

洞侧既有隐伏溶洞对城门洞型 水工隧洞稳定性的影响研究

宋战平^{1,2}, 袁驰宇¹, 王立焘¹, 李 宁³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁十三局集团有限公司, 天津 150008;
3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要:针对隧洞侧边不同位置的中、小尺度溶洞对城门洞型水工隧洞围岩应力、变形、塑性区以及隧洞支护结构受力特征的影响,采用有限元数值模拟方法进行了系统地数值试验。在系统数值试验基础上,根据溶洞对隧洞围岩应力、塑性区和支护结构受力的影响特征,提出了溶洞影响范围划分图,将不同距离和尺寸的溶洞分为强影响溶洞、有影响溶洞和无影响溶洞等三个等级,为施工中对不同溶洞的处理提供了一定的技术支持,对我国岩溶区的隧道和地下工程建设的科学化和定量化必将起到一定的推动作用。

关键词:水工隧洞;既有溶洞;稳定性影响;数值试验

中图分类号:TU31213;TU31811

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)04-0499-09

随着我国经济的快速发展,我国西南部岩溶发育区水电资源开发进入了快速增长期^[1-5]。根据我国的国家规划,未来10~20年,大型水利水电工程和清洁能源工程、交通网络和快速交通工程、资源开发工程等将是我国工程建设的重点。我国水电重点开发西部,特别是西南岩溶地区的金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江和红水河、澜沧江等流域的开发,将会建设更多的大型水利工程,其水工隧洞将不同程度地穿越岩溶地层。岩溶地层中的隧道与地下工程施工中,既有岩溶溶洞对隧(洞)道工程的影响除涌水、突泥之外更常表现为隧洞周围围岩的变形、失稳^[5-7],常常造成隧洞施工灾害。目前,在岩溶区隧洞建设中缺乏溶洞对隧洞影响的系统研究^[8-9]。因此,有必要系统研究既有溶洞对隧洞建设的影响,特别是施工中未揭露出来的隐伏溶洞,探讨其规律性,以便在施工中能有针对性地进行处治,确保隧道工程的施工安全。

城门洞型断面是水工隧洞工程中常见的一种洞型,研究不同位置和形态的空间隐伏溶洞对城门洞型断面水工隧洞施工稳定性的影响对水利工程的建设具有重要的现实意义^[10-11]。为之,采用有限元数值模拟方法,对隧洞侧边不同位置的中、小尺度溶洞对城门洞型水工隧洞围岩应力、变形、塑性区以及隧洞支护结构受力特征的影响进行了系统地数值试验,分析了不同位置、大小的既有溶洞对隧洞围岩应力、塑性区和支护结构受力的影响特征,提出了溶洞影响范围划分图,为施工中对不同溶洞的处理提供了一定的技术支持,对提高我国岩溶区隧道和地下工程建设的科学化和定量化有一定的推动作用。

1 溶洞影响分析的数值试验方案

为研究既有隐伏溶洞对城门洞型水工隧洞围岩-支护结构的影响,探讨隐伏溶洞引起的隧洞结构失稳机理,论文数值分析模型采用无量化尺度,其中,隧洞断面尺寸见图1所示,取 $S_0/D=6/12=0.5$; $B_0/D=12/16=0.75$;根据宋战平等对我国西南山区岩溶资料的统计分析^[1,10-11],受岩溶生成机理及沉积岩地层特点限制,小洞径岩溶溶蚀基本上为圆形或近圆形形状,且其轴线基本上呈水平向发育,因此

收稿日期:2013-02-07 修改稿日期:2013-07-20

基金项目:西部交通科技项目(200831800030);“十二五”科技支撑计划(2012BAJ17B01、2012BAJ17B02)

作者简介:宋战平(1974-),男,陕西蒲城人,副教授,主要从事岩土力学、隧道和地下工程等方面的教学与研究工作。

论文将岩溶溶洞简化圆形断面. 考虑到水工隧洞轴线基本水平的特点, 不同既有似圆形溶洞对隧洞围岩-支护结构影响的分析可简化为双洞影响的平面问题, 采用二维数值模拟来分析.

