

岩溶隧道开挖稳定性的三维数值分析^{*}张军¹, 刘洋洋¹, 李求常²

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙南方职业学院, 湖南 长沙 410208)

摘要: 随着国家基础设施建设的发展,越来越多的隧道穿越岩溶区域,掌子面突泥涌水等地质灾害日益突出。文中依托湖南永吉(永顺—吉首)高速公路务西作隧道,运用三维数值模拟对岩溶隧道开挖稳定性进行分析,得到不同位置、不同大小有填充物溶洞对隧道开挖各断面围岩应力及位移的影响。

关键词: 隧道;岩溶隧道;开挖稳定性;数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0149-03

由于超前地质预报的局限性及对掌子面突泥涌水机理缺乏认知,岩溶隧道施工中频繁发生突泥涌水、塌方等现象,分析隧道开挖过程中不同大小、不同位置溶洞对开挖面应力及位移的影响,进而研究隧道突泥涌水机理很有必要。针对岩溶隧道开挖稳定性,史世雍、李培楠、徐长金等运用有限元软件分析了隧道顶部溶洞分布对围岩稳定性的影响;蒋颖利用有限差分软件分析了不同位置溶洞对隧道围岩稳定性的影响;吴梦军、王高波、郭而东等通过分析溶洞发育程度和位置对围岩施工力学行为的影响,总结了岩溶地区公路隧道围岩位移场、塑性区的分布规律;赵明阶等运用相似模型试验和数值分析成果,分析了岩溶区公路隧道全断面开挖中围岩变形特性,提出了岩溶区域全断面开挖隧道围岩变形时空曲线的一般模式;宋战平等运用原位试验分析了不同位置、不同尺度隐伏溶洞对隧道围岩空间位移变化的影响。前述研究一般以无填充的干溶洞为主,而实际中存在大量有填充物(或水)溶洞,隧道施工过程中溶洞被揭露,填充物(或水)从掌子面涌出形成突泥(或涌水),对施工安全造成威胁。该文以永吉(永顺—吉首)高速公路务西作隧道为工程背景,通过三维数值分析,研究溶洞位置、大小及间距对隧道开挖稳定性的影响。

1 工程概况

务西作隧道属于中长隧道,处于岩溶较发育区段,地下水主要为岩溶裂隙水,主要发生在灰岩裂缝。隧道开挖过程中遇到各种不同位置、不同大小

的溶洞。

2 隧道开挖数值模拟

结合工程实际情况,利用 MIDAS/GTS 有限元软件模拟隧道开挖过程中掌子面前方顶部不同洞径(1.1、3.3、5.5、8.25 m)、不同间距(1.1、3.3、5.5、8.25 m)溶洞对各开挖断面围岩应力及位移的影响。

2.1 有限元几何模型建立

计算模型选取务西作隧道 YK9+807—815 开挖断面尺寸按隧道洞径 3 倍向周围延伸,水平方向取 100 m,竖直方向取 80 m,轴向取 45 m(见图 1)。根据务西作隧道设计资料和工程经验确定各计算参数(见表 1)。

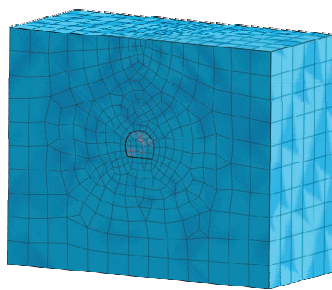


图 1 隧道数值计算模型

表 1 计算参数

介质	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
IV 级围岩	5.0	0.25	25	20	35
溶洞填充物	0.7	0.30	18	25	8
喷砼	25.0	0.20	22	—	—
锚杆	210.0	—	—	—	—

^{*} 基金项目: 湖南省交通科技项目(201435)

隧道开挖采用上下台阶法或预留核心土台阶法,进行数值分析时近似模拟计算区域的连续变化。分成15步进行开挖,每一步开挖进尺3 m,然后进行锚杆施工、喷射砼,如此循环进行,直至掌子面达到溶洞中心处。

