

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.04.005

深部隧洞围岩分区破裂应力/应变分析及其破裂机理探讨

朱训国^{1,2}, 陈卓立^{1,2}, 赵德深^{1,2}

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;

2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测防治重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要: 分区破裂是深埋隧洞围岩破坏的特定类型, 发生围岩分区破裂的条件是存在一个较大的平行于隧洞轴向的应力。通过分析实际工程实例, 阐述了发生分区破裂后围岩的应力-应变特征, 建立了不同破裂圈界面的应力-应变平衡方程, 得出了在不同界面上围岩的径向位移突变, 环向位移连续的特征, 进而推出新的破裂圈的发生是围岩应力再分布或能量再平衡的结果。通过推导不同相邻破裂圈半径的比值, 得到了二者之间的比例关系。通过确定深埋隧洞所处应力环境, 提出了发生分区破裂的根本原因是较大的构造应力的影响, 并提出了确定应力大小的方法。最后, 通过对工程实例的分析, 验证了所提结论的有效性。研究结论可以对相关类似工程提供一定的指导意义。

关键词: 岩石力学; 深埋隧洞; 围岩分区破裂; 应力-应变特征

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)04-0402-06

Analysis of the stress/strain of the zonal disintegration wall rock and discussion of its fracture mechanics in deep tunnel

ZHU Xunguo^{1,2}, CHEN Zhuoli^{1,2}, ZHAO Deshen^{1,2}

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prediction and Control of Complex Structure System, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: The zonal disintegration is a specific type fracture of the surrounding rock in the deep tunnel, which may take place when the stress is too large and parallel to the tunnel axial direction. In this paper, the stress-strain characteristics of the surrounding rock in the phenomenon of zonal disintegration are explained through an analysis of the engineering examples. A stress-strain equilibrium equation to the different zonal disintegration loop interface is established. Based on it, it is obtained that the radial displacement suddenly changes, and the tangential displacement continues in the loop interface, indicating that the occurrence of the new disintegration loop is due to the stress redistribution or energy balance of the surrounding rock. The ratio of the adjacent disintegration loops' radius is derived to obtain their proportional relationship. The occurrence of zonal disintegration is the result of large tectonic stress in the deep tunnel. The analysis results of engineering cases demonstrate the performance and effectiveness of the proposed model, which could provide a reference for the practical engineering application.

Key words: rock mechanics; deep roadway engineering; the zonal disintegration of surrounding rock; stress-strain characteristics

随着国民经济的发展, 出现了大量的深部岩体工程。实践表明: 工程埋深越大, 地质构造越复杂, 地质构造运动更活跃, 出现了所谓的“三高”问题; 即

高地应力、高地温、高渗透^[1]。在开挖过程中, “三高”问题导致了卸荷作用下的高岩爆、大变形、以及大型垮塌等深部工程地质破坏问题, 产生大量的人

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374045); 大连大学博士专项基金资助项目(08-6)

作者简介: 朱训国, 男, 副教授, 博士, 研究方向为地下工程岩体稳定性分析与支护。E-mail: zhu_xunguo@hotmail.com

人员伤亡和财产损失。其中,深部巷道分区破裂就是一种非常复杂的“三高”影响卸荷作用下的围岩破坏问题。

深部巷道分区破裂问题最早是由前苏联专家在对实际工程监测过程中发现的^[2],随后大量的学者对此问题进行了卓有成效的研究工作,并取得了大量的成果^[3]。而我国最早发现这一问题的则是对锚杆的受力监测中发现了这一有趣现象^[4]。后来,陆续有些学者在对深部巷道围岩应力/应变监测中发现,围岩应变的变化随着距离巷道距离的延伸呈现近似波浪变形^[5-6]。而更深入的研究工作则开始于钱七虎院士^[7]、顾金才院士^[8]等研究者的开拓性研究工作。

