

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0847

考虑洞室岩体应力型破坏特征的局部地应力反演方法及应用

裴书锋^{1,2}, 赵金帅^{2,3}, 于怀昌¹, 刘国锋^{2,4}, 夏跃林², 张 頔², 徐进鹏⁵

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 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; 3. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 5. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 介绍了一种考虑地下洞室片帮、钻孔剥落等岩体应力型破坏特征为信息源, 通过数值模拟智能反演方法预测高应力大型地下洞室群围岩局部应力场的新思路。该方法将地下洞室群片帮、钻孔剥落等应力型破坏的位置、深度或者宽度进行定量描述, 以弹性模型计算获得的常偏应力大于岩体启裂强度的范围来表示应力型破坏范围, 通过分析实测地应力数据约束部分地应力数量, 然后采用智能数值反演方法得到其他的地应力分量。采用该方法预测了白鹤滩水电站右岸地下厂房 0+76 断面附近围岩地应力场, 反演获得最大主应力在 34 MPa 左右。通过其他部位岩体破裂的数值模拟和观测结果对比, 验证了地应力场预测的合理性。

关 键 词: 地下洞室; 高地应力; 应力型破坏; 地应力反演; 数值反演

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2020) 12—4093—12

Inversion method for local in situ stress considering stress-induced damage of cavern surrounding rock and its application

PEI Shu-feng^{1,2}, ZHAO Jin-shuai^{2,3}, YU Huai-chang¹, LIU Guo-feng^{2,4}, XIA Yue-lin²,
ZHANG Di², XU Jin-peng⁵

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 5. China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: A new method is proposed for predicting the in situ stress of local surrounding rock of large underground cavern group in high stress, various stress-induced fracturing, such as spalling of caverns and borehole breakouts are considered as the inversion information. This method quantitatively describes the location, depth or width of stress-type failure such as sheet wall and hole spalling of underground caverns, represent by the range of constant deviatoric stress greater than crack initiation stress of rockmass according to the elastic model calculation. The value or direction of local in-situ stress could be constrained based on the law of the measured geo-stress data, and the other in situ stress component are predicted by simulation modeling intelligent inversion method. This method is applied to predict the natural stress of rockmass near chainage 0+76 of the right bank underground powerhouse of Baihetan hydropower station. The predicted maximum principal stress is about 34 MPa, and the prediction rationality of in situ stress is verified by fracturing characteristics in other position through comparison of numerical simulation and field observation.

Keywords: underground cavern; high in situ stress; stress-induced damage; in situ stress inversion; numerical simulation inversion

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-08-20

基金项目: 河南省自然科学基金(No.202300410269); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(No.201912015); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(No.192102310007)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Henan Province(202300410269), the Startup Foundation for Distinguished Scholars of North China University of Water Resources and Electric Power(201912015) and the Key R&D and Promotion Projects in Henan Province(Technical Research)(192102310007).

第一作者简介: 裴书锋, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事深部岩石力学与工程方面的研究。E-mail: peishufeng@ncwu.edu.cn

通讯作者: 于怀昌, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: yuhuaichang@ncwu.edu.cn

1 引言

我国西南地区特殊的地形地貌环境,使得水电、交通等工程建设遇到了越来越多的高应力问题,特别是在建的川藏铁路有许多埋深超过 2 000~3 000 m 的隧道,另外许多水电工程建设在复杂的高山峡谷区域,地质构造发育,局部地应力场变化剧烈,高地应力下地下洞室或者隧道围岩应力型破坏问题突出^[1-3]。相对准确的初始地应力研判对于地下工程开挖支护设计非常重要,受制于地应力测试数量的限制,传统的地应力反演很难准确预测地下工程附近的整个区域应力场^[4-6]。地下工程开挖后片帮、钻孔剥落等应力型破坏是高地应力地下洞室开挖后围岩直接的力学响应,可以根据应力型破坏特征进行初始地应力量值、方位的预测。

国内外已有学者根据地下洞室横剖面的岩体应力型破坏特征,通过数值反演方法来预测洞室横剖面的地应力场^[7-12],其中片帮、钻孔剥落等应力型破坏范围可以通过偏差应力达到某一常量来描述^[13-14]。但前人在地应力预测时关于竖直方向是一个主应力方向的假设,对于河谷地应力场及有特殊地质构造发育时是不符合的^[15-17]。因此,在复杂地质条件下,根据洞室岩体应力型破坏特征对岩体三维地应力场进行预测是值得研究的。

本文首先介绍一个基于洞室岩体应力型破坏特征的三维地应力反演方法,然后将该方法在白鹤滩水电站右岸地下厂房局部断面进行应用,验证其合理性。

2 三维地应力反演方法

本方法的主要特点在于在高应力背景下,以硬岩大型地下洞室附近的地质钻孔、探洞及地下洞室群的片帮、剥落等应力型破坏的特征,作为地下洞室附近局部地应力场的反演目标,结合已有的地应力实测数据等多源信息,通过约束及数值反演方法预测地下洞室附近的局部地应力场。

基于高地应力硬岩大型地下洞室岩体应力型破坏特征的局部三维地应力反演方法的具体流程如下:

(1) 应力型破坏信息统计:通过钻孔摄像、现场调查或者摄影测量等方法观测地下洞室开挖前或者开挖过程中岩体应力型破坏特征,包括钻孔剥落、洞室片帮等应力型破坏的位置、深度或者宽度等信息,对位置、宽度采用方位、角度等进行量化表达,并对数据进行统计分析。收集岩体应力型破坏

发生部位的地质资料和开挖、支护信息。其中钻孔轴线方向宜尽量垂直于洞室剖面上可能的最大主应力方向,钻孔深度宜结合工程布置考虑,且不宜小于洞径的 0.5~1 倍。理论上洞室群中有 3 个相互不平行断面上的应力型破坏特征即可预测三维地应力,当工程条件不满足时,需结合已有地应力数据等多源信息约束地应力分量。

(2) 实测地应力数据分析:收集工程区域已有的实测地应力数据并进行统计分析,研究地应力场随空间分布的变化规律,进而对部分地应力分量做出合理约束。

(3) 启裂强度确定:对取自钻孔岩芯或者洞室片帮破坏附近的岩样进行室内单轴声发射试验,根据声发射信号及应变曲线特征确定启裂强度,无声发射试验时,可以根据启裂应力与单轴抗压强度比(启裂强度比)在 0.3~0.5 附近进行确定^[13],也可以根据其他强度指标对启裂强度进行估计。

(4) 地应力场智能反演:采用正交设计-数值计算-进化神经网络-遗传算法的数值反演方法^[18],对未知的应力分量进行正交试验设计,构建不同的应力状态样本,采用弹性模型和常偏应力准则,计算不同应力状态样本对应的破坏范围。以实际观测的洞室岩体应力型破坏的位置、宽度作为反演目标,对未知的地应力分量进行反演。