2.2 计算结果分析

2.2.1 拱顶沉降

溶洞大小一定时,拱顶沉降随溶洞间距和水平距离的变化见图2;溶洞间距一定时,拱顶沉降随溶洞大小与水平距离的变化见图3。

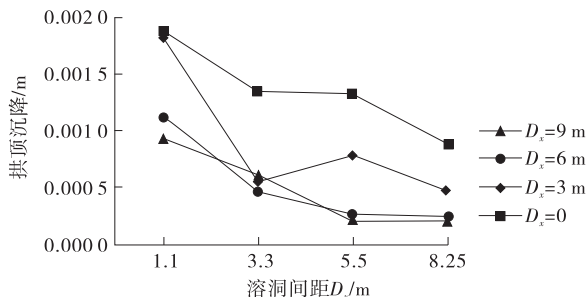


图2 溶洞直径 $D=1.1$ m 时各开挖断面拱顶沉降随溶洞间距 D_y 和水平距离 D_x 的变化

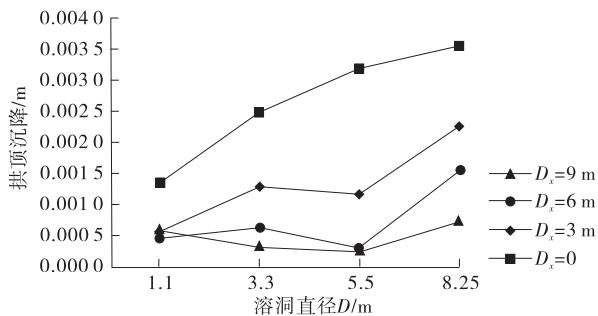


图3 溶洞间距 $D_y=3.3$ m 时各开挖断面拱顶沉降随溶洞直径 D 和水平距离 D_x 的变化

由图2可知:溶洞直径 $D=1.1$ m 时,开挖至开挖断面 $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 处,拱顶沉降随着溶洞间距的增大而减小,沉降值相对较小;开挖至 $D_x=3$ m 处, $D_y=3.3\sim 5.5$ m 时,沉降值有所增加; $D_x=0$ 时,拱顶沉降随溶洞间距增大呈减小趋势,且沉降值较大。

由图3可知:溶洞间距 $D_y=3.3$ m 时,开挖断面 $D_x=9$ m 处,不同大小溶洞拱顶沉降值相差不大;开挖至 $D_x=6$ m 和 $D_x=3$ m 时,沉降差异逐渐明显; $D_x=0$ 时,拱顶沉降随着溶洞直径的增加而增大。