为便于比较, 论文研究中取隧洞围岩级别为 IV 级. 参考水工隧洞设计规范, 取 IV 级围岩的物理、力学参数如表 1 所示. 隧洞 IV 级围岩条件下的支护参数见表 2 所示. 考虑地应力特点, 为简化计算, 论文分析中初始地应力取自重力场, 即: $\sigma^v = \gamma h$; $\sigma^h = \mu / (1 - \mu) \sigma^v$.

研究不同空间位置溶洞对城门洞型隧洞的影响, 论文参考宋战平等的对溶洞和隧洞相对位置的分类, 为分析方便论文将既有隐伏溶洞分为如下五类, 即: (1)隧洞顶拱 15°范围内的既有顶部隐伏溶洞, (2)隧洞拱腰部位既有隐伏溶洞, (3)隧洞边墙中部附近的既有隐伏水平溶洞, (4)隧洞边墙底部

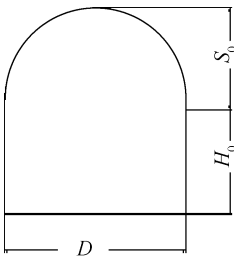


图 1 圆拱直墙隧洞断面示意图

Fig. 1 Section diagram of circular arch and straight wall tunnel

表 1 隧洞围岩的物理、力学参数

Tab. 1 Physics and mechanics parameters of tunnel surrounding rock

围岩类别	容重 kN/m	弹性模量($\times 10^4$)MPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角	抗拉强度/MPa
I	27.00	20.00	0.22	2.00	60.0°	2.00
II	27.00	15.00	0.23	1.80	500.0	1.50
III	26.00	6.00	0.28	1.20	40.0°	1.20
IV	25.00	3.00	0.32	0.80	30.0°	0.80

既有隐伏溶洞(隧洞中线水平面附近 30°以下到与隧洞洞轴线成 15°以上)和(5)隧洞底板以下与隧洞洞轴线成 15°范围内的底部既有隐伏溶洞. 在以上五类既有溶洞中, 对处于隧洞顶部和底部的两类既有隐伏溶洞, 在自重应力为主的应力场中, 一定尺度的溶洞的存在不会造成隧洞应力场的偏移现象; 而对处于隧洞拱腰、水平和隧洞边墙底部的既有隐伏溶洞, 溶洞的存在造成初始地应力场发生应力的偏移现象, 即造成隧洞受力的偏压现象, 为之, 论文将以上三类隧洞统称为侧边既有隐伏溶洞. 考虑到水平溶洞对高边墙隧洞水平位移影响有一定的特殊性, 故而将水平溶洞单独列出来进行研究.

对以上三类溶洞, 研究不同位置溶洞在 λ_R (溶洞洞径/隧洞跨度 D) 和 K_R (溶洞距隧洞间距离/隧洞跨度 D) 变化时隧洞围岩应力、位移和支护结构内力的变化特征. λ_R 和 K_R 的取值见表 3 所示. 限于篇幅, 论文仅就隧洞既有侧边溶洞对隧洞围岩和支护结构的影响进行系统分析, 其他位置既有溶洞的影响另文再述.

2 侧边既有隐伏溶洞对隧洞稳定性的影响分析

2.1 侧部既有隐伏溶洞对隧洞位移的影响

2.1.1 侧部既有隐伏溶洞对隧洞水平位移的影响分析

不同位置的侧边既有隐伏溶洞对隧洞水平位移影响的数值分析结果示于图 2 和表 4. 由图和表可

表 2 隧洞初次支护结构参数表

Tab. 2 Parameters table of tunnel primary supporting structure

围岩类别	初 期 支 护				附注
	喷射混凝土厚度/cm	锚 杆			
		拱部、边墙	位置	长度/m	
I	5.0	局部	2.00	1.50	
II	10.0	拱部	2.00	1.20—1.50	
III	15.0	拱部	2.00—2.50	1.00—1.20	
IV	20.0	拱部	2.50—3.00	1.00—1.20	

表 3 溶洞对城门洞型隧洞影响的数值试验方案

Tab. 3 Numerical experimentation plan of karst caverns impact on the popular shape type tunnel

洞径比(λ_R)	间距比(K_R)					
	0.20	0.50	1.00	2.00	3.00	6.00
2.00						
1.50	0.20	0.50	1.00	2.00	3.00	6.00
1.00	0.20	0.50	1.00	2.00	3.00	
0.50	0.20	0.50	1.00	2.00		
0.20	0.20	0.50				

