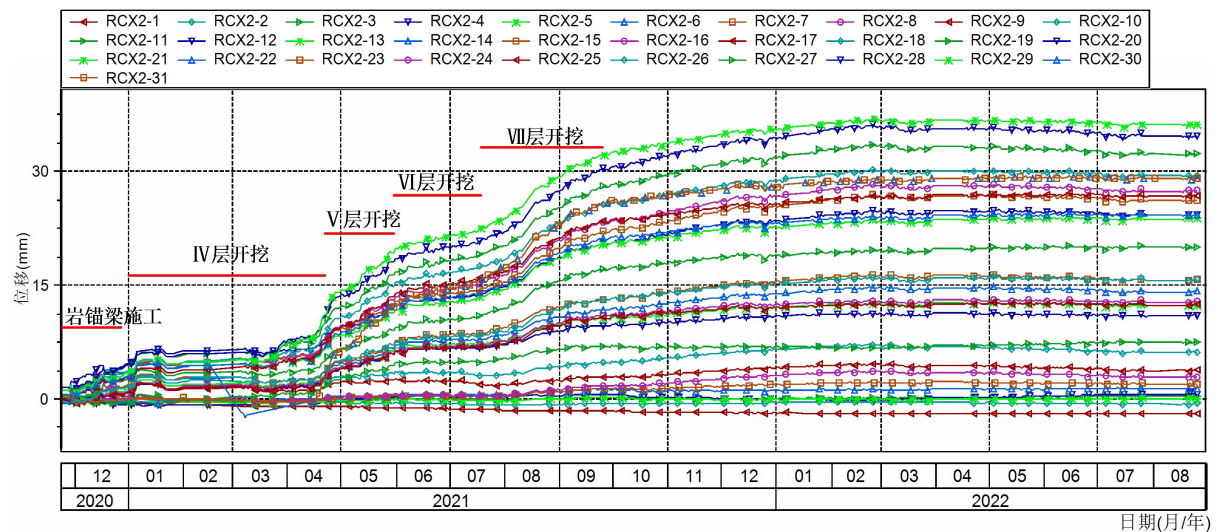


Figure 4. The cumulative displacement process line of flexible inclinometer above 858 m elevation on the downstream side of A2-A2 section of the workshop

图 4. 厂房 A2-A2 断面下游侧 858 m 高程以上柔性测斜仪累计位移过程线

1) 如图 4 所示, A2-A2 剖面 858 m 高程以上测点在 2020 年 11 月~2021 年 1 月上旬(岩锚梁施工及 IV 层开挖初期时段)期间变形明显增大, 变形规律体现为顶拱处的变形最小, 高程越低, 变形越大。测点 RCX2-20 (863.0 m) 在此期间的累计位移量最大, 仅为 6.40 mm, 主要为施工扰动引起的变形。

2) 2021 年 1 月中旬~3 月下旬期间(第 IV 层开挖), 由于预裂爆破在仪器安装前即已完成, 开挖爆破等因素对变形的影响较小, 测点 RCX2-20 (863.0 m) 的累计位移量仅变化了 -0.03 mm (图 5)。

