

# 不同溶洞条件对大跨隧道开挖影响敏感性分析

汪祥国

(中铁十一局集团第二工程有限公司, 湖北 十堰 442000)

**摘要:**该文以江西萍莲高速公路莲花隧道为工程背景,首先通过数值模拟软件建立大跨隧道在不同溶洞条件下的开挖模型,分析Ⅳ级围岩段某典型断面溶洞在不同位置、不同距离和不同扁平率3种条件下,大跨隧道开挖时地表沉降和拱顶沉降的发展变化规律,获取某典型断面隧道拱顶沉降和地表沉降的累积值,然后构建溶洞在3种水平条件下隧道围岩稳定性的正交试验模型,进行不同溶洞条件对大跨隧道开挖影响敏感性分析。研究结果表明:在不同溶洞条件下,溶洞位置是影响隧道开挖围岩稳定性的主要因素,其次是溶洞离隧道的距离和扁平率大小。

**关键词:**隧道工程;不同溶洞条件;敏感性分析;数值模拟

在中国大量山岭隧道建设中,时常要穿越岩溶地区,由于溶洞分布的复杂性,在隧道施工时,溶洞可能对隧道稳定性产生较大影响,引起岩溶塌陷、支护变形、隧道突水突泥等灾害,影响建设进度,严重时可能成为诱发隧道灾变的重要因素。近年来不少学者对岩溶隧道进行了研究,陈峰等通过改变溶洞直径、埋深、溶洞内承压水头3个参数,模拟研究了富水地区溶洞对基坑土体变形、灌注桩侧移以及水平支撑轴力的影响;王建等对公路隧道穿越大型溶洞进行了数值计算分析,得出隧道侧面溶洞对隧道围岩位移扩展影响较大,在溶洞边缘添加加固部件能够对位移起到良好的控制作用;Huang Xin等建立了可识别隧道岩层间安全厚度与隐伏溶洞的模型;王军等针对黔张常铁路高山隧道一巨型溶洞,进行数值模拟计算分析提出了“洞硃充填+上部注浆”的综合处置方案,取得了较好的处置效果;耿招分析了不同开挖方法下偏压大跨隧道围岩的稳定性;江杰等利用有限元软件计算分析比较了不同溶洞条件对基坑开挖的影响;Lu Haifeng等通过调整土的细观变量( $E$ 、 $\mu$ 、 $c$ 等),并把它们作为影响因素开展了正交设计试验;梅博轩运用Midas-GTS软件研究了溶洞的存在对基坑支护桩的影响,并对溶洞各项参数进行了敏感性分析;陈子全等主要研究了千枚岩力学特性及对千枚岩隧道施工期位移安全控制基准;雷勇等开展了穿越溶洞桩的受力特性研究;马敬夫

通过软件模拟了单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、CD法3种开挖方案,优化了复杂条件下隧道施工方案。上述研究为有岩溶的隧道或深基坑的施工提供了较好的参考,但是由于溶洞分布和地质条件的复杂性,开展溶洞在不同位置、不同距离、不同扁平率的条件下,对大跨隧道开挖的敏感性影响研究具有较好的工程意义。鉴于此,该文以江西萍(乡)莲(花)高速公路莲花隧道某典型岩溶断面为研究对象,模拟分析溶洞在不同条件下隧道开挖时围岩拱顶和地表沉降变化规律,设计溶洞在不同位置、不同距离、不同扁平率水平条件的正交试验模型,探讨三水平条件对大跨隧道开挖的敏感性影响程度,为类似岩溶隧道施工提供借鉴和指导。

## 1 工程概况

莲花隧道开始里程在萍乡市湘东区白竺乡拓村东风自然村四周,终止里程在莲花县六市乡垭坞村源里自然村四周,隧道选址区属低山地貌,山脊呈北北东至南北向,植被发育,地面高程为560~885 m,自然坡度为 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,自然边坡稳定,隧道呈约 $60^{\circ}$ 斜穿山脉。隧址区地质构造复杂,断裂构造发育,隧道先后经过4条区域性断裂、6条小断层或派生小断层、2条岩性分界线,隧道选址区水文、工程地质条件复杂,该区段岩溶较发育。特殊性岩土主要包括可溶性白云质灰岩及

