

文章编号:1005-0930(2015)02-0349-010 中图分类号:TU45 文献标识码:A  
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2015.02.012

# 隧洞围岩应力开挖扰动特征与规律研究

朱泽奇<sup>1</sup>, 盛谦<sup>1</sup>, 周永强<sup>1</sup>, 刘继国<sup>2</sup>, 宋康林<sup>2</sup>

(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. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**以锦屏二级水电站引水隧洞为研究实例,对引水隧洞掌子面推进过程中的围岩应力状态和主应力轴变化规律进行了研究.分别通过地质数据处理中的“极点图”表现方法和断裂力学应力状态参数应力三维度,来描述主应力轴的旋转变化和应力状态变化规律.研究表明,随着掌子面推进,掌子面前方的围岩主应力轴方向调整具有一定共性,均表现为最大、最小主应力以一定交角指向临空面,中间主应力近似平行临空面.隧洞围岩应力状态由三轴受压状态转化至双轴压缩或单轴压缩状态.最后,根据应力三维度随开挖进尺的变化关系和空间分布特征,将隧洞围岩开挖应力扰动区分为强应力扰动区和弱应力扰动区,分析了各扰动区的应力扰动特征和规律.相关结论与认识对于围岩开挖扰动研究具有较大的理论和工程意义.

**关键词:**引水隧洞;围岩;开挖扰动;主应力轴;应力三维度

隧洞开挖以后围岩中的应力变化和由此引起的围岩破坏一直是岩石力学研究和地下工程建设中关注的问题<sup>[1-3]</sup>.一般围岩受力特点以及应力状态的变化是描述开挖应力扰动的常用手段,国内很多学者通过理论分析、现场测试等多种手段对开挖后围岩应力扰动特征进行了相关研究工作,例如,安其美等<sup>[4]</sup>通过现场试验认为应力扰动范围约为洞径的2—3倍,在裂隙发育、地质条件差的围岩内,应力扰动范围则相应增大;董燕君等<sup>[5]</sup>通过声波测试分析了某工程地下洞室围岩松动区变化情况,分析结果表明,由于围岩应力的调整,地下洞室围岩的松动区范围为2.5—4.0m,并随时间变化有扩大的趋势.随着深部岩体工程的大量修建,高应力条件下围岩地应力特征、开挖后围岩扰动规律的研究逐渐成为目前的研究热点.国内主要有,刘宁等<sup>[6]</sup>针对锦屏二级水电站深埋引水隧洞,通过监测TBM掘进过程中围岩的应力,研究了应力变化的掌子面效应,并将相关研究成果作为现场确定损伤区范围的依据;杨树新等<sup>[7]</sup>应用压磁电感法高精度应力测试系统对地下硐室挖掘过程中围岩应力变化的全过程进行了跟踪监测,研究了高地应力环境下硐室掘进引起的围岩应力时空变化规律,相关结果具有一定的代表性;郭啟良<sup>[8]</sup>等针对深埋及压

收稿日期:2013-07-08;修订日期:2014-04-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB057905);国家自然科学基金项目集成项目(91215301);国家自然科学基金面上项目(51279202)

作者简介:朱泽奇(1980—),男,博士,副研究员. Tel:13308623389, E-mail:zqzhu@whrsm.ac.cn

力硐室工程,采用水压致裂法测定围岩三维应力状态,认为应在首先判定围岩应力分布状况的基础上才能更为真实地揭示硐壁围岩的三维应力分布特征;罗超文等<sup>[9-10]</sup>基于淮南煤矿区的水压致裂法地应力测量结果,对深埋巷道围岩应力分布特征进行了初步研究。

事实上,隧洞开挖后围岩应力重分布,这一过程不仅涉及应力量值大小的变化,还有主应力方向的变化,而主应力轴的旋转是一个常常被人们忽略的问题。实际上,大量土工实验表明,纯主应力旋转(三主应力值不变)会导致土体出现明显的塑性变形<sup>[11]</sup>。近年来围绕土体主应力轴旋转对变形的影响以及考虑主应力轴旋转的本构模型研究较多<sup>[12-14]</sup>。但对于岩体的相关研究较少,尤其是涉及开挖扰动引起的主应力轴旋转就更少见报导,主要有;Eberhard<sup>[15]</sup>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;张社荣等<sup>[16]</sup>进行了隧道开挖中的围岩主应力轴的变化研究,并将其作为隧洞衬砌支护时机优化的依据。总的来说,目前对于岩体隧洞工程围岩应力方向调整的空间变化规律还没有较好的表现和描述方法。同时,对于掌子面推进过程中的围岩应力大小、应力状态变化规律的研究目前主要还是应用一些传统的力学表征量,如平均正应力、相当剪应力和罗德参数等<sup>[17]</sup>。

