

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.004

马蹄形隧道围岩非线性变形破坏的数值模拟研究

龚 斌, 唐春安

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 主应力方向不同时, 隧道围岩所处的应力环境也会不同, 针对不同方向主应力作用下隧道围岩破坏规律, 通过统计损伤理论和数值模拟方法, 采用主应力逐级加载的方式, 模拟了马蹄形隧道在不同主应力倾角下的破坏模式, 并与模型试验结果相对比, 验证软件模拟结果的可靠性。为了更加真实模拟隧道洞室的实际受力情况, 进一步引入离心加载法定量计算隧洞的整体安全系数。结果表明, 主应力方向对马蹄形隧道围岩稳定有重要影响, 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 隧道两侧产生了较大的剪切应力集中, 破坏较为严重; 当 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时, 拱顶和底板首先产生破裂, 但破裂区扩展规律不同; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 在底板位置处破坏显著。同时, 当 $\theta = 0^\circ$ 和 30° 时, 隧道的安全系数较大; 当夹角 $\theta = 45^\circ$ 时, 隧道的安全系数最小等。这些结果对进一步揭示隧洞围岩复杂的破坏行为, 评价地下工程安全稳定性, 采取合理的支护措施等均具有重要意义。

关键词: 主应力方向; 马蹄形隧洞; 围岩稳定; 岩体破坏

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0028-05

Numerical Simulation of the Nonlinear Deformation and Failure of Surrounding Rocks around Horseshoe Tunnel

GONG Bin, TANG Chunan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Generally, the stress state of tunnel surrounding rocks will change if the principal stress directions are different. In order to understand the fracture behaviors of underground tunnels under the effect of principal stress direction, the statistical damage theory and numerical simulation method was adopted in this paper. The two-dimensional geological model is established considering the heterogeneity of rock mass that is described by Weibull distribution. Failure patterns of the horseshoe-shaped tunnel models are analyzed considering the change of principal stress direction. The influence on the tunnel stability and the failure law of surrounding rocks are discussed. The results show that the failure patterns vary with the principal stress direction changing. When the inclination angle θ is 0° , the side walls were seriously damaged; when the angle θ is $30^\circ, 45^\circ$ and 60° , rupture produces at top and bottom of tunnel firstly; when the angle θ is 90° , the fracture and deformation are serious in floor, and so on. These results could have important significance to further reveal the complicate deformation and failure behaviors of surrounding rocks, and make the accurate evaluation of safety and stability in geotechnical engineering and take reasonable support treatments.

Keywords: principal stress direction; horseshoe tunnel; surrounding rock stability; rock failure

隧道围岩安全稳定状况一直是岩土工程领域的一个重要研究内容。同时, 21 世纪将是人类开发利用地下空间的世纪^[1], 随着交通设施建设、资源开采、水电开发、能源储备等的需要, 我国建设了诸多地下工程项目, 特别是现今工程类型多、规模大、条

件复杂, 对隧道围岩安全稳定性研究提出更高的要求 and 更大的挑战^[2-3]。

需要注意的是, 地应力被认为是主导围岩变形与破坏的重要作用力^[4]。总结地下工程中隧洞围岩稳定性研究的历程, 可知地下洞室围岩稳定性分析

收稿日期: 2019-03-18

修稿日期: 2019-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579031, 51627804)

作者简介: 龚 斌(1990—), 男, 陕西兴平人, 博士研究生, 研究方向为地下工程安全稳定分析。E-mail: bingong@foxmail.com

手段经历了古典的压力理论、散体压力理论、弹塑性理论、支护与围岩共同作用的弹塑性理论等阶段,而每一次分析理论的进步都与人类对围岩初始应力及应力对围岩作用的理解紧密相关^[5-6]。

初始状态下围岩应力场由自重应力场与构造应力场组成,二者的叠加造就了地下洞室围岩主应力方向的可变性。并且,由于岩体形成的复杂环境,其受到的主应力通常也并非竖直的或水平的,而是拥有特定倾角的。一般情况下,主应力方向不同时,围岩应力状态就会不同,其破坏模式也必将受到主应力方向的影响。因此,研究主应力方向对地下洞室围岩破坏形式的影响,将会有助于进一步理解不同应力状态下隧道围岩的破坏规律,并对其失稳和发生岩爆的可能性做出更为合理的判断。

