

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900922



本刊网刊

地应力张量特征对地下洞室轴线方位优化的启示

卢 波, 张玉峰, 邬爱清, 董志宏

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘 要:高应力是深埋洞室工程围岩变形和稳定的主控因素, 初始地应力对洞室围岩的力学效应主要包括开挖释放荷载和偏应力状态两个方面; 地应力与洞室轴线方位的特定组合决定了洞室开挖释放荷载的量值及围岩所承受偏压的程度。为量化既定地应力分布特征下地下洞室长轴线方位的选择区间, 推导了一般条件下开挖洞壁面上的法向应力随洞室长轴线与最大主应力夹角的变化规律, 并提出极大值和极小值贡献度两个指标, 以度量主应力分量对法向应力的贡献。通过研究地应力张量在地下洞室特征平面上的应力椭圆特征随洞室轴线方位变化的方式, 获得了围岩所承受偏压程度的变化规律; 通过推导获得了地应力张量在水平面内大主应力方位角的解析公式, 从理论上证明了当洞室轴线与地应力张量在水平面内的大主应力平行时, 地下洞室开挖释放荷载取最小值。结合锦屏一级地下厂房对上述方法进行案例分析, 结果表明: 当洞室轴线与地应力张量在水平面上的大主应力平行时, 开挖释放荷载取最小值; 但一般情况下, 很难使开挖释放荷载和偏压应力状态同时达到最优。对地下工程围岩稳定的影响而言, 地应力是否有利取决于地应力张量的构成特征, 因此, 应注重对地应力张量空间特征的全面解析。

关键词:岩石力学; 地下洞室; 地应力; 特征平面投影应力椭圆; 洞室轴线选择; 锦屏一级地下厂房

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)02-0054-12

Implications of Geo-stress Tensor Characteristics in Optimizing the Azimuth of Underground Cavern

LU Bo, ZHANG Yufeng, WU Aiqing, DONG Zhihong

(Key Lab. of Geotechnical Mechanics and Eng. of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Inst., Wuhan 430010, China)

Abstract: High stress is the controlling factor that influencing the deformation mechanism and stability of surrounding rock mass of deep-seated underground caverns. Stress relief and deviatoric stress state are the main mechanical effects induced due to excavation in rock masses where in situ stress exists. Tensorial nature of in situ stress and the intersection angle between longitudinal direction and major stress determine the magnitude of stress relief and the anisotropic level of induced stress. A general formula was derived for the magnitude of stress relief due to excavation. Thus, the variation law of the magnitude of stress relief was studied as intersection angle between the cavern axis azimuth and maximum principal stress direction varies. An index called “contribution degree” was purposed to quantify the contributions of different principal stress components to the magnitude of stress relief by excavation, and then to ascertain the dominant one. In order to study the variation characteristic of deviatoric stress state, the variation of the characteristics of stress ellipses with the intersection angle between cavern axis and maximum principal stress direction were illustrated graphically in combination with quantitative data. The method has been applied to the underground powerhouse of Jinping first stage hydropower station. The results showed that when the longitudinal axis of underground caverns parallel to the major stress in horizontal plane, the magnitude of stress relief reached minimum. However, minimizing stress relief and deviatoric level at the same time was difficult. The study showed that due to the complexity caused by tensorial nature, in general case, it was the composition characteristics of geostress

收稿日期:2019-09-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407002); 国家自然科学基金项目(51879014); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019434); 云南省重大科技专项计划(202002AF080003)

作者简介:卢 波(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士。研究方向: 计算岩石力学与试验岩石力学。E-mail: lubo_cky@126.com

网络出版时间:2021-02-26 16:53:16

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210226.1239.004.html>

tensor that determined how and to what extent the geostress would affect the deformation and stability of surrounding rock mass of underground openings. Therefore, attention should be paid to the comprehensive analysis of the spatial characteristics of the geostress tensor.

Key words: rock mechanics; underground opening; in-situ stress; projection stress ellipses on three characteristic planes; selection of longitudinal direction of underground cavern; underground powerhouse of Jinping first stage hydropower station

洞室长轴线方位选择是地下工程布置的重要内容;对于大型地下洞室工程,随着勘察和设计工作的不断深入,对洞室长轴线方位进行相应的调整是很常见的^[1]。既有工程实践表明,洞室轴线的选择主要考虑构造弱面和地应力场两大影响因素。结构面是工程岩体的薄弱环节,需要重点关注其规模、数量、方位及力学强度等性质。地应力是地下工程岩体的基本赋存条件和承受的主要荷载,且对工程岩体的力学介质特征和变形破坏机制有着重要影响^[1-3]。相关规范也明确规定地下洞室长轴线方位选择的基本原则是洞室长轴线与初始地应力最大主应力方向呈较小夹角,与主要结构面走向呈较大夹角^[4]。与浅埋洞室工程不同,深埋条件下高应力往往成为控制围岩变形特征和稳定性的主导因素^[5]。

近年来,随着西部重大工程建设项目的开展,地应力与深埋洞室围岩稳定性的关系一直是岩石力学领域的研究热点。李志鹏等^[6]对猴子岩地下厂房围岩在高地应力下的破坏特征及其地质力学机制进行了研究。杨静熙等^[7]对锦屏一级地下厂房高地应力条件下地应力方向、洞室轴线方向对围岩变形破坏的影响规律开展了研究。王鹏等^[8]对白鹤滩地下厂房柱状节理玄武岩的松弛圈尺寸效应及地应力的影响开展了研究。范勇等^[9]对高地应力条件下深埋洞室围岩损伤区的孕育机制开展了理论分析和数值模拟研究。董家兴等^[10]对高地应力大型地下洞室围岩的变形失稳模式及相应的调控措施进行了较为系统的总结和梳理。综上,围岩的变形与破坏机制与地应力场分布特征密切相关,因此,洞室轴线方位的优化尤为重要。从目前的研究成果来看,洞室轴线优化方面的研究途径大体上有3种:一是将其简化为平面应变问题,采用弹性力学方法获得一定初始地应力条件下洞室开挖后重分布应力的解析解或近似解,对洞室轴线方位进行优化分析^[11-13];二是直接采用现代数值分析方法,在既定地应力场条件下,对不同轴线方案的洞室开挖进行数值仿真,利用围岩最大应力^[14]、最大变形^[15-17]、塑性区^[15,17-19]、锚固工程量^[15]等指标进行量化分析和对比研究;三是采用物理模型试验方法开展研究^[20]。

实际工程中,通过测试获得的地应力成果不可避免地具有一定的离散性,主应力量值和方位也往往以区间而不是确定值的形式给出^[21],从而导致选

择地下工程轴线方位的基本指导原则,即与大主应力成小角度相交,在操作层面上具有一定的困难。另外,由于地应力的空间张量特性,就其对地下工程围岩稳定的影响来说,地应力是否有利,综合取决于各主应力分量的构成特征及地应力的方位与地下工程的相对方位、与岩层主要构造弱面和优势结构面组的夹角等影响因素。以往的研究成果中对地应力场空间特征方面的研究不够深入,未能从地应力张量特性开展研究,考察洞室轴线方位的选择和优化问题。

对深埋条件下的地下洞室工程而言,岩体开挖引发的力学效应主要包括开挖释放荷载和偏压程度加剧这两个方面,其中,开挖释放荷载直接决定回弹变形的量值,偏压程度则决定应力重分布诱发的应力控制型破坏的范围和严重程度。在既定地应力分布条件下,不同的洞室轴线方位导致上述力学效应存在显著差异。作者针对深埋洞室工程的特点,重点关注如何根据地应力的张量特征选择地下洞室长轴线方位,着重对地应力张量空间特征的解析分析。通过理论推导,获得一般地应力分布条件下,洞室开挖洞壁面上的法向应力随洞室长轴线与最大主应力夹角的变化规律;通过研究地应力张量在地下洞室特征平面上的投影应力椭圆随洞室轴线方位的变化特征,获得围岩承受偏压程度的变化规律;最后,结合锦屏一级地下厂房对上述方法进行了案例分析。

