

裂隙围岩隧道塌方规律的数值模拟研究

梁宸¹, 张亚鹏², 曲龙², 刘泾堂³, 杜耀辉⁴

¹中国矿业大学孙越崎学院, 江苏 徐州

²甘肃公航旅天庄高速公路管理有限公司, 甘肃 天水

³甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 天水

⁴兰州交通大学, 土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月29日

摘要

公路隧道在工程建设中愈发常见。为研究裂隙围岩在开挖扰动作用下的塌方规律, 本文以某一公路隧道为工程背景, 借助UDEC离散元模拟软件, 得到岩体位移、速度、加速度随时间变化的曲线图, 模拟开挖扰动下隧道塌方的演变过程, 为类似的隧道工程建设和支护提供建议。

关键词

隧道, 裂隙围岩, 塌方规律, 离散元

Numerical Simulation Study on Collapse Law of Tunnel under Fractured Surrounding Rock

Chen Liang¹, Yapeng Zhang², Long Qu², Jingtang Liu³, Yaohui Du⁴

¹Sun Yueqi Honors College, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²Gansu Gonghanglv Tianzhuang Highway Management Limited Company, Tianshui Gansu

³Gansu Transportation Planning Survey and Design Institute Limited Company, Tianshui Gansu

⁴Civil Engineering College, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Mar. 22nd, 2022; published: Mar. 29th, 2022

Abstract

Highway tunnels have becoming more and more common in engineering construction. To study collapse law of fracture surrounding rock under excavation disturbance, based on a highway tun-

nel engineering, this paper carries out numerical simulation of the evolution process of tunnel collapse by virtue of distinct element method software UDEC and get the rock mass displacement, velocity and acceleration changing curve with time, thus providing suggestions for the similar tunnel engineering construction.

Keywords

Tunnel, Fracture Surrounding Rock, Collapse Law, Distinct Element Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基建技术和交通技术的发展与成熟,隧道建设已越来越多地出现在交通工程中。然而由于地质情况的复杂性,隧道工程建设过程中经常出现突涌水、大变形、塌方、岩爆等严重地质灾害[1][2][3][4],给现场施工人员的人身安全和工程的经济成本带来极大威胁。为此,国内外学者展开了多项研究[5][6][7][8],取得了一系列成果[9][10][11][12][13]。

杨钊等[14]基于非饱和土体渗流及强度理论,着重研究了渗流对隧道变形及稳定性的影响,深入分析了渗流作用下的隧道塌方机理,并给出了针对性的塌方处置措施。杨建辉等[15]使用理论分析、离散元数值模拟方法,结合现场监测结果,在考虑断层破碎带地下水影响的前提下,开展富水断层破碎带施工过程中围岩失稳塌方的内在机理研究。王密田等[16]采用自主研发的隧道多功能模型试验装置,研究降雨作用下断层隧道突水突泥灾变演化过程揭示了降雨强度、断层倾角、断层方位以及围岩级别对断层隧道突水突泥灾害的影响规律。熊华涛[17]结合施工过程中的突水突泥灾害统计,阐述高陡倾岩溶裂隙构造中隧道突水突泥的发生机理及有效防控措施,对其致灾构造形态、突泥物源、灾变机制、防控措施等内容进行研究。刘冬桥等[18]通过图像采集系统拍摄试样洞室内部的岩爆全过程图像,获取冲击岩爆不同阶段的破坏特征现象。邹远华等[19]在分析隧址区高地应力环境特征、岩性组合、岩体强度及岩体刚度特性等因素的基础上,对大变形和岩爆共生的特征及成因进行了研究。

本文聚焦于隧道裂隙围岩的塌方灾害,以某一公路隧道为工程背景,借助离散元模拟软件 UDEC,探究开挖扰动对隧道裂隙围岩稳定性的影响,揭示隧道裂隙围岩塌方规律,为工程支护提供参考。

2. 工程概况

2.1. 地形与地貌

隧址位于变质岩断块侵蚀低山丘陵区,海拔最高点为山顶 243.8 m。其中 K4 + 300~K4 + 550 段为山间凹地,海拔为 32~44 m。山体基岩裸露,风化层薄,局部地段山势陡峭,出现小面积的悬崖和陡壁。近山麓多为第四纪松散堆积物覆盖,植被较茂盛,并发育有多处滑坡,滑坡体范围内发育有醉汉林。

2.2. 地质条件

隧址区第四系坡积物,土性主要为可塑~硬塑状粉质粘土层,黄色、褐黄色,含少量砾石,局部夹碎石或滚石,薄层状分布,层厚度 0.5~8.8 m。隧址区基岩为中~晚元古代云台组区域变质岩系,以钠长浅粒岩、石英变粒岩为主。