基于这一研究现状,本文利用数值模拟技术,以锦屏二级水电站引水隧洞作为研究实例,应用FLAC3D软件对引水隧洞掌子面推进过程中的围岩应力和主应力轴变化进行了研究。引入地质数据处理中的“极点图”表现方法和断裂力学应力状态参数应力三维度,针对隧洞围岩的开挖应力扰动特征和扰动规律开展了初步研究。

## 1 研究实例与计算模型

锦屏二级水电站位于四川省境内的雅砻江锦屏大河弯处,利用雅砻江锦屏150km长大河弯的天然落差,截弯取直凿洞引水,电站水头约为310m,总装机容量为4800MW,通过开挖4条引水隧洞即可建成引水发电的引水式水电站。4条引水隧洞,洞线平均长度约为16.67km,开挖洞径 $D$ 为13m,上覆岩体一般埋深为1500—2000m,最大埋深约为2525m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点,成为锦屏二级水电枢纽的关键控制性工程。鉴于此,本文拟将引水隧洞的开挖施工作为研究隧洞围岩应力扰动的工程实例,以文献报道和实测的地应力分布、岩体力学参数作为基本输入条件,为简化研究,计算模型的建立并非与实际工程完全一致。

引水隧洞穿越三迭系中上统大理岩、灰岩、结晶灰岩及砂岩、板岩等地层。大部分洞段以Ⅱ类和Ⅱ—Ⅲ类围岩为主,约占全长的92%,岩石致密、坚硬、完整<sup>[18]</sup>。关于锦屏二级水电站引水隧洞的研究工作较多,对于引水隧洞的布置、设计与施工等相关细节这里不再详细介绍。本文以2#引水隧洞为研究实例,以15+700桩号为参考剖面,沿洞轴线取100m范围作为研究区段,该区段上覆岩体约1100m,自重应力约为29.2MPa<sup>[19]</sup>。研究中假设最大主应力与洞轴线平行,在模型外边界上施加最大主应力为1.3倍自重应力,约38.0MPa;中间主应力取为1.2倍自重应力,约34.8MPa,倾角22.5°;最小主应力取为1.0倍自重应力,即29.2MPa,倾角67.5°;为满足初始地应力的方向性,还应在相应边界上施加一定大小的正应力和剪应力,其量值可通过弹性力学公式计算得到。

建立数值模型如图1所示,取隧洞轴线方向为 $Z$ 轴,水平面上垂直隧洞轴线的方向

为  $X$  轴, 竖直向上为  $Y$  轴. 整个模型在  $X$ - $Y$ - $Z$  方向上的尺寸为  $130\text{m} \times 130\text{m} \times 100\text{m}$ . 计算模型共划分 16650 个单元, 173316 个节点. 取  $Z = 60\text{m}$  为参考剖面(桩号 15 + 700 桩号), 为研究随掌子面推进, 参考面上围岩的应力变化和主应力轴旋转规律, 将开挖进尺设置为 5m, 在重要研究区段( $Z = 40$ — $60\text{m}$ ) 开挖进尺为 2m.

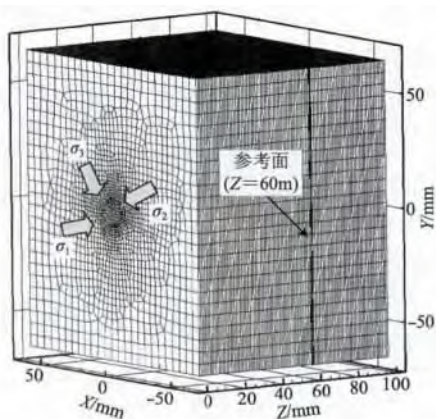


图 1 引水隧洞计算网格

Fig.1 Mesh of the seepage tunnel

引水隧洞的尺寸大小如图 2 所示, 并在参考面处引水隧洞临空面的一些特征部位设置监测点. 围岩采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型, 相关力学参数取值参考文献 [20], 见表 1. 表 1 中  $E$  为岩体变形模量  $\mu$  为泊松比  $c$  为黏聚力  $\varphi$  为内摩擦角  $R_t$  为单轴抗拉强度,  $R_c$  为单轴抗压强度  $\gamma$  为重度.

