

溶洞对城市轨道交通区间隧道安全影响

林希豪, 刘远明, 张凯锋, 景志泉, 匡南魁, 高晓薇

(贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 山区城市轨道交通区间隧道安全稳定受岩溶影响很大。本文拟采用室内物理模型和数值模拟结合的方法, 研究溶洞大小和位置对隧道安全的影响。无溶洞时, 衬砌拱顶和拱脚承受主要弯矩作用, 衬砌整体呈受压状态。随溶洞增大, 衬砌拱顶的轴力增大、拱腰和拱脚的轴力减小; 衬砌各处的弯矩都减小且衬砌一直受压。溶洞处于隧道拱脚处位于最不利的位置。

关键词: 溶洞; 隧道衬砌; 数值模拟; 安全影响

中图分类号: U25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 01—0147—02

随着我国城市轨道交通建设的迅速发展, 人们对地下工程的需求越来越大, 随之而来出现较多的施工难题, 尤其是溶洞对隧道施工的影响。位于石灰岩溶地区的西部已建公路隧道约 50%, 而岩溶对隧道施工的影响主要在洞害、水害、洞穴充填物坍塌、洞顶地表塌陷四个方面。

对此, 一些专家学者已有部分研究。邹成杰^[1]分析不同大小的隐伏溶洞对隧洞位移的作用, 史世雍^[2]等人分析不同大小的隧洞对夏家庙隧道围岩位移和应力的影响, 赵宏国^[3]对顶部溶洞的大小对地铁隧道影响做研究等等。然而, 关于不同大小和位置的溶洞对隧道的综合影响尚未研究全面。

贵阳轨道交通地铁三号线区间线路长 1169 米, 隧道埋深约 5.68 ~ 17.6 米, 隧道主要穿越白云岩等地层, 区间岩溶见洞率为 46.2%, 最大溶洞约 120 m³, 岩层强度 32 ~ 128 Mpa, 有 17 段带富水区域。由于贵阳地处云贵高原黔中山原丘陵中部, 属于独特的喀斯特地貌, 地下溶洞众多, 施工时有可能出现溶洞或引起坍塌, 且洞中常出现岩溶现象, 造成土层结构改变, 甚至出现部分结构悬空现象。在实际施工中, 溶洞的出现将减小隧道的承载能力; 外加因季节变化, 地下水的涌入时间和水量都不稳定, 这也会增加隧道施工的安全隐患。

本文就溶洞的大小和位置对隧道施工安全的影响进行研究, 得出隧道衬砌结构的受力和变形的规律, 为隧道衬砌结构的设计和施工提供参考。

1 模型试验研究

1.1 试验方案

模型由石膏浇筑, 并掺入重晶石膏, 围岩土用凡士林混合沙土替代, 各工况支护等宽。溶洞用四个大小不同、内压均为 30 kPa 的气囊替代。通过粘贴在支护上的应变片的变形反映支护的形变, 同时支护内部填充夯实土壤。

1.2 试验结果

物理模型实验数据如表 1-5 所示。

2 数值模拟研究

2.1 数值模拟方案

采用 MIDAS/GTS 建模, 二维数值模拟、本构模型采用摩尔-库伦准则。假定模型上边界为自由地面、底部及侧面边界位移为固定边界, 模型范围为宽×高=50 m×80 m。模拟过程中, 支护结构只考虑弹性模量和泊松比, 喷射混凝土强度为 C20, 厚度为 23 cm。在开挖过程中用锚杆来加固围岩, 模型的围岩等级为 IV。共设计八种不同工况隧道来模拟, 数值模拟工况如表 6 所示。

2.2 数值模拟结果

数值模拟后, 各工况下隧道衬砌轴力和弯矩的结果如表 7-11 所示。

表 1 无溶洞时衬砌的轴力值和弯矩值

关键点	衬砌轴力/(kN)	衬砌弯矩/(kN·m)
拱顶	-2.15	-0.065
左拱腰	-3.31	-0.059
右拱腰	-3.38	-0.055
左拱脚	-4.66	0.073
右拱脚	-4.63	0.071

表 2 溶洞位于隧道顶部时各测点的轴力值 (kN)

关键点	溶洞底面半径			
	2.5cm	5cm	7.5cm	10cm
拱顶	-4.35	-4.46	-4.57	-4.66
左拱腰	-6.19	-6.03	-5.88	-5.66
右拱腰	-6.18	-6.04	-5.72	-5.52
左拱脚	-6.08	-6.02	-5.97	-5.93
右拱脚	-6.07	-6.01	-5.96	-5.91

表 3 溶洞位于隧道顶部时各测点的弯矩值 (kN·m)

关键点	溶洞底面半径			
	2.5cm	5cm	7.5cm	10cm
拱顶	-0.063	-0.051	-0.042	-0.035
左拱腰	0.057	0.048	0.041	0.034
右拱腰	0.053	0.046	0.040	0.032
左拱脚	0.071	0.063	0.054	0.046
右拱脚	0.069	0.062	0.051	0.044

表 4 溶洞位于不同位置时各测点的轴力值 (kN)

关键点	承压溶洞与隧道的位置			
	拱顶	右拱腰	右拱脚	拱底
拱顶	-4.46	-4.25	-4.23	-4.29
左拱腰	-6.03	-6.20	-6.19	-6.09
右拱腰	-6.04	-6.24	-6.17	-6.09
左拱脚	-6.02	-6.13	-6.10	-5.87
右拱脚	-6.01	-6.17	-6.29	-5.88

