

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.031

地下洞室分期开挖应力扰动特征与规律研究

李建贺¹, 盛 谦¹, 朱泽奇¹, 牛利敏², 卞晓曼¹

(1. 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; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 针对地下洞室开挖扰动分析中常忽略应力主轴旋转以及应力扰动无法量化的现状, 以大岗山水电站地下厂房为研究实例, 根据主应力方向与洞室横断面及洞轴线之间的几何关系, 定义了描述应力主轴旋转的特征角。研究表明, 洞室开挖引起了顶拱和边墙不同程度的应力释放和主方向旋转, 围岩主应力均在开挖当期卸荷强烈, 主应力方向在开挖当期和后续一个开挖期中旋转强烈, 且顶拱和边墙部位主应力方向调整具有一定的共性, 表现为最小主应力方向最终近似垂直于洞室开挖面, 而最大主应力与中主应力方向则近似在平行于开挖面的平面内调整。在此基础上, 考虑应力主轴旋转影响, 定义应力扰动指标 *SDI* 作为描述洞室围岩应力场扰动程度的力学表征量, 研究了大岗山水电站地下厂房围岩应力场扰动的时演化过程和空间分布特征, 并将数值模拟得到的强应力扰动区与现场测试的开挖损伤区进行了对比分析, 相关认识和结论具有一定理论和工程意义。

关键词: 地下厂房; 开挖; 主应力方向; 特征角; 应力扰动

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 02 - 0549 - 08

Stress disturbance characteristics and laws of underground cavern during stage excavation

LI Jian-he¹, SHENG Qian¹, ZHU Ze-qi¹, NIU Li-min², BIAN Xiao-man¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station, the characteristic angles according to the geometric relationship between the principal stress direction and the cavern space position are defined, in order to describe the rotation of the principal axes of stresses. The research shows that different degrees of stress release and principal axis rotation are induced in the arch and the side wall during the excavation. The principal stresses in surrounding rock unload intensely in the current excavation, while the direction of principal stresses rotates violently in the current and subsequent excavation stages. Furthermore, the principal stress direction adjustment has certain similarities in the arch and the side wall. The final direction of the minimum principal stress is approximately perpendicular to the cavern free surface, and the directions of the maximum principal stress and intermediate principal stress are adjusted almost parallel to the excavation surface plane. On this basis, considering the effect of principal stress rotation, the stress disturbance index (*SDI*) is defined as a mechanical characterization quantity, and using it to describe the disturbance degree of stress field in the surrounding rock. *SDI* is applied to study the time evolution, along with the space distribution characteristics of stress field disturbance in the underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station. The strong stress disturbance zone obtained by numerical simulation is compared with the excavation damaged zone by field test, and the related understanding and conclusions are of certain theoretical and engineering significances.

Keywords: underground powerhouse; excavation; principal stress direction; characteristic angle; stress disturbance

1 引 言

地下洞室在开挖过程中, 开挖卸荷打破了岩体

结构系统原有的平衡, 致使围岩内部应力场重新进行分布。在此过程中, 临空面附近一定范围内的岩体力学性质发生显著变化, 主要体现在岩体内部大

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2015CB057905); NSFC-云南联合基金重点支持项目(No. U1402231); 国家自然科学基金项目 (No. 51279202, No.51409263)

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program) (2015CB057905), the NSFC-United Fund Key Support Project of Yunnan(U1402231) and the National Natural Science Foundation of China (51279202, 51409263).

第一作者简介: 李建贺, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程开挖扰动和数值模拟方面的基础性研究工作。E-mail: jianhe_001@163.com

量裂纹的萌生、扩展和贯通,岩体的声波波速下降以及渗透系数的增大^[1],前人在应力场的扰动特征以及围岩的损伤范围方面做了大量的研究工作^[2-10],扰动特征多是基于主应力量值上的改变。事实上,围岩内任意一点的应力状态都对应着一个二阶张量,其状态的改变不仅涉及应力量值的变化,还涉及应力主方向的旋转,而后者在洞室开挖工程中常常被人们所忽略^[10]。