尽管对深部巷道分区破裂的研究已经取得了大量的研究成果,但依然存在很多值得研究的问题,如破裂力学机制依然不是很明晰和系统化,以及如何有效制止分区破裂问题等等。因此,本文试图通过对实际巷道中分区破裂现象的定性描述,通过理论分析,建立深部巷道发生围岩分区破裂的应力应变方程,以及破裂半径的表达函数,进而分析分区破裂范围大小,探讨围岩破裂的力学机制等。

1 工程实例分析

1.1 工程实例一

文献[9]通过钻孔电视对中平6矿3313工作面运输平巷监测断面进行了围岩变形的监测工程,对比了10 d和50 d的监测结果,研究了巷道围岩随时间变化的内部变形结果,得到了巷道分区破裂效果示意图(见图1)。

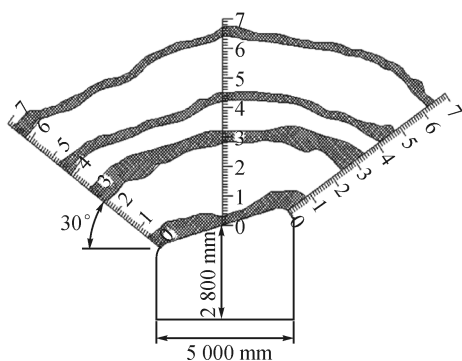


图1 监测断面围岩分区破裂分布

Fig. 1 Zonal disintegration of deep tunnel of monitoring section

文献[9]通过对比不同时间的监测结果发现,不同时段围岩变形是不同的,其随时间的发展而变化,充分说明了分区破裂现象是一个时空演化问题。

通过对监测结果的分析,本文作者认为,深部开

挖隧洞与浅埋开挖隧洞其围岩变形具有较大的差异性。由于深部开挖隧洞处于较高的地应力环境,在隧洞开挖后,其洞壁围岩处于卸荷状态,当卸荷应力超过岩体的极限拉应力时,围岩发生破裂,形成破裂圈。破裂圈的形成导致围岩扩容,再次给围岩塑性区提供径向支撑力,此时原有的塑性区基本不发生明显破裂,仅仅发生塑性变形,从整体看处于较为完整的状态。在空间中类似形成了一个原有隧洞半径加洞壁破裂区半径的更大的隧洞。由于隧洞所处地应力环境基本不变,由此所形成的新隧洞再次发生原有隧洞的围岩变形。当围岩卸荷应力小于岩石的极限拉应力时,破裂停止,最终形成围岩破裂区-完整塑性区-破裂区的交替特征。

1.2 工程实例二

文献[10]采用钻孔电视成像仪对准南丁集矿-910采区轨道巷道进行监测,研究了围岩的分区破裂与巷道尺寸之间的关系,通过对监测结果的统计分析,得到了不同断面围岩分区破裂平均分布示意图(见图2)。

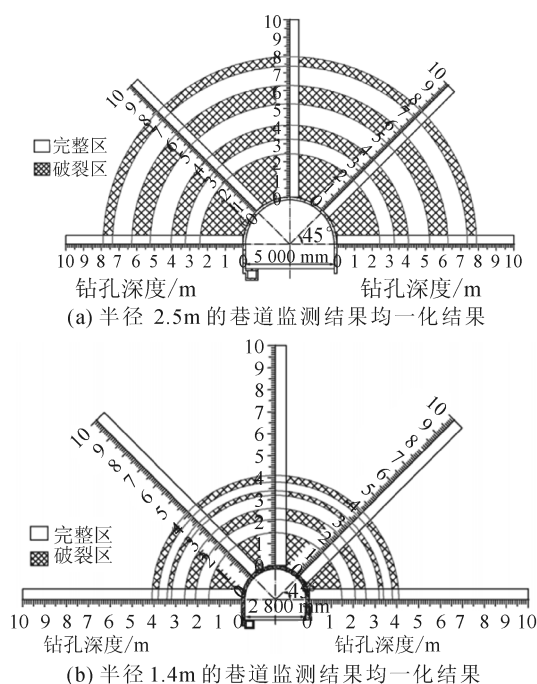


图2 不同断面围岩分区破裂监测结果均一化结果示意图^[10]