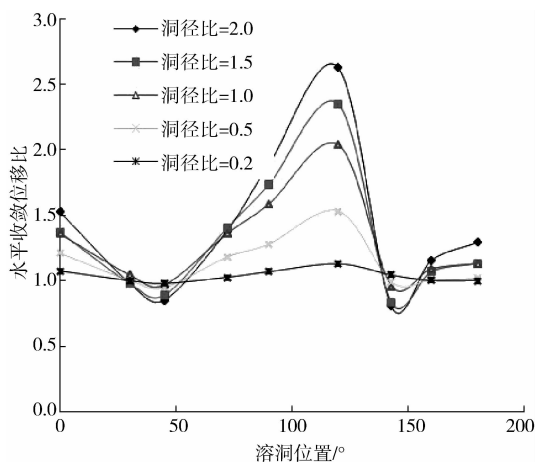


图2 水平位移随溶洞位置的变化特征图

Fig. 2 Change characteristics diagram of horizontal displacement with karst caverns position

见:按溶洞对水平位移的影响特征,可将溶洞划分为5个区域.顶拱 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 为顶部溶洞区(I区);受此范围内溶洞影响时,隧洞水平位移将增加.隧洞拱腰 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 为拱腰区(II区);受该区溶洞影响时,隧洞水平位移将减小,但位移的变化量较小.隧洞拱腰 50° 至边墙下部为水平溶洞区(III区);受该区溶洞的影响,隧洞水平位移将增加,且该范围内溶洞对水平位移的影响最大.隧洞基角附近为IV区;受该区内溶洞的影响,隧洞水平位移将减小.隧洞底边为V区;即底部溶洞区,受该区溶洞影响,隧洞边墙水平位移将增加.

在以上五区溶洞中,以边墙附近溶洞对隧洞水平位移的影响最大,在 $\lambda_R \geq 1.2, K_R \leq 1.0$ 时,隧洞边墙中部水平位移将增加到无溶洞时位移量的1.5倍以上.其次,影响最大的是处于隧洞顶拱和底部的溶洞;在 $\lambda_R \geq 1.2, K_R \leq 1.0$ 时,隧洞边墙中部和起拱线附近水平位移将增加到无溶洞时位移的1.2~1.5倍;而分布于隧洞拱腰和隧洞边墙底部附近的溶洞影响较小,在论文讨论范围内,隧洞水平位移变化量均小于无溶洞时位移的20%.

2.1.2 隧洞拱顶沉降位移的影响分析

隧洞侧边既有隐伏溶洞引起的隧洞拱顶沉降位移数值计算结果如图3和表5所示.由图3和表5所示计算结果可见:当溶洞处于隧洞顶拱 30° 以内时,隧洞顶拱沉降位移的变化特征在 λ_R 大于1.2和 λ_R 小于1.2时截然不同.当 K_R 一定时,在论文讨论范围内,在既有溶洞尺寸大于隧洞最大尺寸时隧洞顶拱位移将减小,其位移最大变化量约为无溶洞时的30%;而在溶洞大小小于隧洞大小时,既有溶洞将导致隧洞沉降位移的增加,在论文讨论范围内,隧洞顶拱位移增加量将小于无溶洞时位移的20%.处于隧洞拱腰及边墙附近的溶洞,隧洞顶拱沉降位移均将增加.在 $\lambda_R \geq 1.2, K_R \leq 1.0$ 时,该部位溶洞将使得隧洞顶拱沉降位移增加20%~60%.在拱腰 30° 以下至边墙下部,溶洞位置的变化引起的顶拱沉降位

表4 侧边溶洞影响时隧洞水平位移变化的数值试验结果(W_d^H)

Tab. 4 Numerical experimentation result of side karst caverns impact on tunnel horizontal displacement change(W_d^H)