2.2.2 拱脚水平位移

溶洞大小一定时,拱脚水平位移随溶洞间距和水平距离的变化见图4;溶洞间距一定时,拱脚水平

位移随溶洞大小和水平距离的变化见图5。

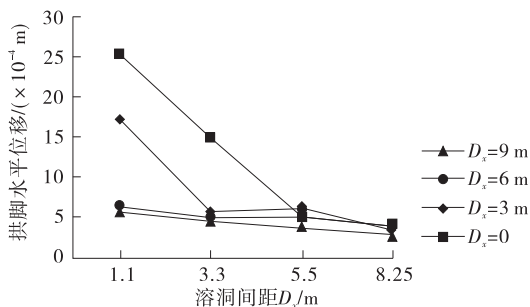


图4 溶洞直径 $D=1.1$ m 时各开挖断面拱脚水平位移随溶洞间距 D_y 和水平距离 D_x 的变化

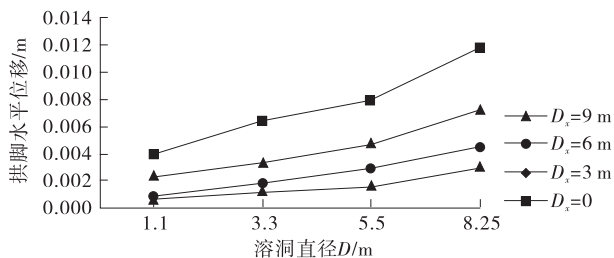


图5 溶洞间距 $D_y=1.1$ m 时各开挖断面拱脚水平位移随溶洞直径 D 和水平距离 D_x 的变化

由图4可知:溶洞直径 $D=1.1$ m 时,开挖断面 $D_x=9$ m 与 $D_x=6$ m 处,拱脚水平位移变化趋势基本一致,随溶洞间距变化不明显; $D_x=3$ m 处, $D_y=1.1\sim 3.3$ m 时,拱脚水平位移变化较大; $D_x=0$ 时,拱脚水平位移达到最大,且随着溶洞间距的增大而减小。

由图5可知:溶洞间距一定时,不同开挖断面拱脚水平位移随溶洞大小变化的趋势基本一致,均为随着溶洞直径的增大而增加; $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 时,拱脚水平位移量值随溶洞直径的变化不大; $D_x=0$ 时,拱脚水平位移达到最大。

2.2.3 拱顶最大主应力

溶洞大小一定时,拱顶最大主应力随溶洞间距和水平距离的变化见图6;溶洞间距一定时,拱顶最大主应力随溶洞大小和水平距离的变化见图7。

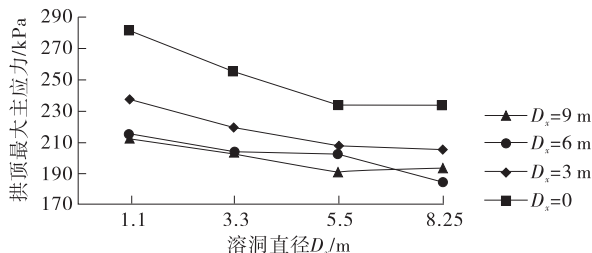


图6 溶洞直径 $D=1.1$ m 时各开挖断面拱顶最大主应力随溶洞间距 D_y 和水平距离 D_x 的变化

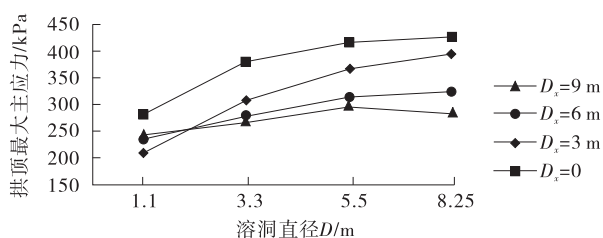


图7 溶洞间距 $D_y=1.1$ m 时各开挖断面拱顶最大主应力随溶洞直径 D 和水平距离 D_x 的变化

由图6可知:溶洞大小一定时,开挖断面 $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 处,拱顶最大主应力随溶洞间距的增大变化不明显; $D_y=5.5$ m 时,拱顶最大主应力最大值出现 $D_x=0$ 处,最小值位于 $D_x=9$ m 处,且最大主应力出现在溶洞间距较小处。

由图7可知:溶洞间距 $D_y=1.1$ m 时,开挖断面 $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 处,拱顶最大主应力随溶洞直径的增加而增大,变化趋势较平缓; $D_x=3$ m, 直径为 1.1 m 时拱顶最大主应力最小,拱顶最大主应力最大值位于开挖断面 $D_x=0$ 处。