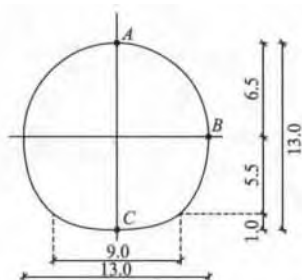


图 2 隧洞横剖面及监测点布置(单位:米)

Fig.2 Cross section of tunnels and layout of monitoring points(unit:m)

表 1 材料力学参数<sup>[20]</sup>

Table1 Material and mechanics parameters<sup>[20]</sup>

材料	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$R_t/\text{MPa}$	$R_c/\text{MPa}$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
II类围岩	30.0	0.20	2.0	55.0	2.0	150.0	27.5

## 2 主应力轴旋转规律

图 3 给出了参考面上监测点 A 的主应力大小及方向随掌子面推进的变化规律. 由图可知, 掌子面推进过程中围岩主应力大小的变化可大致分为 4 个阶段. 首先, 当掌子面离

参考面较远时,开挖卸荷对参考面处围岩应力影响不大,几乎保持初始应力状态不变;当掌子面推进至离参考面4—6m时,监测点A处开始出现应力集中现象,且开挖至参考面时应力集中达到峰值;开挖通过参考面后,应力快速释放,在掌子面通过参考面约10m后,应力释放基本完成;此后随掌子面继续推进,参考面处围岩应力基本不变.同时,根据围岩应力演化的特点,图3同时给出了各个应力发展阶段的代表性主应力方向.由这些主应力方向向量图可以看出,掌子面推进至参考面时,顶拱部位主应力轴发生强烈旋转,最大主应力与临空面成一定交角;开挖通过参考面后,主应力方向重新调整,近似平行隧洞模型的计算坐标系.

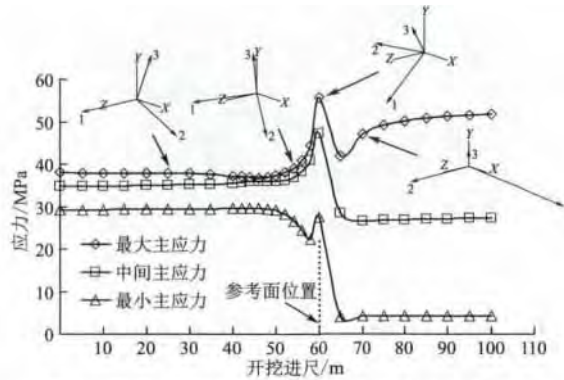


图3 随掌子面推进监测点A主应力大小及方向

Fig.3 Size and direction of principal stress of monitoring point A with tunnel face advancing

图3的主应力方向向量图无法直观和准确地描述开挖过程围岩主应力轴的变化规律.为此,本文引入地质数据处理中的“极点图”方法来表现主应力轴的旋转变化规律.首先建立三维空间坐标系,假设X、Y、Z分别代表地理空间上的北、上、东3个方向,令 $\eta$ 、 $\xi$ 分别表示主应力方向向量的倾向和倾角(图4).主应力方向用其分别与坐标轴X、Y、Z的夹角( $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ )表示.根据空间关系可知,夹角( $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ )与倾向、倾角有如下关系

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \arctan(\cos\gamma/\cos\alpha), \text{ 当 } \cos\alpha > 0 \\ \eta &= 90^\circ, \text{ 当 } \cos\alpha = 0, \cos\gamma > 0 \\ \eta &= 270^\circ, \text{ 当 } \cos\alpha = 0, \cos\gamma < 0 \\ \eta &= \arctan(\cos\gamma/\cos\alpha) + 180^\circ, \text{ 当 } \cos\alpha < 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\xi = \pi/2 - \beta \quad (2)$$