米勒教授曾指出^[11]:应力场的方向对多元系统的力学形状有巨大的影响,对节理块系统的承载能力来说,应力通过该系统的角度比荷载值的大小更为重要。试验和理论研究表明^[12-15],在规定压应力为正的情况下,岩体裂纹的萌生、扩展和贯通都大致沿着最大主应力方向,或与最大主应力方向呈一小夹角。在洞室掌子面推进或分期开挖过程中,围岩中应力大小和应力主方向不断地发生变化,这种复杂的改变直接导致了洞室围岩细观裂纹的多次扩展和扩展方向的改变。张宜虎等^[15]分析了片帮和拉张裂纹的形态与地应力方向的关系,通过试验研究表明,片帮面上的拉张裂纹,其延伸方向主要受片帮形成时的围岩应力状态控制,与当时的重分布大主应力方向一致;Eberhardt^[16]研究了不同地应力条件下的圆形隧道开挖过程中掌子面前方的主应力大小变化和主应力轴旋转特征,特别强调了主应力轴的旋转是微裂缝延伸方向的控制因素;张社荣等^[17]研究了掌子面推进过程中围岩的应力状态,在考虑三维应力旋转的基础上进行衬砌支护时机的选择;李杨帆^[18]以锦屏二级水电站引水隧洞为研究实例,结合应力三维度对深部隧洞掌子面推进过程中的围岩应力状态变化规律进行了研究;江权^[19]提出了主应力转动消散功用以评价掌子面推进过程中主应力大小和方向同时改变的程度,并基于主应力转动消散功进行了支护时机的分析。总的来说,考虑应力主轴旋转效应的围岩扰动特征研究相对较少,且由于三维应力状态的复杂性,在刻画应力状态改变方面尚没有较好的表征方法。

基于这一研究现状,本文以大岗山水电站地下厂房为研究实例,应用FLAC^{3D}软件对厂房分期开挖过程中的围岩应力及其主方向的旋转进行了探讨。文中定义两个特征角来描述围岩应力主方向的旋转,并在此基础上,定义了应力扰动指标SDI(stress disturbance index)集中体现洞室围岩应力场随分期开挖的扰动程度(包含应力大小和方向的扰动)对洞室围岩开挖应力扰动特征和规律开展了

初步探索。

2 工程背景及计算模型

大岗山水电站位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县境内,为大渡河干流规划的22个梯级电站中的第14级。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3大洞室平行布置。主厂房开挖尺寸为206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高),主变室开挖尺寸为144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高),尾水调压室长为130.00 m,净跨度为20.50~24.00 m,室高为75.08 m,主厂房与主变室、尾水调压室轴线距离分别为72.30、141.20 m。工程区域地形地貌复杂,区域地应力水平较高,地质条件复杂,发育有断层、岩脉等不利地质结构。在这种特定的地形与地质条件下,大跨度、高边墙的大型地下洞室群的稳定性成为工程设计、施工与安全运营中的关键技术难题。鉴于此,本文拟将大岗山地下厂房的开挖施工作为洞室围岩应力扰动的研究实例,为简化研究,建立的计算模型与实际工程并不完全一致。计算模型取厂房轴线的垂直方向为X轴,方向为SE35°,主厂房机组中心线为0点,即厂(纵)0+0.000;取厂房轴线方向为Y轴,方向为NE55°,0号剖面端线为0点,即厂(横)0+0.000;竖直向上为Z轴。计算区域^[20]X向:-800~400 m;Y向:-700~300 m;Z向:500 m高程到地表面。图1为地下洞室群三维模型,取洞室轴线方向Y=-50.9 m为监测剖面,并在主厂房一侧取监测点1~5。

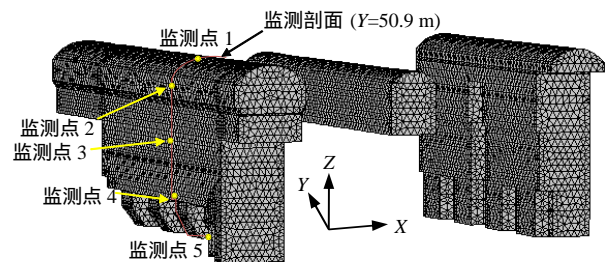


图1 地下洞室群三维模型及监测剖面示意图

Fig.1 3D model of underground caverns and schematic sketch of monitoring section

计算模型共包含1 446 850个单元和244 641个节点。计算模型采用位移边界条件,模型上表面为自由面,其余各界面均固定其平面内所有节点的法向速度。初始地应力场设置:铅直方向(Z向)按自重应力场施加,垂直轴线(顺水流方向)方向(X向)和厂房轴线方向(Y向)按自重应力场的

铅直向应力乘以相应的侧压力系数 k_x 、 k_y 施加；根据地应力测试成果， X 向侧压力系数为 $k_x = 0.6$ （垂直地下厂房轴线方向 $SE35^\circ$ ）， Y 向侧压力系数为 $k_y = 1.44$ （地下厂房轴线方向 $NE55^\circ$ ），在 $FLAC^{3D}$ 数值模型中首先施加自重应力，在此基础上定义 Fish 函数施加 X 、 Y 向应力，经计算平衡后得到数值模型初始地应力场。围岩采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型，相关力学参数取值参考文献[21]，见表 1。

表 1 材料力学参数^[21]

Table 1 Mechanical parameters of materials^[21]