1 地下开挖过程中的力学效应

工程岩体开挖导致被开挖体对未开挖体的作用力被解除,同时开挖临空面成为新的主应力面。在围岩应力释放和方位调整形成二次重分布应力场的过程中,深埋地下洞室应该重点关注应力释放的量级和围岩所承受偏压的程度。前者直接决定了回弹变形的量值,偏应力状态则与应力控制型破坏密切相关。

1.1 开挖释放荷载

围岩的回弹变形与开挖释放荷载呈正相关。在既定应力场分布格局下,影响开挖释放荷载的主要因素即为洞室轴线方位与地应力大主应力的夹角。[图1](#)为理想条件下洞室轴线方位与大主应力不同夹角对开挖释放荷载的影响。由[图1](#)可知,[图1\(a\)](#)所示情况下其开挖释放荷载显然小于[图1\(b\)](#)所示情况,地下洞室设计中应尽量避免[图1\(b\)](#)所示的情况。

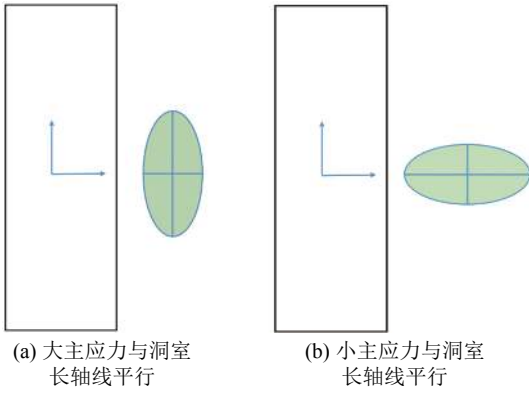


图 1 两种不同应力状态下地下洞室水平切面

Fig. 1 Horizontal section of underground cavern under two different stress states

1.2 偏应力状态

一般来说,高度各向异性应力状态对岩体稳定最为不利^[22],这已被大量工程实践证实^[23-27]。地下开挖导致开挖轮廓法线方向的应力释放和切线方向的应力集中,一定深度范围内的围岩由初始的三向应力状态转变为双轴乃至单轴应力状态,与此同时,偏应力程度加剧,这是围岩产生应力控制型破坏的主要机制。简化起见,图2为城门洞型地下洞室4种典型的应力状态。

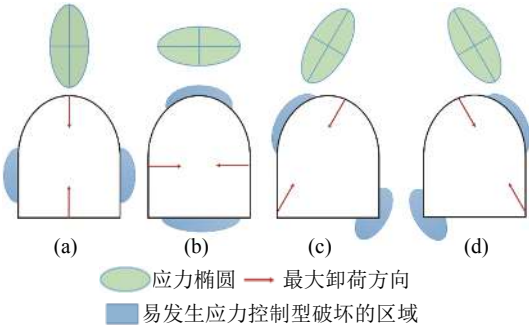


图 2 应力状态对地下洞室围岩影响示意图

Fig. 2 Influence of stress state on the stability of surrounding rock mass

图2(a)中,水平应力为小主应力,应力控制型破坏易在边墙部位发生,垂直方向的释放荷载大于水平方向的释放荷载。图2(b)所示的情况正好与图2(a)相反,此时的应力控制型破坏易在顶拱和底板部位发生,水平方向的开挖释放荷载显然大于垂直方向。在更为一般的应力分布模式下,主应力方向并非总是水平和垂直分布的,如图2(c)和(d)所示。总体来说,开挖轮廓与大主应力平行的部位易发生应力控制型破坏。图2所示的力学机制在本质上与钻孔孔壁产生崩落的机制是一致的。实践证明,钻孔崩落是判断地应力方位的一个有效数据^[21]。在埋深地下洞室工程中,应力控制型破坏迹象也往往成为地应力方位论证的一个重要证据^[27]。一般来说,初始状态下,

大、小主应力比值越大,应力调整后各向异性程度越高,发生应力控制型破坏的可能性也越大。

由此可知,当地下洞室轴线方位发生变化时,不仅开挖释放荷载发生变化,洞室特征平面上的应力椭圆特征,即偏应力状态也相应地发生变化。对于深埋地下洞室而言,轴线方位的选择应综合考虑开挖释放荷载和偏压状态这两个重要因素。

2 地下洞室边墙面上的法向应力

从力学角度来说,任何地下工程的开挖都是一个应力释放的过程。因此,从本质上来讲,围岩开挖引起的应力释放是第一位的^[4]。因此,一般认为使洞室纵轴线走向与地应力最大主应力方向平行或呈较小夹角,可减少侧向压力或变形,并有利于洞室岩壁的的稳定。以下推导的是一般情况下,地下洞室边墙面上的法向应力。

2.1 公式推导

设大地坐标下有一空间地应力张量,大地坐标系中,正北为Y轴正方向,正东为X轴正方向;记地应力张量的3个主应力为 $\sigma_i(\alpha_i, \beta_i), i = 1 \sim 3$ 。为同地质上的概念相互联系起来,主应力矢量方向以倾角和方位角表达。倾角为主应力矢量与水平面的夹角,方位角为主应力矢量在水平面上的投影与正北方向的夹角。则在大地坐标系中,3个主应力矢量表达如下:

$$\begin{cases} l_i = \sin(90^\circ - \beta_i) \sin \alpha_i, \\ m_i = \sin(90^\circ - \beta_i) \cos \alpha_i, \\ n_i = \cos(90^\circ - \beta_i) \end{cases} \quad (1)$$

记洞室轴线方向与最大主应力 σ_1 夹角为 $\theta, -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。则在大地坐标系下洞室边墙方向的法向矢量为 $(\cos(\alpha_1 + \theta) - \sin(\alpha_1 + \theta), 0)$,该法向矢量与地应力3个主方向的方向余弦为:

$$\begin{cases} l = \cos(\alpha_1 + \theta)l_1 - \sin(\alpha_1 + \theta)m_1, \\ m = \cos(\alpha_1 + \theta)l_2 - \sin(\alpha_1 + \theta)m_2, \\ n = \cos(\alpha_1 + \theta)l_3 - \sin(\alpha_1 + \theta)m_3 \end{cases} \quad (2)$$

则边墙面上的法向应力 σ_N 为:

$$\sigma_N = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} \sigma_N = A \cos^2(\alpha_1 + \theta) - B \sin(2\alpha_1 + 2\theta) + C \sin^2(\alpha_1 + \theta), \\ A = \sigma_1 l_1^2 + \sigma_2 l_2^2 + \sigma_3 l_3^2, \\ B = \sigma_1 l_1 m_1 + \sigma_2 l_2 m_2 + \sigma_3 l_3 m_3, \\ C = \sigma_1 m_1^2 + \sigma_2 m_2^2 + \sigma_3 m_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

将 σ_N 进一步展开为 θ 的函数:

$$\begin{cases} \sigma_N = D \sin^2 \theta + E \cos^2 \theta - F \sin 2\theta - G \cos 2\theta, \\ D = A \sin^2 \alpha_1 + C \cos^2 \alpha_1, \\ E = A \cos^2 \alpha_1 + C \sin^2 \alpha_1, \\ F = B \cos 2\alpha_1 + \frac{A}{2} \sin 2\alpha_1 - \frac{C}{2} \sin 2\alpha_1, \\ G = B \sin 2\alpha_1 \end{cases} \quad (5)$$

