

# 大型地下厂房含蚀变带围岩变形特征与机理分析

何一纯<sup>1</sup>, 王兰普<sup>1</sup>, 侯奇东<sup>2</sup>, 张顺利<sup>2</sup>, 孔张宇<sup>1</sup>

(1. 河北丰宁抽水蓄能有限公司, 河北 承德 068350; 2. 中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 大型地下厂房的洞室开挖规模较大, 围岩稳定问题突出; 而当厂区蚀变带发育时, 围岩发生大变形的风险可能骤增。依托丰宁电站主厂房洞室开挖工程, 结合地质资料和监测数据, 对大型地下厂房含蚀变带围岩的变形特征与机理进行了分析。结果表明: 开挖边墙变形普遍较大, 多个监测值超过 50 mm; 开挖规模较大的区域变形更大; 受蚀变影响的围岩时效变形明显。分析认为丰宁电站主厂房围岩变形受到蚀变带、大规模开挖和地应力的综合影响; 沿结构面广泛分布的蚀变带削弱了岩体质量, 成为大变形的内因; 大规模开挖造成围岩卸荷损伤, 创造了大变形的条件; 而与厂房纵轴线大角度相交的地应力大主应力则放大了前两者的不利影响, 最终导致大变形发生。

**关键词:** 地下厂房; 蚀变带; 围岩变形; 大规模开挖; 中等地应力

中图分类号: TV731.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0206-08

## Deformation features and mechanism analysis of the surrounding rock with alteration zone of a large underground powerhouse

HE Yichun<sup>1</sup>, WANG Lanpu<sup>1</sup>, HOU Qidong<sup>2</sup>, ZHANG Shunli<sup>2</sup>, KONG Zhangyu<sup>1</sup>

(1. Hebei Fengning Pumped Storage Corporation Limited, Chengde 068350, China; 2. Power

China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The excavation of large underground powerhouses is of great scale, and stability problems of the surrounding rock are always involved during the excavation. When a developed alteration zone is close to the excavation site, the large deformation risk of the surrounding rock could increase sharply. Here, the main powerhouse excavation project of Fengning Hydropower Station was taken as the research object, the deformation features and mechanism of its surrounding rock with an alteration zone were analyzed based on the geological conditions and monitoring data. The monitoring results show that the deformation of side walls was generally large, with multiple monitoring values exceeding 50 mm. Larger excavation area induced greater deformation. The time-dependent deformation of the surrounding rock was obvious under the influence of the alteration zone. The analysis indicates that the surrounding rock deformation in Fengning main powerhouse was affected by the alteration zone, large-scale excavation and *in situ* stress, because the alteration zone, which is widely distributed along the rock joints and faults, weakened the rock mass quality and became the internal cause of large deformations. Furthermore, the unloading damage of the surrounding rock caused by large-scale excavation created the condition for large deformation and the major principal stress of *in situ* stress intersecting with the longitudinal powerhouse axis at a large angle magnified the adverse effect of the former two factors, which eventually caused the large deformation.

**Key words:** underground powerhouse; alteration zone; surrounding rock deformation; large-scale excavation; medium *in situ* stress

收稿日期: 2020-12-18; 修回日期: 2021-03-29

作者简介: 何一纯(1975-), 男, 安徽安庆人, 学士, 高级工程师, 主要从事抽水蓄能、地下工程等领域的科研及应用工作。

通讯作者: 侯奇东(1994-), 男, 四川达州人, 硕士, 主要从事水工结构与岩土工程等领域的科研与应用工作。

## 1 研究背景

目前在建和新规划的大型水电站多位于山区河谷,河流普遍坡降陡且流速快,虽然水能资源丰富,但河谷往往深切狭窄且岸坡高陡,发电厂房显然更适合布置于地下。另一方面,随着我国能源结构升级和电网运行优化,抽水蓄能电站发展迅速<sup>[1]</sup>,而该类型电站也多采用地下厂房的布置方式。因此,地下发电厂房的应用较为广泛。然而,水电站厂房内部大型设备较多,施工时一般需要进行大规模的洞室开挖,这会显著改变原地质环境。厂区围岩在从被扰动到重新平衡的过程中,可能发生大变形、开裂、片帮、岩爆等破坏<sup>[2-3]</sup>,威胁现场施工安全。为保证水电工程的安全与效益,国内外已有大量学者对地下厂房的围岩稳定问题进行了研究。

大型地下洞室的围岩失稳一般可分为应力驱动<sup>[4-5]</sup>、岩体结构驱动和复合驱动<sup>[6-7]</sup>3类。应力驱动型破坏多发生在赋存高地应力的地区<sup>[8]</sup>,如山区河谷的高陡岸坡的内部<sup>[9]</sup>。李志鹏等<sup>[10-11]</sup>对猴子岩水电站研究后指出应力驱动型破坏可归纳为拉张、张剪和剪切破裂3种形式。而当厂区地应力不大时,不利的岩体质量或结构往往会成为影响围岩稳定的主导因素<sup>[8]</sup>。断层、裂隙等结构面以及地下水均为典型的不利岩体条件,结构面的切割会形成不稳定块体且结构面影响范围内的岩体大多破碎,而地下水渗透也会显著降低岩体质量。岩体受到地壳中热液作用而发生的蚀变同样会严重劣化岩体质量<sup>[12]</sup>。热液上升过程中的冲击挤压作用会造成岩体结构破碎,而热液与岩体的相关化学反应也会削弱岩体强度。并且,由于断层等结构面会成为热液上升的通道<sup>[13]</sup>,因此蚀变与结构面通常伴生分布。由此可见,蚀变是一种极为不利的地质作用,岩体结构可能会因蚀变和结构面叠加作用而更加软弱。

