

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0549-04

裸洞隧道病害形成耦合机制分析

叶伟坤¹, 孟庆山²

(1. 上海警通建设集团公司, 上海 200233; 2. 上海市市政工程质量监督站, 上海 200023)

摘要: 裸洞隧道病害的产生主要是地下应力场在损伤、渗流、温度等因素的耦合作用下形成的, 是非常复杂的非线性耦合过程。从裸洞隧道开挖后的弹塑性应力场出发, 使用Bui损伤模型与地下水渗流场组成的激励-反应耦合系统研究病害形成的耦合机制。结果表明, 裸洞隧道病害是损伤和渗流耦合强度因子在0.5左右时产生的, 随着隧道围岩裂隙的扩展和损伤程度的加剧, 围岩塑性区半径随水压力的增加而迅速增大, 加速隧道病害的产生, 其结果为探明裸洞隧道病害形成机制研究、治理与防护起到一定的理论指导意义。

关键词: 裸洞隧道; 病害; 非线性耦合; 渗流

中图分类号: U 457

文献标识码: A

Coupling mechanism analysis of cavern tunnel disease forming

YE Wei-kun¹, MENG Qing-shan²

(1. Shanghai Jingtong Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Quality Supervision Station, Shanghai 200023, China)

Abstract: Cavern tunnel diseases, mostly forming underground stress field under the action of damage, seepage, temperature and other factors, are very complicated nonlinear coupling process. In this paper, the author employs the stimulate-response coupling system being made up of Bui damage model and seepage field, the result shows that the diseases will form obviously when the coupling strength factor is about 0.5, with the cranny expanding and the damage increasing in the surrounding rock, the plastic Radius of underground rock is increasing with the porous hydraulic pressure, it speeds up the appearance of tunnel diseases. It has some positive significance to prove up the coupling mechanism, the repair and the the protection of the cavern tunnel.

Key words: cavern tunnel; disease; nonlinear coupling; seepage

1 前言

由于经济和技术等方面的原因, 在早期的道路和其他地下设施修建过程中, 存在大量未加支护或简单支护的地下洞室, 尤其是在边远山区等级较低的道路上更为常见。在长期的运营过程中, 出现了种类繁多的病害, 最主要的有隧道渗漏水严重、隧道过度变形、掉块或坍塌、路面积水等; 在寒冷地区, 冬季还会出现冰挂或路面结冰现象, 对当地的经济和生产生活产生重大影响, 严重制约了交通运输的正常运转, 亟需整治与防护。因此, 针对裸洞隧道, 必须加强病害形成机制研究, 提出合理有效的整治防护方法, 本文拟从裸洞隧道应力随时间的变化、地下水渗流与应力耦合方面加以尝试。关于

岩体流体-固体耦合、流体-固体-温度耦合的研究比较普遍, 并且取得了一定的成果^[1-8]。在研究岩石与地下渗流的相互耦合关系时, 一般假定岩体裂隙是贯通的, 采用非Darcy渗流理论进行耦合, 但是针对裸洞隧道的研究文献较少。

裸洞开挖以后, 岩土体由原来的三向受力状态改变为双向受力状态, 应力进行重分布, 在隧道超欠挖处集中最为明显。对于抗拉强度较低的岩石类材料来说, 极易产生失稳。处于地下的岩体多孔而且存在大量的裂隙, 再加上人为爆破震动损伤破坏, 围岩的受力状态劣化严重。另一方面, 由于地下水的存在, 一旦形成地下水通道, 弱化岩石强度参数、携带夹层物质流出, 出现隧道病害则是必然的。