2.2.4 拱脚最小主应力

溶洞大小一定时,拱脚最小主应力随溶洞间距和水平距离的变化见图8;溶洞间距一定时,拱脚最小主应力随溶洞大小和水平距离的变化见图9。

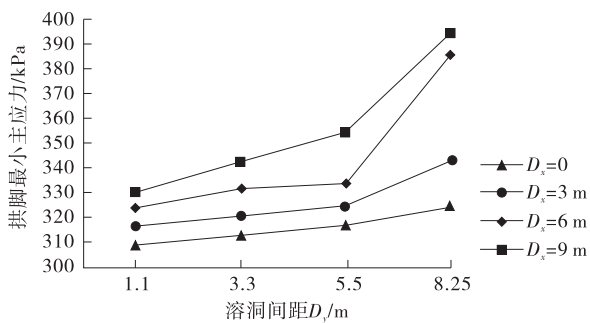


图8 洞径 $D=3.3$ m 时各开挖断面拱脚最小主应力随溶洞间距 D_y 和水平距离 D_x 的变化

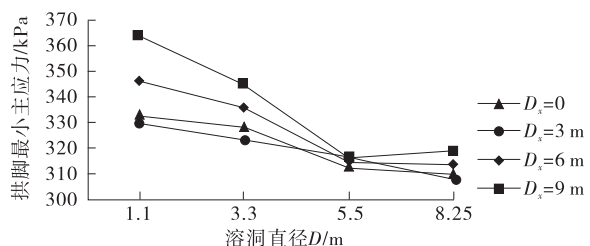


图9 溶洞间距 $D_y=1.1$ m 时各开挖断面拱脚最小主应力随溶洞直径 D 和水平距离 D_x 的变化

由图8可知:溶洞大小一定时,开挖断面 $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 处,拱脚最小主应力变化趋势基本一

致,随着溶洞间距的增加而增大; $D_y=8.25$ m 时,拱脚最小主应力值最大; $D_x=3$ m 和 $D_x=0$ 时,拱脚最小主应力值变化不大。

由图9可知:溶洞间距 $D_y=1.1$ m 时,开挖断面 $D_x=9$ m 和 $D_x=6$ m 处,拱脚最小主应力随溶洞直径的增大而减小; $D=5.5$ m 时变化趋于平缓; $D_x=0$ 时,拱脚最小主应力值最小。

3 结论

运用 MIDAS/GTS 三维有限元软件模拟岩溶隧道施工过程,得到不同位置、不同大小溶洞对各开挖断面围岩应力及位移的影响。主要结论如下:

(1) 溶洞大小一定时,开挖断面距离溶洞越近,拱顶沉降越大;距离较远时,溶洞间距变化对拱顶沉降影响不大,开挖至溶洞正下方时沉降值较大。溶洞间距一定时,开挖断面离溶洞越近,拱顶沉降越大;洞径越大,沉降越大。

(2) 溶洞大小一定时,拱脚水平位移随溶洞间距的增大而减小,溶洞间距较大时,变化趋于平缓;溶洞间距一定时,随着溶洞尺寸的增加,拱脚水平位移呈增大趋势,离溶洞越近增量越大,开挖至 $D_x=0$ 时,拱脚水平位移达到最大。

(3) 溶洞大小一定,开挖断面由远至近时,最大主应力有一定幅度增大,开挖至溶洞正下方时应力最大,最大值出现在溶洞间距较小的位置;溶洞间距一定时,最大主应力整体上随溶洞尺寸的增大而增大, $D_x=0$ 时最大主应力最大,应适当加强支护。

(4) 溶洞大小一定时,拱脚最小主应力随溶洞间距的增大而增大,开挖断面由远及近时,最小主应力有一定幅度减小,应适当加强这类溶洞隧道的拱脚支护;溶洞间距一定时,拱脚最小主应力随着溶洞直径的增大而减小,开挖至溶洞正下方时最小主应力最小。

参考文献:

- [1] 史世雍,梅世龙,杨志刚.隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):698-702.
- [2] 李培楠,刘俊,苏锋.溶洞对地铁隧道开挖稳定性影响的数值分析[J].路基工程,2013(4):76-81.
- [3] 徐长金,樊浩博,赖金星.溶洞对岩溶隧道稳定性影响的数值模拟分析[J].公路交通科技(应用技术版),2013(6):175-177.