对于围岩破坏失稳问题,中外专家展开了广泛的分析研究,目前已经得到了不少有价值的结果。Charpentier等^[7]认识到在地下工程中由开挖引起的应力场重分布是诱发破裂的内在机制,他们开展了相关试验,研究了页岩巷道开挖后近场微破裂的形成情况,讨论了开挖操作与构造作用导致破裂的不同。郑颖人等^[8]研究了隧洞从浅埋到深埋的破坏过程,并在有限元中使用强度折减技术,算得隧洞破裂面的形态和围岩体的安全系数等,认为浅埋拱形隧洞的破坏来自拱顶,深埋隧洞来自侧壁。刘学增等^[9]开展了隧道衬砌拱顶结构1:1载荷试验,相关结果表明隧道拱顶安全系数随衬砌裂缝深度增加呈线性降低,相同裂纹深度情况下,裂纹在拱顶时最不利。李占海等^[10]采用数值模拟研究了不同侧向压力系数下,马蹄形隧道岩体损伤、失稳模式的不同,认为损伤机制和侧压力系数紧密相关,当侧压力系数较小时,损伤的最初分布表现出一定的离散性,但在拱脚、拱肩和拱顶处较为集中;当侧压力系数较大时,最初时以拱顶处的拉伸损伤为主;在破坏模式上,当侧压力系数较小时,沿竖直方向的开裂占主导,随着侧压力系数增加逐步转变成水平方向的开裂占主导。彭建兵等^[11]根据相似理论设计了马蹄形隧道衬砌结构40°斜穿地缝的物理模型,通过试验发现该模型破坏表现出扭转、弯曲、剪切共同作用模式,变形破坏具有不对称性。李永乾等^[12]开展了马蹄形隧道裂纹的产生和扩展的物理实验,分析认为当主应力与隧道成60°左右时,破坏的临界应力最大;当主应力与隧道成45°左右和90°左右时,破坏的临界应力最小,且45°左右方向和90°左右方向的破坏临界应力基本一致。这些研究成果在很大程度上

促进了人们对隧道破坏机理的认识,但是地下工程所处的地质环境往往非常复杂,地应力场也很难准确掌握,主应力方向对隧道破坏的影响还有待进一步研究。同时,虽然圆形隧洞结构简单对称,便于分析,但在实际工程中会给人员和车辆进出带来不便,直墙拱或马蹄形隧道采用较多。为此,本文针对不同主应力方向下马蹄形隧洞的破裂失稳规律开展研究,通过数值模拟对围岩应力变化、声发射信息和破坏模式等进行分析,并与相关试验结果进行比较,同时采用离心加载法定量计算了隧道围岩的整体安全系数,得到一些有理论价值的成果,可望为隧道的安全稳定分析和变形破坏治理提供一定的理论依据。

1 数值计算方法及模型参数

在本文数值模拟中,采用真实破裂过程分析(Realistic Failure Process Analysis, RFPA)二维数值方法,该方法将有限元应力分析与细观单元破坏分析相结合,吸收了统计损伤理论与数值计算方法的优点,以对岩石材料非均匀性的表征来模拟岩石变形和破坏的非线性力学行为,采用连续介质力学方法有效解决了非连续介质力学问题。关于该程序,在文献[13-16]中有详细介绍。

建立350 mm × 350 mm马蹄形隧道模型,隧道高60 mm,宽50 mm,上拱为半径25 mm的半圆,如图1所示,图中隧道倾斜角度 θ 为主应力与隧道中轴线的夹角,在本文破坏规律分析中 θ 分别取为0°、30°、45°、60°和90°。应用RFPA^{2D}程序,采用边长为1 mm的等参单元进行划分,同时按照Weibull分布生成考虑岩体非均匀性的二维地质模型,Weibull分布概率密度函数如下所示:

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: u 为满足分布的参数值,如弹性模量、泊松比等; u_0 为一个与全部单元参数平均值有关的参数; m 为形状参数,它表征了模型材料性质的均匀程度,因此又称之为均质度, m 越大,材料就越均匀,下文计算中采用的岩体力学参数如表1所示。