Fig. 2 Zonal disintegration of average fracture distribution of different sections

通过对监测结果的统计分析,发现分区破裂范围与巷道尺寸有较大的关系,开挖半径较大的巷道其围岩中发生分区破裂的范围也较大,开挖半径较小的巷道其围岩中发生分区破裂的围岩也较小。通过分析,可以简化认为巷道分区破裂的范围与巷道的半径基本呈正比关系。二者之间可以采用下式

拟合:

$$r_i = (\sqrt{2})^{i-1} r \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中, i 为破裂区域的编号。

大量的工程实例表明,分区破裂存在于深部巷道围岩破坏中是一种破坏动态扩展的时空问题。是从一种平衡状态通过能量的转化,转移到另一种平衡状态的运动。钱七虎^[11]综合了国内外研究成果,给出了分区破裂化的基本定义。根据大量的文献分析,现场监测和试验结果的研究,本文作者认为,深部巷道发生分区破裂是需要一定条件的^[12]:

1) 深部开挖隧洞所处地应力由较高的自重应力和较高的构造应力组成,其中大部分以构造应力作为主控制应力,构造应力的方向基本处于水平且平行或近似平行隧洞轴线。通过实测结果表明,发生分区破裂时隧洞轴向的构造应力较高,明显高于自重应力。

2) 从室内实验及现场实测来看,发生分区破裂的隧洞一般为圆形或马蹄形,矩形隧洞发生分区破裂的可能较低。因此,从隧洞外形看,圆形或马蹄形隧洞的基本特点是隧洞壁比较规则且齐整,相对而言具有较大的曲率半径。即隧洞围岩必须有良好的变形空间才可以发生分区破裂现象,否则只能发生传统的围岩片帮或崩塌现象。

2 定性分析

随着巷道埋深不断增加,巷道所处地应力环境也在随之变化。当巷道所处地应力,尤其是所处的构造应力达到围岩极限强度后,巷道围岩的应力状态与原岩应力环境出现了变形不协调,高应力环境会导致围岩产生应变软化,围岩出现应变软化后进而出现围岩的蠕变,为了保持围岩的平衡状态,围岩则在较大的水平构造应力作用下产生横向变形。由于边界条件的约束,膨胀只能下巷道空间进行运动和发展,即围岩在洞壁介质内产生径向拉应变 ϵ_r 。

如图3所示,随着隧洞围岩的卸荷变形的发展,靠近隧洞壁的围岩径向应变逐渐增大,围岩变形逐渐向围岩内部发展,在某一位置达到最大值。然后围岩径向应变逐渐递减,整个变形基本呈类似 $y = Ax \exp(-Bx^2)$ 指数递减函数状态。根据莫尔强度理论,隧洞围岩的破坏主要是剪切破裂和拉伸张开破裂,进而形成类似滑移线的破裂圈^[17]。此时,类似于在原有隧洞的基础上形成了一个更大曲率半径的隧洞,新的隧洞在高应力环境下(构造应力大于自重应力),围岩内滑移线破裂圈的不断重复,形成分区破裂现象,直至围岩径向应变或应力小于极限拉

应变或拉应力时停止发展。

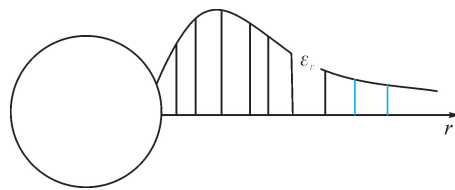


图3 洞周径向应变分布示意图^[16]

Fig. 3 Sketch of distribution of radial strain around tunnels

3 理论分析

对于分区破裂的研究,很多学者对此进行了深入的研究,得到了大量的研究成果,如王明洋^[13]、戚承志^[14]、周小平^[15]等。陈伟^[16]根据顾金才院士的试验模型,建立了隧洞的力学模型,提出了支撑力的概念,认为支撑力可以采用下式

$$P_1 = (1 + \mu)P \left(a' - \frac{a^2}{a'} \right) \quad (2)$$

式中: P_1 为支撑力; μ 为隧洞围岩的泊松比; a 、 a' 分别为隧洞形成破裂圈前后隧洞的半径。

支撑力的概念,可以有效的解决隧洞分区破裂的相关现象,其内涵就是将支护力和支护后面的应力集中有机的结合起来,通过分析支护后围岩的受力特征,分析围岩是否发生分区破裂现象,并提出发生分区破裂的条件。