收稿日期:2020-12-20

基金项目:中铁建股份有限公司科技研究开发项目(编号:13-C01);湖南省教育厅创新平台开放基金项目(编号:18K064);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2020JJ4021)

作者简介:汪祥国,男,高级工程师, E-mail:12159058@qq.com

全强风化粉砂质、泥质、钙质、炭质页岩;全强风化粉砂质、泥质、钙质、炭质页岩水理性质差,具有一定的胀缩性,遇水易崩解,此类围岩在水的作用下易产生变形,且以蠕变为主。该文针对岩溶较发育的隧道出口YK37+332~YK37+302里程段某典型断面开展研究。围岩为Ⅳ级,隧道净空为10.25 m×5.0 m,隧道埋深52 m左右,隧道长3 220 m,属于公路特长隧道,施工时采用台阶法钻爆开挖方案。溶洞与隧道位置关系及其现场分布情况见图1。

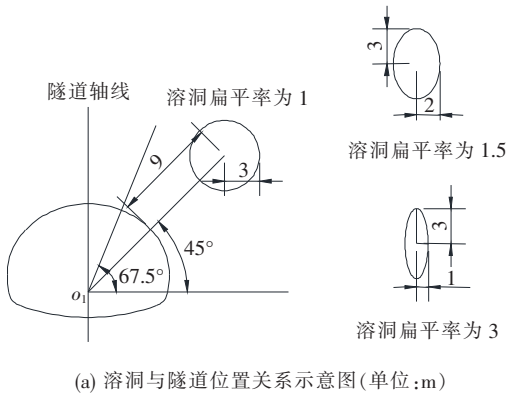


图1 溶洞与隧道位置关系示意图(单位:m)

2 有限元模型建立

2.1 模型建立

根据莲花隧道出口断面尺寸和交通设计要求,利

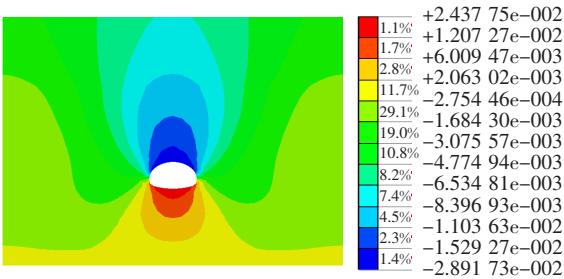
用有限元软件 Midas-GTS 建立隧道三维有限元模型。模型尺寸为长100 m,宽90 m,进尺10 m。隧道围岩的物理力学指标见表1,4层岩土体符合各向同性的 Mohr-Coulomb 模型,喷混和锚杆采用各向同性弹性模型。隧道与溶洞均建立在第4层——中风化砂岩中,计算模型约束条件为自动边界约束,上侧为自由端。施加荷载为重力荷载。模型计算采用的材料参数为:喷混弹性模量为 $1.5\times 10^7$  kPa,泊松比为0.2,重度为24 kN/m<sup>3</sup>,锚杆弹性模量为 $2.1\times 10^8$  kPa,泊松比为0.3,重度为78.5 kN/m<sup>3</sup>。

表1 各土层物理力学性质指标

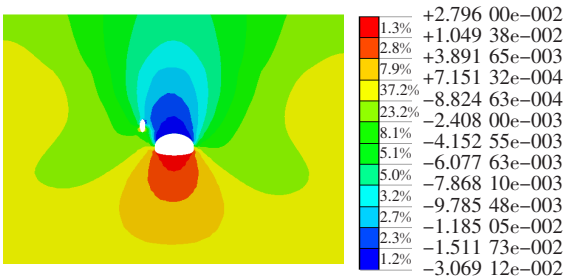
土层名称	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	泊松比	内摩擦角/(°)	弹性模量/kPa
素填土	18	25	0.25	20	$8.6\times 10^3$
粉质黏土	20	41	0.30	19	$1.5\times 10^4$
强风化砂岩	23	35	0.35	28	$5.0\times 10^5$
中风化砂岩	24	40	0.35	32	$8.0\times 10^5$