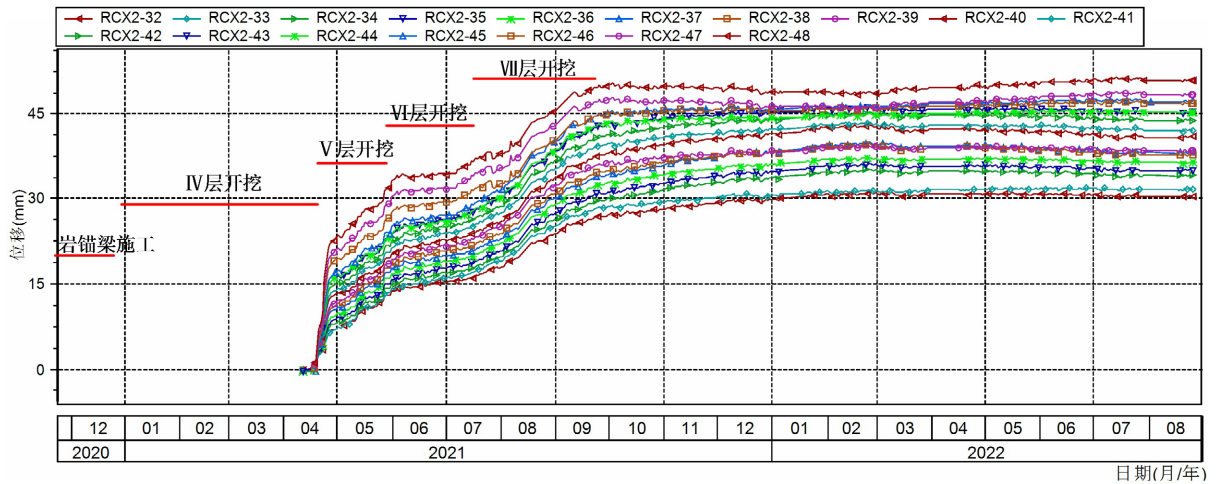


Figure 5. The cumulative displacement process line of the flexible inclinometer at the downstream side of A2-A2 section of the plant is 849 m~858 m

图 5. 厂房 A2-A2 断面下游侧 849 m~858 m 柔性测斜仪累计位移过程线

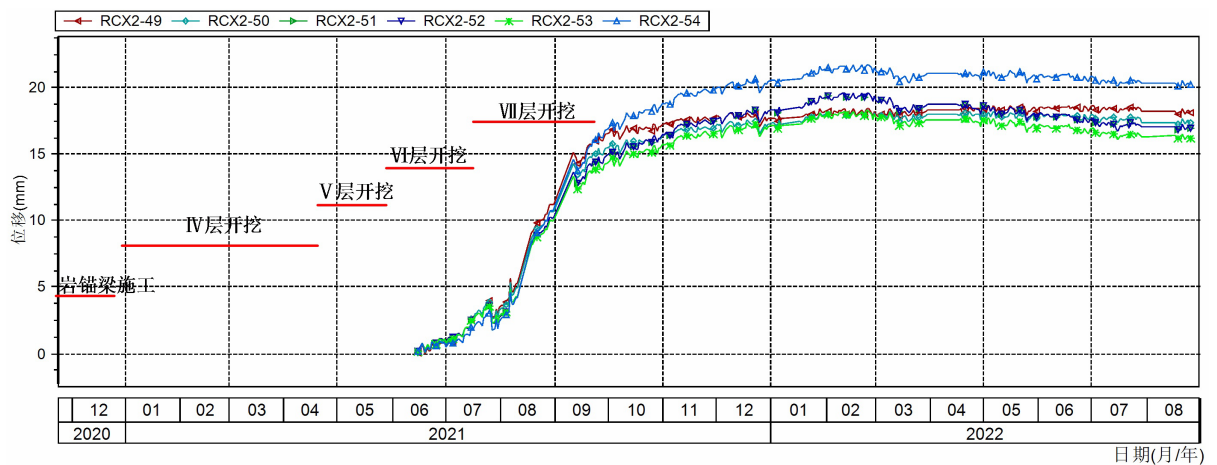
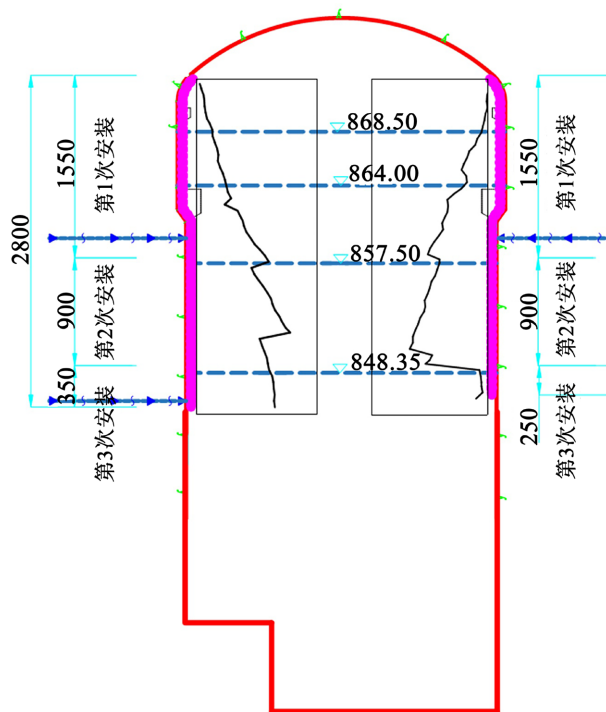


Figure 6. The cumulative displacement process line of the flexible inclinometer 845.5 m~849 m at the downstream side of A2-A2 section of the workshop

