

大岗山水电站地下厂房洞室群围岩 开挖损伤区研究

朱泽奇, 盛 谦, 张勇慧, 李扬帆

(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:以大岗山水电站地下厂房洞室为研究对象,通过施工阶段的围岩力学性状测试、开挖变形长期监测研究地下洞室开挖损伤区的分布范围和损伤劣化特征。以围岩变形和损伤区实测成果为基础,建立基于正交设计-支持向量机-粒子群算法的反演分析方法。通过对地下厂房洞室开挖损伤区的测试与监测、反演分析表明,损伤区分布范围约为临空面向岩体内部 3~7 m 范围,其中,围岩类别不同,其损伤区分布范围不同,损伤劣化程度也不同,具体表现为围岩质量越好,其损伤范围越小,但是损伤区岩体损伤劣化程度越高。相关认识是初步的,对类似重大工程的设计施工有一定的参考价值,但还需要进一步开展理论与工程实践研究。

关键词:水利工程;大岗山水电站;地下厂房;围岩;开挖损伤区;反演分析

中图分类号: TV 31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)04-0734-06

RESEARCH ON EXCAVATION DAMAGE ZONE OF UNDERGROUND POWERHOUSE OF DAGANGSHAN HYDROPOWER STATION

ZHU Zeqi, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, LI Yangfan

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

Abstract: Taking underground powerhouse of Dagangshan hydropower station as the research object, distribution range and damage deteriorating characteristics of excavation damage zone(EDZ) of underground chambers are studied through mechanical properties testing and long-term monitoring of the surrounding rock mass at construction stage. Based on measured displacements and observed EDZ, a method of back analysis is established by using the orthogonal design, support vector machine and particle swarm optimization. By testing, monitoring and back analysis of the EDZ, it's found that the EDZ scope is within a range of 3-7 m; and different surrounding rock classes have different EDZ distribution ranges and different damage deterioration degrees. The results show that the better quality of surrounding rock mass is, the smaller scope of the EDZ is, and the higher damage deterioration degree of the EDZ is. The study which needs further theoretical and application research is preliminary; and it has certain reference value for design and construction of similar major projects.

Key words: hydraulic engineering; Dagangshan hydropower station; underground powerhouse; surrounding rock mass; excavation damaged zone; back analysis

收稿日期: 2012-10-30; **修回日期:** 2013-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732001); 国家自然科学基金面上项目(51009130, 51279202)

作者简介: 朱泽奇(1980-), 男, 博士, 2002年毕业于西安交通大学建筑与力学学院土木工程专业, 现任副研究员, 主要从事数值岩石力学与工程以及岩体力学参数等方面的研究工作。E-mail: zqzhu@whrsm.ac.cn

1 引言

岩体是一种复杂的地质体，通常情况下都处在复杂的应力状态下，承受三向应力的作用。在地下工程中，洞室开挖会形成新的临空面，这种开挖卸荷作用使其周围一定范围内的岩体应力场产生明显扰动，开挖临空面附近一定范围内岩体的力学性质发生明显变化，这些变化主要体现为岩体内部节理裂隙的扩展和贯通、岩体的声波波速的下降以及渗透系数增大等等。发生这种扰动的区域，一般称为开挖扰动区(excavation disturbed zone, EDZ)或开挖损伤区(excavation damaged zone)^[1]。在外界荷载作用下，扰动区可能会进一步发展演化，围岩将发生进一步的损伤，最终导致围岩失稳破坏，或渗透能力大幅度提高不符合工程要求。开挖引起的扰动区范围是评价工程开挖活动对环境影响的一个重要指标。研究开挖扰动区的特征及演化规律，对于优化支护参数、安全施工及评价工程稳定性和安全性是至关重要的，具有重要的现实意义和理论价值。

