

大岗山电站地下厂房围岩开挖损伤动态反演分析

朱泽奇, 付晓东, 盛谦, 张勇慧

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对大岗山水电站地下厂房开挖施工过程, 采用正交设计、最小二乘支持向量机(LSSVM)与粒子群(PSO)优化算法建立了考虑围岩开挖损伤效应的动态反演分析方法。首先采用高精密度的滑动测微计对地下厂房围岩施工期深部变形进行长期稳定的现场监测, 获得大量的监测数据; 再以围岩力学参数为基本变量, 借助于正交设计方法设计一定数量的有限元计算方案, 获得各种方案下与监测点相对应的有限元计算位移; 最后利用智能算法进行围岩力学参数识别, 结合施工进度, 统计每一期地下厂房围岩力学参数反演结果, 研究围岩参数的动态反演规律。

关键词: 地下厂房; 围岩开挖; 变形监测; 损伤演化; 动态反演; 大岗山水电站

中图分类号: TV731.6

文献标志码: A

岩体力学参数取值一直是岩土工程研究的热点问题, 它极大地影响着数值计算和工程设计的成果。位移是反映岩土体受力变形形态的重要物理量, 基于实测位移反求岩体力学参数的位移反分析融合了数值计算和最优化理论等先进计算技术和方法, 为更准确地获取岩体力学参数开辟了新途径。

近年来, 诸多学者对地下工程围岩参数的反演做了大量的研究工作。付成华等为了提高参数反演的效率, 采用均匀设计理论设计不同的反演参数组合, 用有限元计算组建的样本集训练神经网络, 根据洞室开挖过程中实测位移反演地下洞室岩体力学参数^[1]。肖明等结合瀑布沟水电站地下厂房工程, 建立有限元模型, 代入监测数据, 反演获得洞周围岩参数场, 并将计算结果用于预报后续洞室开挖的围岩变形趋势, 结果显示岩体计算预测反演参数与实际监测值符合较好^[2]。

但是, 基于长期稳定监测数据的围岩参数动态反演规律研究尚不多见。本文考虑大岗山水电站地下厂房区域工程地质特征和岩体结构形态, 针对地下厂房的开挖过程, 利用滑动测微计对地下厂房围岩施工期深部变形进行长期稳定的现场监测, 采用最小二乘支

持向量机(LSSVM)与粒子群优化算法(PSO)对每一期围岩开挖变形进行位移反分析, 研究了围岩参数的动态反演规律。

1 工程概况及现场监测

1.1 仪器现场埋设

大岗山水电站地下厂房系统采用主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置, 三大洞室分9期进行开挖^[3]。针对地下厂房区域工程地质特征和岩体结构形态, 选取其中有代表性的、地质条件较差的2和4号机组中心线附近作为现场监测断面。每个断面布置4个变形跟踪测试孔, 共8个孔, 采用滑动测微计对岩体分段变形和裂隙张开变形进行测量^[4]。测试孔位置示意图如图1所示。

1.2 监测结果分析

第九期开挖完成后, 对滑动测微计变形测试孔的累积位移-孔深监测曲线进行了分析, 结果表明: 开挖卸荷将引起岩体的损伤^[5]。综合分析多个测试孔的监测数据, 结果表明: 地下厂房开挖面至岩体内4~6m范围岩体受开挖影响较明显, 变形明显大于深部岩

收稿日期: 2012-09-27

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”计划(2010CB732001); 国家自然科学基金项目(51009130; 51009131)

作者简介: 朱泽奇, 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhuzeqi2005@tom.com

体,力学参数明显降低,可将其定义为开挖损伤区;距开挖损伤区边界至岩体内 5 ~ 15 m 范围,岩体产生松弛变形,松弛由外向内呈渐变,表明力学参数也明显降低,可将其定义为卸荷影响区。