地下厂房的围岩稳定问题随具体工程施工方案的差异和地质条件的不同而表现迥异,因此以往的研究可能无法较好地适用或指导现今具体工程的施工。另外,以往对于大型地下厂房洞室围岩蚀变作用的研究较少且深度不够,尤其对于沿结构面伴生的蚀变带的研究更少。基于此,本文依托丰宁抽水蓄能电站工程展开研究,该工程主厂房洞室在施工期发生了较大的围岩变形且厂区广泛分布蚀变带,结合现场监测数据,对大型地下厂房含蚀变带围岩的变形特征与机理进行分析与探讨,以期类似地下工程提供理论参考。

## 2 工程概况

### 2.1 丰宁电站简介

丰宁抽水蓄能电站坐落于河北承德市,与首都北京相距180 km。电站规划装机容量为3 600 MW,为一大(1)型规模,修建完成后其装机规模在全世界抽水蓄能电站中位列第一。电站包括上下水库、输水系统、地下厂房系统等主要建筑物。地下厂房系统主要包含主厂房、主变室以及连接两者的母线洞等。本文研究的主厂房洞室由1#~2#副厂房、1#~12#主机间和安装场组成,安装场位于主厂房中部,其地下厂房布置如图1所示。1#副厂房和1#~6#主机间为一期工程,2#副厂房和7#~12#主机间为二期工程,两期施工同步。主厂房总开挖尺寸(长×宽×高)为414.0 m×25.0 m×54.5 m。其中,1#~6#、7#~12#主机间开挖尺寸均为169.5 m×25.0 m×54.5 m,安装场长75.0 m。丰宁主厂房边墙高过50.0 m,跨度超过25.0 m,属于典型的大型地下洞室<sup>[14]</sup>。厂房纵轴线为SN向。丰宁主厂房与传统地下厂房的最大区别在于其安装场布置于中部,而非通常情况下的位于洞室端部,一期与二期主机间也由安装场隔开。丰宁电站规划机组较多(12台),若按传统方式布置,主机间长度较大,而采用两期厂房的布置方式在一定程度上减少了开挖规模。

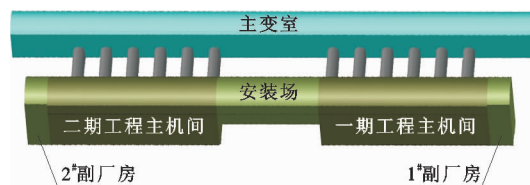


图1 丰宁电站地下厂房布置示意图

### 2.2 厂区地质条件

(1)岩性与蚀变。丰宁电站地下厂房系统布置于滦河左岸,上覆岩体厚度(垂直埋深)为250~330 m。厂区围岩岩性以中粗粒花岗岩为主,具有碎裂结构和花岗结构,呈块状构造。颜色多表现为肉红或灰白。花岗岩蚀变作为一种不利的地质作用,在整个丰宁地下厂房开挖范围内广泛发育。并且,丰宁厂区中的蚀变多沿断层等地质构造发育成长条形或带状,故称为蚀变带。其影响宽度约为2 m,延伸长度普遍不超过10 m。花岗岩本身强度虽高,但蚀变带岩石中的石英、长石等矿物在地壳内部热液作用下发生蚀变,可显著降低块体密度和岩体强度。在平洞勘探中,发现蚀变带岩体可用地质锤挖动。较为破碎的钻孔岩芯显著反映

了蚀变对岩体质量的削弱,而蚀变较严重的岩体在钻孔的岩芯中则已表现为砂土形式,如图 2 所示。

(2)蚀变带分布。电站厂房边墙及顶拱范围内的蚀变、断层、掉块、围岩类别等地质信息见图 3(图 中含变形监测点布置情况)。图 3 采用平铺展开图的表达方式,即将厂房展开成平面,上游边墙平铺在上方,下游边墙平铺在下方,中间为拱圈。主厂房范围内的相关断层信息见表 1。厂区范围内断层宽度较小,一般小于 1 m,但却往往伴随着蚀变带、断层泥、碎裂岩等软弱夹层。厂区范围内裂隙较为发育,

且其发育范围和密集程度受到断层切割岩体的显著影响,在断层附近时裂隙数量明显增多。同时,蚀变不仅沿断层呈带状发育,还出现在长大裂隙面上。据统计,厂区 27.6% 的裂隙有蚀变现象。综上所述,裂隙多分布在断层附近,而蚀变又以带状分布在断层和裂隙周围,故蚀变带与结构面呈显著的伴生分布,而受到两者叠加作用的岩体质量被显著削弱。因此,丰宁电站厂区围岩虽整体属Ⅲ类偏好,但部分围岩受到结构面(断层、裂隙)以及严重蚀变影响,表现为Ⅳ类,如图 3 所示。