2.2 云图结果

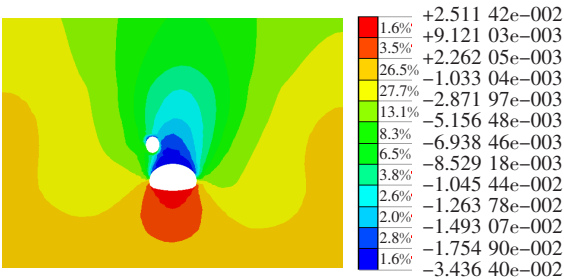
采用 Midas-GTS 软件模拟计算Ⅳ级围岩隧道在不同溶洞条件下隧道开挖围岩拱顶和地表沉降,计算过程中获得了大量位移云图,分析时遴选典型有代表性的云图见图2。图2中:溶洞形状为椭圆,扁平率为 $a/b$ ,其中长轴为 $a$ ,短轴为 $b$ 。



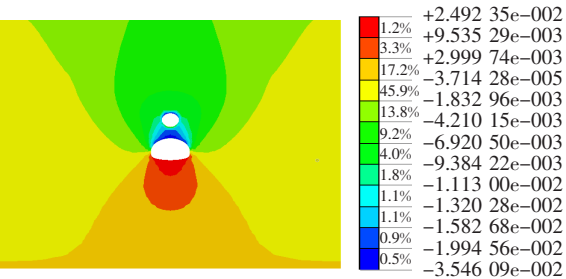
(a) 无溶洞隧道开挖云图



(b) 溶洞位置为45°、距隧道边界8 m、扁平率1隧道开挖云图



(c) 溶洞位置为67.5°、距隧道边界8 m、扁平率1.5隧道开挖云图



(d) 溶洞位置为90°、距隧道边界8 m、扁平率3隧道开挖云图

图2 竖向位移云图(单位:m)

3 敏感性分析

为了更直观、有效地研究不同溶洞条件对隧道开挖稳定性的影响,结合竖向位移云图,选取现场可实测且能代表隧道稳定性的沉降点进行正交试验分析,如隧道地表沉降、拱顶沉降等。

3.1 方案步骤

为保证试验变量单一,每次建模只改变溶洞位置、溶洞离隧道边界的距离、溶洞的扁平率中的一个。且为了模型计算准确,隧道和溶洞均处于第 4 层——中风化砂岩中。然后将建好的模型代入后进行处理分析,最后依次提取拱顶和地表点沉降量,要求每个模型的拱顶和地表点均为同一断面,每隔 10 m 取一次地表点。在所有数据提取完成后,通过正交表格的数据与计算,综合比较多个因素对隧道围岩稳定性的影响,获取影响最大的试验组合。

3.2 正交试验设计

根据现场情况,结合数值模拟结果,试验考虑 3 种影响因素:溶洞相对于隧道的位置、溶洞离隧道边界的距离、溶洞的扁平率;设计的 3 个水平分别是:溶洞位

置分别为 45°、67.5°、90°,溶洞离隧道边界距离分别为 8、8.5 和 9 m,溶洞扁平率分别为 1、1.5 和 3。在所选的正交表格中,把相应的因素与水平条件输入表格,便形成了试验方案,根据上面 9 种模型的计算数据,取最大值,结果如表 2 所示。

表 2 正交表格

序号	溶洞位置/(°)	溶洞离隧道距离/m	扁平率/m	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm
1	45.0	8.0	1.0	29.21	7.02
2	45.0	8.5	1.5	34.22	7.93
3	45.0	9.0	3.0	33.60	8.47
4	67.5	8.0	1.5	33.46	7.10
5	67.5	8.5	3.0	35.89	7.58
6	67.5	9.0	1.0	29.55	6.87
7	90.0	8.0	3.0	27.66	4.73
8	90.0	8.5	1.0	29.16	5.77
9	90.0	9.0	1.5	27.16	5.37