隧道进口穿过残坡积粉质粘土和全~强风化云母片岩层中,埋置浅,岩体裂隙发育,岩体破碎,地下水为孔隙潜水和基岩裂隙水,围岩稳定性差,综合评定为 V 级围岩,施工时易坍塌。隧道进口穿过强~中风化变粒岩,埋置浅,地下水主要为基岩裂隙水,围岩稳定性较差,施工时易产生坍塌和掉块。

隧道主体部分围岩分级为 II~III 级,围岩稳定性一般,侧壁基本稳定,爆破震动过大易坍塌;部分地段围岩为 IV 级,稳定性较差;穿过绿泥片岩地段,洞壁绿片岩岩脉出露位置风化局部加剧现象会较突出,拱部无支护可产生较大坍塌,侧壁有时会失去稳定。

3. 数值模拟

3.1. 模型建立

采用 UDEC 离散元模拟软件,对该隧道某一断面进行模拟研究,建立模型如图 1 所示。选区区长 40 m,高 25 m,隧道跨径 16 m,侧墙高 4 m,拱顶为半径 8 m 的半圆。

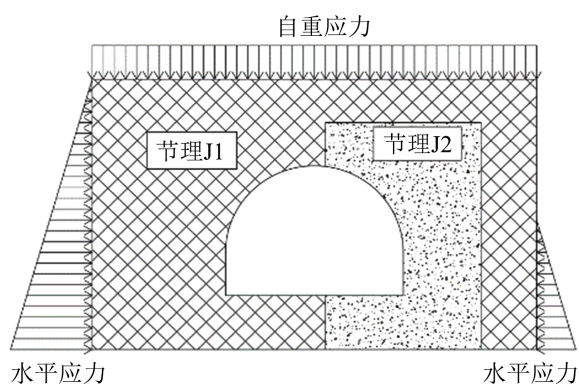


Figure 1. Model schematic diagram
图 1. 模型示意图

掌子面主要发育两组节理,两组节理倾角都比较大,其中一组在整个掌子面均发育,其产状为 $44^\circ \angle 72^\circ$,延伸 4~8 m,几乎贯穿整个掌子面,间距为 0.6~1.0 m。另外一组节理的产状为 $203^\circ \angle 77^\circ$,延伸 6~9 m,间距 0.3~0.5 m,主要在掌子面右侧发育。两条节理相互切割,局部密集处较破碎,节理面较光滑。据推断,两组节理将继续向掌子面上部延伸。掌子面顶部次生节理发育,岩体破碎,掌子面右侧岩体松散破碎,稳定性差。划分节理和网格如图 2 所示。

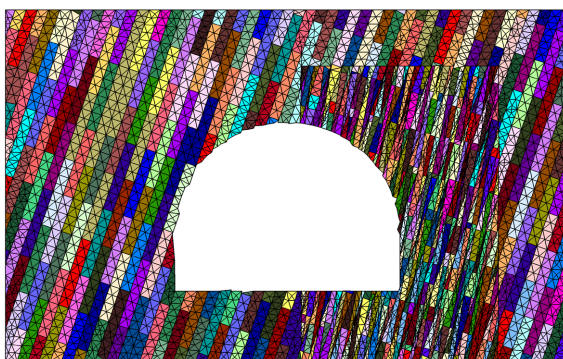


Figure 2. Joints and model meshing details
图 2. 节理和网格划分模型图

根据山体构造，施加左右不对称的水平初始应，计入自重应力。岩体模型采用采用 Mohr-Coulomb 本构模型，节理采用 Coulomb 滑移破坏准则，边界固定。根据现场地质超前预报得到岩体和节理参数如表 1 所示。然后施加开挖钻爆扰动，得到模拟结果。

Table 1. Parameters of rock mass and joints of tunnel cross-section
表 1. 隧道断面岩体和节理参数

岩体参数	弹性模量/GPa	泊松比	容重/kN·m ⁻³	黏聚力/Mpa	摩擦角/°
		0.71	0.36	20	0.2
节理参数	法向刚度/Gpa·m ⁻¹	切向刚度/Gpa·m ⁻¹		摩擦角 ϕ /°	
		0.12	0.04	25	