对模型 $Y = 0$ mm和 $Y = 350$ mm的上、下表面分别施加应力 σ_1 ,同时对 $X = 0$ mm和 $X = 350$ mm的两侧面施加法向约束,这也相当于对模型施加了侧压力 σ_2 ,其与主应力 σ_1 的关系为:

$$\sigma_2 = \nu \sigma_1 \quad (2)$$

式中 ν 是泊松比。在整个加载过程中采用分步逐级加载的方式,即 σ_1 从0 MPa开始,每步增加2 MPa直

至隧道围岩完全破坏。

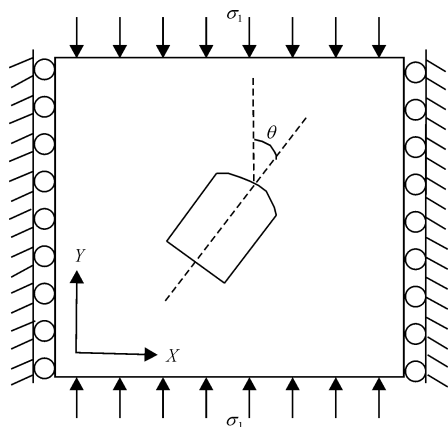


图 1 计算模型

表 1 岩体物理力学参数

弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	压拉比	均质度系数	残余强度系数
80	0.25	200	10	3	0.1

2 数值模拟试验结果分析

2.1 静态荷载作用下隧道的破坏过程

以夹角 $\theta = 60^\circ$ 时为例,此时马蹄形隧道的破坏过程如图 2 所示。

在弹性模量分布图中单元亮度代表了弹性模量的大小,颜色越亮的地方弹性模量就越大;在声发射图中,圆点代表模型中产生损伤的情况;在剪应力图中,亮度的不同反映了应力值的高低,在亮色区域处应力集中程度高。由图 2 可知,随着所施加荷载的不断增加,隧道的右侧拱顶和左侧底角附近出现剪应力集中,此处率先产生了较大的损伤破裂区,同时在拱顶左侧形成一条较深的破裂带,而后,左侧底板破坏范围不断扩大,声发射事件越来越密集,拱顶、底板的破裂不断向围岩深处发展,并最终导致了隧道的结构性破坏和失稳。

2.2 隧道整体破坏的声发射信息

在图 1 中,当 θ 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时,隧道模型整体破坏前每步加载产生的声发射事件次数如图 3 所示。

声发射现象是洞室围岩破坏时发出的重要前兆信息,对这 5 条声发射曲线进行对比可以看出,随着夹角 θ 的变化,隧道整体破坏前的声发射情况存在明显差异。当 θ 为 90° 时,破坏前单步产生的声发射

事件最多,达到 580 个;当 θ 为 60° 时,破坏前产生的声发射事件最少,表明隧道破坏时由围岩微破裂产生的此类前兆信息也较少。当主应力方向不同时,隧道围岩破坏前产生的声发射事件情况为: $n_{90^\circ} > n_{0^\circ} > n_{45^\circ} > n_{30^\circ} > n_{60^\circ}$ 。