20 世纪 80 年代初，在放射性核废料地质贮藏安全性评价的过程中，EDZ 的研究逐渐引起了国外研究者的关注和重视，随后许多国家进行了大量的理论和现场试验研究以及监测、测试工作。其中最具有代表性的主要有：加拿大核能研究公司 AECL (Atomic Energy of Canada Limited)地下工程实验室 URL(Underground Research Laboratory)(1989 ~ 1996 年)针对 Lac du Bonnet 花岗岩开展的大量的现场试验及监测工作^[1-2]；T. Sato 等^[3]在日本的中部 Tono 矿区开展了关于 EDZ 的现场试验研究；瑞典核废料处理公司 SKB 以瑞典东南部 Äspö 岛的硬岩实验室(Hard Rock Laboratory)为基地开展了多种手段的试验与分析工作^[4-5]。董方庭等^[6]于 1970 年开始开展了 EDZ 的试验研究工作，把在围岩中发展的破裂区定义为松动圈，提出了以松动圈厚度为指标的巷道支护岩石分类方法、支护机制解释和支护参数确定方法，称之为松动圈支理论。近年来董方庭等^[6-13]采用微震监测、声发射、地质雷达、声波探测、钻孔摄像等技术手段分别对地下洞室、隧道和巷道围岩 EDZ 进行了监测测试，评估其范围和损伤程度。

在实测位移基础上，采用位移反分析的方法研究岩体开挖损伤区的范围及力学特性，近年来得到了迅速发展。倪绍虎和肖明^[14]结合“参数场”理论提出了考虑松动圈的围岩参数场增量位移反分析

法。董志宏等^[15]以乌江彭水水电站大型地下厂房为例，建立了基于均匀设计-神经网络-遗传算法的围岩力学参数的系统反分析方法。但是基于 EDZ 实测成果对开挖损伤区进行系统研究的工作目前较少见。

本文以大岗山水电站地下厂房洞室为研究对象，通过施工阶段的围岩力学性状测试、开挖变形长期监测以及基于监测成果的反演分析，研究了地下洞室 EDZ 的分布范围和损伤劣化特征，相关研究工作作为围岩支护参数设计的重要依据，取得了一定的社会效益，对类似重大工程的设计施工有一定的参考价值和借鉴意义。

2 EDZ 监测与测试

2.1 现场测试孔布置

大岗山水电站坝址位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县挖角乡境内，为大渡河干流规划的 22 个梯级中的第 14 个梯级电站。工程区域地形地貌复杂，区域地应力水平较高。其引水发电建筑物由电站进水口、4 条压力管道、地下厂房、主变室、尾水调压室、2 条尾水洞等组成。地下厂房系统埋深 500 ~ 600 m，采用主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置，岩柱厚度均为 47.50 m。主厂房开挖尺寸 206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高)。主变室开挖尺寸 144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高)。尾水调压室采用阻抗式，长 130.00 m，净跨 20.50 ~ 24.00 m，室高 75.08 m。

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[#]机组中心线附近进行现场监测断面。每断面布置围岩变形跟踪测试孔(以下简称变形孔)和力学形状测试孔(以下简称力学孔)各 4 个，相关测试孔布置见图 1。在变形孔中埋设测管(隔 1 m 布置一个测点)，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。力学孔布置方案与变形孔相同，在同一测试断面的相同测试部位，力学孔与变形孔平行，相距 5 ~ 10 m，采用声波、钻孔弹模和钻孔摄像等测试手段进行了围岩 EDZ 的测试研究工作。在主厂房、尾调室开挖中导洞期间主要测试孔的钻孔、测管埋设工作就已完成，由此本文获得了较为完整的围岩开挖变形监测数据和洞室开挖前、后的力学性状测试结果。