(5) 地应力场验证:根据预测的地应力状态进行洞室开挖的数值模拟正算,并与洞室观测到的其他破坏现象进行对比分析,验证结果的合理性,必要时进行修正调整。

需要说明的是,本方法主要适用于硬岩、各向同性、岩体完整性较好,岩体结构为块状或者次块状结构的高应力大型地下洞室的岩体。应力型破坏主要指洞室片帮、钻孔剥落等压致拉裂破坏形式,破坏机制主要为拉破坏。地下洞室开挖后,围岩处于非弹性状态,但由于片帮或者剥落等破坏范围可以通过弹性模型下常偏应力范围来表示,故本方法适用于洞室开挖后已进入塑性或者破坏阶段的岩体。图 1 为地下洞室群局部围岩地应力反演方法的应用示意图。

3 方法应用

3.1 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县交界,属高山峡谷地貌,其两岸地下厂房的开挖尺寸均为 453 m×34 m×88.7 m(长×宽×高),采用分层分部开挖,右岸地下厂房机坑以上部

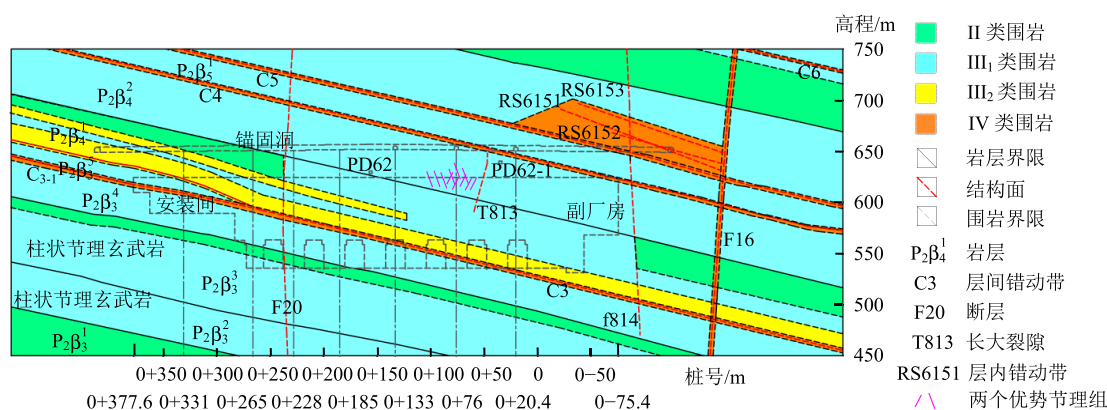
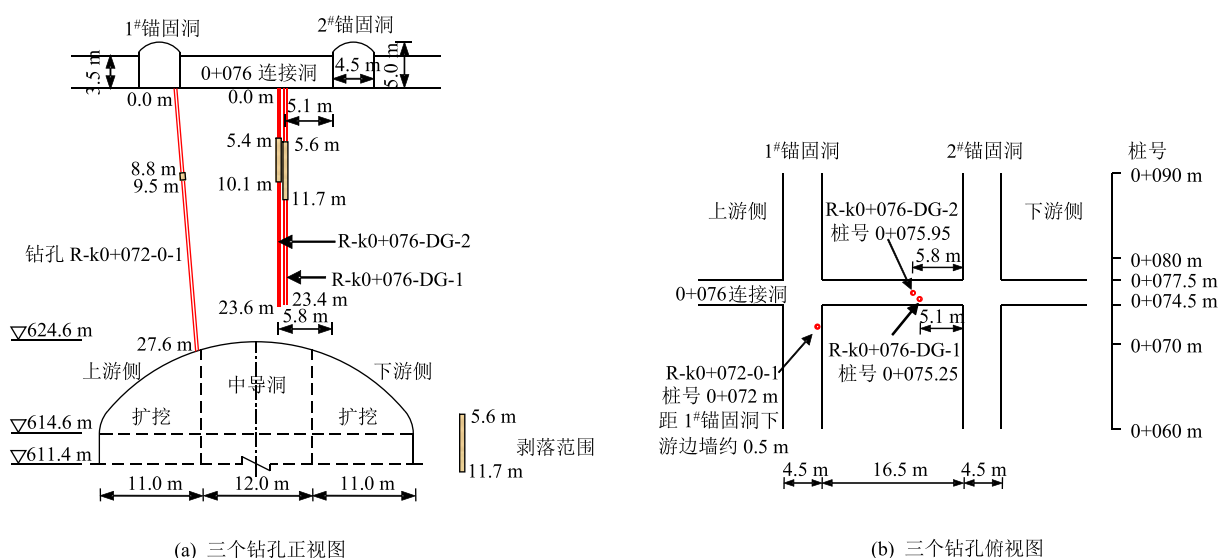


图3 白鹤滩水电站右岸地下厂房工程地质纵剖面图

Fig.3 Longitudinal engineering geological profile of underground powerhouse on right bank of Baihetan Hydropower Station



(a) 三个钻孔正视图

(b) 三个钻孔俯视图

图4 三个钻孔的空间位置及剥落范围

Fig.4 Spatial arrangement and breakout range of three boreholes

开挖时上游侧拱肩发生了大量的片帮破坏, 片帮深度约 0.3~0.8 m; 厂房 III 层开挖时, 桩号 0+40~0+140 上游侧拱肩喷层开裂; 厂房 III 层、IV 层开挖时, 2#锚固洞 0+80~0+170 m 段上游侧拱喷层开裂, 0+76 连接洞临近 2#锚固洞附近正顶拱岩体片帮等, 上述破坏现象参见图 7。

3.3 实测地应力数据分析

中国电建华东勘测设计研究院和长江科学院在地下厂房附近的前期探洞中采用水压致裂法和应力解除法进行了三维地应力测试, 测试结果较为合理的钻孔共 5 个, 分别为 DK4、DK5、DK6、 σ_{zk9} 和 σ_{zk16} , 各钻孔及勘探洞的位置参见图 8。其中 PD62-3 和 PD62-4 轴线平行厂房轴线, 图中桩号为对应厂房断面的桩号, 在 5 个探洞中均出现了片帮现象, 其中探洞 PD62-2 靠近探洞 PD62-3 侧及 PD62-2 中临近厂房 0+76 断面附近片帮程度较为严

重, 达到了 4~5 级。表 1 为各孔三维地应力的测试结果, 可见各测点最大主应力方位角均在 NE 方向, 但分布较为离散, 平均值约为 N38°E, 最大主应力量值在 22 MPa 左右, 最大主应力 σ_1 的倾角集中在 0°~18°, σ_2 和 σ_3 的方位角均在 90°~180°之间, 而倾角的变化较大, σ_3 的量值主要集中在 7.0~11.5 MPa。DK4、DK5 和 DK6 三孔还进行了二维水压致裂地应力测试, DK4 和 DK5 的最大水平主应力均在 31 MPa 左右^[19]。

3.4 隐晶玄武岩启裂强度确定

隐晶玄武岩启裂强度根据 Martin^[12]、Lim^[20]和 Jiang^[7]等的研究成果综合确定, 即启裂强度为 0.4 倍的单轴抗压强度, 岩芯厚径比与切向应力/抗拉强度的比值 (σ_1/σ_t) 成负指数关系, 以及基于 Hoek-Brown 准则的启裂强度等 3 种方法, 其计算的主要步骤参见图 9。其中单轴抗压强度的确定分