图 2 丰宁电站厂区花岗岩蚀变带钻孔岩芯照片

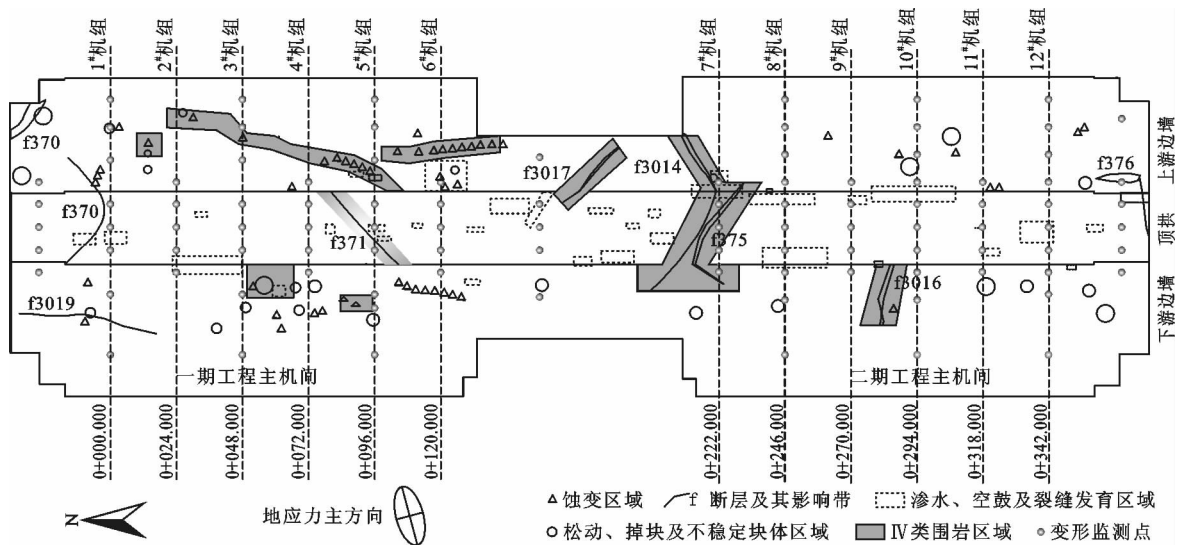


图 3 丰宁电站厂房地质信息及变形监测点平铺图

表 1 丰宁电站厂房范围断层信息

| 编号    | 产状                    | 宽度/m      |
|-------|-----------------------|-----------|
| f370  | NW305°~320°NE∠62°~65° | 0.05~0.30 |
| f371  | NE55°SE∠50°~60°       | 0.05~0.30 |
| f375  | NW317°SW∠50°          | 0.1~1.0   |
| f376  | NE40°~70°SE∠68°~90°   | 0.9~1.2   |
| f3014 | NW290°~295°NE∠50°~70° | 0.1~2.0   |
| f3016 | NE40°NW∠68°           | 0.1~0.5   |
| f3017 | NW310°SW∠51°          | 0.1~0.6   |
| f3019 | NE10°~35°SE∠10°~30°   | 0.05~0.30 |

(3)地应力。丰宁电站厂区最大主应力接近于水平,方向为 NE68°~83°,量值在 12~18 MPa 之间。地应力场为构造应力与自重应力叠加所得,且构造应力稍大。取丰宁电站厂区的岩石试样进行单轴试验,测得其饱和单轴抗压强度平均值为 105.8 MPa。围岩强度应力比在 5~9 之间,根据文献[15]中的初始地应力分级方案,该地属中等地应力区。注意到主厂房轴线为近 SN 向,即厂房轴线与大主应力方向呈较大角度相交(参见图 3)。

### 2.3 变形监测布置

丰宁主厂房洞室开挖工程依托多点位移计对围岩进行变形监测。重点监测位置为洞顶拱圈和上下游边墙。监测时间跨度包含了从2016年初开挖伊始至2019年10月开挖至第Ⅷ层的3年时间。数据整理时默认围岩内部锚固端为不动点。监测数值以向临空面方向变形为正。典型断面的开挖顺序与多点位移计布置位置见图4(不同断面的监测布置可能略有区别,参见图3与图7的监测点空间分布位置)。

## 3 变形监测分析

### 3.1 变形量值统计

整理可得主厂房围岩截至2019年10月的表面累积变形量统计值分布,如图5所示。由图5可看出,无论是一期还是二期主厂房,拱圈围岩的变形都明显小于边墙。一期主厂房所有拱圈测点的变形均小于30 mm,二期主厂房也仅有8%的拱圈测点变形超过30 mm。而边墙则有50%以上的测点表现出30 mm以上的变形,且有超过30%的测点变形50 mm以上。拱圈最先开挖,其累积变形却明显小于后开挖的边墙。这缘于拱圈开挖形成的拱效应将上部围岩的挤压转移到拱座及下部的边墙<sup>[16]</sup>,使得拱圈围岩可更好地抵抗变形。与之相对,丰宁电站主厂房54.5 m的直立式高边墙在竖直方向上开挖规模较大,围岩失去支撑较多,而大主应力又近似垂直于边墙,故开挖卸荷对边墙的影响更大。