图 6. 厂房 A2-A2 断面下游侧 845.5 m~849 m 柔性测斜仪累计位移过程线

3) 2021 年 4 月初~2021 年 9 月下旬期间(第 V~VII 层开挖), 高边墙的高度增大, 受空间效应及开挖卸荷的影响, 柔性测斜仪的累计位移量增大明显。

4) 2021 年 9 月下旬以来, 随着厂房的开挖结束, 下游侧柔性测斜仪变形呈现出逐渐收敛的趋势, 自 2022 年 2 月起基本稳定(见图 6)。截止 2022 年 8 月 26 日, 测点 RCX2-48 (849.1 m) 的累计位移量最大, 最大值为 50.67 mm; 上游侧测点 RCX1-43 (852.3 m) 的累计位移量最大, 达到了 77.62 mm。



**Figure 7.** Horizontal displacement distribution diagram of A2-A2 profile flexible inclinometer in factory building  
**图 7.** 厂房 A2-A2 剖面柔性测斜仪内部水平位移分布图

柔性测斜仪的位移变化规律与现场施工的工况基本吻合，在岩体爆破及应力调整期间，变形速率较快(2021 年 5 月~9 月)；在第 IV 层开挖期间，由于预裂爆破早已完成，因此变形趋势平稳；上、下游高边墙的变形分布规律体现为顶部变形较小，高程越低变形越大(见图 7)。综合以上分析，柔性测斜仪所测的变形符合地下厂房高边墙的一般变形规律，可为地下厂房的施工、运行提供有力的参考。

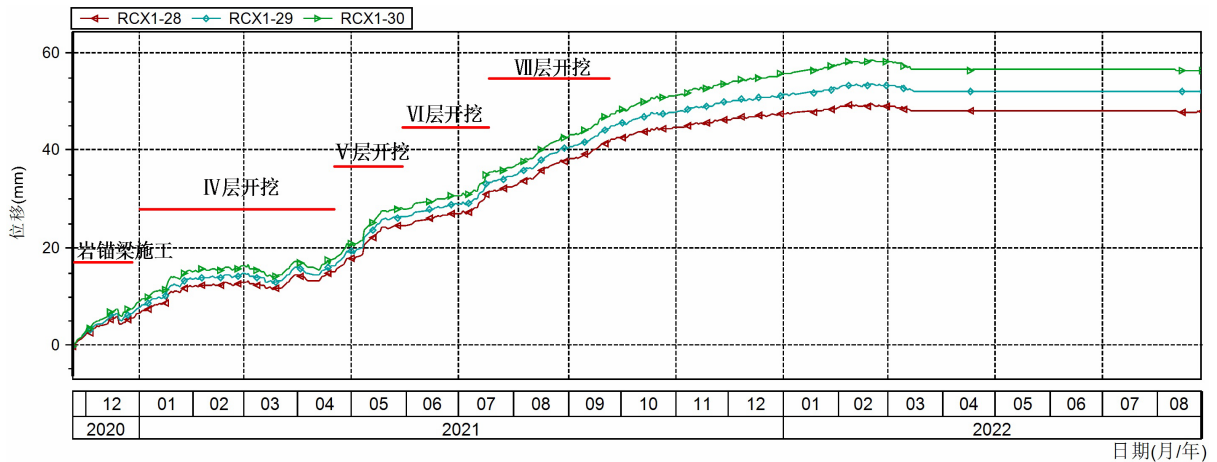
### 5.2. 柔性测斜仪与多点位移计数据对比

对柔性测斜仪安装高程范围内的多点位移计与相邻高程的柔性测斜仪测点的变化过程进行对比分析。四点位移计 M4-CF2-4 (上游侧 859.6 m)、M4-CF2-5 (下游侧 859.6 m)对应部位的柔性测斜仪测点分别为 RCX1-28、RCX2-27。

对比图 8、图 9 可知，变形量值方面，高程 859.6 m 相邻位置柔性测斜仪及多点位移计孔口变形量值差别较大，2020 年 11 月~2022 年 8 月期间，柔性测斜仪测点 RCX1-28、RCX1-29、RCX1-30 向临空面方向的累计位移量分别为 47.95 mm、51.99 mm、56.35 mm，而多点位移计 M4-CF2-4 的孔口位移量仅为 1.13 mm。