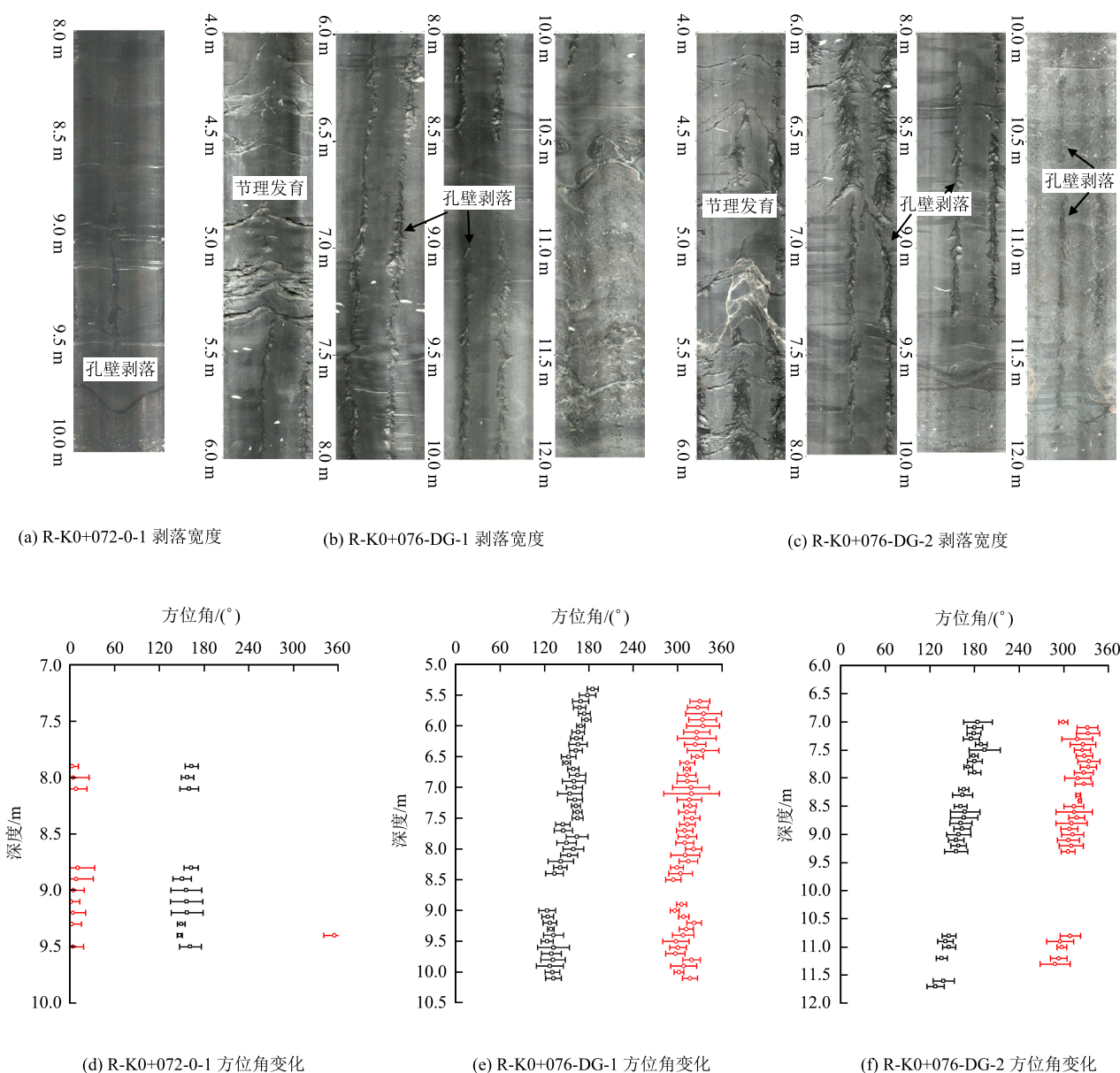


图 5 三孔初始孔壁剥落宽度及方位角沿孔深变化

Fig.5 Variation of initial spalling width and azimuth angle of three-hole wall along hole depth

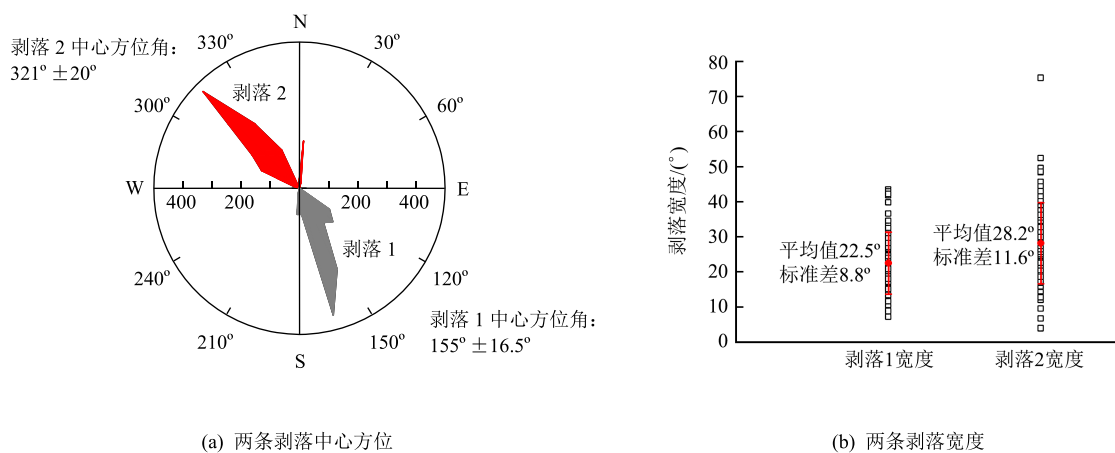


图 6 两条剥落中心方位角及剥落宽度统计

Fig.6 Statistics of azimuth angle and flaking width of two flaking centers

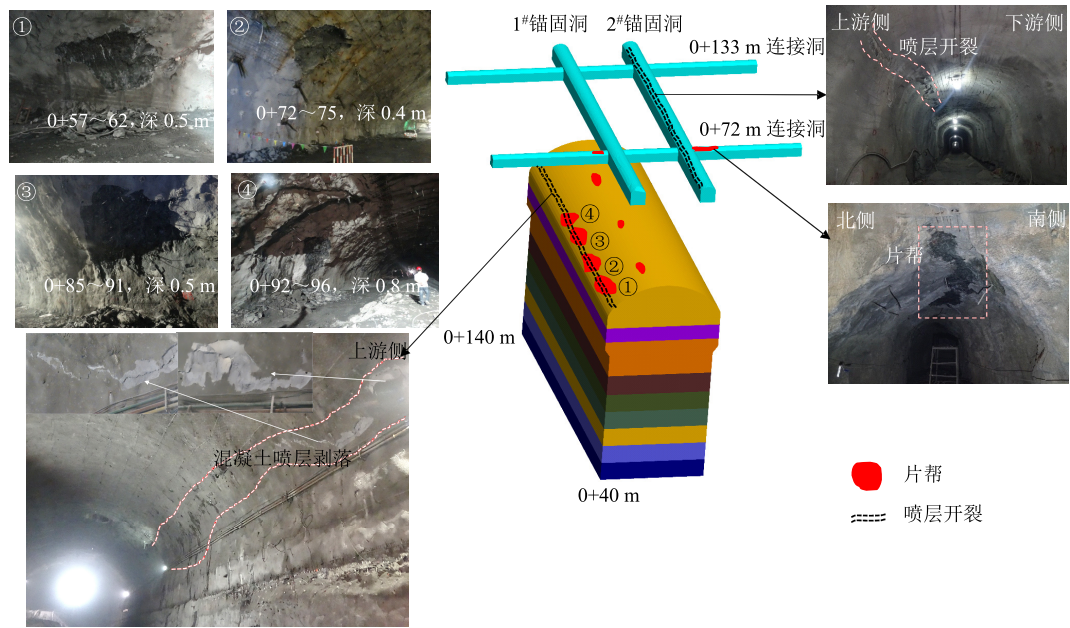


图 7 0+76 附近厂房与辅助洞出现的应力型破坏
Fig.7 Stress-type failure of rockmass in cavern and auxiliary tunnels near chainage 0+76