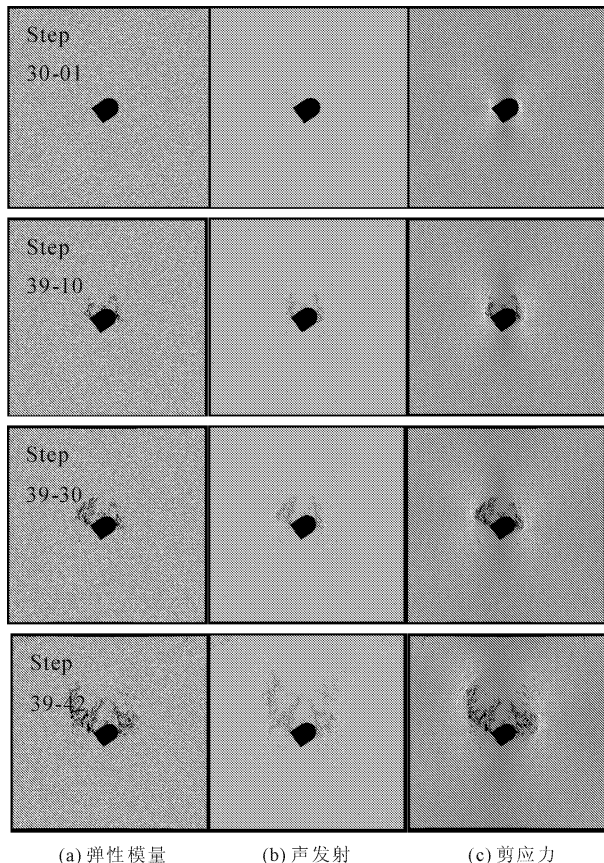


图 2 当 $\theta = 60^\circ$ 时,马蹄形隧道损伤演化过程

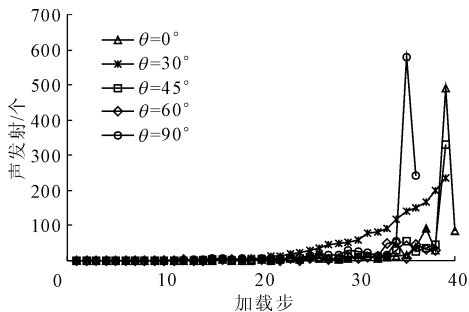


图 3 每步加载产生的声发射

2.3 隧道的不同破坏模式

当主应力与隧道中轴线夹角 θ 不同时,隧道断面的破坏情况如图 4 所示,由图 4 可知随着夹角 θ 的变化,隧道呈现出不同的破坏规律,同时本文的数值计算结果与相关的物理模型试验^[12]结果(见图 5)也非常吻合。

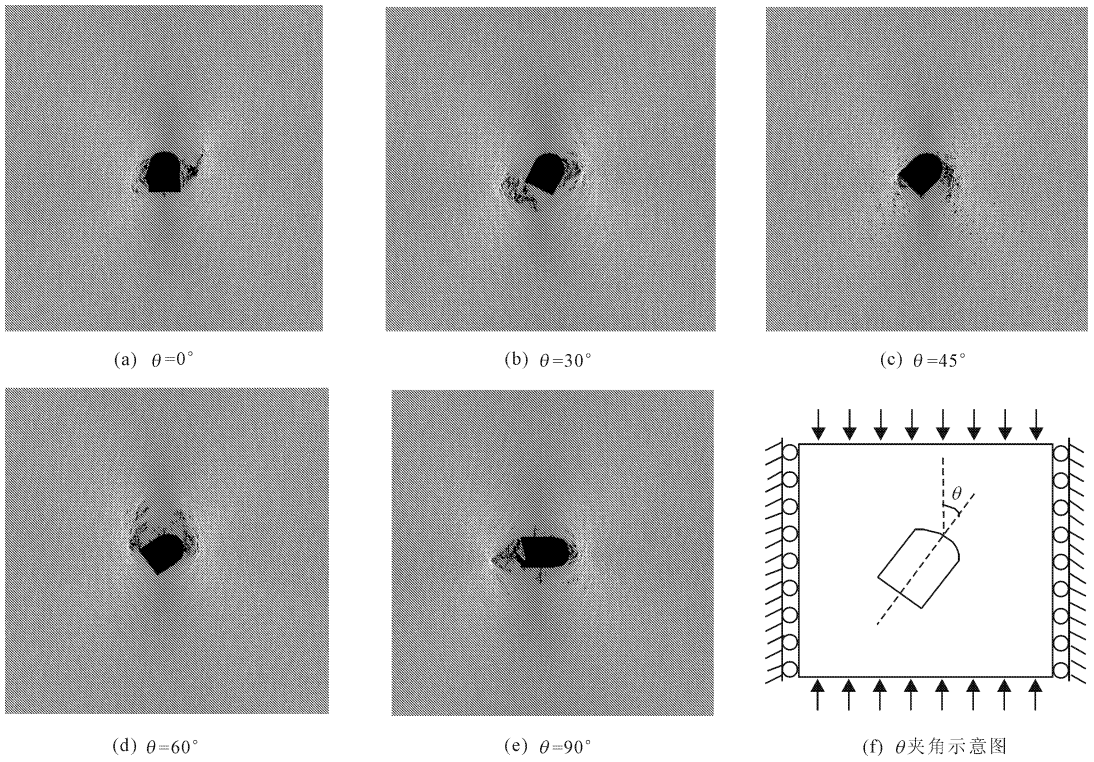


图 4 马蹄形隧道破坏模式的数值计算结果(剪应力)