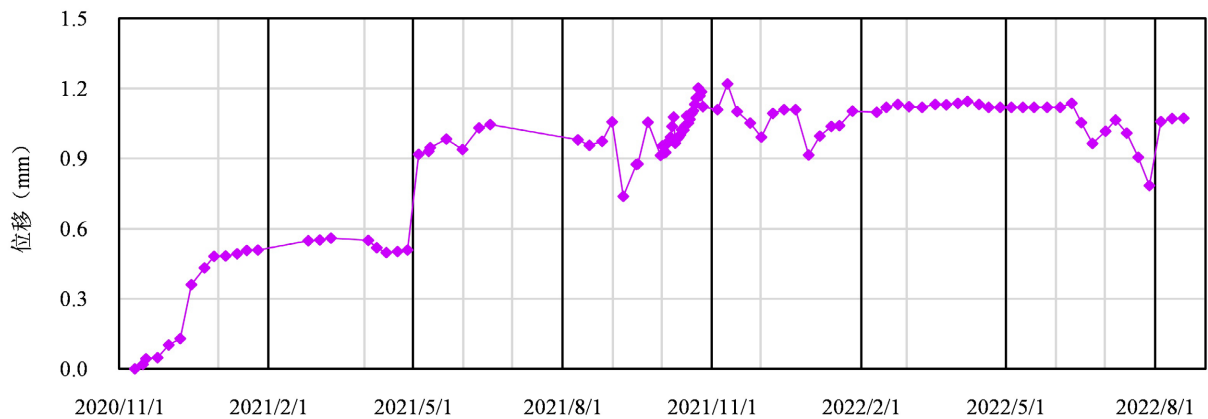
在 2021 年 6 月前，柔性测斜仪及多点位移计孔口位移变化规律基本一致；而 2021 年 6 月后，受 VI~VII 层岩体开挖的影响，柔性测斜仪的累计水平位移仍呈逐渐增大的趋势，而多点位移计的孔口位移在下部岩体开挖扰动等因素影响下变形不明显(2021 年 6 月后未发生明显变化)。

如图 10、图 11 所示，主厂房 A2-A2 剖面下游侧 859.6m 高程柔性测斜仪与多点位移计 M4-CF2-5 的孔口位移变化过程基本一致，各阶段的变形规律与施工工况相符合；变形量值方面相差较大，柔性测斜仪测点 RCX2-28、RCX2-29、RCX2-30 在 2020 年 11 月~2022 年 8 月期间的累计位移量分别为 34.69 mm、36.19 mm、29.11 mm (向临空面方向)，而相邻位置多点位移计的孔口位移仅为 7.22 mm。



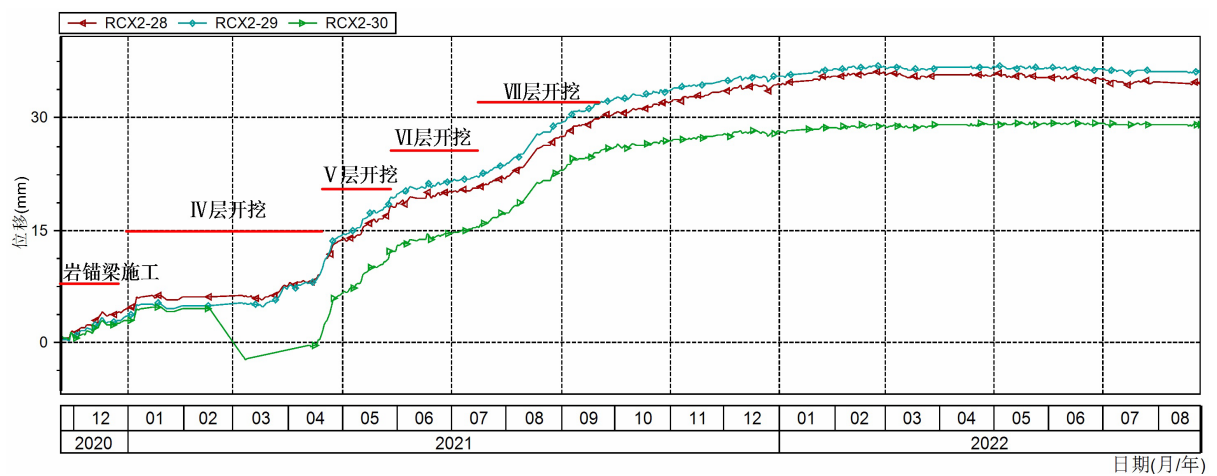
**Figure 8.** The cumulative displacement process line of the flexible inclinometer near 859.6 m upstream elevation of the main workshop