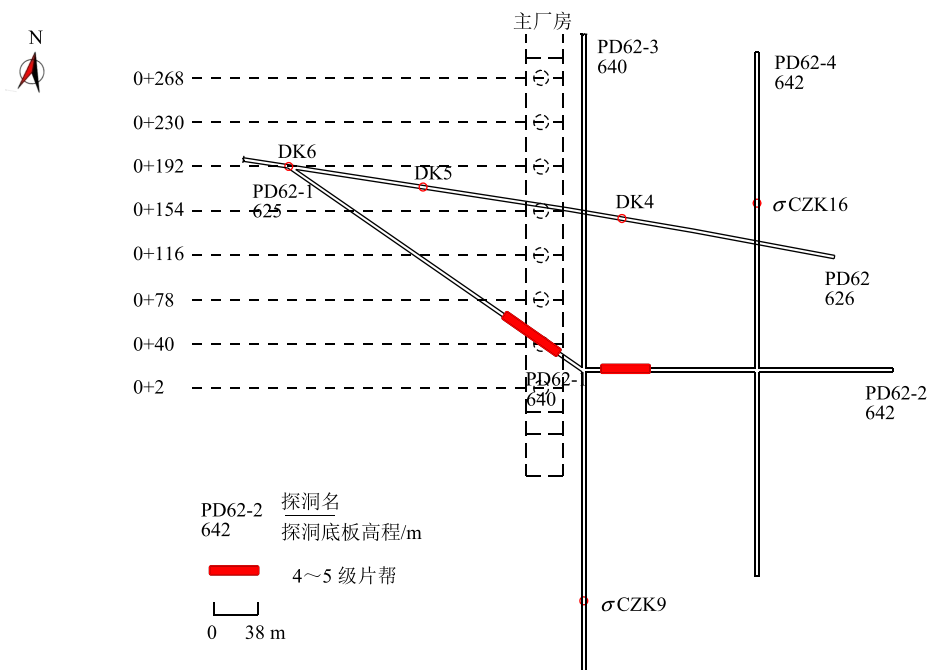


图 8 探洞及地应力测试钻孔位置 (修改自文献[7]和文献[19])
Fig.8 Location of exploration cavities and measuring borehole of in situ stress (revised from references [7] and [19])

表 1 实测三维地应力^[19]
Table 1 Three-dimensional in situ stress from field measurement^[19]

测试方法	测点	岩性	高程/m	埋深/m	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	σ_1 方位角/(°)	σ_1 倾角/(°)	σ_2 方位角/(°)	σ_2 倾角/(°)	σ_3 方位角/(°)	σ_3 倾角/(°)
水压致裂	DK4	斜斑玄武岩	622	506.0	21.14	8.58	5.15	31.7	1.5	122	13.3	115.6	-76.6
	DK5	隐晶玄武岩	626	512.4	21.25	14.83	11.50	4.4	8.0	89.9	-29.2	108.2	59.5
	DK6	隐晶玄武岩	625	455.4	22.88	16.07	6.86	30.9	11.0	129.4	37.2	107.2	-50.6
深孔应变解除法	σ_{zk9}	微晶玄武岩	643	404.0	22.88	16.07	6.86	30.9	11.0	129.4	37.2	107.2	-50.6
	σ_{zk16}	角砾熔岩	644	513.0	19.21	11.42	8.67	79.5	-8.6	160.9	44.8	177.9	-43.9
	σ_{zk16}	角砾熔岩	644	513.0	21.72	13.03	9.43	49.5	16.6	119.3	-49.3	151.9	35.9

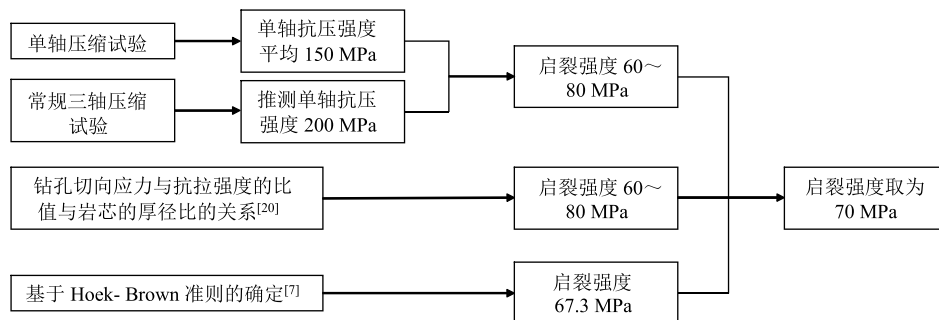
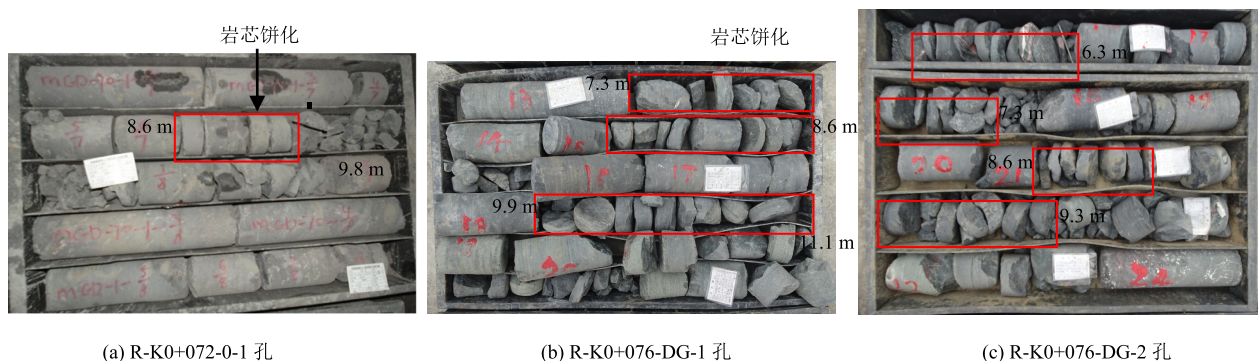