随着巷道埋深的增大,隧洞围岩的应力状态发生了很大的变化。通过大量的监测和试验结果的分析得出,在围岩中可以将岩体的受力分为两部分,一部分为压应力,一部分为拉应力^[13]。拉压之间的截面定义为 c - c 截面(见图4)。

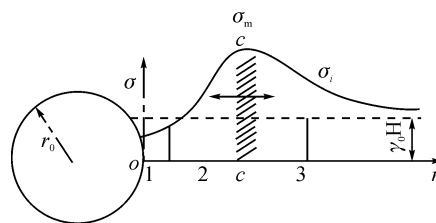


图4 深部圆形巷道附近应力分布状态^[13]

Fig. 4 Stress distributing state of rocks around deep underground workings

假定在 c - c 截面的所有应力都是压应力,变形也假定为线性压缩变形。根据毛洞附近围岩应力状态的特点,由于 c - c 截面所处的应力为最大切向压应力,此截面区域的围岩在围岩应力的作用下发生变形。

围岩应变可以分解为径向应变和切向应变,根据弹性力学理论,围岩弹性区的应变场分布函

数为^[17]:

$$\begin{cases} \epsilon_{re} = \frac{(1+\mu)}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) \\ \epsilon_{\theta e} = \frac{(1+\mu)}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{re}, \epsilon_{\theta e}$ 分别为围岩弹性区径向、切向应变; μ 为围岩泊松比; E 为围岩的弹性模量; σ_r, σ_θ 分别为隧洞围岩的径向、切向应力。

塑性区的应变场分布函数为^[17]:

$$\begin{cases} \epsilon_{\theta p} = \frac{2R_p^2}{r^2} \frac{1+\mu_p}{E_p} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \\ \epsilon_{rp} = -\frac{2R_p^2}{r^2} \frac{1+\mu_p}{E_p} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{rp}, \epsilon_{\theta p}$ 分别为围岩塑性区径向、切向应变; μ_p 为塑性区围岩泊松比; E_p 为塑性区围岩的弹性模量; p_0 为围岩原岩应力; c 为围岩粘聚力; ϕ 为围岩内摩擦角; r 为塑性区内某点至隧洞中心点的半径。

对式(3)~(4)进行变换^[17],可得弹性区和塑性区相应位移场的分布函数为:

$$\begin{cases} u_e = \frac{1+\mu}{E} p_0 [(1-2\mu)r] + \frac{1+\mu}{\mu} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \frac{R_p^2}{r} \\ u_p = \frac{2R_p^2}{r} \frac{1+\mu}{\mu} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_e, u_p 分别为隧洞弹性区和塑性区围岩径向位移函数。

当 $r=R_p$ 时,在弹性区和塑性区分界面,围岩的应变场用如下函数表征:

$$\begin{cases} \epsilon_{\theta e} = \frac{1+\mu}{E} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) + p_0 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} \\ \epsilon_{re} = -\frac{1+\mu}{E} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) + p_0 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E} \\ \epsilon_{\theta p} = 2 \frac{1+\mu_p}{E_p} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \\ \epsilon_{rp} = -2 \frac{1+\mu_p}{E_p} (p_0 \sin\phi + c \cos\phi) \end{cases} \quad (6)$$

综合式(3)~(6)可得: $\epsilon_{\theta e} = \epsilon_{\theta p}$,而 $\epsilon_{re} \neq \epsilon_{rp}$ 。