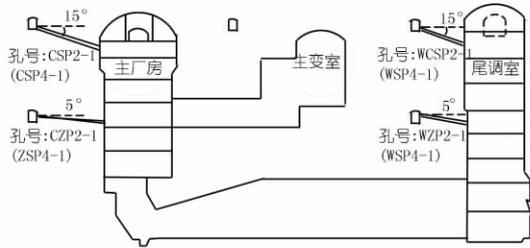


图 1 2(4)号机组剖面测试孔位置示意

2 围岩开挖变形反演分析

2.1 地质概化模型与计算区域

以 4 号机组剖面为例^[6],在分析区域内地表风化层考虑为全风化强卸荷层、强风化强卸荷层,取为 V 类围岩;弱风化卸荷层,取为 IV 类围岩;微风化卸荷层取为 III 类围岩;在计算区域中,考虑了辉绿岩脉 $\beta 80$ 、 $\beta 81$ 、 $\beta 6$ 、 $\beta 9$ 、 $\beta 163$ 、 $\beta 164$,以及伴随岩脉产生的 $f 57$ 、 $f 58$ 、 $f 59$ 和 $f 60$ 断层。断层和岩脉接触面采用节理单元模拟。 $\beta 80$ 、 $\beta 81$ 、 $\beta 163$ 、 $\beta 164$ 岩脉取为 IV 类围岩, $\beta 6$ 、 $\beta 9$ 岩脉取为 III 类围岩。图 2 为 4 号机组剖面地质概化模型。图 3 为地下厂房区域的网格划分及监测仪器位置示意图。

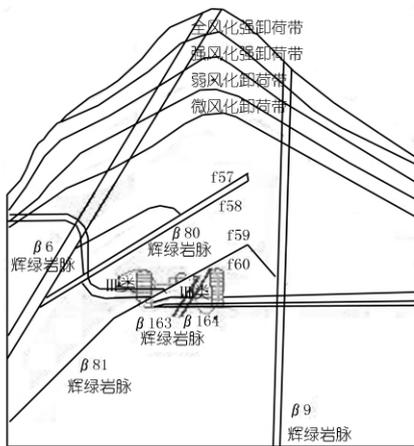


图 2 4号机组剖面地质概化模型

2.2 位移反分析过程

根据大岗山水电站工程地质报告^[7],本文选取了对地下厂房围岩变形影响较大的 8 个参数进行参数反演。II 类围岩(微风化 ~ 新鲜)的变形模量 $E1$ (15 ~ 25 GPa)、II / III 类围岩的变形模量 $E2$ (9 ~ 17 GPa)、III 类围岩(微风化)的变形模量 $E3$ (4 ~ 12 GPa)、IV 类围岩(弱风化)的变形模量 $E4$ (1.0 ~ 3.0 GPa)、垂

直厂房轴线方向的侧压力系数 Kx (0.5 ~ 0.9)、厂房轴线方向的侧压力系数 Kz (1.1 ~ 1.9)。另外,为了解围岩开挖损伤的影响,本文将开挖损伤区范围(4 ~ 6 m)和损伤区岩体变形模量(相对原岩力学性质下降 0 ~ 50%)也作为主要影响因素来进行反演。

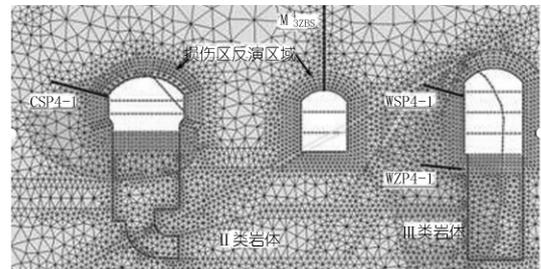


图 3 地下厂房区域的网格划分及监测仪器位置示意

参数反演的目标是由滑动测微计和多点位移计(为了保证反演分析的真实可靠,选取了一个靠近监测断面的多点位移计监测结果与计算结果进行对比验证,如图 4 中的主变室顶拱上的 M_{3ZBS}^4) 测试的轴向累积位移。按照正交设计原则构造计算样本,对每个参数取其可能的取值区间内的 5 个水平,得到 25 组试验组合方案。对于每一组试验数据的组合,采用弹塑性有限元软件 Phase2 进行正分析计算,求出各测试孔的轴向累积位移计算值。将得到的累积位移计算值作为一组结果,与对应的输入参数组合在一起,作为 LSS-VM 和 PSO 的位移反分析模型的一个学习样本,一共得到了 25 组样本,用于反分析模型的训练和检测。

2.3 反演分析结果

以地下厂房第九期开挖为例,将该期反演得到的参数代入 Phase2 有限元计算分析。图 4 给出了 4 号机组剖面在第九期开挖完成后的位移矢量及等色区图。由图可知:主厂房、主变室、尾调室的总体变形形态主要表现为拱顶继续下沉、开挖底面回弹,边墙向洞内变形;变形云图在断层处附近出现间断,靠近断层岩脉一侧洞室围岩变形偏大一些。主厂房、主变室、尾调室顶拱最大变形为 33, 39, 39 mm,在边墙处最大变形为 44, 33, 99 mm。