图 9 玄武岩岩体片帮强度的确定

Fig.9 Determination of spalling strengths of basalts



(a) R-K0+072-0-1 孔

(b) R-K0+076-DG-1 孔

(c) R-K0+076-DG-2 孔

图 10 三孔孔壁剥落处出现的岩芯饼化

Fig.10 Core diskings corresponding to breakouts in three boreholes

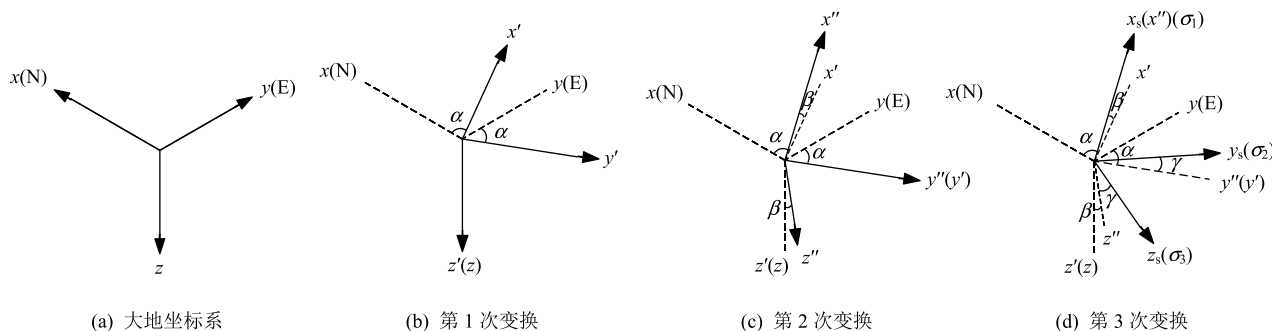
别采用了单轴压缩试验和常规三轴试验结果推断而得, 单轴抗压强度为 150~200 MPa, 得启裂强度为 60~80 MPa。3 个钻孔中具有饼化特征的岩芯参见图 10, 岩芯厚度基本在 2.72 ± 0.79 cm, 厚径比为 0.31 ± 0.09 , 切向应力与抗拉强度比值在 7~8 之间, 玄武岩抗拉强度为 6~9 MPa^[21], 计算得到最大切向应力在 42~72 MPa。Jiang 等^[7]根据 Hoek-Brown 准则得到的启裂强度约为 67.3 MPa。故隐晶玄武岩启裂强度可取为 70 MPa。

3.5 地应力场智能反演

根据 3 个钻孔内孔壁剥落的埋深及相邻高程 σ_3 在 7~11.5 MPa 之间, 且 σ_3 小于覆重, 故钻孔剥落

部位的 σ_3 可假定为 10 MPa。

主应力坐标系是由大地坐标系先绕 z 轴顺时针旋转 α 角 ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$), 再绕新的 y' 轴顺时针旋转 β 角 ($-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$), 再绕第 2 次新的 x'' 轴顺时针旋转 γ 角 ($0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$) 而形成的。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 α 、 β 、 γ 确定了一个主应力状态, 主应力旋转的坐标图示参见图 11。通过分析可知 α 为 σ_1 的方位角, β 为 σ_1 的倾角, 故 $\alpha = 58^\circ$, 基于实测结果可得 β 取值范围为 $0^\circ \sim 18^\circ$ 。由实测的 σ_2 和 σ_3 的方位角都在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 根据 3 个主应力的正交关系可判定 γ 在 $270^\circ \sim 360^\circ$ 之间。主应力状态待求量为 σ_1 、 σ_2 、 β 和 γ , 以两个剥落的宽度和中心方位角,



(a) 大地坐标系

(b) 第 1 次变换

(c) 第 2 次变换

(d) 第 3 次变换

图 11 大地坐标系向主应力坐标系的转换过程

Fig.11 Conversion process from geodetic coordinate system to principal stress coordinate system

以及厂房开挖过程中厂房和 0+76 连接洞的破坏位置作为反演目标,通过进化神经网络-遗传算法反演确定待求量的值,锚固洞的破坏位置用于应力状态确定后的结果验证。

建立两个数值计算模型,一个为仅包含单个竖直钻孔的精细模型,另外一个为包含厂房、锚固洞和钻孔的复杂数值模型。精细模型的尺寸为 1 m (x 方向) $\times$ 1 m (y 方向) $\times$ 2 m (z 方向),其中 x 轴以正东方向为正, y 轴以正北方向为正, z 轴竖直向上为正,平行钻孔轴线,计算时沿 z 轴方向开挖 $-0.5 \sim -1.5$ m,以 -1.0 m 剖面为观测平面。复杂模型宽为 300 m (x 方向),高为 350 m (z 方向),沿轴线方向为 200 m (y 方向), y 轴平行厂房轴线,以指向大桩号方向为正, x 轴指向厂房下游侧为正, z 轴竖

直向上为正,厂房、锚固洞和锚动带等置于复杂模型中,沿轴线方向前后各预留 50 m 消除边界效应。按照厂房开挖顺序模拟开挖过程,计算后厂房以 $y = 30$ m 断面为观测平面(对应 0+76 桩号), 0+76 连接洞以 $x = 14$ m 断面为观测平面(距 2#锚固洞轴线为 2.5 m), 2#锚固洞以 $y = 50$ m 为观测平面(对应桩号 0+96),两个计算模型参见图 12。

以 σ_1 、 σ_2 、 β 和 γ 为变量,采用正交试验设计构建试验样本和测试样本,得到不同的初始地应力状态。岩体和锚动带均采用线弹性本构模型,岩体弹模取为 13.75 GPa,泊松比为 0.26,锚动带的弹模为 6 GPa,泊松比为 0.32。以偏应力大于 70 MPa 的范围作为片帮的范围,偏应力 70 MPa 等值线与钻孔边界的两个交点之间的弧长为剥落范围,偏应力