根据以上分析,岩体在巷道围岩某处发生切向曲面破裂,此处的位置可以用 $r=c$ 标定,此时的破裂体应该是一个平行于巷道轴线的圆柱体或者是一个滑移线破裂体。此时,以 $r=c$ 为界,在靠近巷道空间的围岩区,岩体发生卸荷变形,即 $r_0 \leq r \leq c$ 区域的岩体发生卸荷变形。此时, $r=c$ 处的岩体发生破裂后,形成新的虚拟巷道半径,此时虚拟巷道半径

为 $r=c$,新巷道围岩中的应力重新分配,此时在围岩内部就可能形成新的支撑区。如此循环,只要围岩体所受应力超过其 σ_c ,巷道围岩势必发生分区破裂,当围岩内的应力等于或小于 σ_c 时,分区破裂停止。

上述分析中,关键是找到 $r=c$ 的具体位置。根据文献[17],当隧洞围岩发生变形时,围岩弹性区和塑性区之间的位移存在如下结论:在塑性区半径位置的围岩径向位移发生突变,而切向位移连续。因此,可以认为 $r=c$ 的具体位置就是围岩塑性区半径 $r=R_p$ 。围岩塑性区半径可以采用芬纳公式进行计算:

$$R_p = a \left[\frac{(p_0 + c \cot\phi)(1 - \sin\phi)}{c \cot\phi} \right]^{\frac{1-\sin\phi}{2\sin\phi}} \quad (7)$$

式中: R_p 为塑性区半径; a 为隧洞半径;其他参数同式(4)中相应参数。

根据径向位移突变、切向位移连续的结论,当 $r=R_p$ 时出现第一圈破裂面,围岩发生再次应力重分布。此时,相当于在原有隧洞半径的基础上增加了隧洞的半径,形成一个新的“隧洞”。则在新的隧洞中,由于应力的重分布,围岩内将形成新的弹性区和塑性区,此时,塑性区的半径将变为:

$$R'_p = R_p \left[\frac{(p'_0 + c \cot\phi)(1 - \sin\phi)}{c \cot\phi} \right]^{\frac{1-\sin\phi}{2\sin\phi}} \quad (8)$$

式中: R'_p 为新塑性区半径; p'_0 为隧洞围岩形成第一破裂圈后,围岩应力重分布后的地应力。

因此,在 $r=R'_p$ 处,为了保持围岩的稳定,径向位移突变、切向位移连续的结论依然成立,为了保持围岩能量平衡,应力再次进行重分布,围岩形成新的弹性区和塑性区,此时塑性区的半径变为:

$$R''_p = R'_p \left[\frac{(p''_0 + c \cot\phi)(1 - \sin\phi)}{c \cot\phi} \right]^{\frac{1-\sin\phi}{2\sin\phi}} \quad (9)$$

式中: p''_0 为隧洞围岩形成第二破裂圈后,围岩应力重分布后的地应力。

此时,在此处将产生新的破裂面。以此类推,新的破裂面的出现,势必导致围岩内应力重分布,出现多个破裂面。破裂面的多少,取决于围岩的初始地应力的大小和围岩发生破坏后的残余强度。当隧洞围岩如此破裂后,各破裂区的径向位移指向隧洞空间,在各破裂区之间形成裂缝,裂缝的大小相当于新旧塑性区和弹性区半径之差。

由上述研究分析可得,当围岩内的塑性区和弹性区交界区的岩体在应力作用下发生破裂,产生破裂区和塑性区,其中破裂区应变场分布函数为:

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon'_{\theta p} &= \frac{2R_p^2}{r^2} \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} \times \\ &\quad \frac{1 + \mu_p}{E_p} (p_0 \sin \phi + c \cos \phi) \\ \epsilon'_{rp} &= -\frac{2R_p^2}{r^2} \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} \times \\ &\quad \frac{1 + \mu_p}{E_p} (p_0 \sin \phi + c \cos \phi) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

塑性区应变场分布函数为:

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_{\theta p} &= \frac{2R_p^2}{r^2} \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} \times \\ &\quad \frac{1 + \mu_p}{E_p} (p_0 \sin \phi + c \cos \phi) + p_0 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E} \\ \epsilon_{rp} &= -\frac{2R_p^2}{r^2} \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} \times \\ &\quad \frac{1 + \mu_p}{E_p} (p_0 \sin \phi + c \cos \phi) + p_0 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