材料	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	凝聚力 c / MPa	内摩擦角 ϕ / ($^\circ$)	抗拉强度 R_t / MPa	重度 γ / (kN/m ³)
II 类围岩	21.4	0.25	1.65	51.3	6	26.5
II 类围岩	9.4	0.30	1.15	45.0	4	26.2
II 类围岩	2.8	0.35	0.60	35.0	2	25.8

地下厂房系统采用分层分步开挖，实际工程中的开挖方案如图 2 所示（图中数字代表各洞室开挖期数）。

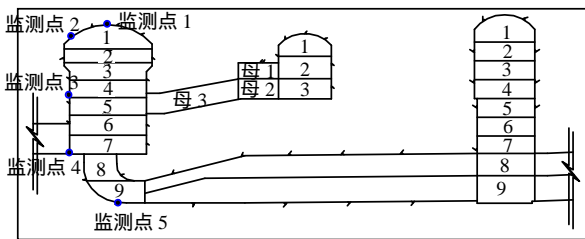


图 2 地下厂房洞室群分层开挖示意图
Fig.2 Sketch of layer excavation of underground powerhouse

3 厂房围岩应力场扰动规律

洞室围岩内任意一点的应力状态都对应着一个二阶张量 $\sigma = \sigma_{ij}e_i e_j (i, j = 1, 2, 3)$ ，通常用矩阵表示如下：

$$\sigma = (\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

由于剪应力满足 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ，应力矩阵只需用 6 个独立参数进行描述，通常选用 3 个主应力 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 及其主方向，根据弹性力学知识，主应力 σ_i 分别对应主方向 n_i ，且 3 个主方向两两正交，故独立的方向余弦只有两个，它们足以描述主应力 σ_i 的空间方位。在洞室开挖过程中，主应力与洞室

临空面的夹角是开挖稳定分析的重要因素，在后文中提出两个特征角代替方向余弦，这样做物理意义明确，且在描述应力主轴偏转方面更为直观、方便。

3.1 主应力大小的变化规律

根据数值计算的结果，对监测点主应力在分期开挖过程中的变化规律进行了分析。以主厂房顶拱（监测点 1）和边墙（监测点 3）为例，其主应力变化曲线如图 3、4 所示。

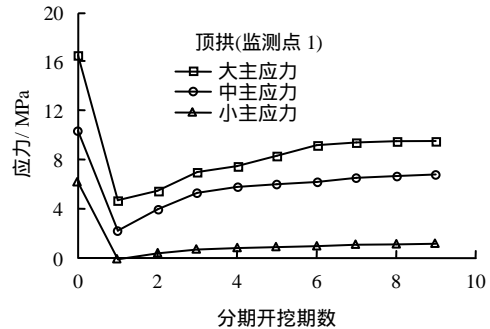


图 3 主厂房顶拱在分期开挖过程中的应力变化图
Fig.3 Variation plot of stress in powerhouse roof during stage excavation process

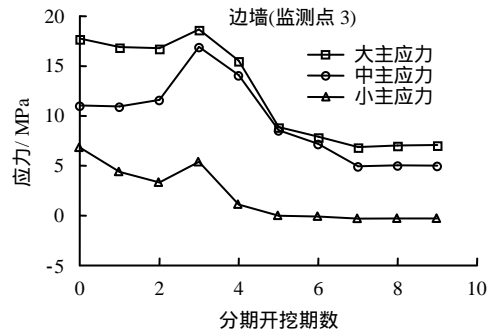


图 4 主厂房边墙在分期开挖中的应力变化图
Fig.4 Variation plot of stress in powerhouse side wall during stage excavation process

从图 3、4 可以看出，在开挖过程中，厂房顶拱和边墙部位出现不同程度的卸荷。对于顶拱（监测点 1），当期开挖（第 1 期）后，主应力骤降，最小主应力出现负值，为拉应力，随后主应力略有回升，直至一个相对稳定值；对于边墙部位（监测点 3），当开挖临近其所在开挖层时（第 3 期），主应力表现出一定的应力集中，当开挖通过其所在开挖层后，主应力开始逐渐减小，卸荷过程相对而言没有顶拱部位强烈；总的来说，当期开挖后围岩卸荷强烈，一般经历约两个开挖步后围岩应力量值趋于稳定，后继开挖对各监测点应力影响较小。