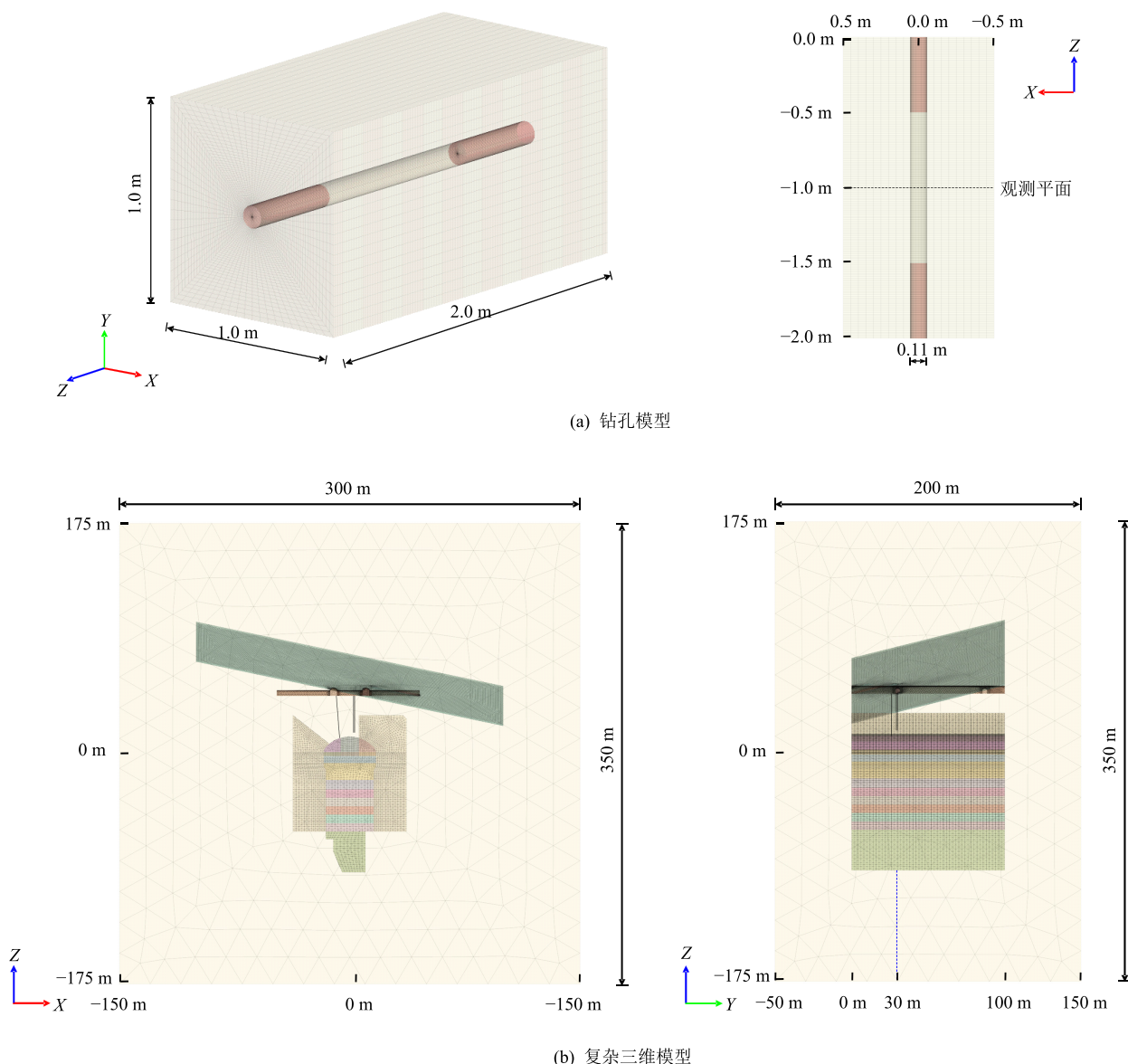


图 12 两个数值计算模型

Fig.12 Two numerical simulation model

70 MPa 等值线距钻孔中心最远点与钻孔中心的连线的方位角作为剥落中心方位角。

为计算方便，将厂房和 0+76 连接洞破坏位置中心进行数值化描述，提出破坏位置中心系数 D 。厂房应力集中区中心自上游侧拱脚向正顶拱变化时， D 自 0.5 逐渐变为 2，间隔为 0.5。对于 0+76 连接洞，应力集中区中心自南侧拱脚向北侧拱脚变化时， D 由 0 逐渐变为 2，应力集中区位置及对应

的破坏位置中心系数 D 参见图 13，数值计算得到的破坏位置中心系数可根据位置内插。故反演时厂房破坏位置中心系数 D 设为 1.2，0+76 连接洞破坏位置中心系数 D 为 1.0。各应力状态对应的孔壁剥落宽度、剥落中心方位角以及厂房和 0+76 连接洞的应力集中区位置等计算结果参见表 2。在采用遗传算法智能反演时钻孔剥落宽度、剥落中心方位角的权重为 0.3，厂房应力集中区位置的权重为 0.25，

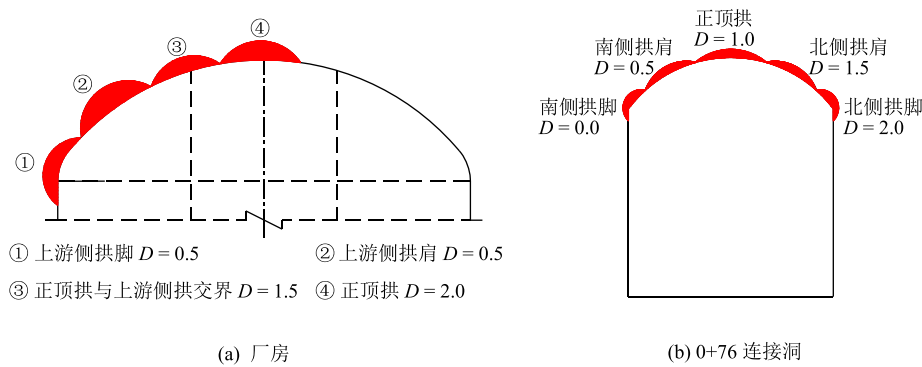


图 13 厂房、锚固洞和 0+76 连接洞应力集中区位置图示

Fig.13 Stress concentration zone of cavern, anchoring tunnel and 0+76 connecting tunnel

表 2 各计算样本对应的钻孔剥落宽度、剥落中心方位角及厂房、0+76 连接洞应力集中位置

Table 2 Corresponding spalling width, azimuth angle of spalling center and stress concentration position of powerhouse and 0+76 connecting tunnel for each calculated sample

样本类型	样本编号	变量				计算结果				
		σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$	孔壁最大偏应力 /MPa	剥落中心方位角 / $(^{\circ})$	剥落宽度 / $(^{\circ})$	厂房应力 集中位置	连接洞应力 集中位置
试验样本	1	28	15	0	270	64.92	150.7	0.0	2.00	1.80
	2	28	19	6	300	62.17	146.2	0.0	1.35	1.75
	3	28	23	12	330	55.31	137.2	0.0	1.40	1.50
	4	28	27	18	360	51.71	56.2	0.0	1.35	0.70
	5	32	15	6	330	71.37	150.7	16.4	1.80	1.35
	6	32	19	0	360	68.63	150.7	0.0	2.00	1.25
	7	32	23	18	270	71.20	146.2	14.4	0.65	0.10
	8	32	27	12	300	69.79	141.7	0.0	0.70	1.80
	9	36	15	12	360	79.41	150.7	44.6	1.60	0.50
	10	36	19	18	330	73.04	146.2	29.5	1.35	0.50
	11	36	23	0	300	83.58	150.7	50.8	1.75	1.80
	12	36	27	6	270	84.63	150.7	50.4	0.60	1.90
	13	40	15	18	300	86.44	146.2	56.9	1.35	0.15
	14	40	19	12	270	92.59	150.7	60.1	1.50	0.05
	15	40	23	6	360	85.98	150.7	66.2	1.90	1.00
	16	40	27	0	330	87.07	150.7	67.7	1.85	1.70
测试样本	1	30	17	3	285	69.32	150.7	0.0	1.75	1.75
	2	30	21	9	315	64.10	146.2	0.0	1.35	1.70
	3	30	25	15	345	56.42	141.7	0.0	1.40	0.90
	4	34	17	9	345	73.85	150.7	30.3	1.65	1.10
	5	34	21	15	285	75.39	146.2	34.3	0.95	1.80
	6	34	25	3	315	74.65	150.7	34.9	1.50	1.75
	7	38	17	15	315	82.13	146.2	51.8	1.40	0.75
	8	38	21	3	345	83.22	150.7	58.0	1.85	1.30
	9	38	25	9	285	87.91	146.2	56.7	1.00	1.80
实测值							148.0	25.0	1.20	1.00