隐伏溶洞位置	间径比(k_R) 洞径比(λ_R)	水平位移误差率/%				
		0.20	0.50	1.00	3.00	6.00
隧洞拱腰 30° 附近	2.00	-1.80	-3.20	-5.60	-3.40	0.00
	1.50	-1.90	-2.40	-2.90	-1.60	0.00
	0.50	0.40	0.00	-0.20	0.00	
隧洞拱腰 中部附近	2.00	-14.80	-12.10	-9.60	-3.90	0.00
	1.50	-11.00	-8.10	-5.70	-2.60	0.00
	0.50	-5.00	-3.10	-2.00	-0.80	0.00
隧洞拱腰 下部附近	2.00	38.20	28.90	20.90	1.00	0.00
	1.50	40.10	23.10	12.10	0.50	0.00
	0.50	18.00	10.60	3.80	0.00	
隧洞起拱 线附近	2.00	88.40	57.10	35.00	7.70	4.30
	1.50	73.20	39.80	19.70	3.60	0.20
	0.50	27.80	13.10	4.30		
隧洞边墙 中下部 附近	2.00	-19.70	-17.10	-14.00	-3.50	-0.30
	1.50	-17.00	-12.60	-8.50	-1.60	0.00
	0.50	-0.90	-1.30	-1.70	-0.10	
隧洞边墙 下部附近	2.00	15.40	8.90	2.00	0.60	0.10
	1.50	6.90	3.70	0.90	0.50	0.00
	0.50	0.40	0.30	0.20	0.20	

注: W_d^H 水平位移误差率定义为既有隐伏溶洞引起的隧道最大位移变化量除以无溶洞时隧道的最大位移,并用百分数表示.

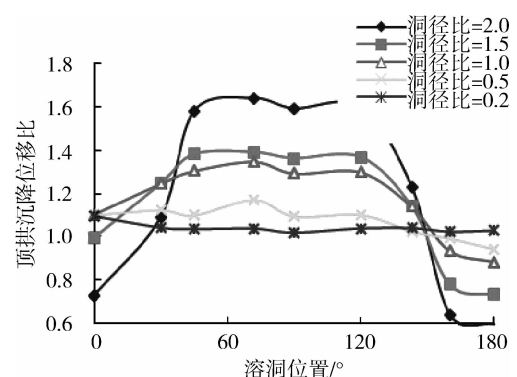


图3 顶拱沉降位移随溶洞位置的变化特征

Fig. 3 Changing characteristics of dome arch subsidence displacement with karst caverns position

移变化将小于无溶洞时位移量的 15%。当溶洞位于隧洞边墙底部附近时,在本论文讨论的范围内,既有隐伏溶洞引起的隧洞沉降位移的变化量约为无溶洞时拱顶沉降位移的 15%;但当溶洞处于隧洞底板以下时,溶洞将导致隧洞顶拱位移的增加。此时,如溶洞处于隧洞底板的中部,在 $\lambda_R \geq 1.2, K_R \leq 0.5$ 时,隧洞顶拱沉降位移将减小 30% 以上。

根据以上的分析可见,在溶洞洞径大于 1.0 时,侧边既有隐伏溶洞对隧洞顶拱的沉降位移影响以隧洞边墙部位最大,其次是位于隧洞底部的溶洞,而隧洞顶部溶洞的影响要小于底部溶洞的影响。

2.2 侧边隐伏溶洞对隧洞围岩应力及塑性区的影响分析

2.2.1 围岩应力的影响分析

由图 4 和表 6 给出的隧洞侧边既有隐伏溶洞对隧洞围岩应力的影响分析结果可见:

(1)既有隐伏溶洞对隧洞围岩应力的影响随溶洞位置的变化而变化,其中顶部溶洞将引起隧道中的拉应力增加,随着溶洞位置逐渐向隧洞底部偏移,围岩中的拉应力随之减小;当溶洞位于隧洞边墙中部时,既有溶洞引起的隧洞起拱线以上围岩的拉应力变化将降低到无溶洞时的 10% 以下;之后,随着溶洞位置的逐渐下移,隧洞围岩中的拉应力将逐渐增加,但其增加量远小于顶部溶洞时的增加量。

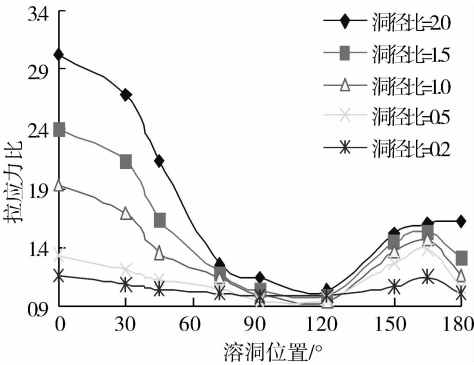


图 4 围岩拉应力的变化特征图
(以隧洞拱顶中点为 0°,起拱线位置为 90°,底板中点为 180°,依次类推)。

Fig. 4 Changing characteristics diagram of tunnel surrounding rock tension stress (tunnel dome arch midpoint 0°,spring ling position 90°,bottom midpoint 180°, with the rest inferred).