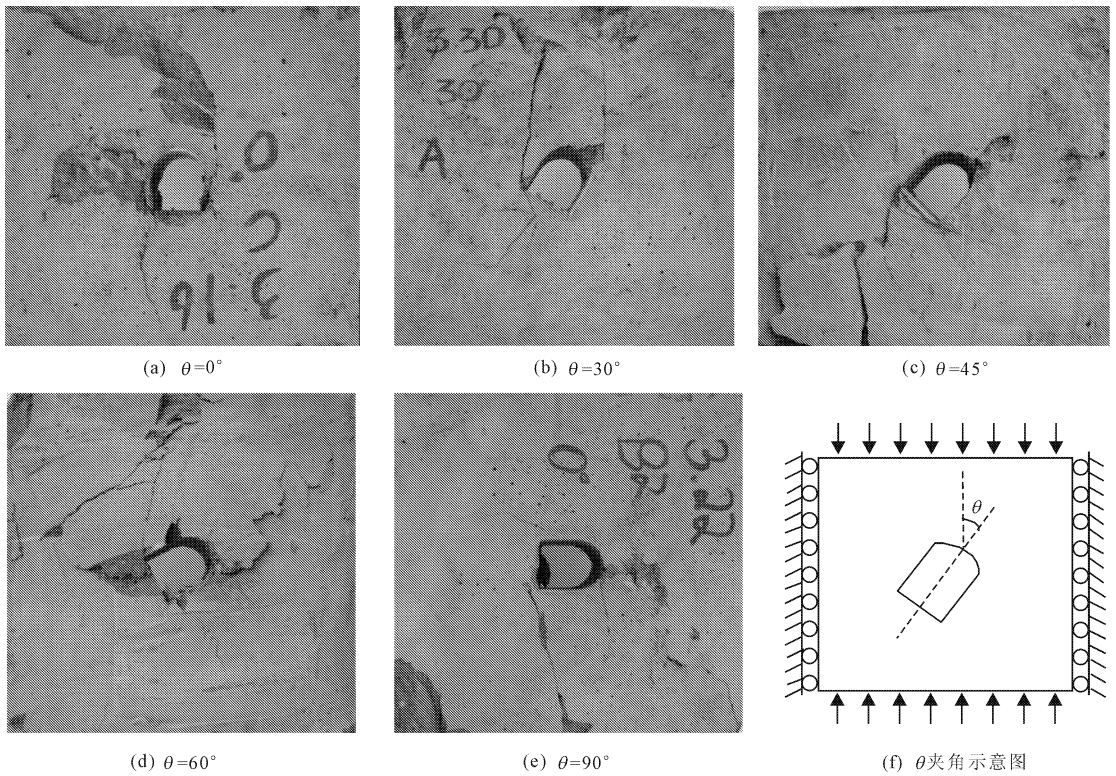


图 5 马蹄形隧道破坏模式的试验结果^[12]

由图 4 可知,当 $\theta = 0^\circ$ 时,隧道两侧产生了较大的剪切应力集中,围岩的破裂区主要分布在隧洞侧壁附近,并且其范围仍然在不断扩大,威胁洞室的整体安全,同时隧道底板和拱顶中心部位也出现了一

定深度的岩体破裂;当 $\theta = 30^\circ$ 时,在隧道的左侧底角和右侧拱肩位置处出现了较大的剪应力集中,这里的破坏也最为严重,并有不断向围岩深部发展的趋势,其中,左侧底角的破坏在岩体内部不断孕育扩

张,而右侧拱肩处的破裂已经使洞壁有剥落的危险;当 $\theta = 45^\circ$ 时,应力集中区域和围岩破坏位置与 30° 时的情况接近,但数值模拟结果表明此时右侧拱顶位置的破裂更为明显,破坏范围和深度也更大,底板和拱顶的破裂同时向下发展,影响隧洞底板和侧壁的稳定;当 $\theta = 60^\circ$ 时,隧道剪应力主要集中在左侧底角和拱顶附近,破裂最先由左侧底角和右侧拱顶处产生并不断向上发展,存在贯通并形成大面积的破坏的可能,图 2 所示的模拟结果表明右侧洞壁和底板相对稳定,但左侧壁及拱顶的破坏会越来越严重,并最终导致隧洞失稳破坏;当 $\theta = 90^\circ$ 时,应力集中在拱顶和底板中心位置,特别是在底板位置处破坏显著,需要注意的是无论是在模型试验还是在数值模拟中,均出现了底板岩体的剥离,同时,拱顶中部的破裂也非常明显,在拱顶表面形成了具有一定深度的破裂区,在两侧洞壁也分别产生了向围岩深部发展的破碎带。

