

隧道开挖诱发富水有压溶洞 破裂突水过程数值模拟

黄明利, 王飞, 路威, 谭忠盛

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 在岩溶地区修建隧道, 溶洞将引起隧道围岩的变形、开裂和失稳, 常常诱发隧道突水突泥灾害。从力学角度对岩溶隧道突水突泥机理研究对隧道突水突泥灾害及时预报和有效治理具有重要意义。通过岩石破裂过程分析程序(RFPA), 用数值模拟方法对隧道施工诱发隐伏有压溶洞破裂突水过程中的应力场、位移场和声发射等特征进行了系统研究, 研究结果加深了对有压溶洞随着压力增加引起隧道突水过程机理的理解, 为该类型溶洞的预报和治理提供了参考依据。

[关键词] 有压溶洞; 隧道开挖; 力学机理; 数值模拟

[中图分类号] U451⁺·5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)12-0093-04

1 前言

我国是世界上岩溶地区分布较广的国家, 随着国家经济的快速发展, 越来越多的地下工程兴建在岩溶地区, 岩溶隧道稳定性问题已成为工程建设中的突出问题, 要顺利地进行工程建设, 就必须解决岩溶对工程的影响及工程诱发的地质灾害问题。在建的宜万铁路全线共设计隧道 159 座, 其中全线隧道洞身穿越可溶岩地段的有 91 座, 占全线 159 座隧道比例为 57%, 总长度约占全线隧道总长度的 70%, 其中隧道洞身位于可溶岩地层长度约占全线隧道总长度的 58%。宜万铁路的岩溶发育、突水突泥的风险程度、规模和工程处理难度为国内外罕见, 工程非常艰巨, 施工风险很大^[1-3]; 岩溶隧道中, 以揭穿性溶洞地质灾害最多, 但隐伏溶洞在施工时发生的突破型岩溶灾害因其发生时间的不可预见性, 危害性将更大。

目前对岩溶隧道的研究主要集中在溶洞的形成条件、发育规律和超前地质预报及施工中的整治技术和措施的研究, 但由于岩溶突水涉及到流体力学、

工程地质学和水文学、隧道施工力学等多个学科, 目前仍然缺乏从力学的角度来分析研究隧道施工诱发有压溶洞围岩破裂过程及突水和突泥机理^[4-8], 而这恰恰是能否正确和及时进行岩溶隧道突水突泥预报和有效治理措施的理论依据。

以宜万铁路某类赋存与新建隧道侧部的压力季节性变化的隧道为背景, 通过岩石破裂过程分析程序(RFPA)^[4,9], 模拟分析了隧道施工诱发隐伏有压溶洞破裂突水过程中的应力场、位移场和声发射等特征, 研究结果加深了对有压溶洞随着压力增加引起隧道突水过程机理理解。

2 模型说明

所用的 RFPA 是一个能模拟岩石从裂纹萌生、扩展直至断裂全过程的数值分析系统, 该系统基于连续介质力学和损伤介质力学原理, 具有应力分析和破坏分析两方面功能。其显著特点是将岩石类材料的不均匀性参数引入到计算单元, 充分考虑了岩石介质的非均匀性。

顶溶洞、侧溶洞和底溶洞中, 侧溶洞对隧道危害

[收稿日期] 2009-10-25

[作者简介] 黄明利(1969-), 男, 黑龙江双城市人, 北京交通大学副教授, 博士, 研究方向为隧道及地下工程施工力学与环境影响控制技术; E-mail: huang_mingli@126.com

性最大。故文章中模拟分析水平侧溶洞造成溶洞隧道系统破坏的过程及特征。考虑溶洞为富水有压溶洞,水压随着季节变化不断增大。隧道开挖前溶洞水压为 0.5 MPa,溶洞处于稳定状态,隧道开挖后,溶洞水压以每步 0.05 MPa 不断增大,直到隧道围压破坏。模型基本尺寸如图 1 所示。按平面应变问题考虑,共划分为 $200 \times 200 = 40\ 000$ 个单元。模型的下边界和左边界为固定约束,上、右边界处施加均布荷载。假定隧道埋深 400 m,岩石自重平均值 20 kN/m^3 ,因此外加均布荷载 p 为 8 MPa,假定侧压力系数 $\lambda = 1$ 。