由上述推导可知, σ_N 为 θ 的连续函数, 地应力张量的3个主应力都对其有贡献。为确定 σ_N 取极值时的 θ 值, 取 σ_N 对 θ 的导数, 则有:

$$\frac{\partial \sigma_N}{\partial \theta} = (D - E + 2G) \sin 2\theta - 2F \cos 2\theta \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_N}{\partial \theta^2} = 2(D - E + 2G) \cos 2\theta + 2F \sin 2\theta \quad (7)$$

令 $\frac{\partial \sigma_N}{\partial \theta} = 0$, 得到:

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2F}{D - E + 2G}\right); \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2F}{D - E + 2G}\right) + 90^\circ, \arctan\left(\frac{2F}{D - E + 2G}\right) < 0; \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2F}{D - E + 2G}\right) - 90^\circ, \arctan\left(\frac{2F}{D - E + 2G}\right) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

即: 当洞室轴线与第一主应力的夹角如式(8)取值时, σ_N 将取极值, 至于是极小值还是极大值则需要根据2阶导数的符号进行判断。

当 σ_N 取得极值时, 式(7)可进一步简化如下:

$$\frac{\partial^2 \sigma_N}{\partial \theta^2} = \frac{4F}{\sin 2\theta} \quad (9)$$

从上面的推导可以看出, 当 σ_N 取得极值时, θ 难以以形式简洁的表达式解析地给出, 但通过计算机编程可容易地实现对 θ 的求解。

为从理论上说明 σ_N 取得极值时轴线方位与地应力在水平面内的大主应力方位角之间的关系, 考虑到 $\alpha_1 + \theta$ 在大地坐标系下可直接表示洞室轴线的方位角, 这里将式(4)中第1个式子直接对 $\alpha_1 + \theta$ 求偏导:

由 $\frac{\partial \sigma_N}{\partial(\alpha_1 + \theta)} = 0$ 可得,

$$(C - A) \sin(2\alpha_1 + 2\theta) - 2B \cos(2\alpha_1 + 2\theta) = 0 \quad (10)$$

在一般情况下, $C - A \neq 0$, 于是得到:

$$\tan(2\alpha_1 + 2\theta) = \frac{2B}{C - A} \quad (11)$$

将式(4)代入式(11)可得到:

$$\begin{aligned} \tan(2\alpha_1 + 2\theta) = & \frac{\sigma_1 \cos^2 \beta_1 \sin 2\alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \sin 2\alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \sin 2\alpha_3}{\sigma_1 \cos^2 \beta_1 \cos 2\alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \cos 2\alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \cos 2\alpha_3} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 极值贡献度的定义

为了方便进一步分析边墙面上法向应力随洞室轴线方位的变化特征及各主应力分量对法向应力极

值的贡献度, 定义极值贡献度指标如下:

$$I^i = \sigma_N^i / \sigma_N \quad (13)$$

式中, σ_N^i 为仅第 i 个主应力单独作用时的开挖释放荷载, 故 I^i 为第一个主应力对开挖释放荷载的贡献度。对式(13)有如下推论:

$$\begin{cases} 0 \leq I^i \leq 1.0, \\ \sum_{i=1}^3 I^i = 1.0 \end{cases} \quad (14)$$

显然, I^i 的值越大, 第 i 主应力对 σ_N 的贡献越大。在后续的分析中, 将引入极值贡献度指标 $I_{\max}^i$ ($i = 1, 2, 3$) 和 $I_{\min}^i$ ($i = 1, 2, 3$) 以量化各主应力分量对开挖释放荷载极值 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 的贡献度。极值贡献度可从量化角度明确对开挖释放荷载起控制作用的主应力分量。

3 地应力张量在水平面的大主应力方位角

首先, 通过应力张量转换公式(15), 将地应力张量的主应力分量转换至大地坐标系:

$$\sigma' = \mathbf{L}^T \sigma \mathbf{L} \quad (15)$$

其中,

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 \sin \alpha_1 & \cos \beta_1 \cos \alpha_1 & \sin \beta_1 \\ \cos \beta_2 \sin \alpha_2 & \cos \beta_2 \cos \alpha_2 & \sin \beta_2 \\ \cos \beta_3 \sin \alpha_3 & \cos \beta_3 \cos \alpha_3 & \sin \beta_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

为排版方便, 得到大地坐标下的应力张量:

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, 6个应力分量的表达式如式(18)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_1 \cos^2 \beta_1 \sin^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \sin^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \sin^2 \alpha_3, \\ \sigma_{yy} = \sigma_1 \cos^2 \beta_1 \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \cos^2 \alpha_3, \\ \sigma_{zz} = \sigma_1 \sin^2 \beta_1 + \sigma_2 \sin^2 \beta_2 + \sigma_3 \sin^2 \beta_3, \\ \sigma_{xy} = \frac{\sigma_1}{2} \cos^2 \beta_1 \sin 2\alpha_1 + \frac{\sigma_2}{2} \cos^2 \beta_2 \sin 2\alpha_2 + \frac{\sigma_3}{2} \cos^2 \beta_3 \sin 2\alpha_3, \\ \sigma_{yz} = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\beta_1 \cos \alpha_1 + \frac{\sigma_2}{2} \sin 2\beta_2 \cos \alpha_2 + \frac{\sigma_3}{2} \sin 2\beta_3 \cos \alpha_3, \\ \sigma_{xz} = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\beta_1 \sin \alpha_1 + \frac{\sigma_2}{2} \sin 2\beta_2 \sin \alpha_2 + \frac{\sigma_3}{2} \sin 2\beta_3 \sin \alpha_3 \end{cases} \quad (18)$$

如此, 可得到平面内大主应力的方位角(这里记为 λ)表达式如下:

$$\tan 2\lambda = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)可得:

$$\begin{aligned} \tan 2\lambda = & \frac{\sigma_1 \cos^2 \beta_1 \sin 2\alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \sin 2\alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \sin 2\alpha_3}{\sigma_1 \cos^2 \beta_1 \cos 2\alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \beta_2 \cos 2\alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \beta_3 \cos 2\alpha_3} \end{aligned} \quad (20)$$

对比式(12)和(20), 注意到 $\alpha_1 + \theta$ 和 λ 都是在统一的大地坐标系下以正北方向为基准, 可推知:

$$\lambda = \alpha_1 + \theta + k\pi, k \text{ 为整数} \tag{21}$$

当洞室长轴线方位发生变化时,由于局部坐标系只是绕着Z轴旋转,故而不影响地应力张量在水平面上的平面应力椭圆形态和方位。由此可得,当洞室轴线方位与地应力张量在水平面内的大主应力方位一致时,洞室开挖释放荷载取得最小值。