注：最大偏应力小于 70 MPa 时，剥落宽度为 0；剥落中心方位角指的是最大偏应力处对应的方位角。

0+76 连接洞的应力集中区位置权重为 0.15。

通过反演得到 $\sigma_1 = 34.0$ MPa, $\sigma_2 = 17.0$ MPa, $\beta = 15.5^\circ$ 和 $\gamma = 316^\circ$ 时, 计算值与观测结果最为接近, 图 14 显示了此主应力状态下, 钻孔、厂房、锚固洞和 0+76 连接洞在厂房不同开挖时期的偏应力场分布。此时钻孔剥落的中心方位角为 146.2° , 剥落宽度为 21.1° , 厂房 I 层顶拱应力集中区位于上游侧拱肩偏向正顶拱和上游侧拱交界, 厂房三层开挖后上游侧拱应力集中进一步增强, 厂房 IV 层开挖

后 0+76 连接洞沿厂房轴线的应力集中区位于正顶拱, 而 2#锚固洞应力集中区位于上游侧拱肩, 说明此主应力状态基本反映了实测结果。

3.6 地应力场验证

采用应变软化模型进行数值模拟正算, 地下厂房 III 层开挖后 k0+76 断面上游顶拱围岩的塑性区深度接近 9 m, 参见图 15, 而现场实测的岩体破裂深度达到了 8.8 m^[22], 见图 16。数值模拟计算结果与现场实测结果较为接近, 说明反演预测得到的地

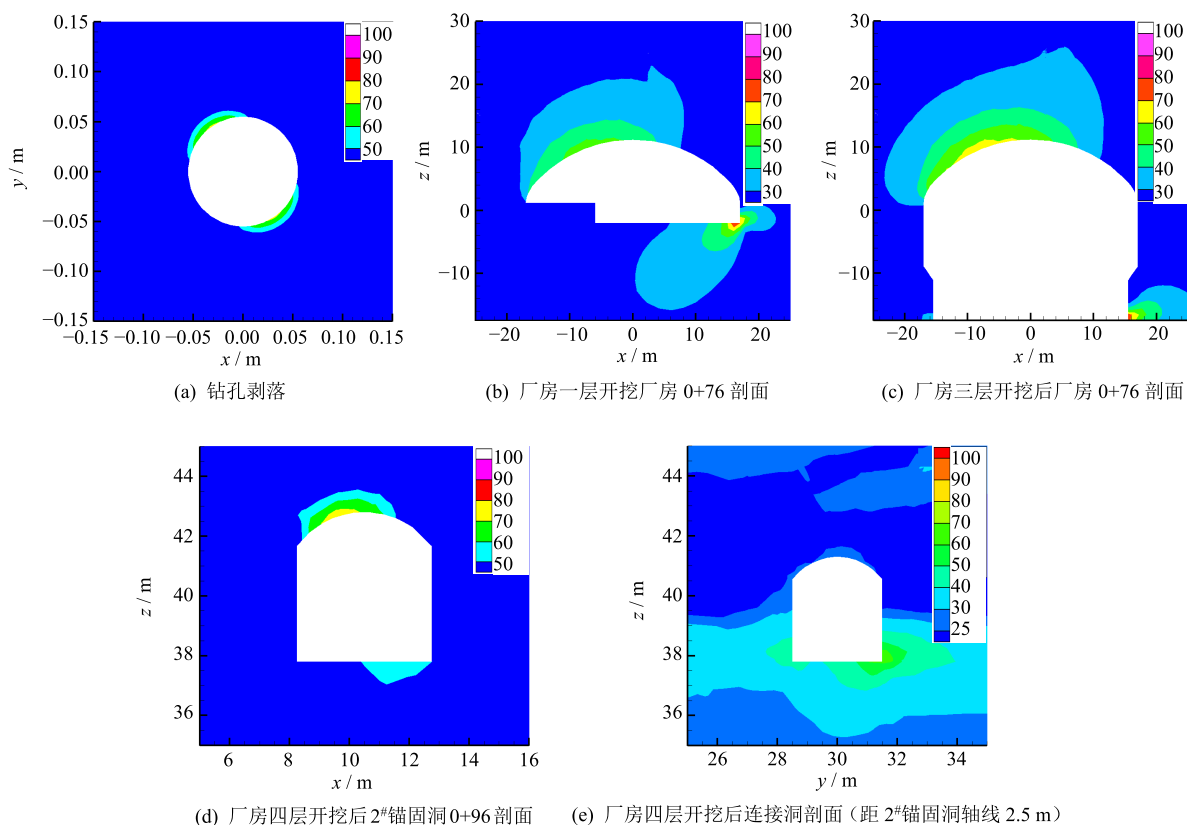


图 14 钻孔、厂房、锚固洞和连接洞围岩偏应力场 (单位: MPa)

Fig.14 Deviatoric stress distribution of borehole, cavern, anchorage tunnel and connecting tunnel(unit: MPa)