4 结论

以屋场坪隧道 K11+125—155 段为研究背景,运用 ANSYS 对隧道开挖过程进行仿真分析,基于不同围岩参数和仿真结果建立正交型灰色关联分析模型,运用 MATLAB 编辑程序求解围岩稳定性对围岩参数的关联系数和关联度。从关联度计算结果来看,围岩力学参数对屋场坪隧道开挖后稳定性的影响大小排序为内摩擦角>黏聚力>弹性模量,内摩擦角对围岩稳定性的影响较大,选取不同的参数值对仿真结果影响较大,需给予足够重视。基于灰色关联分析理论和 ANSYS 软件仿真分析结果建立正交型灰色关联分析模型,运用 MATLAB 软件的编程功能可以确定不同围岩参数对围岩稳定性的敏感程度,为隧道施工和优化设计提供理论依据。鉴于隧道施工是一个动态过程,对于不同的地质情况,需重新构建样本数据和分析模型,从而得到可靠的分析结果。

参考文献:

- [1] 董明余.灰色建模方法及其在预测中的应用研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [2] 张英,万文,程宏超.基于灰色 Verhulst 模型的隧道拱顶沉降预测[J].西部交通科技,2010(1):55—59.
- [3] 刘小俊,蒋雅君,陶双江,等.灰色模型在预测隧道围岩

变形中的应用[C]//中国土木工程学会.2016 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年会论文集.北京:中国土木工程学会,2016:243—248.

- [4] 黎明星.基于灰色 Verhulst 模型的珠江新城隧道变形监测数据分析[J].科技资讯,2017,15(17):84—86.
- [5] 李梓源,王海亮.基于灰色关联度分析法的浅埋隧道围岩稳定性研究[J].安全与环境学报,2017,17(6):2079—2083.
- [6] 文辉辉,秦强,彭海华.基于 ANSYS 的灰色关联分析模型的围岩稳定性分析[J].水力发电,2018,44(12):27—30.
- [7] 倪健,陈甦,王彬,等.地铁盾构隧道长期沉降的灰色关联分析[J].森林工程,2018,34(1):71—74.
- [8] 刘思峰,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].8 版.北京:科学出版社,2017.
- [9] 郝静,贾仰文.应用正交试验法分析地下水流模型参数灵敏度[J].人民黄河,2015,37(9):66—68.
- [10] 田庆,李官群.基于施工监测数据及数值回归的山岭隧道围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2021(2):123—125.
- [11] 周凯,胡敏.隧道穿越溶洞群对围岩及支护结构稳定性的影响[J].公路与汽运,2020(6):149—155.
- [12] 罗跃锋.大华山隧道围岩稳定性及结构可靠度研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.

收稿日期:2020—08—04

(上接第 120 页)

- 科学技术创新,2021(5):138—139.
- [2] 孙恒.现浇箱梁门洞支架受力分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020(9):267—269.
- [3] 王欢.跨国道现浇箱梁支架施工技术研究[J].工程建设与设计,2020(11):250—251+254.
- [4] 李杨.跨公路连续梁支架设计与计算分析[J].交通世

界,2020(11):121—122+125.

- [5] 赵建民.大跨度大面积贝雷梁门洞支架体系设计与应用[J].施工技术,2017,46(增刊 1):394—399.
- [6] 王宁.桥梁大跨径门洞支架的设计及施工[J].铁道勘察,2019,45(3):104—108.

收稿日期:2021—06—08

(上接第 151 页)

- [4] 蒋颖.溶洞分布部位对隧道稳定性影响的数值分析[J].铁道标准设计,2009,38(6):67—70.
- [5] 吴梦军,许锡宾,赵明阶,等.岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1525—1529.
- [6] 王高波.岩溶隧道围岩稳定性及施工力学行为分析[D].重庆:重庆大学,2011.
- [7] 郭而东.溶洞位置对隧道围岩稳定性的影响及治理方案研究[D].西安:长安大学,2014.

- [8] 赵明阶,刘绪华,敖建华,等.隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J].岩土力学,2003,24(3):445—449.

- [9] 宋战平.隐伏溶洞对隧道围岩一支护结构稳定性的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,31(5):1296.
- [10] 宋战平,杨腾添,张丹锋,等.溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(4):484—491.

收稿日期:2020—07—13