近的既有溶洞的影响最小,其基本可忽略不计;在论文讨论的溶洞大小范围内,位于隧洞顶部的既有溶洞将使得顶部围岩拉应力增加达 50% 以上;而同条件的底部溶洞可使隧洞顶拱拉应力增加约 20%。

表 5 侧边溶洞对隧洞顶拱位移影响的数值试验结果(位移误差率)

Tab.5 Numerical experimentation result of side karst caverns impact on tunnel dome arch displacement(displacement error rate)		顶拱沉降位移误差率/%				
隐伏溶洞位置	洞径比(k_R) 洞径比(λ_R)	0.20	0.50	1.00	3.00	6.00
隧洞拱腰 30°附近	2.00	9.10	3.70	-2.40	0.00	0.00
	1.50	24.80	13.90	2.50	0.70	0.00
	0.50	12.30	9.10	2.60	0.30	0.00
隧洞拱腰中部附近	2.00	58.20	40.70	23.40	5.00	0.00
	1.50	38.20	26.10	15.00	3.70	0.00
	0.50	10.00	7.40	4.60	1.50	0.00
拱腰上部附近	2.00	64.10	44.70	26.00	7.60	0.50
	1.50	39.10	29.80	14.20	4.30	0.10
	0.50	17.30	13.30	8.50	0.30	
隧洞起拱线附近	2.00	59.30	40.70	22.80	10.30	
	1.50	36.30	24.90	11.70	2.10	
	0.50	9.50	5.00	2.00	0.10	
隧洞边墙中下部	2.00	22.90	18.50	14.60	7.20	
	1.50	14.00	10.90	7.50	4.00	
	0.50	2.50	2.60	2.80	2.50	
隧洞边墙底部	2.00	-35.90	-32.10	-26.40	-9.70	
	1.50	-22.00	-19.60	-15.50	-4.90	
	0.50	-0.70	-1.30	-2.80	-0.80	

注:位移误差率定义为既有隐伏溶洞溶洞时隧洞最大位移之差除以无溶洞时的最大位移,以百分数表示。

表 6 既有隐伏溶洞引起的隧洞围岩拉应力变化的数值计算结果(应力比)

Tab.6 Numerical calculating result of existing concealed karst caverns impact on tunnel surrounding rocktensionstress change(stress ratio)		洞径比(λ_R) 溶洞位置				
		2.00	1.50	1.20	0.50	0.20
隧洞拱腰 30°附近		2.68	2.12	1.67	1.21	1.07
隧洞拱腰中部附近		2.12	1.63	1.36	1.11	1.04
隧洞拱腰下部附近		1.24	1.17	1.13	1.04	1.02
隧洞起拱线附近		1.51	1.45	1.35	1.26	1.08
隧洞边墙下部附近		1.61	1.54	1.47	1.37	1.15

注:表中数据为有溶洞时隧洞围岩中最大拉应力/无溶洞时的拉应力。

(2)对隧洞围岩拉应力而言,位于隧洞起拱线以上和隧洞边墙底部以下的溶洞对隧洞围岩的应力影响最大,而处于隧洞边墙中部附近的既有溶洞的影响最小,其基本可忽略不计;

分析侧边溶洞对隧洞围岩压应力的影响,由图5给出的应力分布随溶洞位置变化的特征图可见,不论溶洞位置如何,在溶洞与隧洞间岩层中将出现大的应力集中现象.此时,在 λ_R 接近2.0时,如 K_R 小于1.0,岩柱中的应力将增加到无溶洞时应力的1.5倍以上;但当 ν_R 接近2.5时,既有隐伏溶洞对隧洞与既有溶洞间岩柱应力的影响将减少到无溶洞时的10%以下.

