

抽水蓄能电站地下厂房开挖围岩变形预测研究

● 刘昌斌 王艳强 陈 洁



[摘要] 随着我国水电建设的发展,水电站地下厂房的规模愈来愈大,工程安全问题迎来了新的挑战。精确预测地下厂房开挖围岩变形,及时评估围岩稳定性对保障人员与工程安全极为重要。基于现场监测数据及有限元地应力反演的围岩参数和数值分析原理,提出了一种围岩变形动态预测方法。即通过数值迭代与参数反演,对某工程开挖围岩变形的位移进行预测,并应用到某抽水蓄能电站地下厂房开挖的围岩变形预测中。对比预测值与实测值结果表明,预测值与实测值的差值均在 1~5mm 以内,表明方法具有较高的精度,可以为相关地下工程施工期的围岩开挖预警提供依据。

[关键词] 地下厂房;围岩变形;动态预测;有限元;参数反演

抽水蓄能电站作为现代电力系统中的一个重要组成部分,承担着调峰填谷、提高电网稳定性等关键任务。在抽水蓄能电站的建设过程中,地下厂房的开挖是一个复杂却又关键的环节。但由于地下工程涉及地质条件的不确定性,开挖过程中的力学响应,以及支护结构的合理性等多方面因素,当地下厂房穿越软弱破碎岩层时极易发生围岩挤压变形,常规支护措施难以有效控制,严重时还会导致支护失效乃至厂房坍塌等后果。因此,利用现有监测数据辨识开挖过程中围岩变形。准确的预测对于理论研究和实际应用都具有极高的工程价值。地下洞室围岩的变形预测是一个复杂的非线性问题,引起围岩变形的因素很多,很难利用传统方法建立准确的数学方程描述变形产生的过程。因而在目前的研究中,不少学者已经将改进的 Boosting 算法、粒子群优化算法、BP 神经网络以及改进后的布谷鸟算法等机器学习方法,引入围岩变形预测中,取得了丰硕成果,使得机器学习的变形预测方法在地下工程中得到了较为广泛的应用。然而,上述方法仍存在着计算精度受参数选择影响较大、收敛性不佳、泛化能力弱、容易陷入局部最优解等不足。

鉴于此,本文以河北省内某抽水蓄能电站地下厂房为研究对象,针对开挖过程中的围岩变形预测问题,提出了一种动态反演预报方法,基于现场监测数据集合有限元参数反演,对该工程开挖过程中的围岩变形进行预测。通过对地下厂房开挖的现场监测数据和数值模拟反演参数进行综合分析,对比现场实测数据与反演预测数据,验证了该方法的有效性和准确性。可为相关工程开挖阶段和未来一定阶段内

的围岩稳定性分析提供重要的工程指导意义。

Q 工程概况

某抽水蓄能电站位于河北省境内某处,电站总装机容量 1400MW,装机 4 台,单机容量 350MW。电站枢纽主要由上水库、水道系统、地下厂房系统、下水库和地面开关站等建筑物组成。工程等级为一等,规模属大(1)型。工程抗震的基本烈度为Ⅶ度。地下厂房洞室群设计抗震采用基准期 50 年,超越概率为 10%,相应的地震水平峰值加速度为 170GAL。地下厂房位于输水系统中部,轴线方向为 NE40°,洞室上覆岩体厚度 356~380m,厂房区岩性为新鲜麻粒岩,块状构造,围岩以Ⅲ类为主。从厂房平洞揭露情况看,厂房区共发育 44 条断层,走向以 NNE 向较为发育,NEE 向次之。

该电站地下厂房具有高地应力的特点:由厂区的钻孔地应力测试点应力实测值与地应力数值计算成果反演的回归值表明,最大的初始地应力值为 15~20MPa。并且主厂房区断层交错复杂,可能会形成组合滑动块体,进而危及洞室安全。因此,有必要对该工程围岩变形进行监测与预测,可以为工程施工期的结构与人员安全提供可靠保障。所以在该工程施工过程中,主厂房的开挖与监测同步进行,获得了大量的施工监测数据。这对监测数据的变形趋势、预测反馈分析等具有较重要的实践意义。

Q 动态反演理论与方法

(一)动态反演预测原理

反演预测的核心思想是动态预测,即通过当前测值以及前 k 个测点的实测位移 $u_i, u_{i-1}, u_{i-2}, \dots, u_{i-k+1}$,再结合已建立的有限元网格模型的分析计算值,通过多次地下厂房开挖迭代,获得与实测值较为接近的计算值再返回修正相关参数,从而预测后续开挖位移 $u_i, u_{i+1}, u_{i+2}, \dots$ 。具体运算公式与原理示意如下。