3.3 正交试验结果分析

不同溶洞条件对隧道开挖时的影响结果见表 3。

表 3 隧道围岩拱顶沉降、地表沉降极差分析结果

项目	拱顶沉降			地表沉降		
	位置(A)/(°)	距离(B)/m	扁平率(C)	位置(A)/(°)	距离(B)/m	扁平率(C)
$K_1$	97.03	90.33	87.92	23.42	18.85	19.66
$K_2$	98.90	99.27	94.84	21.55	21.28	20.40
$K_3$	83.98	90.31	97.15	15.87	20.71	20.78
$L_1$	32.34	30.11	29.31	7.81	6.28	6.55
$L_2$	32.97	33.09	31.61	7.18	7.09	6.80
$L_3$	27.99	30.10	32.38	5.29	6.90	6.93
极差 R	4.98	2.99	3.07	2.52	0.81	0.37
因素主次	A>C>B			A>B>C		
优组合	$A_2B_2C_3$			$A_1B_2C_3$		

注: $K_i$  为同一水平拱顶沉降或地表沉降之和; $L_i$  为同一水平拱顶沉降或地表沉降平均值。

如第 1 水平: $K_1=29.21+34.22+33.60=97.03$ , $L_1=\frac{97.03}{3}=32.34$ ,其余结果依此计算。

从表 3 可以看出:

(1) 溶洞位置的变化对隧道围岩拱顶沉降结果的影响为  $L_2>L_1>L_3$ ,可知溶洞与隧道中轴线夹角 67.5°为优水平;溶洞离隧道边界的距离对拱顶沉降结果的影响为  $L_2>L_1>L_3$ ,可知距离 8.5 m 为优水平;溶洞的扁平率对拱顶沉降结果影响为  $L_3>L_2>L_1$ ,

可知扁平率为 3 时为优水平。

(2) 由极差分析结果可知:对于拱顶沉降,试验变量因素影响的先后顺序为:溶洞位置 A>扁平率 C>溶洞距隧道边界的距离 B,即溶洞相对于隧道的位置对试验结果影响最大,为主要因素。优组合为  $A_2B_2C_3$ 。

(3) 对于地表沉降,溶洞位置变化影响结果为  $L_1 > L_2 > L_3$ ,可知  $45^\circ$  为优水平;溶洞距隧道边界距离变化影响结果为  $L_2 > L_3 > L_1$ ,可知 8.5 m 为优水平;扁平率因素影响结果为:  $L_3 > L_2 > L_1$ ,可知:扁平率为 3 时为优水平。

(4) 极差分析结果显示:对地表沉降试验变形影响的先后顺序为:溶洞位置  $A >$  溶洞距隧道边界的距离  $B >$  扁平率  $C$ ,溶洞位置是最主要的影响因素。优组合为  $A_1B_2C_3$ 。

由此可以得出结论:该隧道开挖时,溶洞相对于隧道的分布位置,是影响隧道开挖稳定性的最主要因素。

### 3.4 数值试验验证

由表 3 可知:① 对于拱顶沉降的优组合为  $A_2B_2C_3$ ,即溶洞位于  $67.5^\circ$ ,离隧道边界距离 8.5 m,溶洞扁平率为 3 时,拱顶沉降达到最大值,表 2 中 9 种工况确属该工况最大,最大值为 35.89 mm;② 对于地表沉降的优组合为  $A_1B_2C_3$ ,即当溶洞位于  $45^\circ$ ,离隧道边界距离 8.5 m,溶洞扁平率为 3 时,地表沉降达到最大值,然而表 2 中为  $45^\circ$ 、9 m、3 组合工况地表沉降最大为 8.47 mm,故要追加试验验证。经过分析,设计  $A_1B_2C_3$  组合,并将该组合工况代入模型计算,可得地表沉降最大值为 9.29 mm,对比表 2 中地表沉降最大值 8.47 mm,同比增长了 9.7%(图 3),故该组合符合工程实际要求。