因此,在分析第一个破裂圈时,将 $r = R_p$ 分别带入式(9)和式(12),就可以得到新旧塑性区的应变场,并将突变径向应变进行处理,可得:

$$\frac{\epsilon_{Nr}}{\epsilon_{Or}} = \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} = \sqrt{\frac{R_p}{a}} > 1$$

以此类推,围岩在 $r = R'_p$ 再次发生新的破裂圈,当隧洞围岩不断发生破裂后,各破裂区和非破裂区内岩体分离后的应变场、位移场基本可以采用图 5 表征。

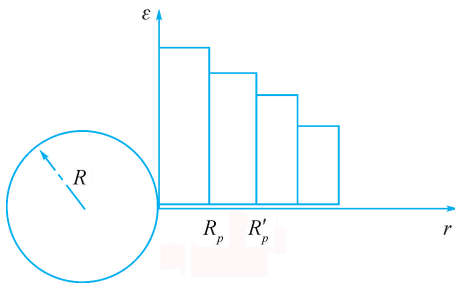


图 5 分区破裂现象出现后洞周围岩应变场分布
Fig. 5 Strain field distribution of surrounding rock after phenomenon of zonal disintegration occurring

从图 5 中分析可得,围岩破裂圈分层递进,分布趋势趋同,但量值有所差异,明显前者大于后者。很多的模型试验也验证了此结论^[19]。图 5 中围岩的应变计算结果不同于实测结果,文献^[8,12-13,18-19]中实测得到的分区破裂围岩的应变分布特征,其分区呈衰减波形。之所以产生差异的原因在于计算结果是将每个破裂圈内的参数统一化造成的,但总体分区趋势与现场实测和室内试验结果一致。

位移场和应变场的这种分布特征,主要是由于围岩应力场的不断重分布,为了保持应力场和能量场的平衡,围岩中就不断的出现破裂圈,直到应力场和能量场平衡后停止破裂。则新旧塑性区半径之比为:

$$\left(\frac{R_p^n}{R_p^{n-1}} \right) = \left[\frac{(p_0^n + c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cot \phi} \right]^{\left(\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi} \right)} \quad (12)$$

式中 R_p^n 、 p_0^n 中的 n 是破裂区的编码, $n=2,3,4,\dots$ 。

因此,可以通过上式对隧洞分区破裂进行基本划分,得到大体的范围,但具体的需要充分考虑隧洞围岩的应力环境与围岩力学参数。需要说明的是,在上式中,可以认为围岩体的 c 、 ϕ 不同分区破裂后的值没有发生变化,但 p_0^n 则是围岩应力场不断重分布后的应力场,更要考虑此时隧道所受到的是自重应力为主还是构造应力为主。因此,本文建议 p_0^n 可以取主要控制力。如在深部隧洞中,其主要控制作用的应力是构造应力,而非自重应力,因此在计算式(12)时, p_0^n 应该取构造应力,并且由于应力场的不断改变,应该做一定的实测得出构造应力的分布规律计算相应的构造应力值,而不是取自重应力。因为大量的实测和实验证明,以自重应力为主的隧洞是不会发生分区破裂现象的,在发生分区破裂现象的隧洞中,起主要作用的应该是平行于隧洞轴向的构造应力。根据我国地应力测量资料,在地层超过 500 米以上的最大和最小水平应力随深度的变化规律为^[20]:

$$\begin{cases} \sigma_{H_{\max}} = (4.5 \pm 2.5) + 0.049Z \\ \sigma_{H_{\min}} = (1.5 \pm 1.0) + 0.030Z \end{cases} \quad (13)$$