4 锦屏一级地下厂房案例分析

4.1 地应力测试结果

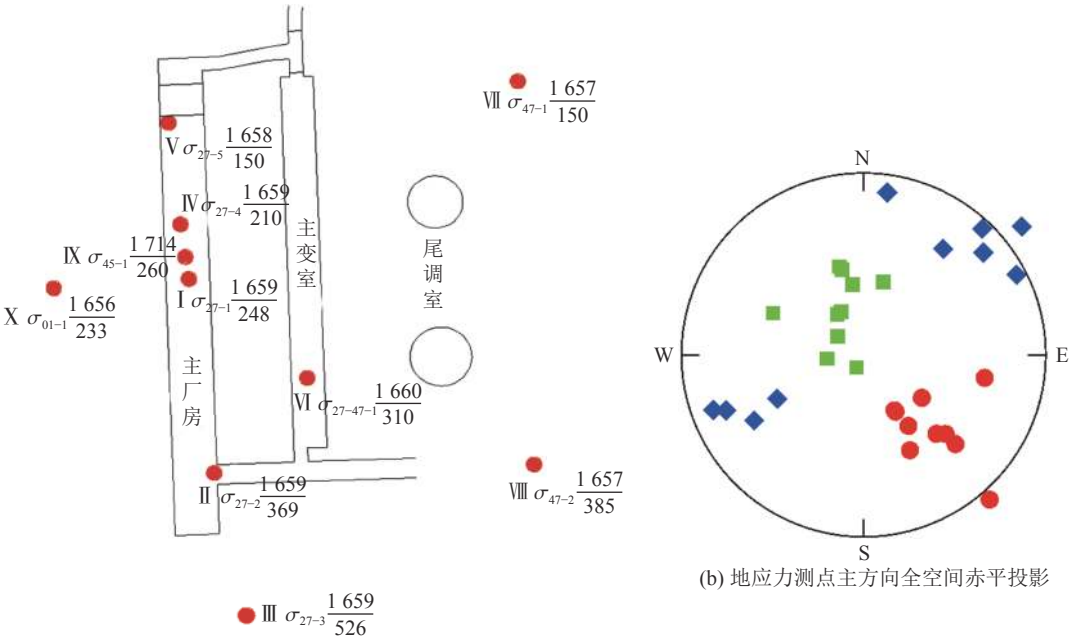
锦屏一级水电站地下厂房位于大坝下游约350 m 的右岸山体内,水平埋深约110~300 m,垂直埋深约

180~350 m;主厂房、主变室和尾水调压室平行布置,主厂房长轴线方位N65°W^[28]。所建立的3维模型坐标系中,X轴指向N25°E,Y轴指向N65°W,Z轴竖直向上,即:Y轴为长轴线方向,YZ平面为厂房纵剖面,XY平面为水平面,XZ平面为厂房横剖面。

可研阶段对地下洞室群区域进行了地应力测试^[28];最大主应力 σ_1 的量值为18.0~35.7 MPa,方向N28.5°~71.0°W; σ_2 的量值为10~24 MPa, σ_3 的量值为3.65~14.45 MPa。表1为三大洞室附近的10组3维地应力测试结果(测点布置见图3(a)),其中, α 和 β 分别为各主应力的倾向和倾角。图3(b)为表1和图3(a)中10个测点主应力方向的赤平投影。

表 1 厂房区域地应力测点信息

Tab. 1 Information of in-situ stress measuring points of underground powerhouse											
测点编号	水平埋深/m	垂直埋深/m	σ_1			σ_2			σ_3		
			量值	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	量值	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	量值	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$
σ_{27-1}	248	307	16.13	150.9	51.6	9.45	294.9	32.6	4.14	36.8	17.9
σ_{27-2}	369	404	27.11	137.4	29.0	21.20	332.2	60.1	13.39	50.9	-6.4
σ_{27-3}	526	690	23.02	100.7	21.9	16.42	263.9	67.2	7.19	8.3	5.9
σ_{27-4}	240	280	17.43	150.7	50.7	7.35	345.7	38.4	5.62	249.8	7.4
σ_{27-5}	150	210	23.21	147.8	40.5	17.67	350.9	47.1	10.59	248.0	11.7
$\sigma_{27-47-1}$	310	320	21.98	126.4	46.7	9.40	344.7	36.5	6.01	239.1	20.0
σ_{47-1}	150	214	21.27	154.1	29.6	9.47	326.9	60.2	6.05	62.3	3.1
σ_{47-2}	385	523	25.32	139.0	-3.0	17.96	209.5	81.1	11.34	49.4	8.3
σ_{45-1}	260	300	24.49	134.2	19.8	10.99	305.4	70.0	5.91	43.2	2.8
σ_{01-1}	233	299	35.70	134.0	26.0	25.60	15.0	45.0	22.20	243.0	34.0



注: 测点表示方法为: 测点编号 $\frac{\text{高程}}{\text{水平埋深}}$ 。

(a) 地下厂房区域地应力测点布置图

(b) 地应力测点主方向全空间赤平投影

图 3 地应力测点布置图及主方向全空间赤平投影

Fig. 3 Layout of the geo stress measuring points and the stereographic projection of principal directions

4.2 地应力测点规律分析

参考文献[29]的方法分析地应力测点规律。图4为表1中所列10个地应力测点主应力方向单位矢量的全空间赤平投影, 以及在模型坐标系中的XY、XZ和YZ平面3个切面上的投影平面应力椭圆。

由图4可知: 由于测点 σ_{27-3} 和 σ_{47-2} 的第2主方向均位于第3象限, 因此, 除了 σ_{27-3} 测点外, 所有测点在

XY剖面上的平面应力椭圆长轴方向均偏向下游侧, 其与Y轴的夹角为 $18^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 平均值为 27.40° (表2); 所有测点在XZ剖面上的平面应力椭圆长轴方向均偏向上游侧, 其与Z轴的夹角为 $1^{\circ} \sim 39^{\circ}$, 平均值为 12.44° ; 除了 σ_{47-2} 测点外, 所有测点在YZ剖面上的平面应力椭圆长轴方向均倾向山外, 其与水平Y轴夹角为 $21^{\circ} \sim 58^{\circ}$, 平均俯角为 42.04° 。