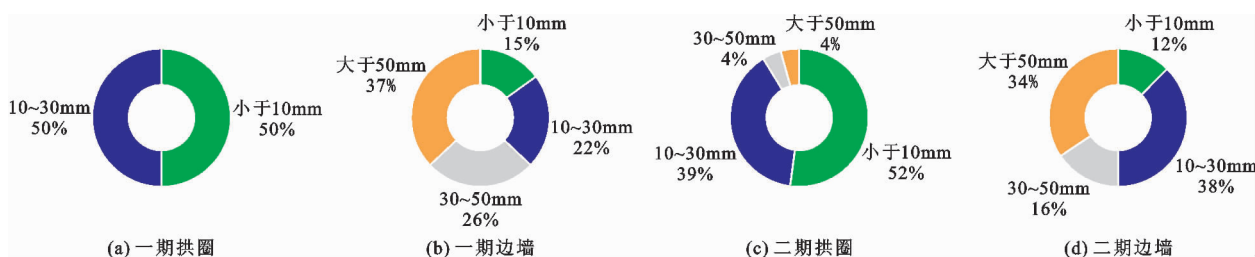


图5 丰宁电站一期和二期主厂房变形量统计值

### 3.2 变形空间分布

图6整理了一期和二期主厂房的上下游边墙及拱圈沿厂房纵轴线在各典型监测断面的最大表面位移监测值。图7在主厂房平铺展开图上绘制出了主要监测点的布置位置及其变形测值范围。观察图6、7可发现以下规律:

(1)拱圈表面变形在厂房轴线方向的分布较为平缓;除0+342.000桩号处,拱圈变形在厂房轴线方向未见明显突变。而上下游边墙变形则在厂房轴线方向上波动较大。

本次监测的最大变形测值出现在0+000.000桩号上游边墙中部(EL 979 m)的M(cf)1-6测点,其表面变形达到94 mm。此外,桩号0+024.000下游边墙岩锚梁上部(EL 999 m)的M(cf)b-6测点以及桩号0+096.000下游边墙岩锚梁下部(EL 991 m)的M(cf)3-9测点均出现了70 mm以上的大变形(桩号与位置参见图4、7)。

综上所述,丰宁电站主厂房拱圈围岩表面变形较小,而边墙围岩表面变形则在同等工程中处于偏大水平。

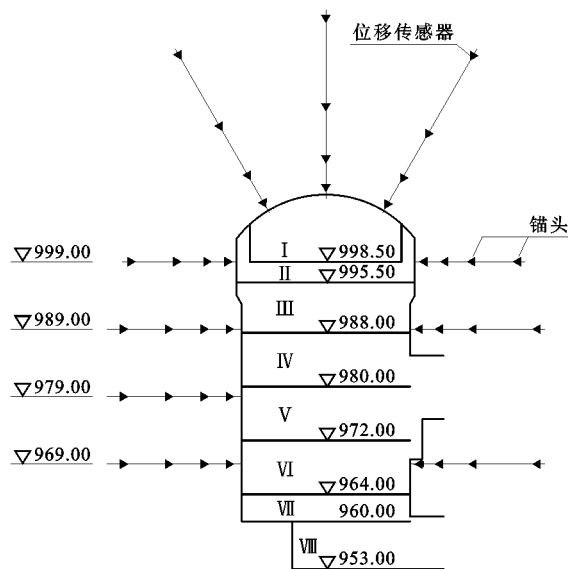


图4 丰宁电站主厂房典型断面开挖顺序及多点位移计布置

(2)绝大多数变形50 mm以上的测点位于边墙,拱圈部位只有0+342.000桩号的一个测点变形大于50 mm。

(3)安装场范围内的5个监测点变形均较小。

(4)变形监测值在上下游边墙的底部较小。

(5)厂房两端的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>副厂房附近的监测点变形较小。

(6)大变形主要分布在上游边墙的中上部和下游边墙的上部。边墙顶部靠近起拱线的位置也有部分测点的变形在50 mm以上。

前两点均对应了 3.1 节中边墙变形相较拱圈更大的规律。安装场变形较小主要是因为开挖规模相对于主机间而言较小。边墙底部和厂房两端的变形较小,可以推测是因该处围岩都会受到附近相对稳固围岩(底部围岩和端墙围岩)的限制。此规律仍然可以归纳为:边墙底部和厂房两端测点附近的开挖规模相对较小,即该处都有一个相同方向的相对稳固围岩未开挖。与之相对,四周均已开挖从而导致周围均为临空面的边墙中上部围岩变形较大。同时,下游边墙上部还受到母线洞开挖影响,开挖规模被放大,故变形亦较大。另一方面,起拱线附近作为拱圈与边墙衔接的不平滑位置,易发生应力集中,且还承受了拱圈部位传递到拱座的挤压,故变形也较大。