3.2 应力主方向的旋转规律

对于大跨度、高边墙的大型地下洞室，其分层

开挖过程中，应力主方向随开挖进程，处于不断调整之中，是一个三维问题。如前所述，在洞室开挖中，如果能够获取主应力与洞室临空面的相对关系，对于围岩中的块体稳定分析、不利地质结构影响研究等均有重要的工程意义。基于这一考虑，将主应力 σ_i 分解为平行于洞室轴线 (Y 轴) 的分量 σ_i^p (stress paralleled component) 和垂直于洞室轴线 (Y 轴) 的分量 σ_i^v (stress vertical component)，在洞室开挖中， σ_i^v 处于洞室横断面上，对围岩的变形破坏影响较大。设洞轴的方向向量为 η ，则有

$$\sigma_i^p = (\sigma_i \cdot \eta) \cdot \eta \quad (2)$$

$$\sigma_i^v = \eta \times (\sigma_i \times \eta) \quad (3)$$

式中： σ_i 为主应力矢量， $i=1,2,3$ 。为了定量研究应力主轴的旋转，根据主应力方向与洞室横断面及洞轴线之间的几何关系，利用两个特征角对主应力空间方向进行描述，特征角示意图如图 6 所示。FLAC^{3D} 中规定拉正压负，为了便于研究，图 6 中所建坐标系与初始应力场的主应力指向一致。

图中特征角 α 为主应力 σ_i 与 Y 轴 (洞室轴线) 的夹角；特征角 β 为 σ_i^v 与 X 轴 (沿上下游边墙的水平方向) 的夹角。

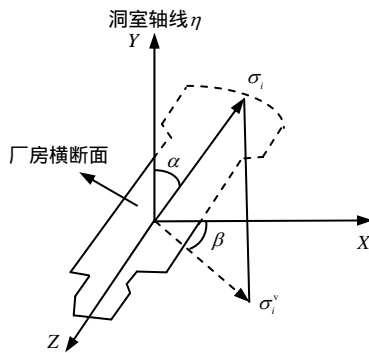


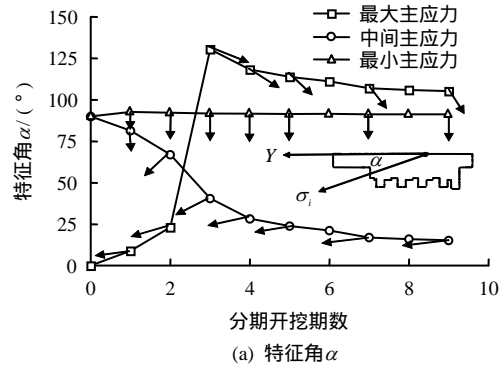
图6 特征角 α 、 β 示意图

Fig.6 Diagram of characteristic angles α and β

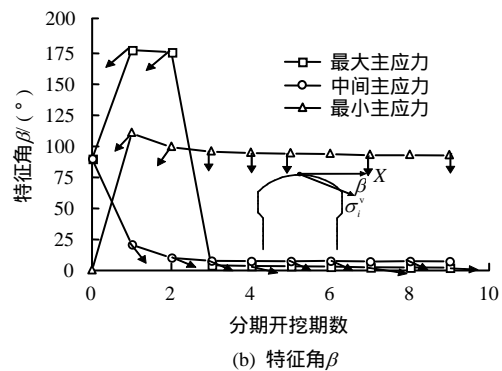
基于特征角的主应力方向旋转分析流程为：首先判断主应力 σ_i 与洞室轴线 (Y 轴) 的空间关系，如果 α 值较小，可认为主应力与洞室轴线近似平行，其分量 σ_i^v 不大，对围岩稳定影响较小；如果 α 值较大，则将该主应力投影到洞室横断面上再具体判断该主应力与临空面的夹角，即采用 σ_i^v 与 X 轴的夹角 β 来反推。

图 7 分别给出了厂房顶拱 (监测点 1) 主应力方向特征角随分期开挖的变化规律。由图 7 可知，对于洞室顶拱部位，其方向的调整主要在前 3 期完成，第 3 期开挖后基本调整完毕。最大主应力从初

始的洞室轴线方向逐渐旋转至平行于洞室临空面，并指向下游边墙。中间主应力从初始的竖直方向旋转至水平面 (XOY 平面)，并与洞室轴线方向 (Y 轴) 呈 20° 左右夹角。最小主应力方向调整在第 1 期当期开挖就基本完成，第 1 期开挖结束后从初始方向 (指向 X 轴正向) 旋转至近乎垂直于洞室临空面，并指向洞室底部，总的来说，最小主应力方向基本上在厂房横断面内变化调整。



(a) 特征角 α



(b) 特征角 β

图 7 顶拱部位特征角随分期开挖变化规律

Fig.7 Changes of characteristic angle in cavern roof during stage excavation

对于厂房边墙中部 (监测点 3)，应力主方向随分期开挖进程的变化规律如图 8 所示。通过对监测数据的分析表明，边墙部位所在水平层被开挖时，大、中主应力方向在开挖当期突然发生了约 90° 的旋转变换，笔者认为这种旋转变换并不是真实发生的，其原因在于开挖当期，最大主应力和中主应力由于卸荷程度不同，出现了 $\sigma_1 < \sigma_2$ (假设压应力为正) 的情况，因此，在开挖当期大、中主应力方向发生了名义上的互换，为了正确反映主方向的变化规律，在进行主方向分析时应排除这一情况。