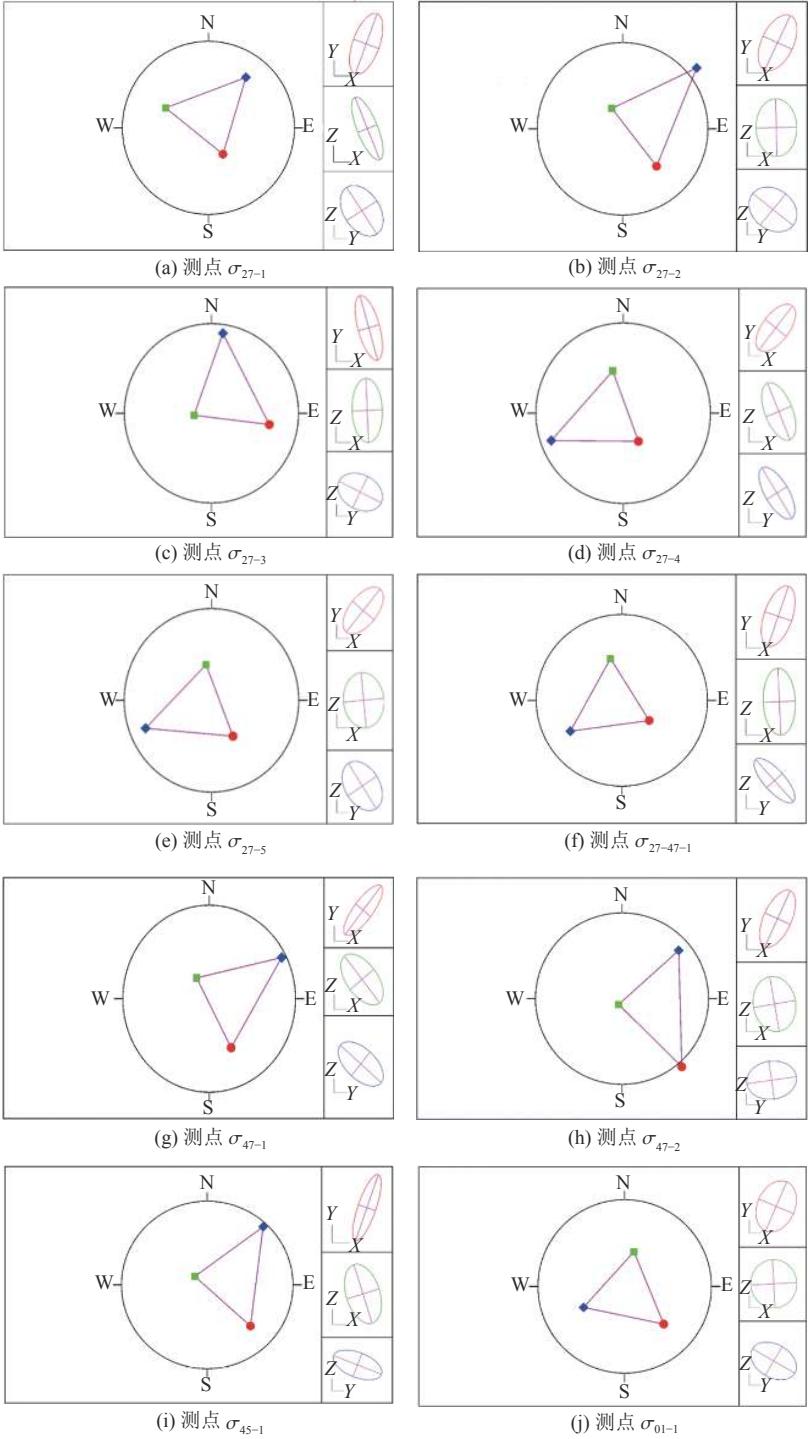


图 4 不同测点全空间赤平投影与切面应力椭圆

Fig. 4 Stereographic projection of each measuring point and its projection stress ellipses on three characteristic planes

表 2 地应力测点切平面主应力比值和应力矢量特征角度

测点编号	XY平面应力			XZ平面应力		YZ平面应力	
	主应力比值	特征角度/(°)	实际方位	主应力比值	特征角度/(°)	主应力比值	特征角度/(°)
σ_{27-1}	2.38	20.04	N44.96°W	3.33	21.58	1.54	57.15
σ_{27-2}	1.92	24.72	N40.28°W	1.43	1.47	1.27	39.10
σ_{27-3}	3.03	-15.79	N80.79°W	2.04	2.32	1.39	26.41
σ_{27-4}	2.00	38.38	N26.62°W	2.13	22.37	2.44	58.38
σ_{27-5}	1.89	39.76	N25.24°W	1.32	5.40	1.49	57.09
$\sigma_{27-47-1}$	2.22	18.84	N46.16°W	2.08	2.40	2.70	48.22
σ_{47-1}	3.03	38.63	N26.37°W	1.85	38.79	1.85	40.36
σ_{47-2}	2.22	24.24	N40.76°W	1.32	9.89	1.30	-8.19
σ_{45-1}	3.85	18.89	N46.11°W	1.82	17.29	2.08	21.38
σ_{01-1}	1.43	23.14	N41.86°W	1.06	2.89	1.45	30.28
平均值	2.40	27.40	N41.92°W	1.84	12.44	1.75	42.04

由表2可知:XY平面内的大、小主应力的比值为1.43~3.03,其平均值为2.40;XZ平面内的大、小主应力的比值为1.06~3.33,其平均值为1.84;YZ平面内的大、小主应力的比值为1.27~2.70,平均值为1.75。

4.3 边墙法向应力随轴线方位变化的总体规律

依次将表2中的10个地应力测点作为能够表征整个厂房区域地应力场空间分布特征的代表性测点,通过式(4)和(8)计算地下洞室边墙面上法向应力随轴线方位的变化特征,结果如图5、6和表3所示。

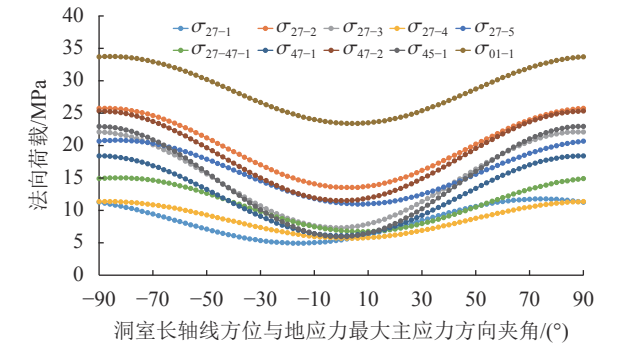


图 5 边墙面上法向应力随洞室轴线方位变化规律
Fig. 5 Variation of normal stress on the sidewall with the longitudinal direction of the main chamber

这里对表3和图5做简单的说明。对于表3,以第1行测点 σ_{27-1} 为例,第1行数据给出了当以该测点作为表征地下厂房区域应力场分布特征的代表性测点,厂房轴线方位与 σ_{27-1} 测点的第一主应力方向的夹角发生变化时,厂房边墙面上法向应力的变化规律;图5中给出了法向应力随夹角变化的完整曲线。总体上来看有如下规律:

1)当洞室轴线与第一主应力成小角度时,边墙面上的法向应力取得极小值;此时,大主应力与厂方轴线的夹角往往不一定为0,比如测点 σ_{27-1} ,取得极

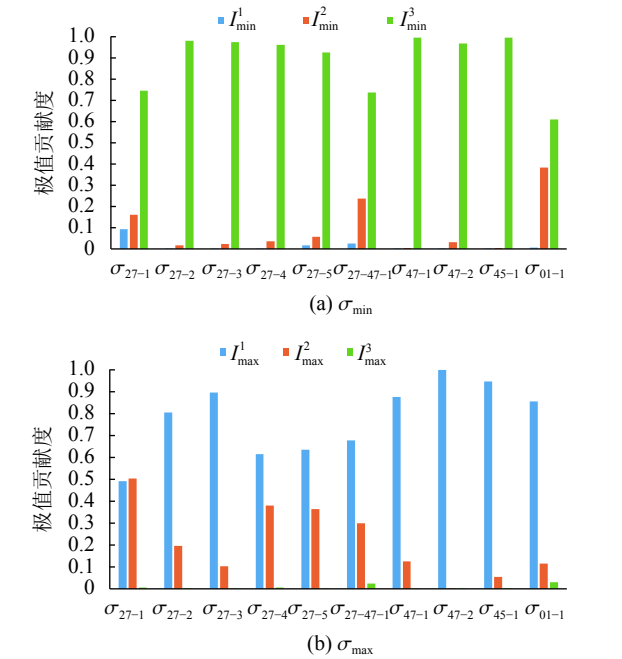


图 6 各地应力测点极值贡献度分布特征
Fig. 6 Distribution characteristics of extreme contribution degrees

小值时的夹角超过了15°。

2)当洞室轴线与第一主应力成大角度相交时(往往不一定垂直),边墙面上的法向应力取得极大值。

3)受三向空间复杂应力影响,当洞室轴线方位与第一主应力夹角发生变化时,洞室边墙面上法向应力的变化规律较为复杂。大体而言,边墙面上的法向应力随夹角增大而增大,过了极大值后渐小;随夹角的减小而变小,过了极值点后继而渐大。

由于地下厂房洞室群往往涉及到多个交叉洞室、纵横交错立体交叉;厂房边墙面上法向应力的极大值和极小值之间的极差越大,说明厂房边墙面上法

表 3 边墙面上法向应力随洞室轴线方位的变化

Tab. 3 Variation of normal stress on the sidewall with the longitudinal direction of the main chamber