3.2. 模拟结果

根据上述建模过程建立模型，对该隧道在开挖扰动过程中裂隙围岩的塌方规律进行模拟。模拟过程共迭代 103,830 步，用时 878 s，隧道塌方情况如图 3 所示，同时对隧道中心线上方的一点进行竖向位移、竖向速度、竖向加速度监测，监测点如图 3 中黑点所示。图 4 为该点竖向位移随时间变化图。图 5 为该点竖向速度随时间变化图。图 6 为该点竖向加速度随时间变化图。由图可知，受到开挖扰动作用，围岩会从节理与隧道拱顶圆弧相切处产生滑移，沿优势节理长度分布方向坍塌。加速度整体呈波动变化，且前期变化幅度较大，最大可达 88 m/s²。在钻爆扰动下，围岩呈现先上升后下降的运动状态。监测点先向上加速至约 0.4 m/s 后开始减速。速度减为 0 时，该监测点上升至最高处，上升距离约为 0.18 米，加速度也几乎在此时达到峰值。而后开始下降，岩体从滑移处坍塌。坍塌速度逐渐加快，但加速度减小。向下速度达到峰值约为 1.6 m/s 后减速，在此过程中加速度呈现先升后降的趋势。

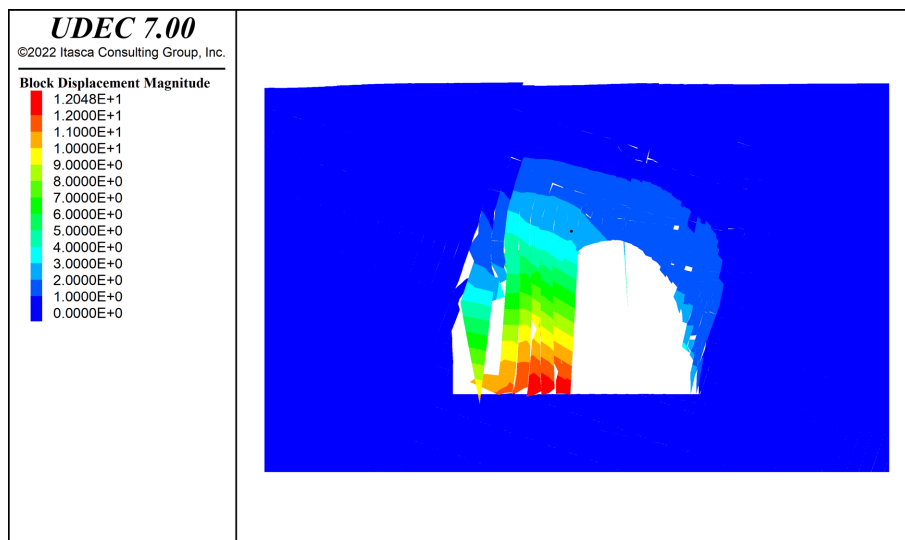


Figure 3. Simulation results of tunnel collapse
图 3. 隧道塌方模拟结果

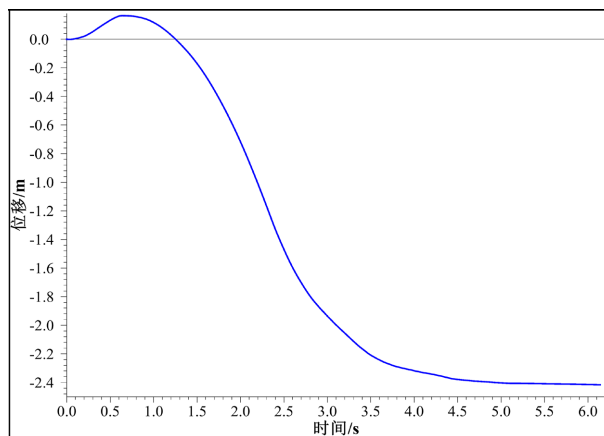


Figure 4. Vertical displacement-time curve

图 4. 竖向位移 - 时间曲线

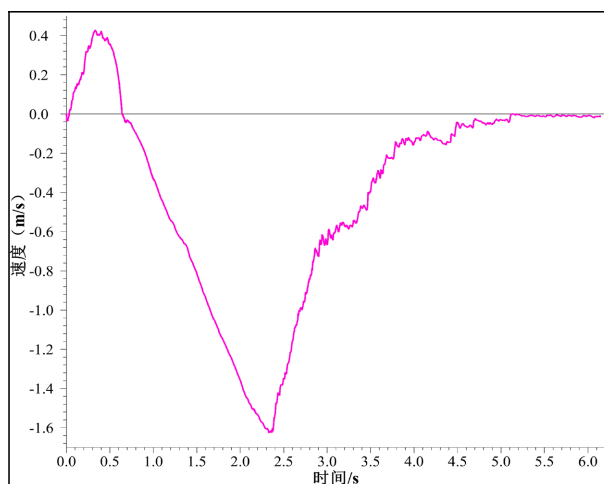


Figure 5. Vertical velocity-time curve

图 5. 竖向速度 - 时间曲线图

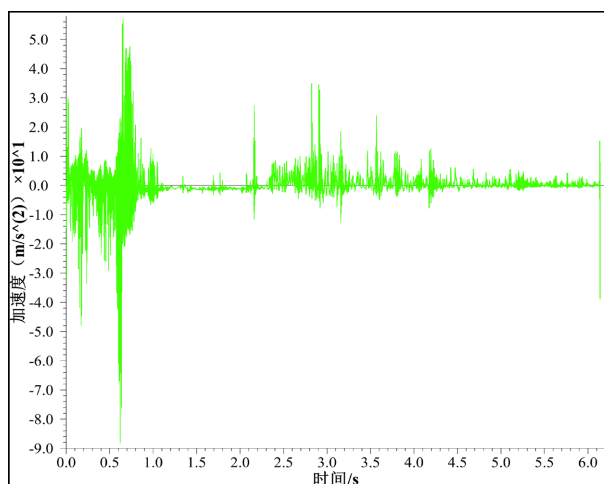


Figure 6. Vertical acceleration-time curve

图 6. 竖向加速度 - 时间曲线图

4. 结论

通过 UDEC 离散元数值模拟, 对某一公路隧道开挖扰动作用下裂隙围岩塌方规律进行研究, 得到如下结论:

1) 开挖扰动作用下, 岩体位移先微量上升后下降。运动过程中, 加速度波动幅度较大, 整体呈现先上升后下降的趋势。下降过程中, 测点速度先增大, 后减小, 分析其原因, 是下降过程中周围岩体运动, 对测点运动产生阻力, 改变其运动状态。

2) 裂隙围岩坍塌破坏作用点位于节理与隧道拱顶的相切处, 因此在隧道开挖过程中应对该处着重进行支护, 谨防掉块和塌方。及时采取锚杆支护, 打锚杆时, 锚杆应垂直于缓倾节理的节理面, 锚杆的长度也可以考虑局部加长, 以充分发挥锚杆的支护能力。

参考文献

- [1] 沈孟龙, 杨华清, 茶增云, 孙丹伟. 景海高速公路全——强风化花岗岩隧道塌方机理分析与处置[J]. 勘察科学技术, 2021(5): 21-25.
- [2] 张学文. 桃树坪隧道穿越富水粉细砂地层塌方处治施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2): 308-315.
- [3] 罗治国, 张智健, 李勇森, 梁斌. 富水软弱围岩隧道塌方机理及治理措施[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 59-64+7-8.
- [4] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 3-21.