2.4 不同方向主应力对隧道稳定性的影响

在上述数值模拟和模型试验中均采用逐级加载的方式,以便于开展试验并进行对比,但这与隧道破坏时的实际受力方式不符,为了进一步更好地研究不同方向主应力作用下隧道洞室安全稳定状况,通过引入 RFPA 离心加载法^[17],一方面定量计算主应力方向不同时的隧洞安全系数,另一方面避免了强度折减法所要求的折减力学参数之间的约束关系,采用图 1 所示马蹄形隧道计算模型,但模型尺寸增加为 $35\text{ m} \times 35\text{ m}$,隧道高 6 m ,宽 5 m ,上拱半径为 2.5 m ,同时对模型底部也施加法向约束,所用岩体力学参数如表 2 所示,计算过程中维持模型顶部 $\sigma_1 = 3\text{ MPa}$,安全系数最终计算结果如图 6 所示。

表 2 岩体物理力学参数

岩体密度 /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松 比	单轴抗压 强度/MPa	均质度 系数	压拉 比
2×10^{-5}	2.5	0.3	20	4	10

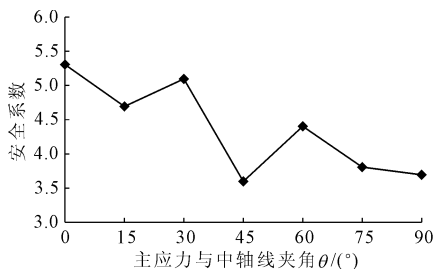


图 6 安全系数随主应力方向变化曲线

由图 6 可知,随着主应力与隧道夹角 θ 的变化,

隧道的安全系数也明显不同。当夹角 $\theta = 0^\circ$ 和 30° 时,隧道的安全系数较大,分别为 5.3 和 5.1,此时隧道的整体稳定状况较好;当夹角 $\theta = 45^\circ$ 时,隧道的安全系数最小,为 3.6,主应力倾角 θ 从 30° 增加到 45° 时安全系数显著减小。

3 结 论

本文通过建立二维非均匀性统计损伤模型,采用分步逐级加载的方式使得隧洞围岩逐步破坏,并从围岩损伤破裂的演化过程、岩体应力场变化以及破坏的前兆信息等角度探讨了不同主应力方向下马蹄形隧洞的破坏模式及规律,并与相关试验结果进行对比,同时采用 RFPA 离心加载法计算了隧洞的整体安全系数,得出以下结论:

(1) 主应力方向是影响隧道围岩稳定的重要因素,主应力方向不同,隧道围岩应力状态也会不同,随着主应力的逐级增大,马蹄形隧道洞壁附近产生应力集中并引起岩体损伤,损伤破裂不断发展就会威胁围岩的稳定,但其破裂模式多种多样。

(2) 在不同方向主应力作用下,马蹄形隧道破裂的声发射信息具有一定差别。当夹角 θ 为 90° 时,破坏前单步产生的声发射事件最多;当 θ 为 60° 时,破坏前产生的声发射事件最少。主应力方向不同时,隧道围岩破坏前产生的声发射数量为: $n_{90^\circ} > n_{0^\circ} > n_{45^\circ} > n_{30^\circ} > n_{60^\circ}$ 。

(3) 马蹄形隧道的直墙底部和拱顶容易诱发破裂失稳,当 $\theta = 0^\circ$ 时隧洞侧壁破坏严重;当 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 时,顶板和底板位置首先产生破裂,但破裂区扩展规律不同;当 $\theta = 90^\circ$,在底板位置处破坏显著,顶板中间的破裂也非常明显。

(4) 马蹄形隧道的安全稳定状况随夹角 θ 的不同而不同,当 $\theta = 0^\circ$ 和 30° 时,隧道的安全系数较大;当夹角 $\theta = 45^\circ$ 时,隧道的安全系数最小, θ 从 30° 增加到 45° 时安全系数显著减小。

参考文献:

- [1] 傅冰骏. 国际岩石力学发展动向[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 195-196.
- [2] 王 猛, 苏卫强, 吕 苑, 等. 加固措施对富水断层破碎带隧洞围岩稳定的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 200-204.
- [3] 郑进修, 何建华, 张建华, 等. 叶巴滩地下厂房布置方案选择与围岩稳定分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 30-35.