应力测点	最小值 $\sigma_{\min}$					最大值 $\sigma_{\max}$				
	量值/MPa	夹角 $\theta/(^{\circ})$	$I_{\min}^1$	$I_{\min}^2$	$I_{\min}^3$	量值/MPa	夹角 $\theta/(^{\circ})$	$I_{\max}^1$	$I_{\max}^2$	$I_{\max}^3$
σ_{27-1}	4.93	-15.86	0.094	0.161	0.745	11.74	74.14	0.490	0.503	0.007
σ_{27-2}	13.50	2.32	0.003	0.018	0.979	25.73	-87.68	0.805	0.195	0
σ_{27-3}	7.30	-1.49	0.002	0.024	0.975	22.10	88.51	0.896	0.104	0
σ_{27-4}	5.68	2.68	0.003	0.036	0.961	11.35	-87.32	0.614	0.379	0.006
σ_{27-5}	10.95	6.96	0.018	0.058	0.924	20.81	-83.04	0.635	0.363	0.002
$\sigma_{27-47-1}$	6.71	7.44	0.026	0.238	0.736	15.01	-82.56	0.677	0.298	0.025
σ_{47-1}	6.06	-0.47	0	0.005	0.995	18.39	89.53	0.874	0.125	0
σ_{47-2}	11.48	0.24	0	0.033	0.967	25.30	-89.76	0.998	0.002	0
σ_{45-1}	5.92	-0.31	0	0.005	0.995	22.94	89.69	0.945	0.055	0
σ_{01-1}	23.38	4.14	0.006	0.384	0.610	33.52	-85.86	0.856	0.114	0.030

向应力和与厂房垂直的洞室边墙面上法向应力的差值就越大。

由表3和图5的计算结果可以获得上述10个测点分别作为表征整个厂房区域地应力场空间分布特征的代表性测点时,厂房的最优轴线方位(表4),即此时边墙面上的法向应力最小。各个测点单独预测的最优方位跨越了从N26.37°W到N80.97°W的区间,完全涵盖了实测第一主应力方位的分布区间(N28.5°~71.0°W);平均起来看,最优厂房轴线方位为N42°W。

表 4 各地应力测点计算得到的厂房最优轴线方位
Tab. 4 Optimal angle of longitudinal direction obtained based on geostress measuring ponits

应力测点	$\sigma_{\min}$ 对应的 夹角/($^{\circ}$)	$\sigma_{\min}$ 对应的 轴线方位	与实际轴线 方位的夹角/($^{\circ}$)
σ_{27-1}	-15.86	N44.96°W	-20.04
σ_{27-2}	2.32	N40.28°W	-24.72
σ_{27-3}	-1.49	N80.79°W	15.79
σ_{27-4}	2.68	N26.62°W	-38.38
σ_{27-5}	6.96	N25.24°W	-39.76
$\sigma_{27-47-1}$	7.44	N46.16°W	-18.84
σ_{47-1}	-0.47	N26.37°W	-38.63
σ_{47-2}	0.24	N40.76°W	-24.24
σ_{45-1}	-0.31	N46.11°W	-18.89
σ_{01-1}	4.14	N41.86°W	-23.14
平均值		N41.92°W	-23.08

由表4和表2可知,当轴线方位与地应力测点在水平面内的大主应力方位一致时, σ_N 取得最小值,从而验证了前面的理论推导结果。

图7以两个典型地应力测点为例,给出了极值贡献度随厂房轴线方位的变化规律。在表1给出的所有10个测点中: $\sigma_{\min}$ 基本上受小主应力控制,这是因为

上述10个测点的小主应力的倾角较小。总体而言,小主应力的倾角越小,即越接近水平方向, $I_{\min}^3$ 的值越接近于1。 $\sigma_{\max}$ 基本上受大主应力控制,这是因为上述10个测点的大主应力的倾角较小。总体而言,大主应力的倾角越小,即越接近水平方向, $I_{\max}^1$ 的值越接近于1。

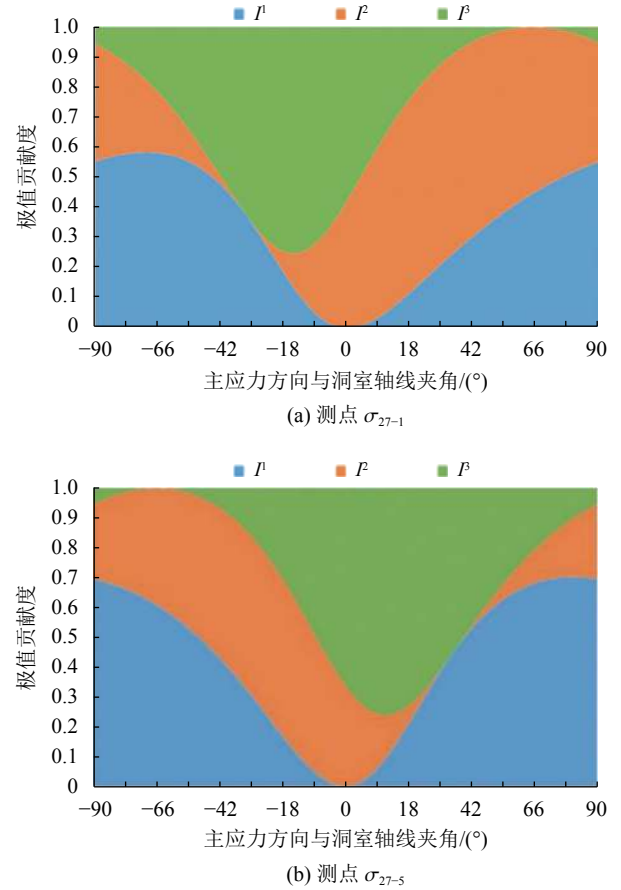


图 7 极值贡献度随洞室轴线的变化
Fig. 7 Variation of contribution degrees with the change of cavern axis

这里面有两个较为特殊的测点, σ_{27-1} 和 σ_{27-4} 。对于 σ_{27-1} 测点, $I_{\max}^1$ 小于 $I_{\max}^2$, 其原因在于大主应力的倾角为中等~陡倾, 而中间主应力 σ_2 是缓倾角, 最终导致 σ_2 对极大值的贡献度超过了 σ_1 。 σ_{27-4} 测点与 σ_{27-1} 测点的情况类似, 大主应力为中等~陡倾, 而中间主应力为缓倾角; 然而, 对于 σ_{27-4} 测点, 其 $I_{\max}^1$ 依然大于 $I_{\max}^2$, 其原因在于 σ_{27-1} 测点的中间主应力与大主应力的比值为 0.59, σ_{27-4} 测点中间主应力与大主应力的比值仅为 0.42。由此可见, 极限贡献度不仅与各主应力分量的倾角有关, 还与各主应力分量之间的比值密切相关。

一般应力状态下, 3 个主应力分量都对 σ_N 有着自己的贡献, σ_N 应是夹角 θ 的连续函数。如果倾角和量值有利, σ_2 对 σ_N 的贡献度超过 σ_1 是完全有可能的。

4.4 特征平面应力椭圆随轴线方位的变化规律

由于开挖面即为应力调整后新的主应力面, 轴线方位不同, 开挖形成的新主应力面方位也不相同。因此, 在既定地应力场中, 当洞室长轴线方位变化时, 不仅洞室壁面上的开挖释放荷载量值发生变化, 洞室特征平面上的投影平面应力椭圆特征也相应的发生变化。这里深入研究洞室水平切面、横切面及纵切面上平面应力椭圆随洞室长轴线方位的变化特征。

直观上来看, 特征平面上的投影应力的大、小主应力比值必然存在极值; 但可以看到, 特征平面上大、小主应力比值难以解析计算。因此, 这里并没有尝试去通过推导获得一个确定的表达式, 而是寻求获得数值解。

以 N42°W 为中心考察其左右各 90° 的范围, 以 10° 为增量将洞室长轴线方位从 S48°W 依次变化至 N48°E, 这样共有 19 个轴线方位。对每一个轴线方位, 如第 4.1 节所示, 建立一个局部的右手坐标系; 随后, 获得每种轴线方位下的 3 个特征平面应力椭圆特征。