其中某一个测点的实测值和有限元计算值如下式表示:

$$u_i = \hat{u}(p_i) \quad (1)$$

式中: p_i 为地下厂房开挖层数; u_i 为某一测点的实测值。

$$v_i = \hat{v}(p_i) \quad (2)$$

式中: p_i 为地下厂房开挖层数; v_i 为某一测点的有限元计算值,则后续开挖位移可由下式获得:

$$u_i = a \hat{v}(p_i) + b \quad (3)$$

后续开挖的围岩位移预测公式可由下式计算:

$$u_{i+1} = a \hat{v}(p_{i+1}) + b \quad (4)$$

(二) 计算位移取值换算

地下洞室围岩的位移一般采用多点变位计进行观测。由于实际工程的限制,多点变位计只能在相应位置开挖完成后安装并开始工作。因此,多点变位计统计的位移数据是从安装测位计之后开始记录的。

与此同时,有限元计算从开挖初始阶段就获取位移变化数据。因此,为确保参数反演的准确性,需要对有限元计算结果进行调整,排除安装前的位移数据,统一实测值与有限元计算值的时间序列。具体原理是将安装时刻设为原点(即位移为0),之后再将统计的位移值将作为分析基准。如图1所示。

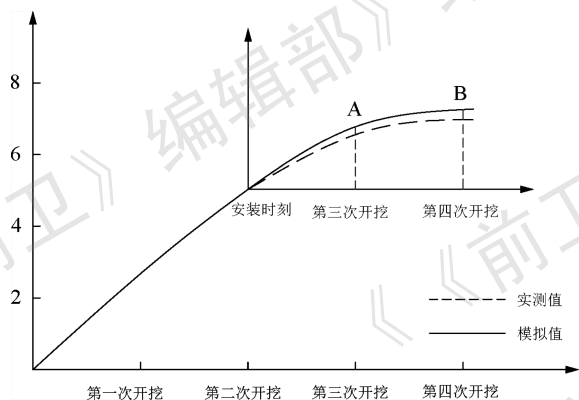


图1 围岩变形实测值与计算值的对应关系示意

根据有限元计算成果换算对应的多点变位计处的计算位移方法。受开挖应力释放以及自身重力影响,多点变位计会发生偏移,则多点变位计的伸长量为:

$$\Delta = |A'B'| - |AB| \quad (5)$$

如图2所示。其中, $|A'B'|$ 为变形后仪器长度, $|AB|$ 为变形前仪器长度,计算公式如下:

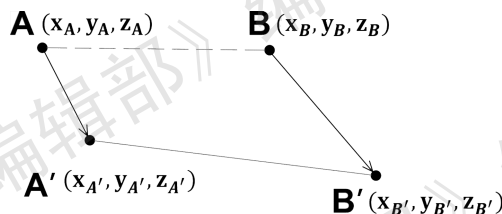


图2 测点坐标变化

$$|A'B'| = \sqrt{(x_B' - x_A')^2 + (y_B' - y_A')^2 + (z_B' - z_A')^2} \quad (6)$$

$$|AB| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (7)$$

通过有限元数值模拟可获得后续开挖中测点位置的变化情况,即可计算相应测点的变形量。

(三) 计算步骤

对于多点变位计的伸长量可分两种情况进行统计:(1)若直接知道变形前后坐标值,则直接使用公式(5)计算。

$$(2) \text{若知道 } A、B \text{ 的位移增量及 } \begin{cases} \Delta u_{Ax} \\ \Delta u_{Ay} \\ \Delta u_{Az} \end{cases} \text{ 及 } \begin{cases} \Delta u_{Bx} \\ \Delta u_{By} \\ \Delta u_{Bz} \end{cases}, \text{ 则}$$

将其值加上原始坐标,可得到 $A、B$ 变形后的坐标值,然后用公式(6)~公式(7)算得精确结果。

若作近似处理,则可用:(1) B 的合位移减去 A 的合位移,其隐含假设为 $A、B$ 变形方向一致,且都沿着 AB 的轴向方向,如图3所示。

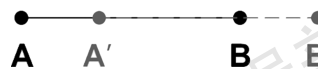


图3 伸长量计算示意

(2) B 的位移增量减去 A 的位移增量,其分量的差值平方和开根号。其隐含假设为 $A、B$ 变形方向一致,且都沿着 AB 的轴向方向,如图4所示。作 $\vec{BC}$ 与 $\vec{AA'}$ 相等,则 $\vec{CB}$ 长度即为开根号后的值,其数值近似为多点变位计的伸长量。

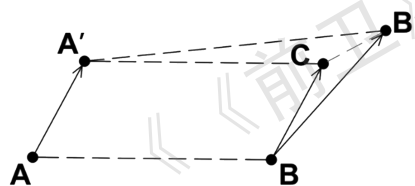


图4 多点变位计伸长量近似计算示意

工程实例分析

(一) 工程概况

以从主厂房洞上游边墙向上游延伸50m,从尾闸洞下游边墙向下游延伸50m作为有限元模型的上、下边界;取从主厂房洞左端边墙向左延伸50m,从主厂房洞右端边墙向右延伸50m作为有限元模型的左、右边界。其中地下厂房厂