根据图 8 的特征角变化曲线，可以发现，对于边墙中部监测点，主应力方向在前 3 期开挖时仅有微弱调整，第 4 期当期开挖通过监测点所在水平层后，中主应力成为名义上的大主应力，方向与洞室

横断面斜交，且斜指向洞室底部，与上游边墙夹角约 20° 左右，在后继开挖中方向逐渐向洞室横断面内调整，并近似平行于上游边墙；最大主应力是名义上的中主应力，在第 4 期当期开挖之后，一定程度上偏离了洞室轴线方向，与洞室临空面呈 25° 左右斜交；而最小主应力，与顶拱部位（监测点 1）类似，近似在厂房横断面内调整变化，前 3 期开挖时，最小主应力从初始方向（垂直于边墙）旋转为与 X 轴（边墙法向）呈 30° 左右相交，第 4 期当期开挖过后，应力方向逐渐调整为近似垂直于洞室临空面，指向下游边墙。

总的来说，围岩应力主方向的剧烈调整主要集中在开挖当期和后继一个开挖期中，主要表现为中主应力和小主应力斜指向洞室临空面，大主应力与洞室轴线呈小角度相交；至洞室开挖完成，洞室周边应力主方向与开挖面的关系表现出一定的共性，最小主应力方向最终近似垂直于开挖面，而最大主应力与中主应力方向则近似在平行于开挖面的平面内调整。

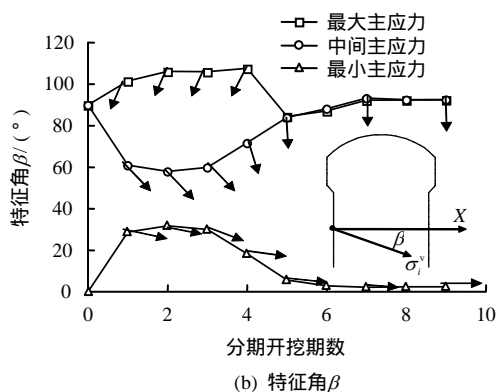
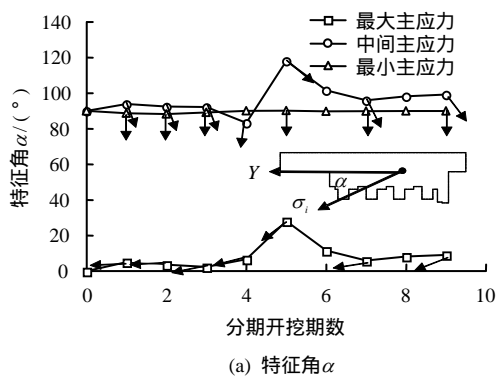


图 8 边墙部位特征角随分期开挖变化规律
Fig.8 Changes of characteristic angle in side wall during stage excavation

3.3 应力扰动指标的提出及初步探索

前文中探讨了洞室厂房典型监测点的主应力

大小及其方向的变化规律，说明应力开挖扰动包含两个方面的内容，其中应力主方向的变化是不可忽视的重要应力扰动特征，但传统的应力场扰动力学表征量很少有考虑应力方向变化的，为了更加准确地描述应力场的扰动特征以及扰动程度，本文在前文研究基础上定义了新的力学表征量——应力扰动度 SDD (stress disturbance degree)，它可集中体现围岩应力场扰动在量值和方向两个方面的变化，应力扰动度定义如下：

$$|\sigma_i^y| = |\eta \times (\sigma_i \times \eta)| = |\sigma_i \cdot \sin \alpha| \quad (4)$$

$$SDD = 0.5 \int \Delta |\sigma_i^y(\beta)| \cdot |\sigma_i^y(\beta)| d\beta \quad (5)$$

式中： σ_i^y 为某一主应力在洞室断面上的分量， $i=1, 2, 3$ ； α 为该主应力与洞室轴线 (η) 的夹角； $\Delta \sigma_i^y$ 为 σ_i^y 相对前一开挖阶段的变化增量； β 为 $\Delta \sigma_i^y$ 相对于前一开挖阶段转动的角度增量；事实上，应力扰动度的物理含义是 $\Delta \sigma_i^y$ 在洞室断面上扫过的面积，如图 9 所示的阴影面积，其量纲为 $p^2 \alpha$ 。