综上所述,大规模的开挖以及开挖断面不光滑带来的应力集中,可导致大变形的发生。丰宁电站主厂房通过中部安装场将 12 台机组分成一、二期

各 6 台机组对称布置,避免了 12 台机组并排带来的轴线方向更大规模开挖,从而一定程度上限制了更大规模开挖可能导致的更大规模变形。

将图 7 的变形空间分布与图 3 的地质平铺图对比,可发现大变形与地质条件相关。部分大变形测点直接受到蚀变带影响,如:1<sup>#</sup>机组上游边墙上上部及下游边墙上部;3<sup>#</sup>机组上游边墙上上部;5<sup>#</sup>机组上游边墙上上部及下游边墙上上部;10<sup>#</sup>机组上游边墙上上部。还有一些大变形测点受到断层、裂缝等结构面的影响,如:2<sup>#</sup>机组下游边墙起拱线附近;7<sup>#</sup>机组上游边墙起拱线附近;12<sup>#</sup>机组顶拱位置。根据 2.2 节的地勘资料,蚀变带与结构面往往伴生分布,且蚀变带可弱化结构面的强度,故此类测点可视为受到蚀变带间接影响。另有少量测点受附近围岩松动、掉块的影响。因此,在丰宁主厂房围岩中,大部分的大变形区域都受到蚀变带的影响。

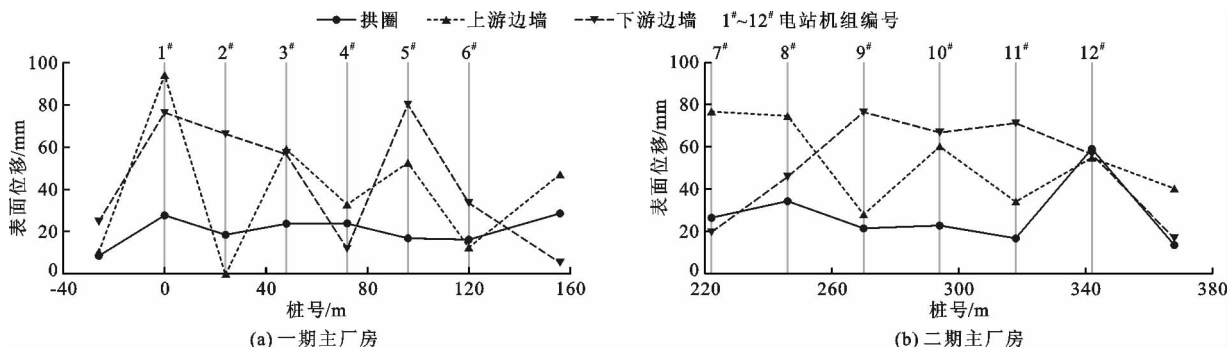


图 6 丰宁电站主厂房沿纵轴线方向最大表面位移分布

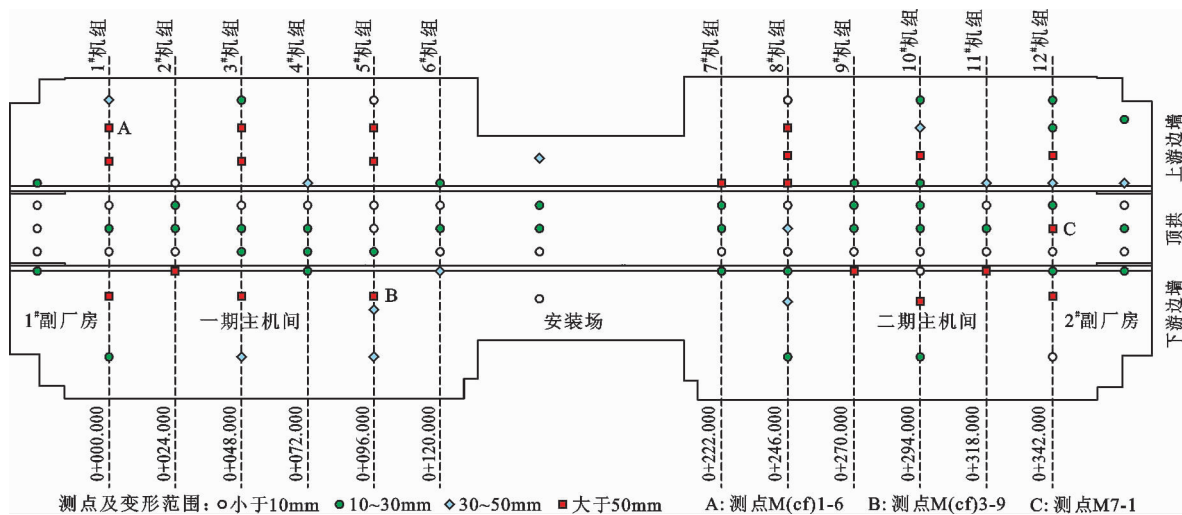


图 7 丰宁电站主厂房围岩监测点空间布置及变形量值统计

### 3.3 变形时间演化

洞室围岩变形并非在开挖后即刻产生,往往表现为随着时间推移而继续增长的时效变形。软岩<sup>[17]</sup>或高地应力作用下的破裂岩体<sup>[18]</sup>在开挖停止后易发生流变。此外,施工过程中,受下层开挖扰动

和应力逐步释放的影响,围岩也会发生与开挖密切相关的渐进扩展式时效变形<sup>[19]</sup>。丰宁电站主厂房施工期的围岩时效变形显然属于后者。本节分别选取丰宁主厂房上下游边墙及拱圈的变形监测值最大的测点进行施工期时间演化分析,所选测点的空间