显然地, 水平切面上的应力椭圆并不随着洞室长轴线方位而发生变化; 因为当洞室长轴线方位发生变化时, 实质上是坐标系绕 Z 轴旋转, 对地应力张量的水平分量没有影响。图 8(a)、(b) 给出了 XZ 和 YZ 平面上大、小主应力的比值随长轴线的变化规律(这里分别记为 R_{xz} 和 R_{yz}) , 进一步展示了地应力这个物理量作为一个空间张量的复杂性。由图 8(a)、(b) 可知, 当洞室轴线方位发生变化时, 即使这些地应力测点在赤平投影图上看起来差异并不大, 各个地应力测点的 R_{xz} 和 R_{yz} 随轴线方位的变化特征也各不相同。图 8(c) 为表 1 中 10 个测点的 R_{xz} 和 R_{yz} 的平均值随轴线方位的变化特征。

以 σ_{27-1} 测点为例, 对特征平面应力椭圆特征随洞室轴线的变化特征做简单的剖析, 如图 9 所示。

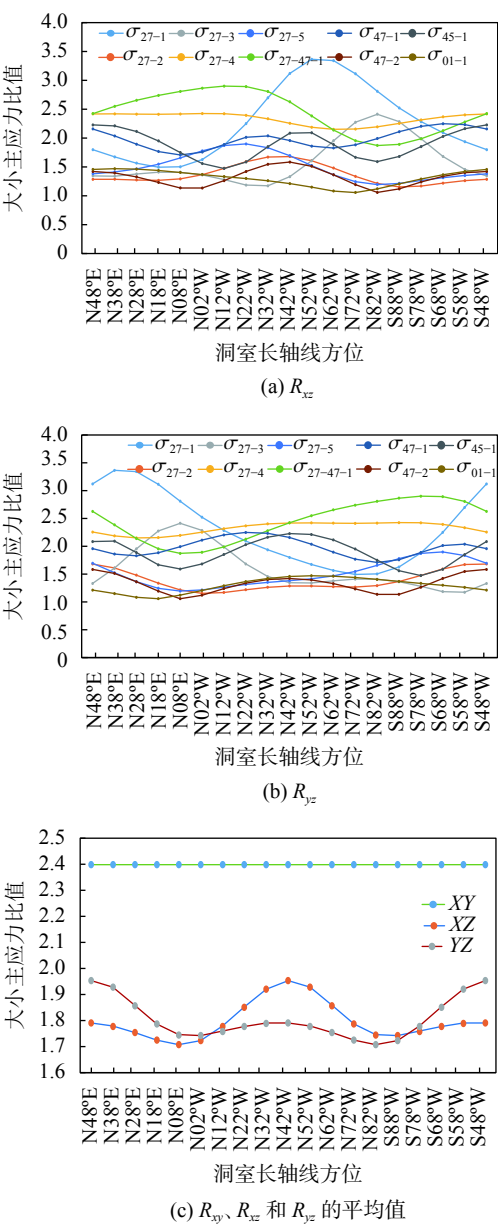


图 8 特征平面应力主应力比值随洞室轴线的变化特征
Fig. 8 Variation characteristics of characteristic plane stress principal stress ratio with cavity axis

由图 9 可知: 特征平面上应力椭圆大小主应力的比值随着洞室轴线方位的变化而变化; 同时, 应力椭圆的特征角度也在发生变化。

当洞室轴线方位改变时, XY 平面上大、小主应力的比值保持不变, 平面应力椭圆的形状保持不变而绕着 Z 轴旋转。当轴线方位为 N42°W 时, XY 平面应力椭圆长轴线方向与洞室轴线方位近平行, 此时的 σ_N 接近最小值。当洞室轴线方位旋转至 N48°E 时, 平面应力椭圆长轴线方向与洞室轴线方位近垂直, 此时的 σ_N 接近最大值。为减小开挖释放荷载, 洞室轴线方位应尽可能与水平面应力椭圆的长轴方位成小角度相交。

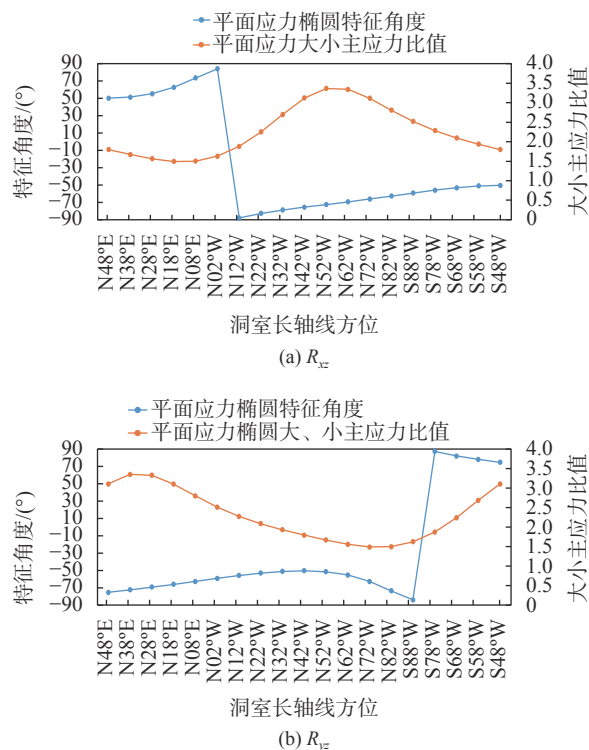


图9 R_{xz} 和 R_{yz} 随洞室轴线方位的变化特征(测点 σ_{27-1})

Fig. 9 Variation of R_{xz} , R_{yz} with the change of longitudinal axis (measurement point σ_{27-1})

当洞室轴线方位发生变化时, XZ 平面(洞室横切面)上的应力椭圆大小主应力比值在1.39~3.36之间变化。这个比值在洞室轴线为N52°W时接近最大值, 在N18°E时接近最小值; 比值越大, 意味着偏压状态越严重。从应力控制型破坏的角度来讲, XZ 平面上大小主应力的比值越小越为有利; 因此, N18°E是较为理想的轴线方位。

当洞室轴线方位发生变化时, YZ 平面上的应力椭圆大小主应力比值也在1.39~3.36之间变化。当厂房轴线为N38°E(与N52°W垂直)时, 这个比值接近最大值; 当轴线方位为N72°W(与N18°E垂直), 这个比值接近最小值。 YZ 平面大小主应力比值对与主洞室长轴线垂直的洞室围岩有影响。

地下洞室开挖之后, 一般来说, 第二主应力一般沿洞室轴线方向分布。因此, 需要重点关注水平切面(XY 平面)和横切面(XZ 平面)上的应力椭圆特征。就偏应力状态而言, XZ 平面上大小主应力的比值较小, 对围岩较为有利。由图8(c)可知: 平均而言, XZ 和 YZ 平面上大小主应力的比值在1.71到1.95之间变化; 在N82°W~S88°W和N2°W~N8°E之间, R_{yz} 取最小值。然而, 开挖释放荷载 σ_N 取最小值时的轴线方位为N42°W, 由此来看, 在一般情况下, 很难使 σ_N 和 R_{yz} 同时达到最优。从这个意义上说, N65°W介于N42°W和

N82°W之间, 可以理解为一种折衷的选择。

5 结论

由于地应力的张量特性, 在一般情况下难以直观地判断其对地下洞室围岩的影响, 从而获得深埋地下洞室的最优轴线方案布置。作者研究了一般地应力分布条件下、不同轴线方位下开挖洞室洞壁面上的法向应力及特征平面应力椭圆随洞室长轴线与最大主应力夹角的变化规律; 并结合实际工程案例进行了分析。

推导了开挖释放荷载随洞室长轴线方位变化的理论公式, 从而获得了开挖释放荷载取最小值时的最优轴线方位。通过对地应力张量的平面投影应力特征进行解析, 获得了地应力张量在水平面内大主应力方位角的理论公式。研究发现, 当洞室长轴线方位与水平面内大主应力方位一致时, 洞室开挖释放荷载取得最小值。