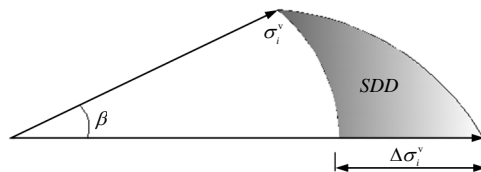


图 9 应力扰动度 SDD 计算示意图
Fig.9 Schematic diagram of stress disturbance degree

江权^[19]提出主应力转动消散功 $SRDW$ ，并用于锦屏二级引水隧洞辅助洞的围岩破损评价，该力学表征量考虑了应力方向的旋转演化，但该表征指标在描述主方向旋转时，角度的改变量基于初始的应力方向，并未考虑应力主方向与洞室开挖面的空间几何关系；应力扰动度是在应力特征角的基础上提出的，体现了主应力方向与洞室开挖面的相对关系，具有明确的物理意义。为了便于分析和比较，将 SDD 进行归一化处理，得到无量纲的应力扰动指标 SDI (stress disturbance index) 为

$$SDI = SDD / \{SDD\}_{\max} \quad (6)$$

式中 SDD 由式 (5) 计算得出， $\{SDD\}_{\max}$ 可以是固定开挖阶段内监测剖面上的最大应力扰动度（计算 SDI 空间分布特征），也可以是固定监测点应力扰动度在开挖完成后的数值（计算 SDI 随分期开挖的演化规律）。以监测点 1、3 为例，基于应力扰动指标 SDI 评估顶拱和边墙部位扰动应力场的时

间演化规律如下所示：

从图 10 可以得出，应力扰动指标 SDI 与前文中应力量值和应力方向的扰动规律大致相同，表现为当期开挖应力场剧烈扰动，随后 1~2 期应力场继续调整，后继的开挖期对监测点影响较小。 SDI 的特点在于可综合反映围岩应力量值和方向的开挖扰动特征，以监测点 3（边墙部位）为例，第 3 期开挖时出现了短暂的应力集中，但应力的方向调整不大， SDI 的计算可对这一差别信息进行整合，更为客观地反映了扰动应力场随分期开挖的演化规律。

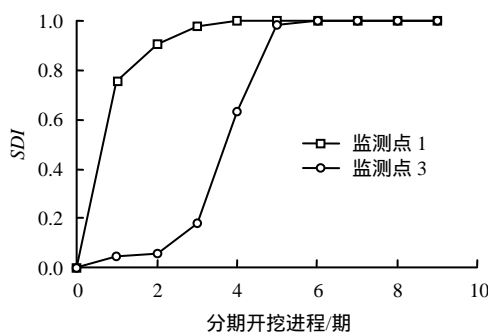


图 10 SDI 在分期开挖中的演化规律
Fig.10 Law of SDI during stage excavation

图 11 给出了主厂房开挖完成后应力扰动指标 SDI 在监测剖面上的特征分布图，可以看出，主厂房洞周附近应力场扰动显著，且边墙中部应力场扰动尤为明显。图 11 中还给出了边墙典型部位应力扰动指标 SDI 从洞室临空面到围岩内部的分布曲线， SDI 的数值向围岩内部逐渐减小，且呈现出一定的分区特点，据此可将临空面向岩体内部 3~6 m 划分为应力场强扰动区，区内应力扰动指标 SDI 均大于 0.70；围岩内部大约 4~8 m 范围可定义为次扰动区，次扰动区 SDI 值在 0.3~0.7 之间，为强扰动区向原岩应力区的过渡区域。

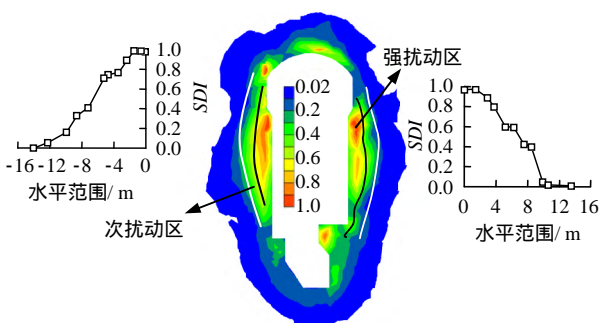


图 11 地下厂房开挖完成后应力扰动指标 SDI 特征云图
Fig.11 Nephogram of SDI after excavation finished

朱泽奇等^[22]根据大岗山地下厂房现场测试和反演结果，以变形模量劣化程度为指标，得出卸荷损伤区约为临空面向岩体内部 3~7 m 的范围，损伤区内岩体变形模量劣化 20%~30%；卸荷损伤区的范围和劣化程度与本文中根据 SDI 定义的强扰动区较为一致，由此可见，围岩应力扰动与开挖卸荷损伤（质量劣化）存在明显的相关性。结合现场实测成果，可以发现围岩应力扰动是隧洞围岩变形损伤的重要原因，应力场剧烈扰动将导致岩体裂纹扩展，质量显著劣化，同时 SDI 可综合反映围岩应力量值和方向的扰动变化，可较好地表征围岩的应力扰动特征以及扰动程度，因此，将 SDI 作为开挖后围岩质量评价指标具有一定的工程应用价值。