根据反演得到的参数代入 Phase2 计算出的各变形



图 4 开挖完成后位移矢量及等色区(单位:m)

监测孔的轴向累积位移值,由反演参数值经 LSSVM - PSO 的位移反分析模型外推得到的预测值,与实测位移值进行了对比,见表 1。由表 1 可知:对滑动测微计变形测试孔来说,用反演获取的参数经 Phase2 正向计算得出的位移量和监测得到的位移量在量值上基本相当,这说明采用的 LSSVM - PSO 优化反演分析方法在工程上是可行的,且效果较为显著。

表 1 第九期各监测孔监测值、反演参数正向计算值及 PSSVM - PSO 外推预测值对比 mm

测试孔	实测值	基于反演参数的	
		LSSVM - PSO 模型外推预测值	基于反演参数的 Phase2 计算值
CSP2 - 1	8.10	7.78	7.65
WSP2 - 1	8.17	7.82	7.65
WZP2 - 1	11.27	11.75	12.70
M35WTS	0.72	-	0.74
CSP4 - 1	8.84	8.12	7.86
WSP4 - 1	7.85	7.67	7.70
WZP4 - 1	16.49	16.65	16.60
M43ZBS	6.73	-	6.91

综合多次力学参数反演结果与现场岩体力学试验结果,可以认为:II 类围岩变形模量在 19 ~ 22 GPa, II / III 类围岩变形模量在 11 ~ 13 GPa, III 类围岩变形模量在 8 ~ 11 GPa, IV 类围岩变形模量在 2 ~ 3 GPa; 垂直厂房轴线方向的侧压力系数为 0.6 ~ 0.7, 厂房轴线方向的侧压力系数为 1.6 ~ 1.8; 开挖损伤区为开挖面至岩体内约 5 m 范围,损伤区内岩体变形模量下降约 10% ~ 30%。

3 围岩力学参数演化规律

将地下厂房每一期开挖完成时监测的轴向累积位移作为参数反演目标,基于建立的位移反分析模型反演得到 9 组围岩力学参数。图 5、6 分别为 2、4 号机组剖面反演参数计算结果,图中横坐标为大岗山地下厂房开挖周期,纵坐标为归一化的围岩弹模 (E_{ij}/E_{imax} , E_{ij} 表示第 i 类围岩在第 j 期开挖反演得到的弹模, E_{imax} 表示第 i 类围岩在所有九期开挖反演中的弹模最大值)。

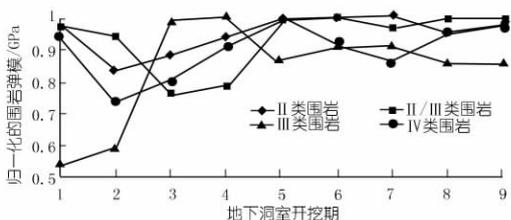


图 5 2 号机组剖面反演参数计算结果

由图可知:在地下厂房开挖的初期,各类围岩的反

演参数变化均较大;随着地下厂房向下部开挖,各类围岩的反演参数变化不大,趋于稳定;4 号机组剖面反演的 IV 类围岩弹模变化较大,是因为该剖面受岩脉 $\beta 81$ 和 $\beta 164$ 影响。总的来说,多次的岩体力学参数反演的结果差别不大,表明参数反演方法的科学性和局部地质条件的变化带来的差异。

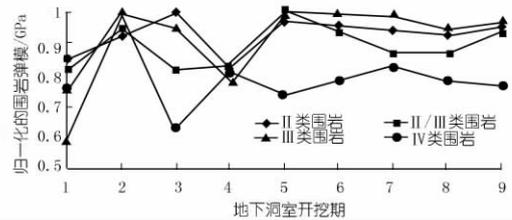


图 6 4 号机组剖面反演参数计算结果

4 结论

(1) 建立了 LSSVM - PSO 力学参数反演分析模型,基于该模型对地下厂房每一期的开挖进行了参数反演,将获取的参数代入有限元 Phase2 正向计算,得出的位移量和监测得到的位移量在量值上基本相当,这说明采用的 LSSVM - PSO 优化反演分析方法在工程上是可行的,且效果较为显著。