位置参见图4、7。

M(cf)1-6测点位于1<sup>#</sup>机组中心线上游边墙中部(EL 979 m),监测时段内累积变形达94 mm。图8展示了M(cf)1-6测点不同深度随时间演化的变形趋势及对应的厂房开挖高程。受分层开挖的影响,变形呈现近似阶梯状的特征。例如在第7和第8层(EL 954 m)开挖时,M(cf)1-6测点表面变形在短时间内跃升了20 mm左右,明显呈阶梯状。M(cf)1-6测点在开挖后的一年时间内持续变形且量值较大,主要是受附近蚀变带影响(图3),围岩质量差,从而易受施工扰动。但该测点的变形在每个台阶跃升后都增长较缓,且变形主要在表面,内部10 m深处的变形明显减小。因此,若加强支护,则M(cf)1-6测点变形在开挖完成后会逐渐收敛。

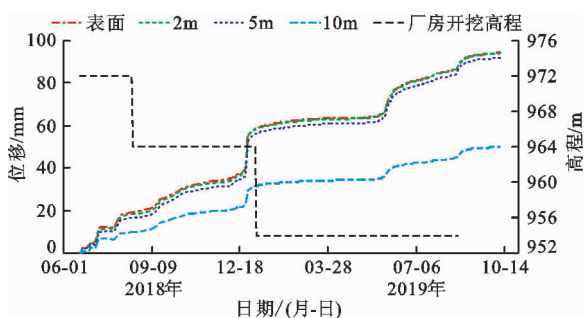


图8 主厂房上游边墙 M(cf)1-6 测点不同深度位移随时间变化趋势

M(cf)3-9测点位于5<sup>#</sup>机组中心线下游边墙岩锚梁底部(EL 991 m),监测时段内累积变形达80 mm。图9展示了M(cf)3-9测点不同深度随时间演化的变形趋势及对应的厂房开挖高程。岩锚梁部位本就属于开挖轮廓的突变位置,容易发生应力集中,再加之该处受蚀变带影响,围岩类别为IV类(图3),故M(cf)3-9测点前期变形较大且迅速。但该测点前期应力释放较为完全,后期开挖过程中变形平稳、近似收敛,因此若支护得当则风险较小。

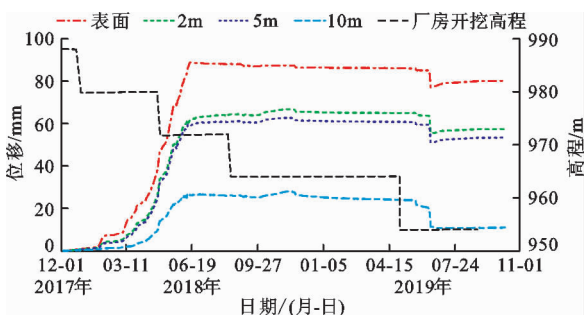


图9 主厂房下游边墙 M(cf)3-9 测点不同深度位移随时间变化趋势

M7-1测点位于12<sup>#</sup>机组中心线顶拱位置,监测时段内累积变形达58 mm。图10展示了M7-1测点不同深度随时间演化的变形趋势及对应的厂房开挖高程。该测点不仅在开挖初期变形较明显,且在之后的3年时间里其变形持续增长,即使在停工期间(图10中开挖高程虚线间断处)变形也未收敛。顶拱本应较边墙而言更安全,M7-1测点出现较为异常的大变形,主要是因其所处位置裂缝较发育(图3)。根据地勘资料,部分裂隙伴生有蚀变带,可能进一步弱化岩体质量。因此开挖后M7-1测点处顶拱较为软弱的围岩无法顺利将应力传递到拱座;并且,开挖后拱圈部位的大主应力一般沿洞周分布,此应力条件带来的压剪作用使得裂缝和空鼓现象更加突出<sup>[20]</sup>。因裂缝发育而导致岩石完整性差,所以该测点变形持续增长但阶梯状特征不明显。另外,M7-1测点深部(13 m埋深)变形较为显著,说明裂缝的影响范围较深,开挖卸荷可导致裂缝等结构面的张开或错动,从而加剧深部变形。但在监测后期,M7-1测点变形仍有收敛迹象,且拱圈只有这一处出现大变形,因此,采取针对性的定点加固措施可控制变形。

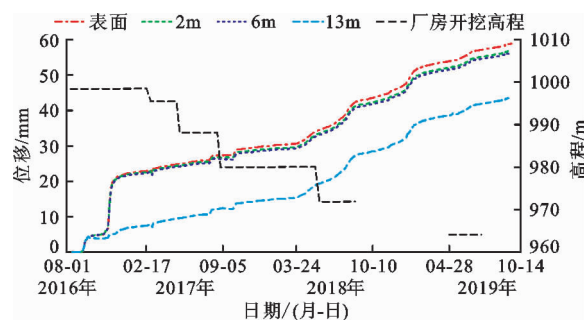


图10 主厂房顶拱 M7-1 测点不同深度位移随时间变化趋势

综上所述,3个典型大变形测点的变形趋势虽有区别,但都随开挖的进行表现出了典型的时效变形。三者的共同点在于其所在围岩都受到了蚀变带或裂隙发育的影响,岩体质量较差。

## 4 变形机理探讨

丰宁电站主厂房区域地应力属于中等水平,厂区内没有大规模断层穿过,岩体质量也并非特别软弱,但围岩却产生了相对同等工程偏大的变形。这说明丰宁主厂房围岩变形并非受地应力或岩体条件等某个单一因素的支配,而是受到相关因素的综合影响,具体影响机制可归纳为以下3个阶段:

(1)内因:蚀变带削弱岩体质量。由于岩体条

件的差异,不同工程区的围岩在相同应力条件下可能表现出不一样的变形特征。丰宁厂区的断层延伸不长,厚度也不大;受断层控制的裂隙较为发育,对于岩体质量有一定弱化。但若仅限于此,大变形还不足以发生。丰宁厂区地质条件的特别之处在于沿断层和裂隙等结构面发育着呈条带状分布的蚀变带。不论是挤压破碎等物理作用,还是地壳热液的化学作用,蚀变都会显著降低岩体质量。虽然单独的中等结构面或裂隙发育在系统支护下一般不会有较大变形发生,且局部的岩体蚀变也只会削弱小范围的岩体质量,造成小范围的围岩变形增加;但沿结构面伴生的蚀变带,却能借助结构面为“通道”,在整个厂区范围内广泛发育,大面积削弱岩体质量,成为厂区围岩整体大变形发生的内因。其削弱机制可概括为以下3点:①蚀变带使得已被结构面切割而完整性较差的岩体更加破碎;②蚀变产物(绿泥石等)一般吸水性强,吸水后具有可塑性,浸泡后易崩散,因此蚀变区域若有渗水发生,则岩体性质将进一步劣化<sup>[21]</sup>,丰宁主厂房洞室已揭露的渗水区域(图3)可加大劣化风险;③富集于结构面上的软弱蚀变产物会导致结构面强度变低,破碎岩体更易沿结构面错动。因此,工程中应在开挖后及时封闭蚀变岩体,防止进一步的风化和地下水的劣化,并有针对性地加强支护。

(2)诱因:大规模开挖损伤围岩。地下厂房开挖后,围岩突然失去一部分支撑,会向临空面方向卸荷扩容。卸荷过程中的应力调整可能使某些位置出现拉应力区,还可使开挖轮廓的不平滑处发生应力集中,这都会导致围岩损伤<sup>[22-24]</sup>。卸荷后期平行于洞周分布的地应力大主应力使得边墙围岩近似处于缺少了临空面方向围压的三轴压缩状态<sup>[25]</sup>,导致围岩向临空面鼓出变形,从而使得围岩损伤区(或塑性区)向深部发展,变形也进一步增加。并且,开挖规模越大,发生卸荷的岩体范围越大,岩体损伤的区域越多,变形的规模自然越大;本文3.2节的变形空

间分析也证实了这一点。对于丰宁厂区围岩,广泛分布的蚀变带虽已埋下了不稳定的内因,但若无外界干扰,地下深埋岩体一般处于稳定受压状态;而地下厂房大规模开挖带来的大范围围岩卸荷损伤则暴露了蚀变带对岩体的弱化作用,成为了大变形的导火索。

(3)强化:地应力扩大影响。地下厂房的开挖可类比为在一个周围受挤压的长方体中挖洞;开挖后,洞周必然发生向内收缩的变形;且长方体所受的初始挤压力越大,洞周的内收变形也越显著。因此,实际工程中初始地应力越大,开挖后卸荷的影响也越大。丰宁厂区的地应力虽不高,但其大主应力方向与厂房纵轴线近似垂直,从而导致开挖规模较大、延伸范围较广的上下游边墙都面临较大的卸荷风险。而前述的蚀变带对岩体的弱化以及大规模开挖对岩体的损伤,都将在与厂房纵轴线大角度相交的地应力大主应力作用下被强化。

综上所述,沿结构面广泛分布的蚀变带导致岩体质量较差,是大变形发生的主要内因;大规模开挖造成的围岩卸荷损伤,为大变形创造了条件并成为诱因;而与厂房纵轴线大角度相交的地应力大主应力放大了前两者的不利影响,最终导致大变形的发生。当然,大变形并非与蚀变带作用完全正相关,大型地下洞室围岩变形的影响因素复杂且多元,蚀变带只是其中的一个重要诱因。

基于以上推论,图11以3<sup>#</sup>机组中心线剖面为例,展示了其围岩变形的大致过程。主厂房开挖轮廓四周的围岩受到多组岩石结构面的切割,且上游边墙同时还受到蚀变带的影响以致围岩等级降为IV类;开挖后暴露了上述不利地质条件,再加之与厂房纵轴线大角度相交的地应力大主应力放大了边墙的强烈卸荷作用,加剧了上述不利地质条件对3<sup>#</sup>机组厂房围岩的弱化效果。因此,在蚀变带、开挖和地应力的综合作用下3<sup>#</sup>机组中心线的上游边墙出现了大变形。