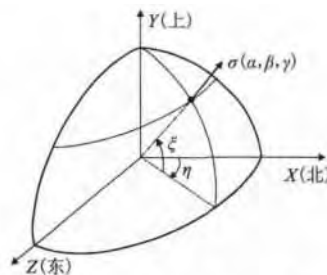


图4 三维空间坐标系

Fig.4 Three dimensional space coordinate

通过式(1)和式(2)的转换关系,将主应力方向用地质坐标系中的倾向、倾角表示,再以极点形式投影在乌尔夫网或施密特网上形成“极点图”。将掌子面推进过程中监测点的主应力方向变化信息全部输入极点图中,则可以更加直观、准确地观察到主应力方向的变化规律。

图5给出了掌子面推进至参考面这一过程中监测点A、B的主应力方向极点图。由图5可以看出,对于顶拱计算点A,最大主应力倾向由最初的隧洞轴线方向逐渐旋转至与洞轴线成较大交角(最大约 $70^\circ$ ),当掌子面推进至52m时,又快速回复至接近洞轴线方向,在这一过程中,最大主应力倾角一直逐渐增大,最大达到约 $34^\circ$ ;最小主应力倾向由最初的垂直隧洞轴线方向逐渐旋转至与洞轴线近水平,但其倾角变化幅度不大,由一开始的与水平面夹角 $67.5^\circ$ 变化至约 $55^\circ$ ;中间主应力的倾向、倾角变化较复杂,倾向发生突变式反向(掌子面推进至50m时),倾角由最初的 $22.5^\circ$ 起伏变小,总体上是随着最大、最小主应力的变化而相应调整。对于顶拱部位,应重点关注最大、最小主应力,它们均与临空面形成一定交角(约 $34^\circ$ 和 $55^\circ$ ),而中间主应力最后近似在水平面上调整。

而对于侧墙计算点B,最大主应力在掌子面推进至50m这一过程中,倾向由原洞轴方向缓慢偏转约 $44^\circ$ ,产生约 $15^\circ$ 倾角,此后基本保持倾向不变,倾角回复至约 $8^\circ$ ;中间主应力倾向由最初的垂直洞轴线方向旋转至平行洞轴线的水平方向,而后继续旋转至与洞轴线成约 $25^\circ$ 夹角方向,倾角由原来的 $22.5^\circ$ 增大至约 $82^\circ$ ,且掌子面推进至50m时,中间主应力方向调整明显加快;最小主应力倾向则由最初的垂直洞轴线方向向平行洞轴线方向偏转,最大偏转角度约 $45^\circ$ ,倾角由原来的 $67.5^\circ$ 减小至约 $2^\circ$ ,且掌子面推进至48m时方向调整明显加快。同样对于侧墙部位,最大、最小主应力经过调整后与临空面成一定交角(约 $44^\circ$ 和 $45^\circ$ ),中间主应力与水平面夹角达到约 $82^\circ$ ,近似平行于侧墙。

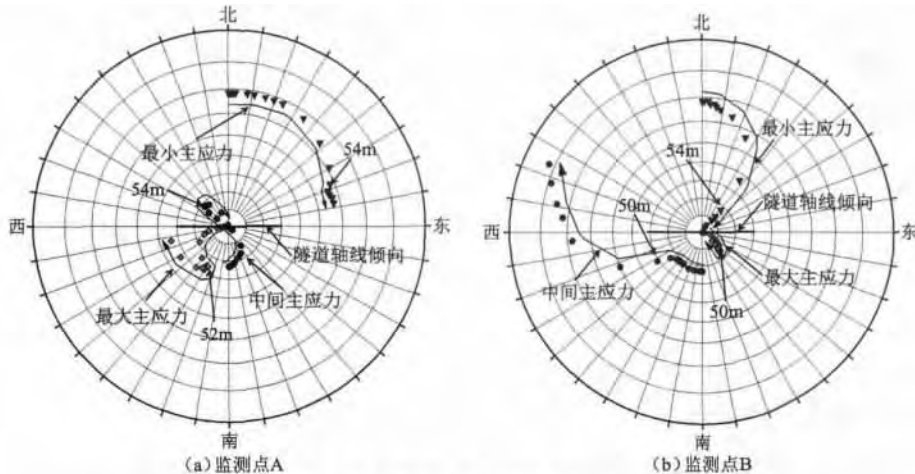


图5 应力监测点主应力方向变化的极点表示

Fig.5 Pole diagram of direction variation of principal stress of stress monitoring points

综合以上分析,可以得到这样两点认识,一是随着掌子面推进,掌子面前方的围岩应力调整具有一定共性,均表现为最大、最小主应力以一定交角指向临空面,中间主应力近似平行临空面;二是掌子面推进至距离参考面10—12m(约一倍洞径),前方围岩应力方

向调整进入加速阶段.