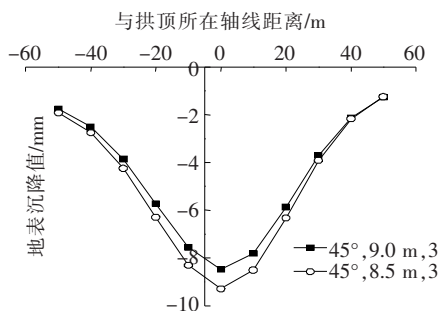


图3  $A_1B_2C_3$  组合拟合曲线对比图

## 4 结论

建立Ⅳ级围岩不同溶洞条件的隧道开挖模型,设计了溶洞在不同位置、不同距离和不同扁平率 3 种水平条件下的正交试验,开展了不同溶洞条件对隧道开挖影响的敏感性分析,得出以下结论:

(1) 在不同溶洞条件下开挖时,溶洞位置是影响隧道开挖稳定的主要因素,其次是溶洞离隧道边界的距离和溶洞的扁平率。

(2) 在溶洞位置为同一水平条件下,溶洞与隧道中轴线夹角为  $67.5^\circ$  时拱顶沉降达到最大值,在  $45^\circ$  时地表沉降达到最大值。在溶洞离隧道边界距离为同一水平条件下,溶洞在离隧道边界 8.5 m 时拱顶沉降和地表沉降均达到最大值;在溶洞扁平率为同一水平条件下,溶洞在扁平率为 3 时拱顶沉降和地表沉降达到最大值。

(3) 当溶洞与隧道中轴线夹角为  $67.5^\circ$ 、距隧道边界 8.5 m、扁平率为 3 时,拱顶沉降量最大;当溶洞与隧道中轴线夹角为  $45^\circ$ ,距隧道边界 8.5 m,扁平率为 3 时,地表沉降量最大。

### 参考文献:

- [1] 陈峰,吴绍明,王林枫,等.富水地区溶洞对深基坑开挖稳定性影响[J].地下空间与工程学报,2020(6).
- [2] 王建,王丽君,马建新,等.岩溶地区公路隧道穿越大型溶洞处治措施分析[J].地下空间与工程学报,2020(S2).
- [3] Huang Xin, Li Shucui, Xu Zhenhao, et al. An Attribute Recognition Model for Safe Thickness Assessment Between Concealed Karst Cave and Tunnel. [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(4): 955-969.
- [4] 王军,郭毕钧,冯国森,等.巨型溶洞回填处置与超厚回填体沉降机制研究[J].岩石力学与工程学报,2020(3).
- [5] 耿招,张彬,李伟瀚,等.不同开挖方法偏压大跨隧道围岩稳定性对比分析[J].工程地质学报,2018(4).
- [6] 江杰,王彰庆,彭远胜,等.岩溶区溶洞对基坑稳定性影响及处治技术研究[J].地下空间与工程学报,2018(S1).
- [7] Lu Haifeng, Yuan Baoyuan, Wang Lin. Rock Parameters Inversion for Estimating the Maximum Heights of Two Failure Zones in Overburden Strata of a Coal Seam[J]. Mining Science and Technology, (China), 2011, 21(1): 41-47.
- [8] 梅博轩.岩溶区基坑支护桩的稳定性分析[D].广东工业大学硕士学位论文,2018.
- [9] 吴永胜,谭忠盛,喻渝,等.川西北茂县群千枚岩各向异性力学特性[J].岩土力学,2018(1).
- [10] 陈子全,何川,吴迪,等.深埋碳质千枚岩力学特性及其能量损伤演化机制[J].岩土力学,2018(2).
- [11] 汪波,杨意,何川,等.破碎千枚岩隧道施工工期位移安全控制基准研究[J].岩石力学与工程学报,2016(11).
- [12] 杨博铭,赵明华,肖尧,等.基桩下伏矩形溶洞稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2020(4).
- [13] 雷勇,陈秋南,马缤辉.基于极限分析的桩端岩层冲切分析[J].岩石力学与工程学报,2014(3).
- [14] 马敬夫.大断面、小净距隧道施工力学效应分析[J].中外公路,2020(4).