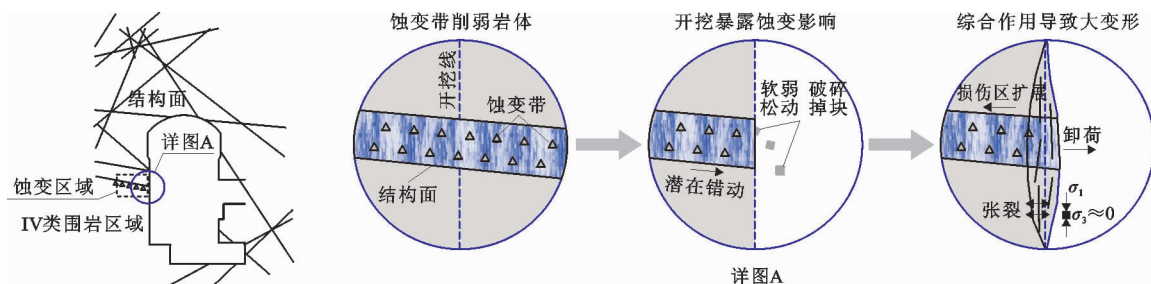


图11 丰宁电站3<sup>#</sup>机组中心线地质剖面及变形过程

## 5 结 论

本文依托丰宁电站主厂房洞室开挖工程,基于地质条件与变形监测数据,采用统计对比与理论分析相结合的手段,对大型地下厂房含蚀变带围岩的变形特征与机理进行了分析与探讨,主要结论如下:

(1) 丰宁主厂房拱圈围岩整体变形较小,但边墙围岩则有超过 30% 的测点表现出 50 mm 以上的表面变形,在同等工程中属于偏大水平。

(2) 开挖规模越大,则变形的风险也越大;丰宁主厂房通过中部安装场将工程分成一、二期,避免了 12 台机组并排带来的更大规模开挖,从而一定程度上限制了更大规模开挖可能导致的更大规模变形。

(3) 蚀变影响下的围岩时效变形明显,部分测点在开挖后的一两年内仍持续变形;工程中应在开挖后及时封闭蚀变岩体,并有针对性地加强支护。

(4) 丰宁主厂房围岩变形受到蚀变带、大规模开挖和地应力的综合影响:蚀变带弱化岩体质量,是内因;大规模开挖造成围岩卸荷损伤,是诱因;而与厂房纵轴线大角度相交的地应力大主应力放大了前两者的不利影响,最终导致大变形的发生。

### 参考文献:

- [1] 吕 优. 风-光-抽水蓄能联合发电系统优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [2] 张 嶙, 李邵军, 徐鼎平, 等. 双江口水电站主厂房开挖初期围岩变形破裂与稳定性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 520-532.
- [3] 刘思杰, 王 凯, 蔡 浩. 白鹤滩水电站左岸地下厂房围岩破坏研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 232-236.
- [4] 刘 健. 超大型地下洞室围岩变形特性及监控模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [5] WANG Meng, LI Haibo, HAN Jinqi, et al. Large deformation evolution and failure mechanism analysis of the multi-freeface surrounding rock mass in the Baihetan underground powerhouse[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 100: 214-226.
- [6] LI Haibo, YANG Xingguo, ZHANG Xuebin, et al. Deformation and failure analyses of large underground caverns during construction of the Houziyan Hydropower Station, Southwest China[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 80: 164-185.
- [7] 李唱唱, 侍克斌, 姜海波. 深埋高地应力引水隧洞节理围岩稳定性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 219-224.
- [8] 董家兴, 徐光黎, 李志鹏, 等. 高地应力条件下大型地下洞室群围岩失稳模式分类及调控对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2161-2170.
- [9] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297.
- [10] 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.
- [11] 李志鹏, 徐光黎, 董家兴, 等. 高地应力下地下厂房围岩破坏特征及地质力学机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1568-1576.
- [12] 茆大炜, 杜少华, 李地元, 等. 基于大型三轴试验的蚀变花岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1819-1831.
- [13] 杨根兰. 蚀变岩特性及其工程响应研究——以澜沧江小湾水电站为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [14] 巨能攀. 大跨度高边墙地下洞室群围岩稳定性评价及支护方案的系统工程地质研究——以糯扎渡水电站为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [15] 陈 菲, 何 川, 邓建辉. 高地应力定义及其定性定量判据[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 971-980.
- [16] 黄子平, BROCH E, 吕 明. 水电站地下厂房洞室顶拱的形成与锚固[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1348-1354.
- [17] 赵庆荣. 水电站工程隧道高温条件下岩石流变特性及围岩变形研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [18] 黄润秋, 黄 达, 段绍辉, 等. 锦屏 I 级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23-35.
- [19] 魏进兵, 邓建辉, 王倬凯, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1198-1205.
- [20] 刘 健, 朱赵辉, 蔡 浩, 等. 超大型地下洞室拱圈围岩变形、破坏特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1257-1267.
- [21] 傅 晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [22] 章奇锋, 向天兵, 李 华, 等. 东非某大型水电工程地下洞室群稳定性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 207-213.
- [23] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1251-1275.
- [24] 范 勇, 卢文波, 周宜红, 等. 高地应力条件下深埋洞室围岩损伤区孕育机制[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 308-316.
- [25] 卢 波, 王继敏, 丁秀丽, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2429-2441.