由表7给出的不同位置溶洞对隧洞边墙中部切向应力影响的数值分析结果和图5可见:当溶洞位于拱腰30°以上时,顶部既有隐伏溶洞的屏蔽效应将引起隧洞边墙中部环向应力的减小.在拱腰30°以下,随着溶洞逐渐向边墙中部的移近,既有隐伏溶洞的屏蔽效应将逐渐减小,在既有隐伏溶洞接近隧洞起拱线时,隧洞边墙部位的环向应力将恢复到原来的应力水平.此后,随着既有隐伏溶洞的逐渐下移,隧洞边墙中部环向应力将逐步增加,在既有隐伏溶洞与隧洞中线共面时,隧洞环向应力达到最大;此时,如 $\lambda_R \geq 1.2$, $K_R \leq 1.0$,边墙中部切向应力将增加到无溶洞时应力1.5倍以上.当溶洞处于隧洞边墙下部时,随着溶洞向隧洞底部的逐渐移动,隧洞边墙中部的环向应力将逐渐减小,在既有隐伏溶洞位于隧洞边墙底部时,在论文讨论溶洞尺度范围内,隧洞边墙中部环向应力减小量将小于无溶洞时应力的20%;而在溶洞接近隧洞底板中部时,边墙中部切向应力将减小40%以下.

2.2.2 围岩塑性区的影响分析

位于隧洞边墙底部和隧洞拱腰72°附近既有隐伏溶洞引起的隧洞围岩塑性区的变化见表8和表9所示,由表可见:当溶洞位于隧洞拱腰70°以上时,随着溶洞的逐渐下移,隧洞远离溶洞侧拱腰至边墙塑性区深度将随之增加.在 λ_R 接近2.0时,如 K_R 小于0.5,隧洞远离溶洞侧拱腰塑性区深度将增加到无溶洞时塑性区的2.0倍以上.

数值分析结果分析同样表明,受既有侧边溶洞影响时,隧洞近溶洞侧因既有隐伏溶洞的屏蔽作用,远离溶洞一侧边墙中部塑性区深度基本无变化;但既有溶洞与隧洞间岩柱中的塑性区深度将大大增加.随着既有溶洞位置的逐渐下移,隧洞远离溶洞一侧边墙的塑性区深度将逐渐减小.而当既有溶洞位于隧洞底部时,如溶洞尺度大于隧洞最大尺度,在隧洞边墙的中上部将出现大范围塑性区,且随着溶洞距隧洞距离的增加,此塑性区沿竖向45°方向向溶洞一侧发展;在 K_R 小于隧洞跨度之半时,既有溶洞与隧洞间的岩柱将出现贯穿性的塑性区.

2.3 侧边隐伏溶洞对城门洞型隧洞支护结构内力的影响

2.3.1 锚杆轴力的影响分析

由图6给出的隧洞侧边既有溶洞对锚杆轴力的影响分析结果可见:(1)随着隧洞周边既有溶洞的逐渐下移,隧洞顶拱锚杆轴力将随之增加;当既有隐伏溶洞位于隧洞拱腰50°范围内时,如 $\lambda_R \geq 1.2$, $K_R \leq 1.0$,靠近溶洞一侧隧洞锚杆轴力将增加约3.0倍以上,且随着 λ_R 的逐渐减小,既有隐伏溶洞的影响也将随之减小.在 λ_R 小于0.5或 ν_R 大于2.0时,溶洞对隧洞顶拱锚杆轴力的影响基本上就可忽略不计.在既有溶洞接近隧洞中部附近时,其对锚杆轴力的影响将逐渐减小,此时如 $\lambda_R \geq 1.2$, $K_R \leq 1.0$,既有溶洞引起的隧洞近溶洞侧锚杆轴力的增加约在20%~60%之间.在既有隐伏溶洞接近隧洞边墙底部时,溶

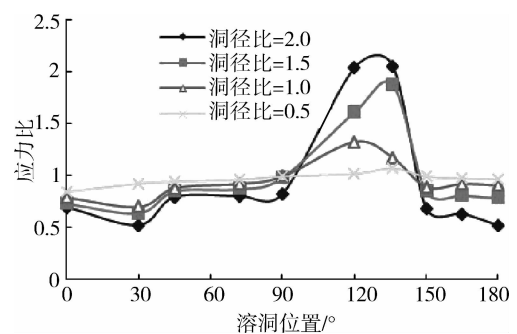


图5 边墙中部切向应力的变化特征

Fig. 5 Changing characteristics of side wall midpoint tangent stress

表7 隧洞边墙中部切向应力变化的数值分析结果(应力比)