### 3 应力状态变化规律

以上研究表明,隧洞开挖过程中围岩主应力量值和方向均会发生变化.文献[21]进行了二维和三维主应力轴旋转的应力增量分析,建立了主应力轴旋转角度与应力增量之间的关系,式(3)给出了其二维条件下的关系表达式

$$d\sigma_r = \begin{bmatrix} 0 & (\sigma_1 - \sigma_2) d\theta \\ (\sigma_1 - \sigma_2) d\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $d\sigma_r$  为只考虑了主应力轴旋转的应力增量分量;  $(\sigma_1 - \sigma_2) d\theta$  表示与主应力轴旋转角  $\theta$  有关的量,即为剪应力分量.从式(3)可以看出,由主应力轴旋转引起的应力增量表现为剪应力形式,其大小主要与偏应力大小和主应力轴旋转角度有关.

但是目前关于主应力轴旋转对围岩应力状态变化的影响研究不多,亟需建立能够考虑主应力轴旋转的应力状态表征参数.断裂力学中常用的应力状态参数应力三维度  $R_\sigma$  可反映应力场中三轴应力状态和对材料变形的约束程度<sup>[22-23]</sup>,其表达式为

$$R_\sigma = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (4)$$

表2 不同应力状态下的应力三维度和罗德参数值

Table 2  $R_\sigma$  and  $\mu_\sigma$  under different stress states

应力状态	主应力			$R_\sigma$	$\mu_\sigma$
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$		
三向不等拉	$\sigma$	$\sigma$	$0.5\sigma$	1.67	1
双向拉伸	$\sigma$	$\sigma$	0	0.67	1
单向拉伸	$\sigma$	0	0	0.33	-1
纯剪切	$\sigma$	0	$-\sigma$	0	0
单向压缩	0	0	$-\sigma$	-0.33	1
双向压缩	0	$-\sigma$	$-\sigma$	-0.67	-1
三向不等压	$-0.5\sigma$	$-\sigma$	$-\sigma$	-1.67	-1

文献[24]分析了从三向压缩到三向拉伸不同应力状态下应力三维度、罗德参数代数值的(表2)<sup>[24]</sup>.随应力状态从拉向压变化,  $R_\sigma$  的代数值从大向小变化.  $R_\sigma$  值为正时,应力状态处于受拉状态,且  $R_\sigma$  值越大,受拉程度越强;  $R_\sigma$  值为负时,应力状态为受压,且  $R_\sigma$  值越小,受压程度越强.可见  $R_\sigma$  可以较好地反映不同的应力状态情况.

根据弹性力学理论,应力三维度  $R_\sigma$  可视为平均正应力 ( $I_1/3$ ) 与等效剪应力 ( $\sqrt{J_2}$ ) 之比,其中  $I_1$ 、 $J_2$  分别为第一应力不变量与第二偏应力不变量.以应力监测点 A 为例,图6给出了其平均正应力、等效剪应力和应力三维度随掌子面推进的变化曲线.由图6可知,随掌子面推进隧洞顶拱部位的应力路径总体表现为平均正应力减小,等效剪应力增大,其应力状态由三轴受压状态转化至双轴压缩或单轴压缩状态.进一步观察图3中进尺区间50—56m段,测点A主应力大小变化不大,平均正应力量值更是几乎不变,而在这一开挖

推进阶段,主应力轴旋转是较剧烈的(图5),图6中 $R_\sigma$ 与 $\sqrt{J_2}$ 的发展趋势和规律较一致,且在50—56m进尺区间同样变化显著,这一情况说明 $R_\sigma$ 可以描述由于主应力轴旋转引起的开挖应力状态变化.