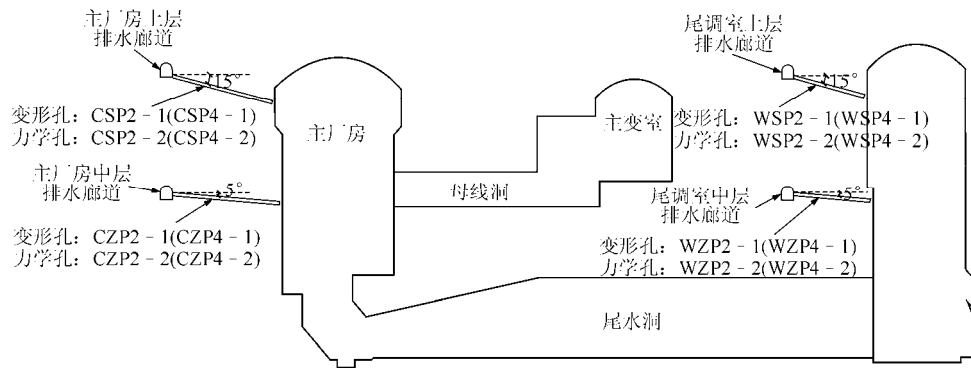


图1 2[#](4[#])机组剖面测试孔布置示意图

Fig.1 Testing hole arrangement of sections of unit #2 or #4

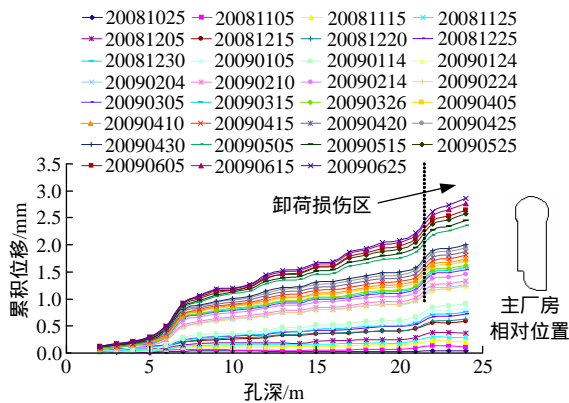
2.2 EDZ 开挖损伤特征

图2给出了2[#]机组剖面主厂房上层排水廊道变形孔的测点位移-孔深曲线。从图2(a)中可以看出,洞室开挖面至岩体内4~6m范围受开挖影响较明显,变形明显大于深处岩体;距开挖面5~15m范围,岩体变形表现为一个渐变过程。可见,沿孔深向主厂房临空面方向的围岩变形具有明显的分区特征,其他变形孔均表现为同样的变形规律。实际上,很多学者根据围岩这一开挖损伤特征进行EDZ

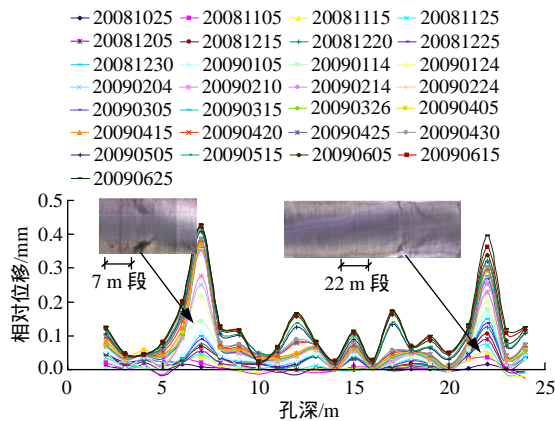
分区^[2-3],认为不同分区表现出的开挖扰动程度不同,力学性质劣化也不同。本文在前人研究的基础上,将EDZ分区为卸荷损伤区和卸荷影响区,这里的卸荷损伤区专指开挖面附近的EDZ。

图2(b)的测点相对位移曲线可以用来监测围岩原生裂隙的张开变形。从图2(b)中可以看出,CSP2-1变形孔主要在约7和22m处发生裂隙张开变形,这与埋设测管前进行的钻孔摄像拍摄到的地质信息较吻合。图2(b)中发生裂隙张开的范围可以较好地表征EDZ的分布,说明受开挖卸荷影响,围岩中一定范围内裂隙张开是EDZ的主要表现形式和形成原因。