4 工程实例验证

根据式(12)对实例 1 进行分析,根据图 1 中的标注,可将隧洞等效为半径 2.1 m 的圆形隧洞(包括毛洞洞壁的破坏区厚度)。文献^[9]中指明,隧洞处于泥岩和细砂岩中,埋深 710 m,此时构造应力起主要作用。因此, p_0^n 为构造应力,取水平构造应力进行计算,根据式(13),并结合实测数据,确定 $p_0^n = 21$ MPa。参考地勘资料,围岩力学参数 $c = 2.9$ MPa、 $\phi = 30^\circ$,代入式(12)可得新老破裂区半径之比为 1.6,即第一个破裂区的半径为 3.36 m,第二个破裂区半径则为 5.38 m,第三个破裂区半径则为 8.61 m。对比实测数据,采用式(12)所计算的破裂区半径要比实测结果稍大,主要是在进行分析时,没有考虑岩体的各向异性和不均匀性,以及受地应力大小的影响所导致的。

同理,采用式(12)对工程实例2进行分析,根据图2中的标注,隧洞等效半径2.3 m,文献[10]中指明隧洞处于泥岩和中砂岩中,埋深910 m,此时构造应力起主要作用,因此根据式(12)并结合实测数据,确定 $p_0=27.3$ MPa,参考地勘资料,围岩力学参数 $c=2.9$ MPa, $\phi=25.6^\circ$,代入式(12)可得新老破裂区半径之比为1.4,即第一个破裂区的半径为3.22 m,第二个破裂区半径则为4.48 m,第三个破裂区半径则为6.2 m,第四个破裂区半径为8.7 m。总体来看,采用本文分析得到的破裂区半径基本符合实测结果。

上述工程实例分析,验证了本文所得到的结论是正确的,对于分区破裂现象的分析,可以参考本文的相关推导进行分析,有助于对此问题的探讨和认识。

5 结 论

通过对深埋隧洞分区破裂实例的分析,建立了分区破裂的力学分析模型,在此基础上得到了破裂区和非破裂区界面的应力和应变方程,根据上述方程推导了新旧破裂区半径的关系,其主要结论如下。

1) 发生区破裂的深埋隧洞围岩破裂区与非破裂区界面存在位移突变现象,即在二者界面处围岩径向位移发生突变,而切向位移连续。

2) 在位移突变处的应力特点是,界面过渡区环向应力发生间断,这种跳跃式的变化,说明岩石发生破裂后界面的 c 值完全丧失。

3) 由于围岩发生破裂,因此随着材料的破坏围岩破裂区和非破裂区将产生扩容现象,即分析区内的岩石体积随着位移的增长而增长。也就是说在破裂区将产生大量的裂缝。

4) 分区破裂基本呈非对称的波浪形,破裂环的多少取决于围岩的初始应力状态及材料破坏后的峰值应力。

5) 各破裂区之间的关系可以用式(12)表征,由此可见,新旧破裂区的大小与围岩的应力状态 p_0 有直接关系,受其直接影响。

参考文献:

[1] 汪洋,曾雄辉,尹健民,等.考虑卸荷效应的深埋隧洞围岩分区破坏数值模拟[J].岩土力学,2012,33(4): 1233-1239.
WANG Yang, ZENG Xionghui, YIN Jianmin, et al. Numerical simulation of zonal cracking of deep tunnel

surrounding rock considering unloading effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1233-1239.
[2] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part I: Data of in situ observations [J]. Soviet Mining, 1986, 22(3): 157-168.
[3] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground mines, part III: Theoretical concepts [J]. Soviet Mining, 1987, 23(1): 1-6.
[4] 李世平. 权台矿3109综采区煤巷锚杆试验观测报告——兼论煤巷锚杆特点与锚杆参数选择的新观点[J]. 中国矿业学院学报, 1979, (3): 19-58.
LI Shiping. Observation of coal roadway roof bolt tests at 3109 mechanized section at Quantai Mine: Characteristics of coal roadway roof bolts and new viewpoints on the choice of roof bolt parameters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1979, (3): 19-58.
[5] 贺永年. 软岩巷道围岩松动带及其状态分析[J]. 煤炭学报, 1991, 16(2): 63-70.
HE Yongnian. Analysis of loose zone around the roadway in soft rock [J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(2): 63-70.
[6] 方祖烈. 软岩巷道维护原理与控制措施[M]//何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996.
[7] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 华东理工学院学报, 2004, 27(1): 1-5.
QIAN Qihu. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1-5.
[8] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433-438.
GU Jincai, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433-438.
[9] 姜光, 朱守颂, 谷满, 等. 深部矿井巷道围岩分区破裂实测研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(6): 83-85.
JIANG Guang, ZHU Shousong, GU Man, et al. Zonal disintegration observation of roadway's surrounding rock in deep mine [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(6): 83-85.