应力扰动与围岩破损存在较为密切的关系，但其具体关系和机制仍然不清，下一步的研究工作中将通过分析各个开挖期洞室围岩的应力扰动指标 SDI ，并结合岩体初始裂隙的发育特征，预测围岩中容易损伤破坏的部位，为选取合理的支护手段和加固措施提供有益参考。

4 结 论

(1) 应力特征角几何意义明确，可以方便地描述分期开挖过程中应力主轴的旋转变化规律。隧洞的分期开挖致使顶拱和边墙不同程度的应力释放和主方向旋转，应力的调整具有一定共性，均在开挖当期强烈卸荷，在应力主轴方向的调整上均表现为主方向的剧烈调整集中在开挖当期和后继一个开挖期中，且监测点所在开挖层被开挖后，应力主方向的最终分布规律类似，即最小主应力近似垂直于开挖面，最大主应力和中主应力则近似在平行于开挖面的平面内调整。

(2) 对应力扰动指标 SDI 进行了初步探讨，该力学表征量物理意义明确，揭示了强应力扰动是引起洞室围岩劣化损伤的物理机制。 SDI 建立了岩体初始和二次应力场之间的联系，可以较为客观地评价洞室开挖对围岩的扰动程度，具有一定理论和工程意义。相关认识是初步的，需要进一步开展理论和工程实践研究。

参 考 文 献

- [1] 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, 8(41): 1251 - 1275.
- [2] 刘宁, 张春生, 陈祥荣, 等. 深埋隧洞开挖围岩应力演化过程监测及特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011,

- 30(9): 1729 - 1737.
- LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHEN Xiang-rong, et al. Monitoring and characteristics study of stress evolution of surrounding rock during deep tunnel excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1729 - 1737.
- [3] 杨树新, 李宏, 白明洲, 等. 高地应力环境下洞室开挖围岩应力释放规律[J]. **煤炭学报**, 2010, 35(1): 26 - 30.
- YANG Shu-xin, LI Hong, BAI Ming-zhou, et al. The wall-rock's stress releasing regularity arose by cavern excavation in the high stress condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(1): 26 - 30.
- [4] 白世伟, 韩昌瑞, 顾义磊, 等. 隧道应力扰动区地应力测试及反演研究[J]. **岩土力学**, 2008, 29(11): 2887 - 2891.
- BAI Shi-wei, HAN Chang-rui, GU Yi-lei, et al. Research on crustal stress measurement and inversion of stress disturbed area of a tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 2887 - 2891.
- [5] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 深埋巷道地应力测量及围岩应力分布特征研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(7): 1418 - 1423.
- LUO Chao-wen, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Study of distributing characteristics of stress in surrounding rock masses and in-situ stress measurement for deeply buried tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1418 - 1423.
- [6] 郝宪杰, 冯夏庭, 李邵军, 等. 柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟[J]. **岩土力学**, 2015, 36(3): 837 - 846.
- HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, LI Shao-jun, et al. Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 837 - 846.
- [7] 王汉鹏, 薛俊华, 李建明, 等. 隧洞开挖围岩动态卸载响应特征模拟研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(5): 1841 - 1847.
- WANG Han-peng, XUE Jun-hua, LI Jian-ming, et al. Simulation of dynamic response of surrounding rock under the tunneling-induced unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1841 - 1847.
- [8] 张勇, 肖平西, 丁秀丽, 等. 高地应力条件下地下厂房洞室群围岩的变形破坏特征及对策研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(2): 228 - 244.
- ZHANG Yong, XIAO Ping-xi, DING Xiu-li, et al. Study of deformation and failure characteristics for surrounding rocks of underground powerhouse caverns under high geostress condition and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 228 - 244.
- [9] 陈浩, 肖明, 衡为方. 基于 ABAQUS 大型地下洞室群分期开挖动态模拟[J]. **武汉大学学报(工学版)**, 2013, 46(3): 321 - 327.
- CHEN Hao, XIAO Ming, HENG Wei-fang. Dynamics simulation of large underground caverns stage excavation using ABAQUS[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2013, 46(3): 321 - 327.
- [10] 应宏伟, 李晶, 谢新宇, 等. 考虑主应力轴旋转的基坑开挖应力路径研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(4): 1013 - 1017.
- YING Hong-wei, LI Jing, XIE Xin-yu, et al. Research on stress path during excavation considering rotation of principal stress axis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1013 - 1017.
- [11] 米勒 L. 岩石力学[M]. 李世平, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- MULLER L. Rock mechanics[M]. Translated by LI Shi-ping, et al. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.
- [12] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(6): 697 - 701.
- REN Jian-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 697 - 701.
- [13] 陈蕴生, 李宁, 韩信. 非贯通裂隙介质裂隙扩展规律的 CT 试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(15): 2665 - 2670.
- CHEN Yun-sheng, LI Ning, HAN Xin. Research on crack developing process in non-interpenetrated crack media by using CT[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2665 - 2670.
- [14] 刘冬梅, 蔡美峰, 周玉斌, 等. 岩石裂纹扩展过程的动态监测研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(3): 467 - 472.
- LIU Dong-mei, CAI Mei-feng, ZHOU Yu-bin, et al. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 467 - 472.
- [15] 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): 3527 - 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(Supp.2): 3527 - 3535.
- [16] EBERHARDT E. Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(4): 499 - 518.