图3和4分别给出了部分典型力学测试孔岩体波速和变形模量的测试结果。与开挖前相比,岩体平均波速降低2%~3%;开挖面附近有3~5m



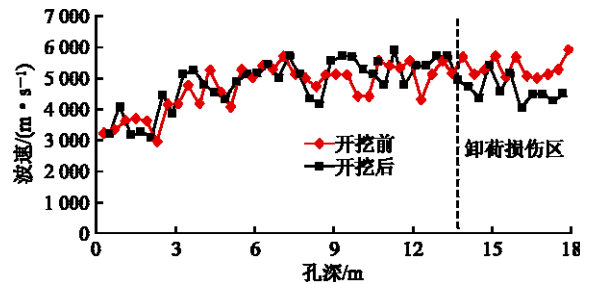
(a) 累积位移-孔深



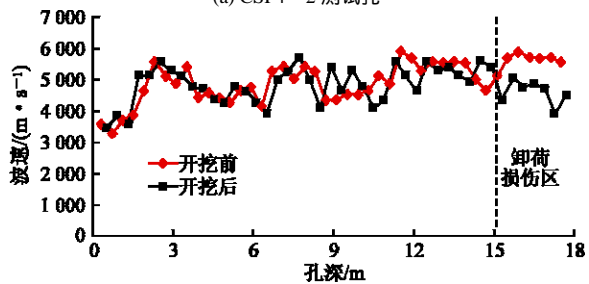
(b) 相对位移-孔深

图2 CSP2-1测试孔位移-孔深曲线

Fig.2 Displacement-hole depth curves of testing hole CSP2-1



(a) CSP4-2测试孔



(b) WSP4-2测试孔

图3 开挖前、后岩体波速-孔深曲线

Fig.3 Rock mass wave velocity-hole depth curves before and after excavation

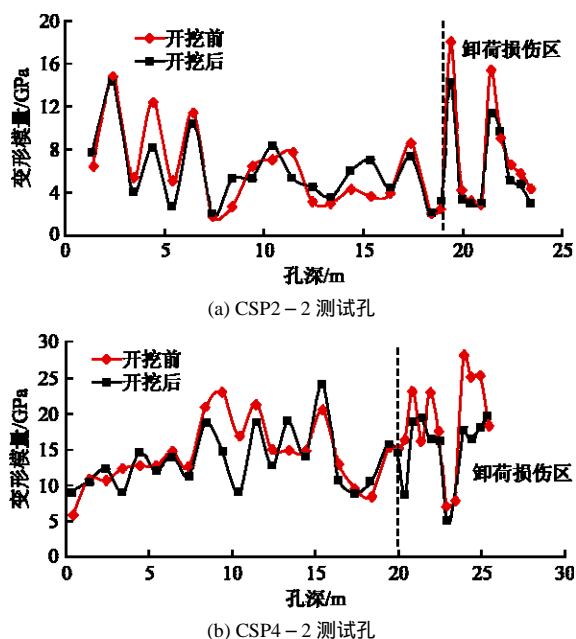


图 4 开挖前、后变形模量-孔深曲线

Fig.4 Rock mass deformation modulus-hole depth curves before and after excavation

范围内岩体波速有明显降低,平均波速可降低 10% ~ 20%,表明该区岩体性状弱化,其他区域岩体平均波速几乎不变。钻孔变形模量开挖前后测试结果表明,洞室开挖后围岩力学性质整体呈现下降趋势,各测试点岩体变形模量平均下降 4% ~ 14%;靠近开挖面附近 4 ~ 6 m 围岩变形模量下降明显,平均变形模量下降 15% ~ 25%。

综合分析 EDZ 开挖损伤变形监测与力学性状测试结果,可以认为,EDZ 内岩体松动开裂,整体变形具有分区特点,其中卸荷损伤区岩体受开挖影响强烈,变形显著,力学性质劣化明显;卸荷影响区岩体变形呈渐变特征,岩体力学性质变化不明显。值得注意的是,图 2(b)中的裂隙张开并不局限于卸荷损伤区内岩体,卸荷影响区内岩体也发生了程度不等的张开变形,为什么由此引起的岩体力学性质劣化却并不明显呢?这种情况至少可以说明一个方面的问题,即裂隙张开、岩体松动变形并不是围岩力学性质下降的唯一原因或主要因素。

3 EDZ 反演分析

3.1 反演分析方法

根据前文的实测成果可知,卸荷损伤区是客观存在的,损伤区的范围和力学特性弱化程度不仅与开挖尺度、岩性、地质结构、原状岩体力学特性有关,还受到开挖方式的影响,要准确获取损伤区范

围和损伤区岩体力学参数仅仅依靠现场测试中的若干测试孔是不够的,而反分析方法基于实测资料,可以考虑多种因素的影响,对围岩卸荷损伤区的研究具有明显优势。

由于传统位移反分析中的正分析计算量大、解的稳定性差,神经网络和遗传算法等逐渐被引入到位移反分析领域中,即利用神经网络建立的非线性模型来代替正分析中的数值计算,再利用遗传算法搜索与实测位移值最吻合的反演参数,该方法已经在智能反分析领域得到广泛应用^[16]。但是神经网络在反演过程中有泛化性能不高、易陷入局部极小点等缺陷。支持向量机(SVM)作为近年来发展起来的一种机器学习算法,它采用了结构风险最小化原则,具有全局优化、泛化性能好的特点,逐渐被应用在了位移反分析领域中^[17-18]。本文尝试采用最小二乘支持向量机(LSSVM)与粒子群优化算法(PSO)进行位移反分析。最小二乘支持向量机是标准 SVM 的一种新扩展,它采用等式约束代替标准 SVM 的不等式约束,将二次规划问题转化为线性方程组求解,有效降低了计算复杂性,加快了求解速度,增强了抗干扰能力,具有良好的泛化性能,在处理小样本、非线性问题上有独特的优势。而粒子群算法作为一种新型仿生进化算法,有收敛速度快,参数较少易确定等优点。基于正交设计和 PSO-LSSVM 的位移反分析流程如图 5 所示。