- [5] 郑仕跃, 周权峰, 张仁坤, 冯安治. 岩溶隧道突水灾害形成机制及风险评估研究进展[J]. 四川水泥, 2021(10): 313-314.
- [6] 柏成浩. 基于机器学习的岩溶隧道突水突泥灾害风险智能预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [7] 李秀茹, 郭恩栋, 张文静, 蒋越, 王祥建. 基于离散元法的爆破荷载作用下深埋隧道失稳破坏模拟研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 87-93.
- [8] 王吉亮. 基于人工智能与三维数值模拟的乌竹岭隧道围岩稳定性系统研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [9] 陈泽龙, 崔江余, 王军, 杜涛, 李迁. 富水断层带隧道突水突泥的临界判据[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 53-55+63.
- [10] 钟明文, 汪红武, 李武雄, 袁从华, 陈佳正. 综合探测技术在岩溶隧道突水成因判定中的应用与研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(12): 69-74.
- [11] 马栋, 孙毅, 王武现, 晋刘杰. 高地应力软岩隧道大变形控制关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1634-1643.
- [12] 戴世伟, 刘鑫鑫, 万飞. 软岩隧道大变形事故致灾因素耦合分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 119-124.
- [13] 谭忠盛, 李松涛, 王建军, 杨旸. 中老铁路隧道软弱围岩大变形特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 98-106.
- [14] 杨钊, 任梦, 黄威, 袁青. 考虑非饱和土渗流的隧道塌方机理分析及注浆加固对策[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(1): 11-15.
- [15] 杨建辉, 沈恺, 周杰, 薛亚东. 穿越富水断层破碎带隧道塌方机理分析与预防[J/OL]. 工程地质学报, 2022, 29(6): 1-11.
- [16] 王密田, 王迎超, 王楠, 冯帅, 李文豪, 羊嘉杰. 降雨条件下断层隧道突水灾变演化规律[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(4): 40-52.
- [17] 熊华涛. 高陡倾岩溶裂隙构造中隧道突水突泥机理及防控方法研究[J]. 路基工程, 2021(3): 229-234.
- [18] 刘冬桥, 胡天祥, 王炆, 凌凯, 韩子杰, 何满潮. 动载频率对砂岩冲击岩爆影响的实验研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 2022, 46(5): 1-15.
- [19] 邹远华, 张广泽, 丁文富, 邓睿. 成昆铁路保安营隧道大变形岩爆共生特征及成因分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 28-32.