- [17] 张社荣, 梁礼绘. 考虑三维应力旋转的隧洞衬砌支护时机研究[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 704 - 709.
ZHANG She-rong, LIANG Li-hui. Analysis on tunnel liner supporting time considering three-dimensional stress rotation[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(6): 704 - 709.
- [18] 李杨帆. 隧洞开挖扰动应力分布规律及影响因素研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.
LI Yang-fan. Study on stress distribution law and influence factors of excavation disturbed zone near tunnel[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [19] 江权. 高地应力下硬岩弹脆塑性劣化本构模型与大型地下洞室群围岩稳定性分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
JIANG Quan. Study on model and stability of surrounding rock of large underground caverns under high geo-stress condition[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [20] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 大渡河大岗山水电站地下厂房洞室群围岩开挖损伤演化规律预演分析[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
Institute of Rock and Soil Mechanics. Chinese Academy of Sciences. The rock excavation damage evolution of underground caverns of Dagangshan hydropower station[R]. Wuhan: Institute of rock and soil mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [21] 郭凯, 盛谦, 张勇慧. 大岗山水电站地下洞室群施工过程中数值模拟分析[J]. 水力发电, 2009, 35(7): 20 - 23.
WU Kai, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui. Numerical simulation analysis of the excavation process of Dagangshan underground carven group[J]. **Water Power**, 2009, 35(7): 20 - 23.
- [22] 朱泽奇, 盛谦, 张勇慧, 等. 大岗山水电站地下厂房洞室群围岩开挖损伤区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 734 - 739.
ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Research on excavation damage zone of underground powerhouse of Dagangshan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 734 - 739.
- 上接第 548 页
- [8] 许国胜, 李德海, 侯得峰, 等. 厚松散层下开采地表动态移动变形规律实测及预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2056 - 2062.
XU Guo-sheng, LI De-hai, HOU De-feng, et al. Measurement and prediction of the transient surface movement and deformation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2056 - 2062.
- [9] HU Qing-feng, DENG Xu-biao, FENG Rui-min, et al. Model for calculating the parameter of the Knothe time function based on angle of full subsidence[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 78: 19 - 26.
- [10] GONZALEZ-NICIEZA C, ALVAREZ-FERNANDEZ M I, MENENDEZ-DIAZ A, et al. The influence of time on subsidence in the Central Asturian Coalfield[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2007, 66(3): 319 - 329.
- [11] NIE Lei, WANG Hong-fei, XU Yan, et al. A new prediction model for mining subsidence deformation: The arc tangent function model[J]. **Natural Hazards**, 2015, 75(3): 2185 - 2198.
- [12] 高延法, 贾君莹, 李冰, 等. 地表下沉衰减函数与塌陷区稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 892 - 896.
GAO Yan-fa, JIA Jun-ying, LI Bing, et al. The attenuate on function of surface subsidence and stability analyses is due to mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(7): 892 - 896.
- [13] 崔希民, 缪协兴, 赵英利, 等. 论地表移动过程的时间函数[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 453 - 456.
CUI Xi-min, MIAO Xie-xing, ZHAO Ying-li, et al. Discussion on the time function of time dependent surface movement[J]. **Journal of China Coal Society**, 1999, 24(5): 453 - 455.
- [14] 常占强, 王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究——改进的克诺特时间函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1496 - 1499.
CHANG Zhan-qiang, WANG Jin-zhuang. Study on time function of subsidence: The improved Knothe time function[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1496 - 1499.
- [15] 刘玉成. 开采沉陷的动态过程模型研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.
LIU Yu-cheng. The study on dynamic process of mining subsidence model[M]. Changsha: Central South University Press, 2013.
- [16] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 改进的 Konthe 地表沉陷时间函数模型[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 16 - 17, 31.
LIU Yu-cheng, CAO Shu-gang, LIU Yan-bao. The improved Knothe time function for surface subsidence[J]. **Science of Surveying and Mapping**, 2009, 34(5): 16 - 17, 31.
- [17] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
HE Guo-qing, YANG Lun, LING Sai-di, Mining subsidence science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995.