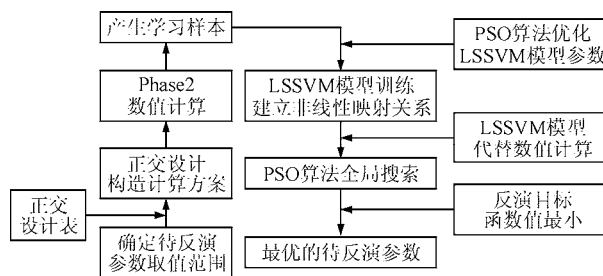


图 5 基于正交设计和 PSO-LSSVM 的位移反分析流程
Fig.5 Back analysis flowchart based on orthogonal design and PSO-LSSVM

3.2 计算条件

结合 EDZ 实测结果,开展二维有限元弹塑性反演分析。以 2#机组剖面作为反演计算剖面,计算剖面地质结构模型见图 6。根据地应力回归计算的结果^[19],初始地应力场考虑自重应力和构造应力。2#机组剖面用于反演的实测位移,取 CSP2-1, WSP2-1, WZP2-1 滑动变形孔和 M_{5WTS}³ 多点位移计埋设后下一开挖步至洞室开挖完成之间的位移增量。大岗山水电站地下厂房洞室共分 9 个开挖步,

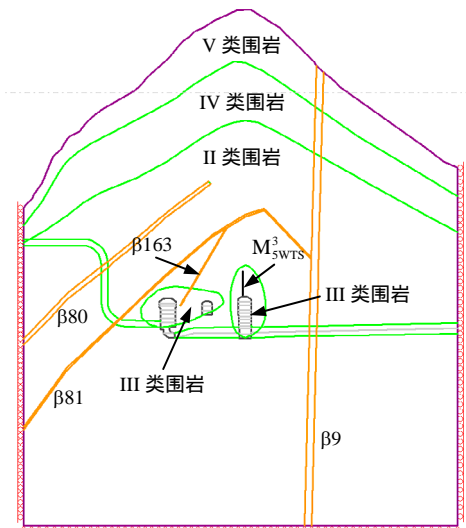


图6 地下厂房2#机组剖面地质概化图

Fig.6 Geological generalization section of unit # 2 of underground cavern

之所以选这个增量位移作为反演分析的目标值，是因为测试孔安装完成一段时间后，测点上布置的测标与围岩协同变形，测试数据稳定，这个阶段的监测位移可以较好地反映围岩的真实变形情况。测试孔位置见图1和7。

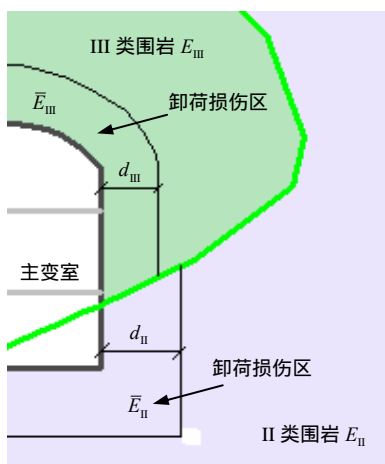


图7 卸荷损伤区及反演参数示意图

Fig.7 Sketch of unloading damage zone and inversion parameters

选取 II, III 类围岩变形模量、卸荷损伤区内 II, III 类围岩变形模量和 II, III 类围岩卸荷损伤区范围共 6 个变量为待反演参数，相关卸荷损伤区分布及反演参数表征见图 7。待反演参数的取值范围依据现场岩体力学参数建议值及前文中卸荷损伤区测试结果确定，分别为：II 类围岩 $E_{II} = 15 \sim 25$ GPa；III 类围岩 $E_{III} = 5 \sim 11$ GPa；卸荷损伤区内 II 类围岩 $\bar{E}_{II} = 10 \sim 20$ GPa；卸荷损伤区内 III 类围岩 $\bar{E}_{III} = 3 \sim 9$ GPa；卸荷损伤区边缘距临空面距离 $d = 3 \sim 7$ m。