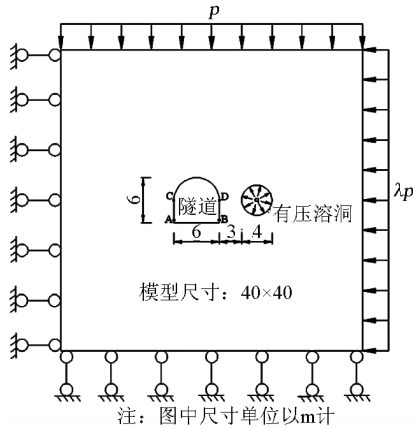


图 1 模型图

Fig. 1 Numerical model

溶洞隧道的围岩力学参数如表 1 所示。模型中考虑了材料性质的随机性,把材料细观结构的力学性质按照 weibull 分布进行赋值。其中,均质度 m 表征材料性质的均匀性, m 越大,材料的宏观性质越均匀。考虑到岩石类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此文章采用了修正后的库仑准则包含拉伸

截断作为单元破坏的强度判据。

3 计算结果与分析

3.1 应力场分析

根据整个计算结果,提取出来的典型步骤的应力图如图 2 所示,分别对应步骤 1-3 (0.5 MPa), 2-1 步 (1.05 MPa), 2-13 步 (1.05 MPa), 26-3 步 (1.75 MPa), 36-2 步 (2.25 MPa), 39-1 步 (2.4 MPa), 39-10 步 (2.4 MPa), 39-13 步 (2.4 MPa)。

表 1 围岩力学参数

Table 1 Material property parameters for the surrounding rock

	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	泊松比	自重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
均质度 m	3	2	100	100
大小	6 000	15	0.25	20

从图 2 可看出,因为溶洞起初有 0.5 MPa 的水压,所以隧道开挖前,溶洞周围对称分布着环状应力带。隧道全断面刚开挖后,隧道两侧和拱顶拱底都分布着一定的应力,而且两侧要大于拱顶和拱底。另外,中间岩柱出现了很明显的应力集中。当溶洞水压进一步增大,可以看到,在隧道的两侧和溶洞的左侧已经萌生了微裂纹。紧接着,由于中间岩柱应力集中进一步加剧及中间岩柱两侧的约束最小,在图 2 可看出,一条连接隧道右侧底和溶洞左侧的宏观裂纹已经贯通,而一条伸向隧道右侧顶的裂纹正在扩展。到了最后,以两条主裂纹为滑裂面,中间岩柱整体向隧道内部塌陷。从中也可以看出,受材料非均匀性的影响,主裂纹扩展过程是十分复杂曲折的。