(下转第485页)

- SHEN Yongge, LI Fanning, LI Zheng. Infrared image acquisition based on SOPC [J]. Infrared Technology, 2010, 32(6): 311-314.
- [9] 罗宁, 方向忠, 张文军. 一种新的用于视频格式转换的中值滤波算法 [J]. 中国图象图形学报 A 辑, 2003, 8(增刊 1): 32-35.
- LUO Ning, FANG Xiangzhong, ZHANG Wenjun. A new median filtering algorithm for video format conversion [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(S1): 32-35.
- [10] 盛磊, 徐科军. 一种彩色空间变换的 FPGA 实现方法 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增刊 2): 378-380.
- SHENG Lei, XU Kejun. A FPGA implementation of color space conversion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 378-380.
- [11] 王骞, 丁铁夫. 高速图像存储系统中 SDRAM 的实现 [J]. 液晶与显示, 2006, 21(1): 48-52.
- WANG Qian, DING Tiefu. Realization of SDRAM controller in high-speed image storing system [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2006, 21(1): 48-52.
- [12] 刘攀, 王红亮, 孟令军. 基于 FPGA 的数字图像采集存储系统的设计 [J]. 电视技术, 2010, 34(6): 32-34.
- LIU Pan, WANG Hongliang, MENG Lingjun. Design of digital image acquisition and storage system based on FPGA [J]. Video Engineering, 2010, 34(6): 32-34.
- (责任编辑 王绪迪)
-
- (上接第 407 页)
- [10] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1545-1553.
- LI Shucai, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1545-1553.
- [11] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题 [C]//中国岩石力学与工程学会第八次学术大会, 北京: 科学出版社, 2004: 10-17.
- [12] 袁亮, 顾金才, 薛俊华, 等. 深部围岩分区破裂化模型试验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 987-993.
- YUAN Liang, GU Jincai, XUE Junhua, et al. Model test research on the zonal disintegration in deep rock [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 987-993.
- [13] 王明洋, 宋华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1771-1776.
- WANG Mingyang, SONG Hua, ZHENG Daliang, et al. On mechanism of zonal disintegration within rock mass around deep tunnel and definition of “deep rock engineering” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1771-1776.
- [14] 戚承志, 钱七虎, 王明洋, 等. 深隧道围岩分区破裂的数学模拟 [J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3439-3446.
- QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang, et al. Mathematical modeling of zonal disintegration of surrounding rock near deep tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3439-3446.
- [15] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 877-885.
- ZHOU Xiaoping, QIAN Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877-885.
- [16] 陈伟, 王明洋, 顾雷雨. 深埋洞室围岩分层断裂现象模型试验解析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2680-2686.
- CHEN Wei, WANG Mingyang, GU Leiyu. Solution to model test of layered failure within rock mass around deep-buried tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2680-2686.
- [17] 郑永学. 矿山岩体力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [18] 陈旭光, 张强勇. 高应力深部洞室模型试验分区破裂现象机制的初步研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 84-90.
- CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 84-90.
- [19] 李剑锋, 程建龙, 冯朝朝. 深部软岩巷道围岩分区破裂模拟实验 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 298-305.
- LI Jianfeng, CHENG Jianlong, FENG Chaochao. Experiment simulating on zonal disintegration in rock mass of the surrounding rock of deep soft rock roadway [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(3): 298-305.
- [20] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- (责任编辑 王绪迪)