收稿日期: 2007-05-30

作者简介: 叶伟坤, 男, 1971年生, 工程师, 主要从事公路工程施工工作。

2 裸洞隧道应力分析

隧道开挖以后,由原来的三向受力变化为两向受力状态,圆形洞室开挖后的应力状态和分布见图1。

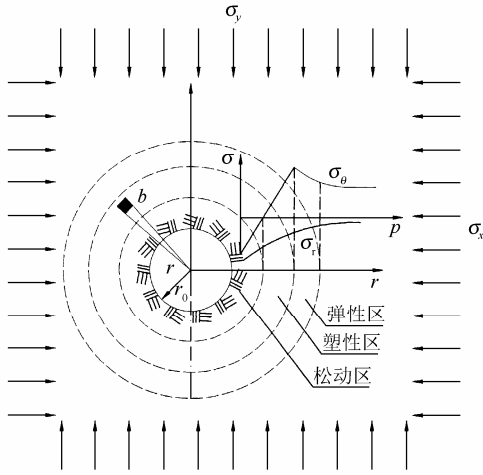


图1 弹塑性围岩应力状态图

Fig.1 Strain state of elastic-plastic surrounding rock

从理论上讲,隧道开挖后形成了洞壁一定范围的松动区,接下来是塑性区和弹性区,围岩的自承能力主要由塑性区来承担,裸洞隧道更是如此。在半径为 r_0 的圆形隧道内,由于轴对称的条件,可以首先假定塑性区的 c , φ 值为常数,所满足的塑性条件为莫尔-库仑准则。当不考虑体力时,塑性区内任意一点 b 的平衡方程和塑性条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \frac{\sigma_r^p + c \cot \varphi}{\sigma_\theta^p + c \cot \varphi} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: σ_r , σ_θ 分别为 b 点的径向与环向应力,加角标 p 表示塑性区的分量。由塑性与弹性的边界条件和弹塑性区界面变形与应力协调条件解得

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^p = (P_i + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \\ \sigma_\theta^p = (P_i + c \cot \varphi) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \end{array} \right. \quad (2)$$

P_i 为支护抗力,当无支护时为0,式(2)可简化为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^p = c \cot \varphi \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \\ \sigma_\theta^p = c \cot \varphi \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \end{array} \right. \quad (3)$$

可见,塑性区的应力与围岩的物理参数 c , φ 值关系最为直接、密切。受到地下环境因素的影响, c , φ 值处于变化状态,因此,塑性区的应力状态只能是一个动态平衡的过程,尤其是受到地下水影响最为明显。计算表明,弹塑性界面上的应力值仅取决于原始地应力 σ_y 和 c , φ 值,与支护抗力无关,支护抗力只能改变塑性区的大小,所以从理论上讲,支护抗力只是松动区调节的杠杆。

地下巷道内岩体并非理想的完整体,存在大量的裂隙。隧道开挖后,围岩大部分处于压剪状态,研究隧道围岩压剪应力状态具有重要意义。

但是,实际工程中,隧道断面和实际开挖效果并不是理想的圆形,普遍是椭圆或扁坦的形状,并且受到爆破的震动损伤,由统计分析可知,围岩在超欠挖状态下的应力状态分布规律为:由超欠挖形成的平面不平整产生局部的应力集中,超挖处应力急剧增加,应力集中系数几乎与隧道形状无关,而与隧道不平整的数量和变化幅度有关。因此,隧道的破坏,首先是从应力集中最大的地方开始。

3 地下水渗流分析

裂隙岩体非Darcy孔隙渗流的控制方程由3部分组成,即质量方程、动量方程和状态方程,它们分别是^[3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial (\phi \rho)}{\partial t} + \nabla (\rho V) = \rho q \\ \rho c_a \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla p - \frac{\mu}{k} V + \beta \rho V V + F \\ \frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} = \rho_0 \phi_0 c_t \frac{\partial p}{\partial t} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: p 为流体压力; V 为渗流速度(比流量); ϕ 为孔隙率; ρ 为流体的质量密度; q 为源(汇)强度; ϕ_0 , ρ_0 分别为参考压力 p_0 对应的孔隙率和质量密度; c_t 为流体的综合压缩系数, $c_t = c_f + c_\phi$; c_f 为流体的等温压缩系数; c_a 为加速度系数; μ 为流体的动力黏度; k 为渗透率; β 为非Darcy渗流 β 因子; F 为流体的质量力。

无汇源流动和忽略体积力,式(4)可以简化为

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \phi_0 c_t \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V)}{\partial x} = 0 \\ \rho c_a \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{k} V + \beta \rho V^2 \end{array} \right. \quad (5)$$

令 W 表示动量密度,即 $W = \rho V$,则

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} - \frac{W}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6)$$

渗流对节理岩体最直接的作用是产生流体压力。从微观上讲,对裂隙产生胀力,增大裂尖处的应力强度因子,劣化岩石参数 c , φ 值,加速裂隙的贯通,增加围岩的不稳定性因素。所以,地下洞室的稳定性是明显的非线性过程,在某种桥梁的作用下,可以耦合在一起,是隧道病害形成的主要原因。下面以应力场为桥梁,进行非线性耦合分析。

4 损伤岩体应力-渗流耦合分析

对于地下岩石应力场-渗流场耦合问题,渗透张量 K_{ij} 是应力的函数,它是变化的,一般采用Louis(1974年)根据某坝址岩体中不同深度的钻孔抽水试验资料总结出各向平均渗透系数与应力状态之间的经验公式:

$$K = K_0 e^{(-\alpha\sigma)} \quad (\sigma = \gamma h - P_0) \quad (7)$$

式中: K_0 为地表渗透系数; γh 为覆层岩土重量; P_0 为孔隙水压力; α 为系数。

文献[3]考虑到裂隙在应力场作用下发生扩展、开裂,不单单考虑裂隙张开度对渗流张量的贡献,而且还考虑裂隙长度对渗流张量的影响,得到渗流场-应力场的耦合方程。

从裸洞病害的发展过程看,与时间有密不可分的关系。隧道开挖后应力达到平衡,是一个随时间变化而处于动态的平衡过程,可以以隧道围岩的损伤断裂过程加以体现;隧道内的水流亦是一个动态的发展过程,先期没有水路产生,隧道只是在遇到特殊地质条件时有明显的水出现。随着时间的推移,围岩内的裂纹逐渐扩展,逐渐形成水的通道,隧道病害随之产生。因此,隧道围岩本身是隧道病害形成的内部主要原因,而渗流等其他因素则是病害产生的动力催动因素。根据非线性原理^[9],可以把渗流动力方程作为激励函数,即加速隧道围岩损伤断裂的驱动因素,围岩应力损伤函数作为响应函数,直接表现为隧道病害产生或坍塌失稳。

隧道围岩的损伤模型采用Bui模型,其最大的特点就是岩石在单轴压缩状态应力-应变曲线表现为明显的双线性,有明显的弹性和塑性之分(图2)。AB阶段为弹性,忽略岩石早期的损伤,BC段为弹塑性劣化软化阶段,峰值点对应的应力与应变分别为 σ_s 和 ε_s 。一维损伤演化方程为

$$\left. \begin{aligned} H &= 0, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ H &= \frac{\lambda}{\sigma_s}(\varepsilon - \varepsilon_s), \quad \varepsilon \geq \varepsilon_s \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: H 为损伤函数; λ 为降模量。考虑岩石初始

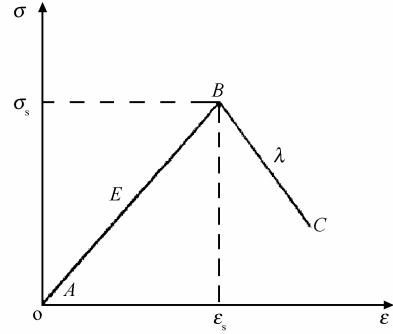


图2 弹塑性损伤模型

Fig.2 Elasto plastic damage model

损伤,计为 H_0 ,则式(8)可以简化为

$$\left. \begin{aligned} H &= H_0, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ H &= H_0 + \frac{\lambda}{\sigma_s}(\varepsilon - \varepsilon_s), \quad \varepsilon \geq \varepsilon_s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在三维状态下的损伤方程为

$$H = H_0 + \frac{\lambda}{\sigma_s}(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_s) \quad (10)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变。

当主应变为 ε_1 , ε_2 和 ε_3 时

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (11)$$

以上各式中的角标s表示岩石饱水强度值。

下面以式(4)和式(10)构成的激励-反应系统加以分析。渗流场与损伤场的耦合方程在考虑裂隙张开度和扩展长度的条件下可得^[4]

$$\left. \begin{aligned} \nabla(K \nabla H) + q &= S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ p &= \rho H \\ \sigma_{ij} &= K_{ijkl}^{0-d} \varepsilon_{kl} + K_{ijkl}^{0-d} C_{kl}^d p \\ K_{ij} &= K(b, a, n) \\ \Omega_{ijkl} &= K_{ijkl}^{0-d} : C_{pqkl}^d = \Omega(a, n) \\ b &= b(\sigma_{ij}, p) \\ a &= a(\sigma_{ij}, p) \\ n &= n(\sigma_{ij}, p) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: p 为渗流压力; ρ 为地下水重度; σ 为应力场; K_{ij} 为渗透矩阵; ε 为应变矩阵; C 为岩体损伤张量; b 为裂隙张开度; a 为裂隙扩展长度; n 为结构面参数矩阵; q 为源(汇)项阵列; S 为储水矩阵。上面的式子可以使用有限元迭代的方法求出。这里,从系统耦合强度因子的角度进行求解。

设耦合系统的强度因子为 ψ ,可以通过计算系统的最大条件指数 ξ 随 ψ 的变化情况,式(10)可以进一步改写为

$$H' = H_0 + \frac{\lambda}{\sigma_s}(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_s) - \psi(H - K) \quad (13)$$