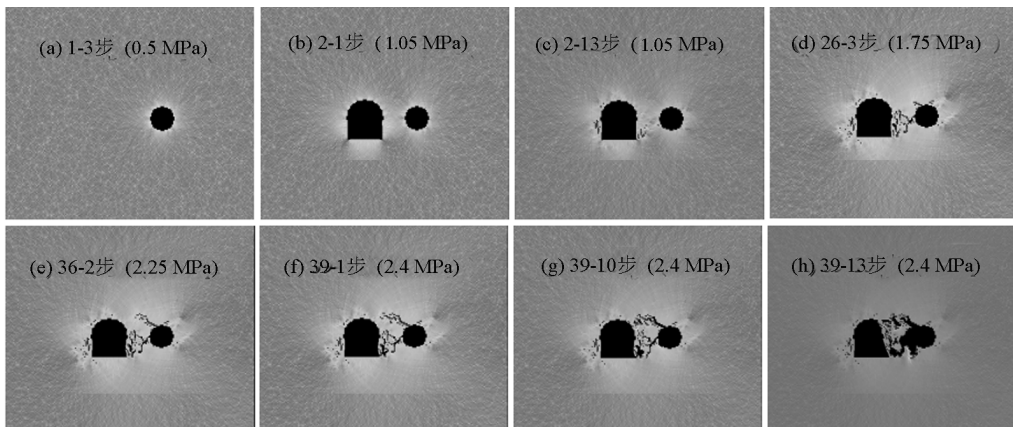


图 2 典型步骤的最小主应力图

Fig. 2 Numerically simulated min principle stress distribution

3.2 位移场分析

水平收敛是隧道变形控制的重要监测项目。为了研究有压溶洞导致隧道破坏过程中的隧道两侧的水平位移规律,数值模拟时分别在每侧设置了两个监测点,如图1所示。

图3为测点的水平位移与溶洞压力之间的关系曲线。由于隧道开挖卸荷造成应力释放,可以看到,隧道刚开挖完后A,B,C,D测点均有一定的位移,其中靠近溶洞的B点位移最大,往后也一直最大。这说明在岩溶地区修建隧道,如果隧道一侧的收敛一直大于另一侧,那可能在隧道的该侧隐伏存在富水有压溶洞。对于A,C测点,由于其位于远离溶洞侧,受溶洞水压影响小,直到最后隧道右侧围压破坏,其测值也基本保持不变。而对于B,D测点,可以很明显的看出,其位移曲线可以分为三个阶段:稳定期,加速期和急剧破坏期。在稳定至1.75 MPa后,位移曲线加速发展,而在2.45 MPa时有一个大的突跳,此时对应于围岩急剧突然破坏;在实际施工中,如果隧道一侧收敛开始加速发展,这个时候应把它作为急剧破坏期的征兆加以足够重视并采取工程措施,以防造成重大灾害。

3.3 声发射规律分析

由于岩石单元的破坏为脆性,单元破坏释放的弹

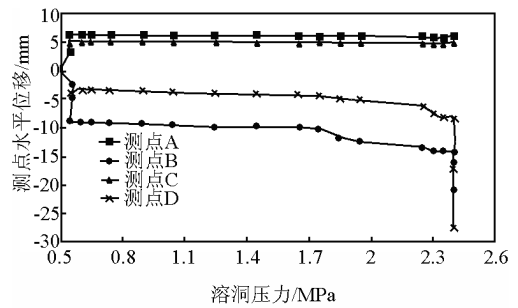


图3 四测点水平位移与溶洞压力之间的影响关系曲线

Fig. 3 The relationship curve between the horizontal displacement of four measuring points and the hydraulic pressure

性能以声发射的形式释放,因此可以根据声发射特性来观察岩石破裂过程。图4中浅色表示是受压破坏,深色表示的是受拉破坏。从图4可看出,溶洞刚形成和刚开挖隧道时,溶洞和隧道周围随机无规律地出现了一下压剪破坏单元,而随着溶洞压力的不断增大,最后形成的主裂纹主要是拉剪性破坏。图5是声发射能量与溶洞压力关系的柱状图。从图5可看出,每次大的围岩单元破坏,均对应着大量的声发射次数和能量,因此工程中能通过声发射监测,预测和评价围岩的稳定性情况。