左 48.5~厂右 050 围岩以Ⅲ类为主,厂右 050~厂右 128 围岩以Ⅳ类为主。在前期进行的对该工程的地应力反演结果

基础上,依据地质资料,对围岩以及相关的断层进行了充分模拟。围岩参数取值为反演后结果,详见表 1。

表 1 地下厂房围岩物理力学参数值

围岩分类	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	摩擦系数	凝聚力/MPa	泊松比
3	2.76	2.219	17.118	1.141	1.078	0.3
4	2.20	1.45	5.80	0.754	0.522	0.35

(二)结果分析

本文主要根据第 3 层到第 5 层开挖结束后的实测位移进行参数反演,并据此预测后续开挖的位移。由于主厂房已开挖至第 5 层,将以前 4 层的开挖实测数据进行迭代计算,进而反演预测出第 5 层的实测数据。根据现场监测数据显示,当前地下厂房围岩绝对位移量在 $-3.55\text{mm} \sim 31.66\text{mm}$ 之间。取顶拱代表测点 mcfII-5-1 的计算值和实测值进行对比。如图 5 所示。

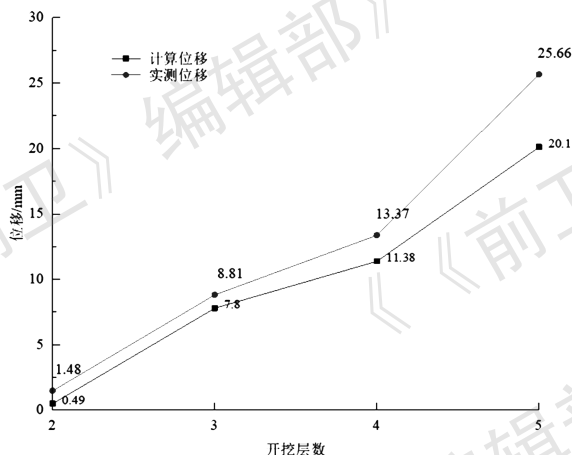


图 5 典型测点实测位移与预测位移对比图

从图 5 可以看出,位于上游边墙处的 mcfII-5-1 测点实测值在第 2 层开挖和第 4 层开挖均呈慢增长趋势,当开挖从第 4 层到第 5 层时呈快增长趋势,预测值的整体趋势与实测值吻合。预测值与实测值的相差不大,一般差值都在 $1 \sim 5\text{mm}$ 以内,符合工程建设精度要求,表明动态反演预测的准确性。

结束语

本文通过对某工程开挖过程中的围岩变形进行了参数反演与位移预测研究,可以得出以下几点结论:(1)针对某抽水蓄能电站地下厂房开挖过程中的围岩变形预测问题,本文提出了一种动态反演预测方法。并通过对该地下厂房开挖的现场监测数据和数值模拟反演参数综合分析,验证了该方

法的有效性和准确性。(2)有限元数值分析是把复杂的围岩条件简化为某种抽象的数学模型,一般难免与工程实际有差别。另外,反映岩体特性的岩石力学参数不容易准确选取也会对计算产生影响。但是本文中采用的有限元分析方法能够模拟地下厂房开挖过程中的应力释放和变形情况,为反演预测提供了可靠的计算基础。通过与现场实测数据的对比,证明了数值模拟结果与实际情况具有较高的一致性。较为贴合工程原型。(3)使用动态反演预测方法对某工程的地下厂房开挖围岩变形进行预测,对比分析现场的实测数据与预测数据,结果表明,预测值与实测值之间的差异一般控制在 $1 \sim 5\text{mm}$ 以内,符合建设工程误差精度要求,显示出良好的预测精度。(4)本文提出的动态反演预测方法,是通过多点变位计实测位移数据的动态反演分析,结合有限元计算值,逐步优化了预测参数,并对后期开挖步序中产生的围岩位移进行预测分析,可确保工程施工期的正常运行,在一定程度上保障了工程结构安全。可为类似工程的围岩变形预测和控制提供参考和借鉴。

参考文献

- [1]焦玉勇,欧光照,王浩,等.基于证据理论的隧道挤压变形预测[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(05):1156-1170.
- [2]张炎,朱珍德,朱姝,等.龙滩水电站地下洞室围岩变形的智能化预测方法[J].水力发电学报,2013,32(02):246-251.
- [3]廖烟开,郭德平,刘志强,等.隧道周边应变与挤压因子法在隧道围岩大变形预测中的应用[J].现代隧道技术,2020,57(04):20-26.
- [4]王述红,董福瑞.基于变形预测和参数反演的山岭隧道围岩稳定性分析[J].岩土工程学报,2023,45(05):1024-1035.

作者简介:

刘昌斌(1990—),男,汉族,山东济南人,硕士,工程师,山东电力工程咨询院有限公司,研究方向:电力工程设计。

王艳强(1988—),男,汉族,山东济南人,硕士,高级工程师,山东电力工程咨询院有限公司,研究方向:电力工程设计。

陈洁(1995—),男,汉族,云南昭通人,硕士,工程师,山东电力工程咨询院有限公司,研究方向:发电结构设计。