**图 8.** 主厂房上游侧高程 859.6 m 附近柔性测斜仪累计位移过程线



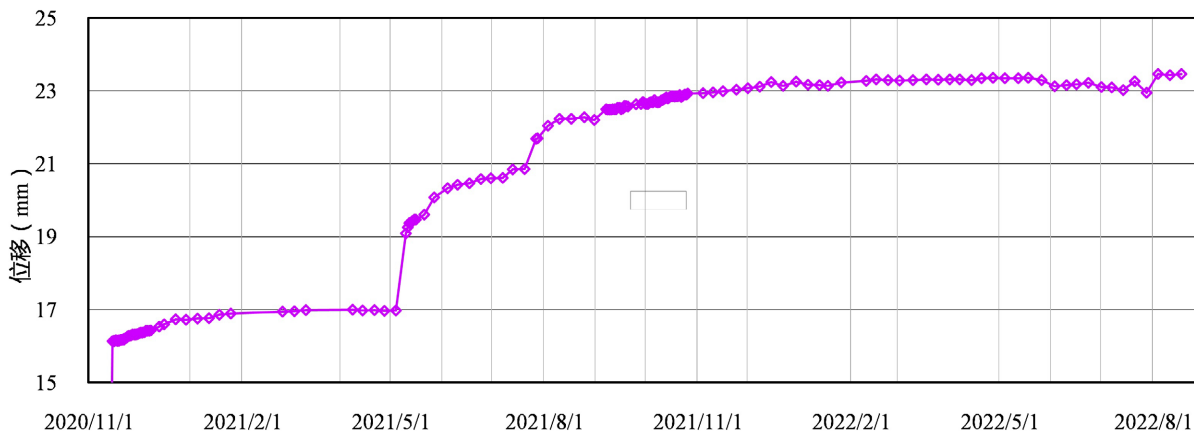
**Figure 9.** Plant A2-A2 section four-point displacement meter M4-CF2-4 orifice displacement change curve (859.6 m)

**图 9.** 厂房 A2-A2 断面四点位移计 M4-CF2-4 孔口位移变化曲线图(859.6 m)



**Figure 10.** The cumulative displacement process line of the flexible inclinometer near 859.6 m in the downstream side of the main workshop

**图 10.** 主厂房下游侧高程 859.6 m 附近柔性测斜仪累计位移过程线

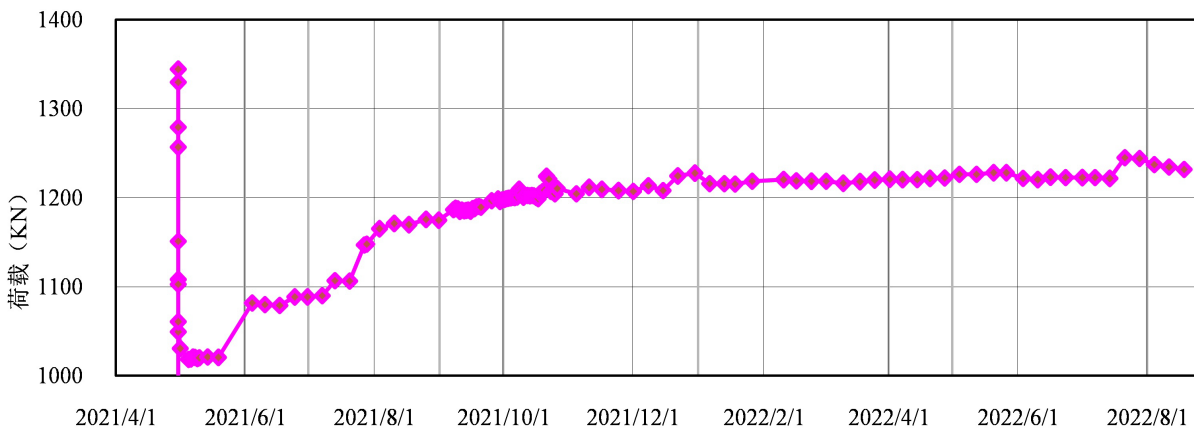


**Figure 11.** Plant A2-A2 section four-point displacement meter M4-CF2-5 orifice displacement curve (859.6 m)  
**图 11.** 厂房 A2-A2 断面四点位移计 M4-CF2-5 孔口位移变化曲线图(859.6 m)