(下转第 54 页)

(2) 分析了沉降自动化采集系统的误差来源及解决措施。确保传感器的正确安装,减小安装误差。

(3) 结合沉降自动化采集系统在台州市东部新区软基处理工程沉降监测中的应用,自动监测与人工测量数据的对比验证了沉降自动化采集系统用于软基处理沉降监测的可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 张文中. 软土地基沉降监测仪的研究[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2006.
- [2] 柯嘉. 揭阳潮汕机场工程地基处理工程监测分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 227-230.
- [3] 李德桥. 基于磁致式静力水准仪的沉降远程监控系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 梁国清, 周娇娇, 董海波. 静力水准系统在黄龙滩大坝变形监测中的应用[J]. 大坝与安全, 2012(3): 25-29, 34.
- [5] 李农发, 赵义飞. 静力水准测量系统在向家坝水电站的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(S1): 181-182, 185.
- [6] 杨奇. 高速铁路桥梁桩基础变形性状试验与工后沉降研究[D]. 广州: 中南大学, 2011.
- [7] 张建民. 静力水准自动化系统在高铁桥墩差异沉降监测中的应用[J]. 铁道勘察, 2016, 42(2): 1-2, 5.
- [8] 冯谦, 张祎, 朱念, 等. 基于 GPRS 的远程铁路路基沉降实时监测系统的设计[J]. 大地测量与地球动力

学, 2013, 33(3): 155-157.

- [9] 匡团结, 张志刚. 自动化监测系统在某高速铁路运营监测中的应用[J]. 铁道勘察, 2013, 39(4): 1-2, 5.
- [10] 谢雄耀, 李军, 王强. 盾构施工地表沉降自动化监测及数据移动发布系统[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 788-794.
- [11] 黄新召. 港珠澳大桥拱北隧道静力水准自动化监测系统应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(6): 173-174, 177.
- [12] 胡云龙, 汪大超. 静力水准系统在沉降监测中的应用[J]. 城市勘测, 2017(3): 154-157.
- [13] 何晓业. 静力水准系统在大科学工程中的应用及发展趋势[J]. 核科学与工程, 2006, 26(4): 332-336.
- [14] JONES M. Latest results from the CLIC geodetic studies, international workshop on accelerator alignment[C]//The 11st International Workshop on Accelerator Alignment, Hamburg, Germany, 2010.
- [15] 韩三琪. 物联网技术在城轨交通工程变形监测中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2015(2): 73-76.
- [16] Song Kaichen, Nie Xili. Adaptive fusion algorithms based on weighted least square method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(3): 451-454.
- [17] 程传杰, 王斌, 吴凤娇. 基于 51 单片机的油矿测控系统硬件设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 168-171.

(上接第 32 页)

- [4] 于学馥. 轴变论与围岩变形破坏的基本规律[J]. 轴矿冶, 1982, 1(1): 8-17.
- [5] 张继勋, 刘秋生. 地下工程稳定性分析方法现状与不足[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 1-5.
- [6] 闫红江, 邓志刚. 丽香铁路中义隧道高地应力软岩大变形控制技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 67-72.
- [7] Charpentier D, Tessier D, Cathelineau M. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing. case of tournemire, france[J]. Engineering Geology, 2003, 70(1/2): 55-69.
- [8] 郑颖人, 徐浩, 王成. 隧洞破坏机理及深浅埋分界标准[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1851-1875.
- [9] 刘学增, 张鹏, 周敏. 纵向裂缝对隧道衬砌承载力的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 31(10): 2096-2101.
- [10] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2):

441-448.

- [11] 彭建兵, 胡志平, 门玉明, 等. 马蹄形隧道 40°斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2258-2265.
- [12] 李永乾, 朱哲明, 胡荣. 主应力方向对隧道稳定性影响规律的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S1): 93-98.
- [13] 梁正召. 三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [14] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践, 1999, 21(2): 21-24.
- [16] 廖志毅, 唐春安, 高军程, 等. 撞击荷载作用下板状岩体破坏特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 120-124.
- [17] 唐春安, 唐先烈, 李连崇, 等. 岩土破裂过程分析 RFPA 离心加载法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 71-76.