研究表明, 对深埋地下洞室工程而言, 洞室轴线方位的选择应考虑开挖释放荷载和围岩可能承受的偏应力状态这两个因素。当洞室轴线方位与水平面大主应力方位一致时, 开挖释放荷载取得最小值; 当洞室横切面上大、小主应力比值取最小值时, 偏压状态对围岩有利; 但上述两个因素很难同时达到最优。

参考文献:

- [1] 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [2] Hoek E, Brown E T. 岩石地下工程[M]. 连志升, 田良灿, 王维德, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [3] 张倬元, 王兰生, 王士天. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 42~48.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水电站厂房设计规范: SL266—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [5] Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 91~99. [周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(1): 91~99.]
- [6] Li Zhipeng, Xu Guangli, Dong Jiaxing, et al. Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass failure for underground powerhouse under high geostress[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(6): 1568~1576. [李志鹏, 徐光黎, 董家兴, 等. 高地应力下地下厂房围岩破坏特征及地质力学机制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(6): 1568~1576.]
- [7] Yang Jingxi, Chen Changjiang, Liu Zhongxu. Deformation

- and failure laws of underground cavern rock mass in high ground stress[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(6): 37–41. [杨静熙, 陈长江, 刘忠绪. 高地应力洞室围岩变形破坏规律研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(6): 37–41.]
- [8] Wang Peng, Hong Wangbing, Song Gang. Influences of size effect and in-situ stress of columnar jointed basalt relaxation zone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1): 139–146. [王鹏, 洪望兵, 宋刚. 柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力影响[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 139–146.]
- [9] Fan Yong, Lu Wenbo, Zhou Yihong, et al. Evolution mechanism of damage zone in surrounding rock mass during excavation of deep tunnels under high geostress condition[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 308–316. [范勇, 卢文波, 周宜红, 等. 高地应力条件下深埋洞室围岩损伤区孕育机制[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(2): 308–316.]
- [10] Dong Jiaying, Xu Guangli, Li Zhipeng, et al. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of large-scale caverns with high geostress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2161–2170. [董家兴, 徐光黎, 李志鹏, 等. 高地应力条件下大型地下洞室群围岩失稳模式分类及调控对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(11): 2161–2170.]
- [11] Fan Qiuyan. Mechanical analysis for choosing optimal orientation of underground opening[J]. *Journal of China Coal Society*, 1990, 15(3): 62–71. [范秋雁. 选择巷道合理开挖方向的力学分析[J]. *煤炭学报*, 1990, 15(3): 62–71.]
- [12] Li Man, Ma Ping, Sun Qiang. The influence of the relationship between the cavity axis direction and initial stress to surrounding rocks stability[J]. *Railway Engineering*, 2011(7): 70–72. [李曼, 马平, 孙强. 洞室轴线走向与初始地应力关系对围岩稳定性的影响[J]. *铁道建筑*, 2011(7): 70–72.]
- [13] Li Li, He Jiangda, Yu Ting, et al. Optimized design on the direction of longitudinal axle of underground plant[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, 35(3): 34–37. [李莉, 何江达, 余挺, 等. 关于地下厂房纵轴线方位的优化设计[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2003, 35(3): 34–37.]
- [14] Qi Lan, Ma Qichao. On the selection of longitudinal direction and stability of underground opening based on the analysis of in-situ stress field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Suppl): 1120–1123. [戚蓝, 马启超. 在地应力场分析的基础上探讨地下洞室长轴向选取和围岩稳定性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增刊1): 1120–1123.]
- [15] Zhang Yuting, Xiao Ming, Tang Fuping. Numerical analysis on proper arrangement of axis azimuth of deep underground cavern groups[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(3): 331–335. [张雨霆, 肖明, 汤福平. 深埋地下洞室群轴线方位合理布置的计算分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(3): 331–335.]
- [16] Simanjuntak D Y F, Marence M, Mynett A E, et al. Pressure tunnels in non-uniform in situ stress conditions[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2014, 42(5): 227–236.
- [17] Wang Zhenzhou, Hou Dongqi, Zeng Haiyan, et al. Choice of the axial azimuth and stability analysis of surrounding rock of Lianghekou underground powerhouse[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(2): 227–235. [王震洲, 侯东奇, 曾海燕, 等. 两河口地下厂房轴线方位选择与围岩稳定分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(2): 227–235.]
- [18] Wang Junqi, He Benguo, Zhang Youtian, et al. Study on the axis orientation and stability of linings for deep tunnels[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(12): 188–197. [王俊奇, 何本国, 张有天, 等. 深埋隧道轴线合理布置与衬砌结构稳定性研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(12): 188–197.]
- [19] He Jianhua, Shen Xin, Wang Quan. Choice of axial azimuth of powerhouse under complicated geological conditions for Yebatan hydropower station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(Suppl2): 791–797. [何建华, 申昕, 王泉. 叶巴滩水电站复杂地质条件下厂房纵轴线的选择[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(增刊2): 791–797.]
- [20] Dai Cong, He Chuan, Xia Wuyang, et al. Test on the stability of soft rock tunnel with high ground stress field influenced by direction of maximum horizontal principle stress[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(2): 303–311. [代聪, 何川, 夏舞阳, 等. 主应力方向对软岩隧道稳定性影响的试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(2): 303–311.]
- [21] Amadei B, Stephansson O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [22] Paterson M S, Wong T F. Experimental rock deformation—The brittle field[M]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [23] Meng Guotao, Fan Yilin, Jiang Yali, et al. Key rock mechanical problems and measures for huge caverns of Baihetan hydropower plant[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2549–2560. [孟国涛, 樊义林, 江亚丽, 等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2549–2560.]
- [24] Zhang Yong, Xiao Pingxi, Ding Xiuli, 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. [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.]
- [25] Hou Dongqi,Liao Chenggang,Feng Mei,et al.Study on deformation and damage causes and reinforcement measures of rock mass surrounding the downstream arch of underground powerhouse for Jinping-I hydropower[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2012,31(5):230–235.[侯东奇,廖成刚,冯梅,等.锦屏一级水电站地下厂房下游拱围岩变形开裂破坏成因分析与加固措施研究[J].*水力发电学报*,2012,31(5):230–235.]
- [26] Huang Runqiu,Huang Da,Duan Shaohui,et al.Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass deformation failure in construction phase for underground powerhouse of Jinpin I hydropower station[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(1):23–35.[黄润秋,黄达,段绍辉,等.锦屏I级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(1):23–35.]
- [27] Lu Bo,Ding Xiuli,Wu Aiqing,et al.Comprehensive analysis method for validating geostress measurement data[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2012,31(8):1614–1626.[卢波,丁秀丽,邬爱清,等.地应力测试数据甄别综合分析方法研究[J].*岩石力学与工程学报*,2012,31(8):1614–1626.]
- [28] 周钟,汤雪峰,廖成刚,等.雅砻江锦屏一级水电站地下厂房洞室群围岩稳定与支护、厂房主要结构设计报告[R].成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2007.
- [29] Lu Bo,Wang Jimin,Ding Xiuli,et al.Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping I underground powerhouse[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2010,29(12):2429–2441.[卢波,王继敏,丁秀丽,等.锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2010,29(12):2429–2441.]

(编辑 李轶楠)

引用格式: Lu Bo,Zhang Yufeng,Wu Aiqing,et al.Implications of geo-stress tensor characteristics in optimizing the azimuth of underground cavern[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(2):54–65.[卢波,张玉峰,邬爱清,等.地应力张量特征对地下洞室轴线方位优化的启示[J].*工程科学与技术*,2021,53(2):54–65.]