(2) 基于第九期的地下厂房开挖反演结果,研究了围岩力学参数动态演化规律:在地下厂房开挖的初期,各类围岩的反演参数变化均较大;随着地下厂房向下部开挖,各类围岩的反演参数变化不大,趋于稳定。同时,针对开挖损伤区的反演分析与实测成果较为吻合,对围岩开挖损伤演化规律的研究有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 付成华,秦卫星,陈胜宏,等. 地下洞室岩体力学参数反演软件系统开发与应用[J]. 岩土力学,2007,(3): 577 - 581.
- [2] 郭凌云,肖明. 地下工程岩体参数场反演分析应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增2): 3822 - 3826.
- [3] 邹凯,盛谦,张勇慧. 大岗山水电站地下洞室群施工过程数值模拟分析[J]. 水力发电,2009,35(7): 20 - 23.
- [4] 邓建辉,王浩,姜清辉,等. 利用滑动变形计监测岩石边坡松动区[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2): 180 - 184.
- [5] 王华宁,曹志远. 地下洞室开挖过程中洞周损伤分布的时变反演[J]. 力学季刊,2002,23(4): 471 - 479.
- [6] 张占荣. 裂隙岩体变形特性研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2010.
- [7] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 四川大渡河大岗山水电站可行性研究报告[R]. 成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2005,12.

(编辑:赵凤超)

(下转第 64 页)

(3) 在厂房开挖中,共完成 60 场次施工期爆破振动监测,取得有效数据 739 点次,爆破质点振动速度不大于 10 cm/s 的共 660 点次,占总点次 89.3%。

共进行了 6 个孔 25 m 的爆破影响深度检测,总计取得有效数据 125 组,平均波速衰减率为 9.5%。岩锚梁开挖共进行了 9 个孔 110.6 m 的爆破影响深度检测,总计取得有效数据 552 点次,平均波速衰减率为

2.0%。

主厂房开挖共进行了 20 个孔 195.8 m 围岩松动圈声波检测,围岩松弛深度为 0~3.8 m。岩锚梁开挖共进行了 9 个孔围岩松动圈声波检测,最大一孔松弛深度为 0.8 m,其它孔松弛深度均为零。

以上数据显示,地下厂房爆破控制效果明显,对围岩损伤较小。

(编辑:赵凤超)

Technology of excavating construction of underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station

XIE Changshui¹, ZHAO Rui¹, GU Qianqian²

(1. Hydrochina Beijing Engineering Cooperation, Beijing 100024, China; 2. Dagangshan Branch of Guodian Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Shimian 625409, China)

Abstract: In view of the structural features, geological conditions and influential factors during construction of the underground powerhouse system of Dagangshan Hydropower Station, the excavating quality of underground powerhouse is improved and the deformation of high sidewall is controlled effectively by the scientific excavating scheme made before excavation, reasonable layout of the construction channel, technical measures of controlling blasting influences, safety monitoring, immediate support and the advanced managing method during the process of excavation. All above provide much experience for similar excavation of underground powerhouse.

Key words: underground powerhouse; vibration velocity of particle; excavation zoning; Dagangshan Hydropower Station

(上接第 56 页)

Dynamic back analysis on excavation damage in surrounding rock of underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station

ZHU Zeqi, FU Xiaodong, SHENG Qian, ZHANG Yonghui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: For the excavation process of underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station, based on the orthogonal design method and LSSVM (Least Squares Support Vector Machine), PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm, the dynamic back analysis method considering excavation damage effect of surrounding rock has been established. Firstly, the sliding micrometer has been used to monitor the deformation of surrounding rock in construction period, and abundant filed data are obtained. Then, we took the surrounding rock's mechanical parameters as basic variables, designed a number of finite element calculation programs by orthogonal design method, and got the calculated displacements corresponding to the field monitoring points. Finally, we adopted intelligent algorithm to identify the mechanical parameters of surrounding rock. According to the construction progress, we obtained statistics for the mechanical parameter of rock mass at each excavation step to research the dynamic back analysis law of parameters of rock mass.

Key words: underground powerhouse; surrounding rock's excavation; deformation monitoring; damage evolution; dynamic back analysis; Dagangshan Hydropower Station

· 简 讯 ·

四川省华阳第一污水处理厂二期工程顺利通过竣工验收

2012 年 11 月 8 日,四川省双流县华阳第一污水处理厂二期工程通过竣工验收,成都市水务工程质监站、双流县水务局、规划局、财政局、环保局及设计单位、监理单位、地勘单位参加了此次验收会。华阳第一污水处理厂二期工程位于华阳街办广福社区,规模 3.96 万 t/d,该污水厂采用 CASS 处理工艺,出

水水质执行 GB18918-2002 一级 A 标。目前,该厂已进入试运行阶段,工程主要收集华阳老城区及航空港工业开发区三、四期污水,提高华阳片区污水收集处理能力。

(长江)