计算表明(图3),当耦合强度较小时,响应系统不受驱动系统的支配,当 $\psi > 0$ 时,系统存在一个临界耦合强度 ψ_c 。当 $\psi > \psi_c$ 时, λ 由正穿0变负,说明驱动系统与响应系统达到同步,响应系统不再对自身的初始值敏感,主要是对驱动系统的输出敏感,图中 $\psi_c \approx 0.4952$ 。其实际的现实意义就是在初始阶段,隧道内渗流水压对隧道不起明显的作用,主要是受控于岩石本身的劣化与爆破损伤等因素;但是,随着时间的变化,围岩裂隙逐渐增多变大,当岩石破损率在50%以上时,渗流起到了控制性作用,与损伤一起基本呈直线(图3中BC段部分)急速加快隧道围岩的失稳状态,使隧道失稳破坏,这种破坏机制与隧道病害的形成过程基本吻合,与隧道长期稳定性支理论基本符合,从而有力地证明了隧道病害耦合性分析的正确性。图4是部分岩石孔隙水压力与塑性区半径的关系曲线^[10]。从图中可以看出:岩石在早期由于裂隙并不发育,塑性区半径与裂隙水压力基本呈正比例关系;达到一定程度以后(超过岩石的抗压强度),岩石破碎,裂隙贯通,塑性区虽然在较小的水压力下,依然迅速扩展,但不同的岩石具有一定的差异性。

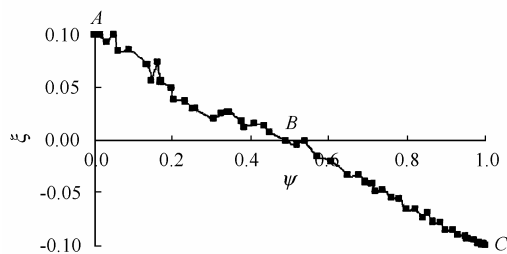


图3 耦合系统的 ξ 随 ψ 变化曲线

Fig.3 Curve of ξ with ψ in the coupling system

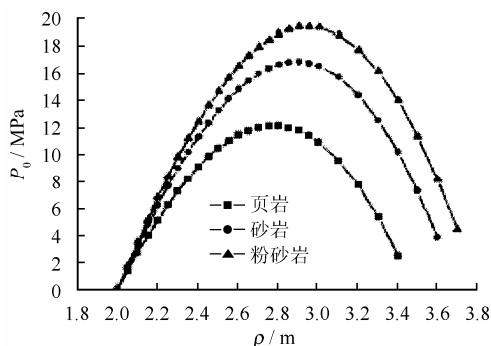


图4 孔隙水压力 P_0 与塑性区半径 ρ 的关系曲线图

Fig.4 Curves of porous hydraulic pressure P_0 and plastic Radius ρ

5 结 论

从以上的耦合非线性系统研究可以看出:

(1) 地下水渗流是裸洞隧道病害产生的主要原因之一,尤其是在裂隙发育有利于渗流破坏的发生,裂隙密集带和断层破碎带往往是发生渗流破坏严重区域,同时也是病害集中发生的地方。

(2) 通过对裸洞隧道围岩应力场在损伤作用下与渗流场耦合的激励-反应非线性系统分析可知,隧道成洞后短期内,岩石的损伤与渗流耦合并不明显,随着时间的推移,耦合强度因子 ψ 由0穿负,明显加强了隧道病害的发生,危及裸洞隧道的健康与安全。

(3) 本文的计算结果表明,渗流与损伤耦合系统的临界耦合强度 ψ_c 在0.5左右时,系统明显出现共振加强现象,是隧道进入病害期的关键点,这与实际工程中的测量结果相吻合。

为了避免隧道后期营运过程中危及健康问题的产生,研究隧道健康机制是目前亟需解决的问题,本文建立的耦合非线性激励系统为进一步研究该问题提供了一定的理论依据和技术支撑。对于隧道施工和病害机制研究具有重要的指导意义。另外,为了能够进一步揭示隧道病害机制和为隧道健康服务,在隧道与其他地下工程建设中,应对围岩裂隙水和损伤模型进行详细深入研究,建立更加有效与接近实际的模型,以指导工程实践。

参 考 文 献

- [1] 余健,王国超,邓国宏. 石黄隧道毛洞的应力分布规律及可靠度计算[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(2): 10—13.
- [2] 苑莲菊,李振栓,武胜忠,等. 工程渗流力学及应用. 北京: 建筑材料出版社, 2001.
- [3] 缪协兴,刘卫群,陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 180—199.
- [4] 易顺民,朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 哈秋龄,陈洪凯. 长江三峡工程岩石边坡地下水渗流及排水研究:永久船闸陡高边坡岩体力学研究(四)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 曾亿山,卢德唐,曾清红,等. 单裂隙流-固耦合渗流的试验研究[J]. 试验力学, 2005, 25(1): 10—16.
- [7] 吉小明,白世伟,杨春和. 岩体地下流固耦合理论的研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增1): 846—849.
- [8] 杨立中,黄涛. 初论环境地质中裂隙岩体渗流—应力—温度耦合作用研究[J]. 水文地质与工程地质, 2000, (2): 33—35.
- [9] 郑志刚. 耦合非线性系统的时空动力学与合作行为[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 86—108.
- [10] 荣传新,程桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 741—744.