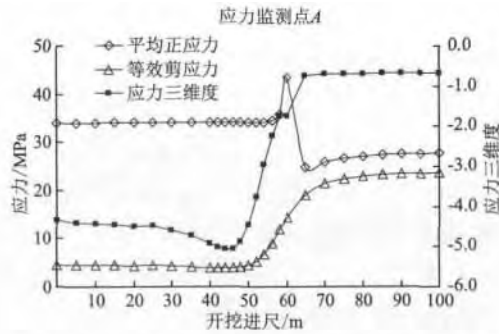
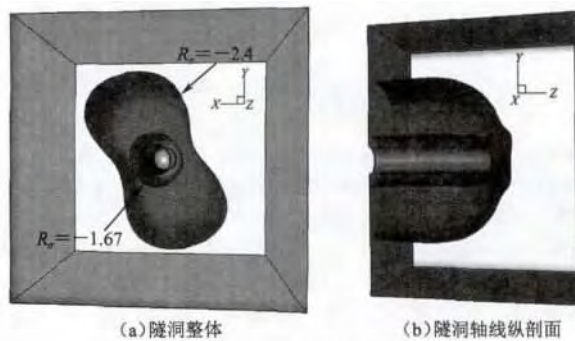


图6  $I_1/3$ 、 $\sqrt{J_2}$ 和 $R_\sigma$ 随掌子面推进的变化曲线

Fig.6 Curves of  $I_1/3$ ,  $\sqrt{J_2}$  and  $R_\sigma$  with tunnel face advancing

由图6中 $R_\sigma$ 变化规律,可将开挖过程中的围岩应力状态变化分为3个阶段.第一阶段开挖进尺0m至约50m处 $R_\sigma$ 由初始值(约-4.2)略有下降,反应了围岩应力受前方开挖影响而小幅调整的情况;第二阶段开挖进尺至参考面所在处( $Z=60m$ ) $R_\sigma$ 迅速增大至约-1.67,这一阶段主应力轴旋转是控制因素;第三阶段为开挖通过参考面直至开挖结束 $R_\sigma$ 上升至约-0.67,其后基本保持不变,这一阶段应力释放是主要控制因素.图7给出了掌子面推进至参考面时的应力三维度等值面透视图.依据前文的分析,尝试将 $R_\sigma$ 曲线上的一些特征点量值作为评价围岩应力扰动程度、扰动机制的门槛值,由此将隧洞开挖后应力扰动区分为两个,一个靠近开挖临空面( $R_\sigma > -1.67$ ),其范围约为0.5倍洞径,其形状分布较均匀,近似为空心圆柱,可称为强应力扰动区,受开挖影响,区内岩体应力释放强烈,应力方向发生较大变化;另一个远离开挖面( $-1.67 > R_\sigma > -4.2$ ),其形状与以洞轴为高程的“山丘”较为相似,山丘底部近似为不规则椭圆形状,其范围约为1—3倍洞径,椭圆长轴走向受初始地应力场影响偏转约 $22.5^\circ$ ,山丘顶部即掌子面前方影响范围约1倍洞径,这一影响区域可称为弱应力扰动区,区内岩体应力状态和应力方向与原岩应力区相比均发



(a) 隧洞整体 (b) 隧洞轴线纵剖面

图7 应力三维度等值面透视

Fig.7 Nephogram of stress triaxiaty

生不同程度变化. 基于应力三维度的开挖应力扰动分区结果与文献 [17] 的结论基本一致, 说明本论文引入的应力状态表征量与相关分区方法是可靠的.

## 4 结论

以锦屏二级水电站引水隧洞为研究实例, 对引水隧洞掌子面推进过程中的围岩应力状态和主应力轴变化规律进行了研究, 对隧洞围岩的开挖应力扰动特征和扰动规律形成了一些初步的认识.

(1) 利用地质学中常用的“极点图”表现方法来描述随掌子面推进, 围岩主应力轴的旋转变化规律. 研究发现随着掌子面推进, 掌子面前方的围岩主应力轴方向调整具有一定共性, 均表现为最大、最小主应力以一定交角指向临空面, 中间主应力近似平行临空面;

(2) 引入金属材料变形破坏中常用的应力状态参数应力三维度来研究围岩应力状态变化规律, 研究表明应力三维度不但可以表征由于开挖应力释放引起的应力状态变化, 还可以描述由于主应力轴旋转引起的应力状态变化. 随掌子面推进隧洞围岩应力状态由三轴受压状态转化至双轴压缩或单轴压缩状态. 掌子面通过参考面前、中、后, 围岩应力开挖扰动主要经历三个典型阶段: 即应力小幅调整、主应力轴强烈旋转和应力释放阶段;

(3) 根据应力三维度与应力状态的对应关系和空间分布特征, 将隧洞围岩开挖应力扰动区划分为强应力扰动区和弱应力扰动区, 其中强应力扰动区靠近开挖临空面, 其范围约为 0.5 倍洞径, 区内岩体应力释放强烈, 应力方向发生较大变化. 强应力扰动区的分布规律与扰动特征与很多文献中关于开挖损伤区 (EDZ) 的报导较为一致, 说明本文引入的应力状态参量与相关分区方法是较为合理的, 可以反应开挖引起的围岩应力扰动分区现象.