在样本“试验”阶段，依据正交设计原则构造计算样本，对每个参数取其可能取值区间内的 5 个水平。按照正交试验设计给出 16 组试验组合方案(不包含一些不合理的组合值，例如 $\bar{E}_{II} > E_{II}$ 的情形)。每一组参数组合均采用 Phase2 进行计算，得到各变形孔和位移计开挖引起的位移增量，将其与计算参数组合在一起，作为 1 个学习样本，共得到了 16 组样本反分析模型的训练和检测。

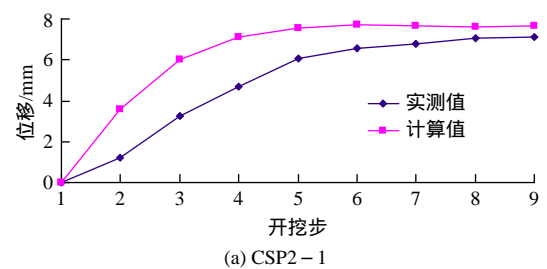
3.3 反演结果

基于分析样本，利用 PSO-LSSVM 方法建立 EDZ 与开挖实测位移之间的非线性映射关系，相关围岩力学参数与卸荷损伤区反演结果见表 1。将反演得到的参数代入 Phase2 正向计算，将测试点计算位移与实测位移进行对比(见图 8)，正演计算值与实测变形在初始几个开挖步有一定差距，但围岩变形发展趋势是一致的，这表明围岩在施工过程中的变形特征具有一定的时效性，随着开挖应力释放完成，后继开挖对上部围岩变形影响变小，此后围岩变形的计算值与实测值基本一致，说明本文采用的反演方法有效，模型概化基本合理，由此得到的 EDZ 反演结果可靠性较好。

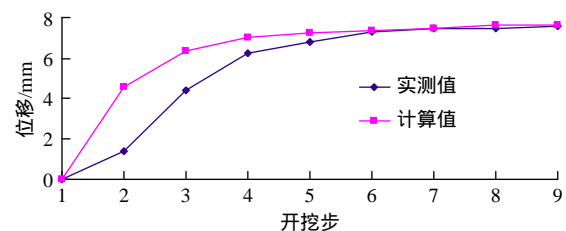
表1 反演分析结果

Table 1 Results of back analysis

E_{II} /GPa	E_{III} /GPa	\bar{E}_{II} /GPa	\bar{E}_{III} /GPa	d_{II} /m	d_{III} /m
21.7	9.5	15.4	7.7	3.6	6.5



(a) CSP2-1



(b) WSP2-1

图8 变形监测值与计算值对比图

Fig.8 Comparison of monitoring values and calculation results of surrounding rock mass deformation

表 1 中 II, III 类岩体的损伤区范围分别约为 3.6, 6.5 m；相比于原状岩体，卸荷损伤区中的 II, III 类岩体变形模量分别弱化了 29.0%和 18.9%，与

卸荷损伤区力学性状实测成果较一致。对比分析 II, III 类围岩卸荷损伤区反演结果,似乎可以认为围岩质量越好,其卸荷损伤范围越小,但是卸荷损伤区岩体损伤劣化程度越高。相关认识是初步的,还需要进一步开展理论与工程实践研究。

4 结 论

(1) EDZ 开挖损伤变形监测与力学性状测试结果表明,EDZ 内岩体松动开裂,整体变形具有分区特点,其中卸荷损伤区岩体受开挖影响强烈,变形显著,力学性质劣化明显;卸荷影响区岩体变形呈渐变特征,岩体力学性质变化不明显。围岩中一定范围内裂隙张开是 EDZ 的主要表现形式和形成原因,但却不是卸荷损伤区岩体力学性质下降的唯一原因或主要因素。

(2) 建立了基于正交设计-支持向量机-粒子群算法的反演分析方法。以围岩变形和卸荷损伤区实测成果为基础,进行了考虑卸荷损伤区影响的反演分析,分析表明,卸荷损伤区分布范围为临空面向岩体内部 3~7 m 范围,岩体变形模量劣化 1/5~1/3,与实测成果较一致,与前人的研究工作也较相符^[16]。研究中还发现当围岩质量越好,则其卸荷损伤范围越小,但是损伤区岩体损伤劣化程度越高。