综合柔性测斜仪、多点位移计的变形监测结果及现场施工工况可知，柔性测斜仪的监测结果与多点位移计更能准确的体现地下厂房围岩的变形情况，而多点位移计可能存在锚固不理想等问题。

### 5.3. 柔性测斜仪与锚索测力计数据对比

由于柔性测斜仪安装高程范围内布设有锚索测力计，因此将锚索测力计 PR-CF2-2、PR-CF2-3、PR-CF2-5 的锚索应力变化情况及相邻高程柔性测斜仪测点进行对比，结果显示锚索测力计荷载在 2021 年 9 月前均呈逐渐增大的趋势，2021 年 10 月后测值变化基本稳定，与现场施工工况相吻合，并且与对应高程柔性测斜仪测点的位移变化规律基本一致，进一步的印证了柔性测斜仪所测结果的可靠性。典型测点过程线对比情况见图 12、图 13。

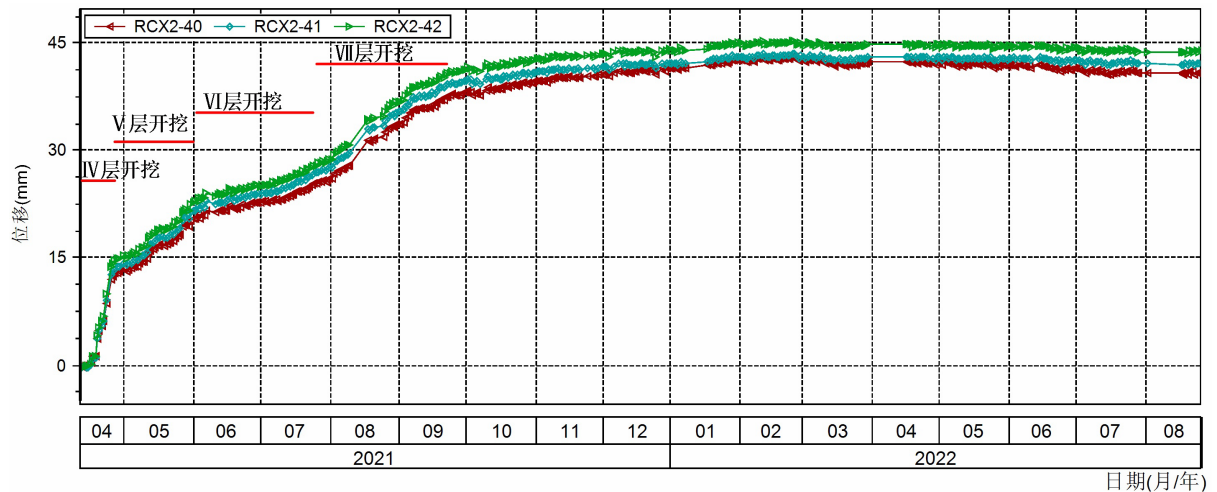


**Figure 12.** Load variation curve of anchor cable dynamometer PR-CF2-5 in factory building  
**图 12.** 厂房锚索测力计 PR-CF2-5 荷载变化曲线图

## 6. 结论

1) 柔性测斜仪所测的变形规律与相邻部位锚索测力计的荷载变化规律相似性较强，且与现场施工工况也基本一致，表明将柔性测斜仪应用于地下厂房围岩变形监测中的较为可靠。而相邻部位多点位移计的变形规律及量值均有差异，可能存在锚固不理想等问题。





**Figure 13.** The accumulated displacement process line of flexible inclinometer near PR-CF2-5 of anchor cable dynamometer in factory building

**图 13.** 厂房锚索测力计 PR-CF2-5 附近柔性测斜仪测点累计位移过程线

2) 本文所安装的柔性测斜仪基本能够反映围岩的变形规律，在地下厂房围岩稳定监控方面起到了重要作用，有效保证了施工安全。为其他抽水蓄能电站的地下厂房大跨度柔性收敛变形监测实施奠定了理论及应用基础，具有较强的推广价值。

### 参考文献

- [1] 邓人文, 周家文, 韩进奇, 等. 基于三维激光扫描的地下洞室危岩体识别与监测技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 39-45, 58.
- [2] 李彪, 徐奴文, 戴峰, 等. 乌东德水电站地下厂房开挖过程微震监测与围岩大变形预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4102-4112.
- [3] 张科峰, 高平. 滑动测微计在深圳抽水蓄能电站地下厂房围岩监测中的应用[J]. 水利科技与经济, 2016(7): 116-119.