## 参考文献

- [ 1 ] 殷黎明, 杨春和, 王贵宾, 等. 地应力对裂隙岩体渗流特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3071-3075  
Yin Liming, Yang Chunhe, Wang Guibin, et al. Study on effect of geostress on permeability of fractured rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3071-3075
- [ 2 ] 郭啟良, 伍法权, 钱卫平, 等. 武鞘岭长大深埋隧道围岩变形与地应力关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2194-2199  
Guo Qiliang, Wu Faquan, Qian Weiping, et al. Study on relationship between deformation of surrounding rock and in-situ stress Wushaoling deep-buried railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2194-2199
- [ 3 ] 朱以文, 黄克戡, 李伟. 地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1344-1348  
Zhu Yiwen, Huang Kejian, Li Wei. Study on effect of in-situ stresses on plastic region induced by excavations of underground openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1344-1348
- [ 4 ] 安其美, 郭啟良, 赵仕广, 等. 地下洞室围岩应力的测量研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 48-53  
An Qimei, Guo Qiliang, Zhao Shiguang, et al. The research and measurements of the stress in surrounding rock of underground tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(1): 48-53
- [ 5 ] 董燕君, 黄纸鹏, 陈赛超. 某地下洞室围岩松动区深度的测试与分析[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(1): 44-47  
Dong Yanjun, Huang Zhipeng, Chen Saichao. Test and analysis for surrounding rock mass disturbed zone of underground cavern[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(1): 44-47
- [ 6 ] 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 Chunsheng ,Chen Xiangrong ,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
- [ 7 ] 杨树新 ,李宏 ,白明洲 ,等.高地应力环境下硐室开挖围岩应力释放规律[J].煤炭学报 2010 ,35 (1) :26-30  
Yang Shuxin ,Li Hong ,Bai Mingzhou ,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
- [ 8 ] 郭啟良 ,赵仕广 ,丁立丰 ,等.地下硐室围岩应力状态及相关参数测量结果的分析与评价[J].岩石力学与工程学报 2007 ,26 (S1) :3361-3366  
Guo Qiliang ,Zhao Shiguang ,Ding Lifeng ,et al. Analysis and evaluation of measurement results of in-situ stress state and related parameters for surrounding rockmass of underground cavern [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 ,26 (S1) :3361-3366
- [ 9 ] 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 Chaowen ,Li Haibo ,Liu Yaqun. 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
- [10] 罗超文 ,李海波 ,刘亚群.煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J].岩石力学与工程学报 2011 ,30 (8) :1613-1618  
Luo Chaowen ,Li Haibo ,Liu Yaqun. Characteristics of in-situ stress and variation law of plastic zone of surrounding rocks around deep tunnels in a coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 ,30 (8) :1613-1618
- [11] Wong R K S ,Arthor J R. Sand sheared by stresses with cyclic variations indirection [J]. Geotechnique ,1986 ,36 (2) :215-226
- [12] Han L. DAYAKAR P Experiment investigation on principle stress rotation in Kaolin clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,ASCE 2005 ,131 (5) :633-642
- [13] 沈扬 ,周建 ,龚晓南.主应力轴旋转对土体性状影响的试验进展研究[J].岩石力学与工程学报 2006 ,25 (7) :1408-1416  
Shen Yang ,Zhou Jian ,Gong Xiaonan. Experimental progress research on influence of principal stress rotation on soils characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 ,25 (7) :1408-1416
- [14] 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 Hongwei ,Li Jing ,Xie Xinyu ,et al. Research on stress path during excavation considering rotation of principal stress axis [J]. Rock and Soil Mechanics 2012 ,33 (4) :1013-1017
- [15] Eberhard T. 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
- [16] 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 Sherong ,Liang Lihui. Analysis on tunnel liner supporting time considering three-dimensional stress rotation [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2007 ,38 (6) :704-709
- [17] 景锋.中国大陆浅层地壳地应力场分布规律及工程扰动特征研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所 2009  
Jing Feng. Research on the distribution rule of the shallow crustal geostress field in the China mainland and engineering disturbance characteristics [D]. Wuhan: Insititute of Rock and Mechanics ,Chinese Academy of Sciences ,2009
- [18] 陈国庆 ,冯夏庭 ,周辉 ,等.锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J].岩土力学 2007 ,28 (S1) :417-422  
Chen Guoqing ,Feng Xiating ,Zhou Hui ,et al. Numerical analysis of the long-term stability of the seepage tunnel in Jinping II Hydropower Station [J]. Rock and Soil Mechanics 2007 ,28 (S1) :417-422
- [19] 陈明 ,胡英国 ,卢文波 ,等.锦屏二级水电站引水隧洞爆破开挖损伤特性研究[J].岩土力学 2011 ,32 (S2) :172-177  
Chen Ming ,Hu Yingguo ,Lu Wenbo ,et al. Blasting excavation induced damage characteristics of diversion tunnel for Jinping cascade II hydropower station [J]. Rock and Soil Mechanics 2011 ,32 (S2) :172-177
- [20] 吴世勇 ,任旭华 ,陈祥荣 ,等.锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定性分析及支护设计[J].岩石力学与工程学报 ,2005 ,24 (20) :3777-3782