表5 溶洞位于不同位置时各测点的弯矩值(kN·m)

关键点	承压溶洞与隧道的位置			
	拱顶	右拱腰	右拱脚	拱底
拱顶	-0.051	-0.074	-0.068	-0.064
左拱腰	0.048	0.061	0.063	0.045
右拱腰	0.046	0.056	0.057	0.044
左拱脚	0.072	0.086	0.086	0.069
右拱脚	0.070	0.087	0.097	0.068

表6 数值模拟工况

工况	溶洞底面半径 R/cm	位置关系
N0	0	--
N1	2.5	拱顶
N2	5.0	拱顶
N3	7.5	拱顶
N4	10.0	拱顶
N5	5.0	拱腰
N6	5.0	拱脚
N7	5.0	拱底

3 试验及数值模拟分析

3.1 无溶洞时分析

由表1、表7的隧道衬砌轴力和弯矩值可得：

无溶洞隧道施工时，衬砌在拱顶和拱腰处出现负弯矩，拱脚处出现正弯矩，即衬砌上部内侧受拉、下部外侧受拉；且在拱顶处出现最大负弯矩、在拱脚处出现最大正弯矩，即衬砌拱顶和拱脚承受主要弯矩作用。衬砌整体受压。

3.2 溶洞大小影响分析

由表2、表3、表8、表9所示的模型试验及数值模拟的各测点的隧道衬砌轴力和弯矩可得：

(1) 溶洞的存在导致衬砌受力变化，并产生相应变形。当溶洞与隧道相对位置一定时，随着溶洞半径的增大，隧道的横向变形逐渐加大，纵向变形逐渐减小，但变形量较小。

(2) 整个衬砌处于受压状态；轴力值腰部大、拱部和顶部小；弯矩值脚部最大、腰部最小。

(3) 当溶洞位于隧道的顶部时，随溶洞增大，衬砌拱顶处的轴力值增大，但拱腰和拱脚处的轴力值减小；衬砌各处的弯矩值都减小。

表7 无溶洞时衬砌的轴力值和弯矩值

关键点	衬砌轴力/(kN)	衬砌弯矩/(kN·m)
隧道拱顶	-143.96	-0.592
左拱腰	-313.30	-0.103
右拱腰	-312.58	-0.102
左拱脚	-329.00	2.133
右拱脚	-328.80	2.090

表8 溶洞位于隧道顶部时轴力值(kN)

关键点	溶洞底面半径			
	1m	2m	3m	4m
拱顶	-149.76	-162.92	-175.38	-184.83
左拱腰	-325.45	-313.78	-297.72	-279.39
右拱腰	-325.20	-313.63	-297.44	-279.12
左拱脚	-312.54	-309.62	-304.76	-298.07
右拱脚	-311.82	-308.93	-304.06	-297.39

表9 溶洞位于隧道顶部时弯矩值(kN·m)

关键点	溶洞底面半径			
	1m	2m	3m	4m
拱顶	-0.515	-0.320	-0.122	-0.045
左拱腰	0.101	0.089	0.066	0.034
右拱腰	0.099	0.088	0.064	0.032
左拱脚	2.125	2.102	2.065	2.011
右拱脚	2.083	2.059	2.022	1.970

表10 溶洞在不同位置时衬砌轴力值(kN)

关键点	承压溶洞与隧道的位置			
	拱顶	右拱腰	右拱脚	拱底
拱顶	-162.92	-145.84	-142.25	-149.82
左拱腰	-313.78	-340.76	-340.23	-312.75
右拱腰	-313.63	-349.34	-325.02	-312.69
左拱脚	-309.62	-322.38	-313.09	-287.88
右拱脚	-308.93	-325.33	-355.86	-288.13

表11 溶洞在不同位置时衬砌弯矩值(kN·m)

关键点	承压溶洞与隧道的位置			
	拱顶	右拱腰	右拱脚	拱底
拱顶	-0.320	-0.641	-0.581	-0.541
左拱腰	0.089	0.115	0.125	0.065
右拱腰	0.088	0.084	0.062	0.062
左拱脚	2.102	2.178	2.183	1.711
右拱脚	2.059	2.202	2.718	1.755

3.3 溶洞位置影响分析

由表4、表5、表10、表11所示的模型试验及数值模拟的各测点的隧道衬砌轴力和弯矩可得：

(1) 溶洞位于任何位置，隧道衬砌一直受压，且衬砌轴力都是腰部最大、脚部次之、顶部最小，而衬砌弯矩则都是脚部最大、腰部次之、顶部最小。溶洞在隧道腰部和脚部时，此规律明显于在其他位置，说明溶洞在隧道拱腰和拱脚时最不利。

(2) 溶洞在拱腰处，衬砌轴力大、弯矩小，弯曲变形不明显；而溶洞在拱脚处，衬砌轴力小、弯矩大，弯曲变形明显，即溶洞在拱脚处更危险。

4 结论

本文通过物理模型试验以及数值模拟试验，得到以下结论：

无溶洞时，衬砌拱顶和拱脚承受主要弯矩作用，衬砌整体呈受压状态。随溶洞增大，衬砌拱顶的轴力增大、拱腰和拱脚的轴力减小；衬砌各处的弯矩都减小且衬砌一直受压。溶洞处于隧道拱脚处是最不利位置。

参考文献：

- [1] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [2] 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(05):698-702+716.
- [3] 赵宏国. 顶部溶洞对新修地铁隧道的稳定性分析及施工处理技术研究 [J]. 施工技术, 2012, 41(15):88-91.