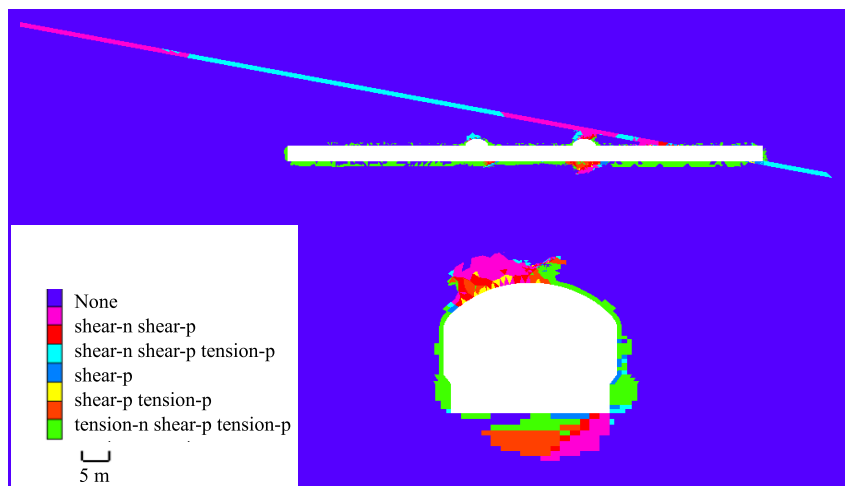


图 15 地下厂房 III 层开挖后围岩塑性区

Fig.15 Plastic zone of rock mass after excavation of layer III

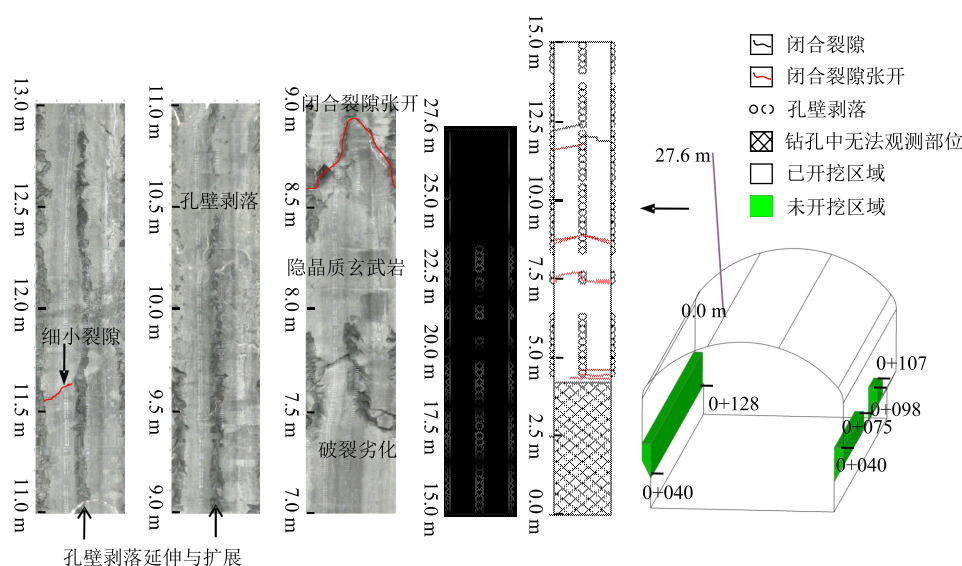
图 16 地下厂房 III 层开挖后岩体破裂钻孔摄像展布图^[22]

Fig.16 Borehole camera picture of rock fracturing of borehole after excavation of layer III

应力状态与厂房 0+76 断面附近的真实地应力状态较为接近。

4 结 论

(1) 提出了一种以洞室片帮、钻孔剥落等洞室应力型破坏特征为信息源，以实测地应力数据分析为约束条件，通过数值计算智能反演确定洞室地应力场的新方法。该方法特别适用于高应力大型地下洞室群的局部地应力场反演。

(2) 根据洞室片帮、钻孔剥落方位可以约束三维或者剖面上最大地应力方位；通过分析实测地应力数据反映的规律，可以约束部分地应力分量的量值、方位；尽可能地利用互不平行的洞室片帮等应力型破坏信息。这些处理方式有利于更精确地预测地应力分量。

(3) 通过应用本方法，得到白鹤滩水电站右岸厂房 0+76 断面顶拱围岩附近的最大主应力方位角为 $N58^{\circ}E$ ，倾角为 15.5° ，量值约为 34 MPa。

致谢：感谢中国三峡建设管理有限公司王鹏飞、陈浩和中国电建集团华东勘测设计研究院的方丹、王鹏等同志提供的基础资料及在钻孔过程中的帮助。

参 考 文 献

- [1] 蒙伟, 何川, 汪波, 等. 基于侧压力系数的岩爆区初始地应力场二次反演分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4191-4200, 4209.
MENG Wei, HE Chuan, WANG Bo, et al. Two-stage back analysis of initial geostress field in rockburst area based on lateral pressure coefficient[J]. *Rock and Soil*

Mechanics, 2018, 39(11): 4191-4200, 4209.

- [2] 黄书岭, 丁秀丽, 廖成刚, 等. 深切河谷区水电站厂址初始应力场规律研究及对地下厂房布置的思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2210-2224.
HUANG Shu-ling, DING Xiu-li, LIAO Cheng-gang, et al. Initial 3D geostress field recognition of high geostress field at deep valley region and considerations on underground powerhouse layout[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2210-2224.
- [3] 徐佩华, 黄润秋, 陈剑平, 等. 锦屏复杂结构谷坡应力场反演模拟与特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 329-337.
XU Pei-hua, HUANG Run-qiu, CHEN Jian-ping, et al. Inverse modeling of stress field of valley slope of Jinping complex structure and characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Suppl.2): 329-337.
- [4] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破环迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 811-817.
WANG Bo, HE Chuan, WU De-xing, et al. Study on modification of geostress and forecast of rockburst based on destructive size of rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 811-817.
- [5] 梅松华, 盛谦, 冯夏庭, 等. 龙滩水电站左岸地下厂房区三维地应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4006-4011.
MEI Song-hua, SHENG Qian, FENG Xia-ting, et al. Back analysis of 3D in-situ stress field of underground powerhouse area of Longtan hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004,

- 23(23): 4006-4011.
- [6] 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): 1523-1530.
- ZHANG Yong-hui, WEI Qian, SHENG Qian, et al. Three dimensional back analysis of geostress field in underground powerhouse zone of Dagangshan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1523-1530.
- [7] JIANG Q, FENG X T, CHEN J, et al. Estimating in-situ rock stress from spalling veins: a case study[J]. **Engineering Geology**, 2013, 152(1): 38-47.
- [8] 张宜虎, 卢轶然, 周火明, 等. 围岩破坏特征与地应力方向关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3526-3535.
- ZHANG Yi-hu, LU Yi-ran, ZHOU Huo-ming, et al. Study of relationship between failure properties of surrounding rock and direction of geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.2): 3526-3535.
- [9] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 52: 139-162.
- [10] HAIMSON B C, LIN W, OKU H, et al. Integrating borehole-breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan[J]. **Tectonophysics**, 2010, 482(1-4): 65-72.
- [11] VERNIK L, ZOBACK M D. Estimation of maximum horizontal principal stress magnitude from stress-induced well bore breakouts in the Cajon Pass Scientific Research borehole[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1992, 97(B4): 5109-5119.
- [12] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(2): 219-228.
- [13] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(1): 136-151.
- [14] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(5): 833-847.
- [15] 江权, 冯夏庭, 李邵军, 等. 高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1081-1101.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, LI Shao-jun, et al. Cracking-restraint design method for large underground caverns with hard rock under high geostress condition and its practical application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(6): 1081-1101.
- [16] 沈海超, 程远方, 赵益忠, 等. 基于实测数据及数值模拟断层对地应力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3985-3990.
- SHEN Hai-chao, CHENG Yuan-fang, ZHAO Yi-zhong, et al. Study on influence of faults on geostress by measurement data and numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Suppl.2): 3985-3990.
- [17] LIN W R, YEH E C, HUNG J H, et al. Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project(TCDP)[J]. **Tectonophysics**, 2010, 482(1-4): 82-91.
- [18] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1737-1744.
- FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, et al. Intergrated intelligent feedback analysis of rock mechanics and engineering problems and its applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1737-1744.
- [19] 张春生, 石安池, 唐鸣发, 等. 金沙江白鹤滩水电站工程地应力测试研究报告[R]. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2008.
- ZHANG Chun-sheng, SHI An-chi, TANG Ming-fa, et al. The in situ stress test report of Baihetan hydropower station in Jinsha river[R]. Hangzhou: Huadong Engineering Corporation Limited, 2008.
- [20] LIM S S, MARTIN C D. Core diskings and its relationship with stress magnitude for Lac Bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47: 254-264.
- [21] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 865-878.
- LIU Guo-feng, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 865-878.
- [22] FENG X T, PEI S F, JIANG Q, et al. Deep fracturing of the hard rock surrounding a large underground cavern subjected to high geostress: in situ observation and mechanism analysis[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(8): 2155-2175.