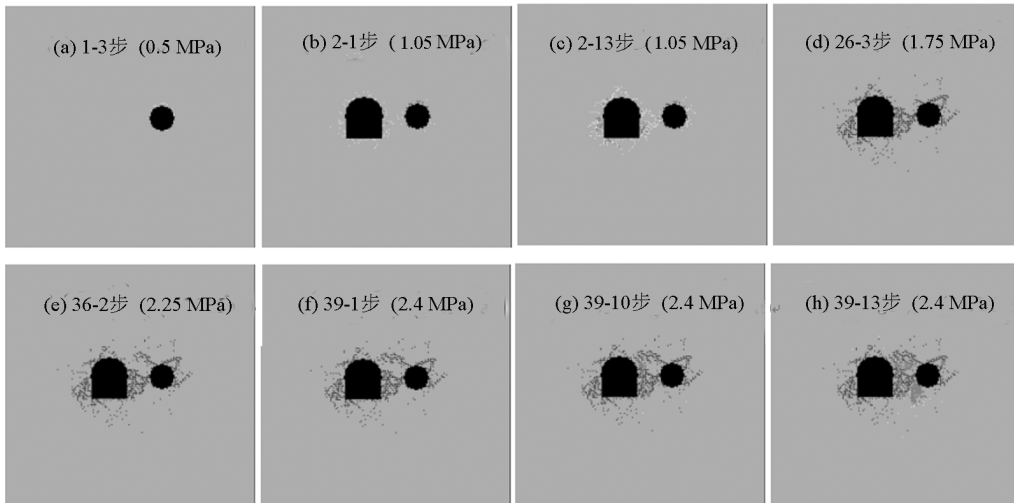


图4 典型步骤的声发射图

Fig. 4 Numerically simulated AE events

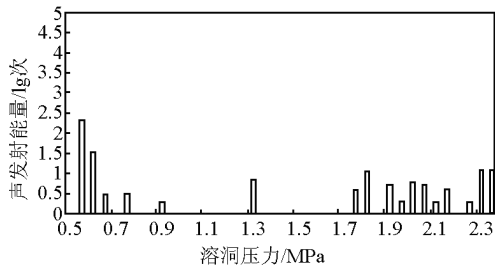


图5 声发射能量与溶洞压力关系的柱状图

Fig. 5 Histogram relationship of the AE energy and the hydraulic pressure

4 结语

目前对岩溶隧道的研究,仍然缺乏从力学的角度来分析研究隧道施工诱发有压溶洞围岩破裂过程及突水和突泥机理。通过岩石破裂过程分析程序(RFPA),建立二维平面应变模型,对隧道施工诱发隐伏的水平侧的有压溶洞破裂突水过程中的应力场、位移场和声发射等特征进行了初步探索研究,研究结果加深了对有压溶洞随着压力增加引起隧道突水过程机理的理解。可供类似岩溶隧道设计参考,

同时值得指出的是,研究中虽然涉及到一些定量的数据如溶洞水压力,但仍属于定性研究。

参考文献

- [1] 苗德海. 宜万铁路岩溶隧道灾害及防治对策[J]. 铁道标准设计, 2007, (7): 95-99
- [2] 张民庆, 黄鸿健, 苗德海, 等. 岩溶隧道水压力的研究与确定[J]. 铁道工程学报, 2008, (5): 53-58
- [3] 白明洲, 许兆义, 王连俊, 等. 深埋隧道岩溶突水灾害的地质条件研究[J]. 铁道工程学报, 2006, (3): 21-24
- [4] 曹武安. 溶洞对隧道围岩稳定性影响的数值分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2005
- [5] 郭伟. 侧部水压充填型岩溶隧道施工力学特性研究[J]. 湖南交通科技, 2008, 34(2): 131-135
- [6] 赵明阶, 徐容, 许锡宾. 岩溶区全断面开挖隧道围岩变形特性模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 710-715
- [7] 宋战平, 党宏斌, 李宁. 既有溶洞对隧道围岩位移特征影响的数值试验[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 79-83
- [8] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩—支护结构稳定性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006
- [9] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060-1066

Numerical study on the process of water inrush in Karst caves with hydraulic pressure caused by tunnel excavation

Huang Mingli, Wang Fei, Lu Wei, Tan Zhongsheng

(School of Civil Engineering and Architecture,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Water inrush is often encountered during tunnel excavation in karst region, and it will cause the deformation and failure of surrounding rock. So it is of important significance to study the mechanism of water inrush for the prevention of Karst disasters. In this paper, the characters of stress distribution, displacement field and acoustic emission(AE) during the process of water inrush and surrounding rock failure were studied by using RF-PA2D (Rock Failure Process Analysis) software, developed by Center for Rockburst and Induced Seismicity Research of Northeastern University. The results deepen the understanding of the mechanism of water flush and surrounding rock failure caused by gradually increasing hydraulic stress in Karst caves, and it can provide reliable reference for prevention of Karst disasters.

[Key words] water flush in Karst caves; tunnel excavation; mechanical mechanism; numerical simulation