- Wu Shiyong ,Ren Xuhua ,Chen Xiangrong ,et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for Jinping Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24 (20) :3777-3782
- [21] 李海波 ,梁立孚 ,陈德民. 考虑主应力轴旋转土体的应力增量分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报 ,2001 ,22 (4) :56-60  
Li Haibo ,Liang Lifu ,Chen Demin. Analysis of stress increment considering rotation of principal stress axes of soil [J]. Journal of Harbin Engineering University 2001 22 (4) :56-60
- [22] Bao Yingbin ,Tomasz W. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. International Journal of Mechanical Sciences 2004 46 :81-98
- [23] Bao Yingbin. Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality ,stress and strain ratios [J]. Engineering Fracture Mechanics 2005 72 :505-522
- [24] 马凯 ,李智慧 ,汤安民. 金属材料断裂与应力状态参数的关系 [J]. 西安理工大学学报 2007 23 (2) :201-204  
Ma Kai ,Li Zhihui ,Tang Anmin. The relation between fracture of metal material and stress state parameter [J]. Journal of Xi'an University of Technology 2007 23 (2) :201-204

## Stress Disturbance Characteristics and Law Research of Surrounding Rock During Tunnel Excavation

ZHU Zeqi<sup>1</sup> , SHENG Qian<sup>1</sup> , ZHOU Yongqiang<sup>1</sup> , LIU Jigu<sup>2</sup> , SONG Kanglin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,Institute of Rock and Soil Mechanics ,Chinese Academy of Sciences ,Wuhan 430071 ,China; 2. China Second Highway Survey ,Design and Research Institute of Communications ,Wuhan 430056 ,China)

### Abstract

Regarding the diversion tunnel of Jinping secondary hydropower station as the research instance ,the surrounding rock stress state and variation of principal stress axes were studied in the advancing process of tunnel face of diversion tunnel. Respectively through the pole diagram performance of geological data processing method and stress triaxiality of stress state parameter of fracture mechanics ,describe the rotation variation of principal stress axes and variation of stress state. Study shows that as tunnel face advances ,the reorientation of principal stress axes of surrounding rock in front of tunnel face has some generality ,which is that maximum and minimum principal stress both point to free face with a certain angle and intermediate principal stress is approximate parallel to free face ,as well ,stress state of tunnel surrounding rock is transformed from triaxial compression to biaxial compression or uniaxial compression. Finally ,based on the relation between stress triaxiality and excavation footage and spatial distribution characteristics of stress triaxiality ,the stress disturbed zone of surrounding rock during tunnel excavation is divided into strong stress and weak stress disturbed zones. On this basis ,authors analyze stress disturbance characteristics and law of each disturbed zone ,the related conclusions and understanding can provide theoretical and engineering significance.

**Keywords:** diversion tunnel; surrounding rock; excavation disturbance; principal stress axis; stress triaxiality