相关认识是初步的,对类似重大工程的设计施工有一定的参考价值,但还需要进一步开展理论与工程实践研究。

参考文献(References) :

- 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) : 1 251 - 1 275.
- MARTINO J, CHANDLER N. Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8) : 1 413 - 1 426.
- SATO T, KIKUCHI T, SUGIHARA K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan[J]. *Engineering Geology*, 2000, 56(1/2) : 97 - 108.
- ANDERSSON J C, MARTIN C D. The Aspö pillar stability experiment : part I—Experiment design[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(5) : 865 - 878.
- ANDERSSON J C, MARTIN C D, STILLE H. The Aspö pillar stability experiment : part II—Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(5) : 879 - 895.
- 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. *煤炭学报*, 1994, 19(1) : 22 - 32.(DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(1) : 22 - 32.(in Chinese))
- PAUL Y R, MARTIN C D. Potential role of acoustic emission/microseismicity investigations in the site characterization and performance monitoring of nuclear waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7) : 797 - 803.
- FALLS S D, YOUNG R P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterize the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock[J]. *Tectonophysics*, 1998, 289(1/3) : 1 - 15.
- AUTIO J, SIITARI-KAUPPI M, TIMONEN J, et al. Determination of the porosity, permeability and diffusivity of rock in the excavation-disturbed zone around full-scale deposition holes using the ¹⁴C-PMMA and He-gas methods[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 35(1) : 19 - 29.
- MAXWELL S C, YOUNG R P, READ R S. A micro-velocity tool to assess the excavation damaged zone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(2) : 235 - 247.
- KWON S, LEE C S, CHO S J, et al. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1) : 1 - 13.
- 杨永杰, 刘传孝, 蒋金泉, 等. 巷道围岩松动圈的地质雷达探测及应用[J]. *工程地质学报*, 1997, 5(3) : 276 - 281.(YANG Yongjie, LIU Chuanxiao, JIANG Jinquan, et al. Fractured detection of rock zone in mine roadway with ground penetrating radar and its application[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1997, 5(3) : 276 - 281.(in Chinese))
- 靖洪文, 李元海, 梁军起, 等. 钻孔摄像测试围岩松动圈的机制与实践[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(5) : 645 - 649.(JING Hongwen, LI Yuanhai, LIANG Junqi, et al. Borehole camera technology for measuring the relaxation zone of surrounding rock : mechanism and application[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(5) : 645 - 649.(in Chinese))
- 倪绍虎, 肖明. 基于围岩松动圈的地下工程参数场位移反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(7) : 1 439 - 1 446.(NI Shaohu, XIAO Ming. Displacement back analysis of parameter field in underground engineering based on excavation damaged zone of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7) : 1 439 - 1 446.(in Chinese))
- 董志宏, 丁秀丽, 卢波, 等. 大型地下洞室考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(6) : 1 562 - 1 568.(DONG Zhihong, DING Xiuli, LU Bo, et al. Displacement back analysis of rock mechanical parameters of large-scale underground powerhouse with unloading surrounding rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6) : 1 562 - 1 568.(in Chinese))
- 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭, 等. 三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增) : 987 - 993.(SHENG Qian, DING Xiuli, FENG Xiating, et al. Displacement back analysis for the high slope of the Three Gorges Project considering the effect of excavation unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Supp.) : 987 - 993.(in Chinese))
- 赵洪波, 冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10) : 1 618 - 1 622.(ZHAO Hongbo, FENG Xiating. Study on genetic-support vector machine in displacement back analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10) : 1 618 - 1 622.(in Chinese))
- 许传华, 任青文, 周庆华. 基于支持向量机和模拟退火算法的位移反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(22) : 4 134 - 4 138.(XU Chuanhua, REN Qingwen, ZHOU Qinghua. Displacement back analysis based on support vector machine and simulated annealing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22) : 4 134 - 4 138.(in Chinese))
- 张勇慧, 魏倩, 盛谦, 等. 大岗山水电站地下厂房区三维地应力场反演分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5) : 1 523 - 1 530.(ZHANG Yonghui, WEI Qian, SHENG Qian, et al. Three dimensional back analysis for geostress of underground caverns of Dagangshan hydropower station[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5) : 1 523 - 1 530.(in Chinese))