Tab. 7 Numerical analysis result of tunnel side wall midpoint tangent stress change(stress ratio)

洞径比(λ_R) 溶洞位置	近溶洞一侧				远离溶洞一侧			
	2.00	1.50	1.20	0.50	2.00	1.50	1.20	0.50
拱腰30°	0.52	0.64	0.70	0.92	30.00	0.81	0.93	0.95
拱腰中部	0.79	0.85	0.88	0.94	45.00	0.88	0.95	0.97
拱腰下部	0.80	0.87	0.92	0.96	72.00	1.09	1.03	1.02
起拱线位置	2.03	1.61	1.32	1.02	90.00	1.24	1.13	1.04
边墙中下部	2.05	1.87	1.17	1.07	136	1.42	1.21	1.07
基角附近	0.63	0.81	0.92	0.97	165	0.71	0.83	0.95

注:表中数据为有溶洞隧洞边墙中部最大压应力/无溶洞时的压应力.

洞引起的隧洞顶拱锚杆轴力的变化将小于 20%;而当溶洞处于隧洞边墙底部以下时,溶洞引起隧洞顶部锚杆轴力的变化量将降低到 20%以下,因此,可不考虑该部位溶洞对隧洞顶拱锚杆的影响。

表 8 隧洞基角处溶洞对隧洞塑性区影响的数值分析结果(误差率)

Tab. 8 Numerical analysis result of tunnel corner karst caverns impact on plastic zone(error rate)

洞径比 λ_R 间径比 K_R		隧洞边墙底部附近溶洞影响时隧洞塑性区深度误差率						备注
		底部		边墙		顶部		
		近溶洞侧	远溶洞侧	近溶洞侧	远溶洞侧	近溶洞侧	远溶洞侧	
2.00	0.20	贯通	61.50	3.20	12.80	23.10	92.20	以隧洞顶拱和边墙底部影响最大
	0.50	贯通	46.70	-1.20	10.90	13.70	71.30	
	1.00	贯通	34.50	-6.70	9.10	5.40	58.10	
	3.00	75.50	15.80	-12.90	6.50	1.20	14.10	
1.50	0.20	贯通	23.70	-13.10	10.80	4.90	22.40	以隧洞顶拱和边墙底部影响最大
	0.50	贯通	22.30	-9.70	7.40	2.10	14.60	
	1.00	贯通	17.80	-5.30	5.30	1.20	3.90	
	3.00	9.60	-9.20	-2.10	3.60	0.20	0.40	
0.50	0.20	贯通	5.40	0.20	4.30	1.10	3.00	以近溶洞侧边墙底部溶洞影响最大
	0.50	贯通	-6.70	-3.40	1.40	0.30	0.10	
	1.00	14.00	-0.50	-4.50	0.40			
0.20	0.20	贯通	0.20	0.6	0.70		0.40	以近溶洞侧边墙底部影响最大
	0.50	11.30	-3.40	-2.10	0.00		0.00	
	1.00	0.40		-1.30				

注:塑性区深度误差率为有、无溶洞时隧洞塑性区深度之差除以无溶洞时塑性区深度,以百分数表示。

表 9 隧洞顶拱 72°附近既有溶洞对隧洞塑性区的影响分析结果(误差率)

Tab. 9 Analysis result of existing karst caverns impact on plastic zone in tunnel dome 72°nearby (error rate)

洞径比 λ_R 间径比 K_R		塑性区范围						备注
		底部		边墙		顶部		
		近溶洞侧	远溶洞侧	近溶洞侧	远溶洞侧	近溶洞侧	远溶洞侧	
2.00	0.20	16.90	43.70	贯通	29.40	42.70	4.90	以隧洞顶拱和边墙底部影响最大
	0.50	11.80	27.50	贯通	18.70	24.80	2.60	
	1.00	7.50	17.30	贯通	13.50	6.10	0.40	
	3.00	4.30	8.70	26.30	6.60	1.50	0.00	
	6.00	1.20	4.50	5.40	1.90	0.00	0.00	
1.50	0.20	16.20	42.90	贯通	18.40	13.90	3.40	以隧洞顶拱和边墙底部影响最大.
	0.50	11.10	25.60	贯通	12.30	7.70	2.20	
	1.00	6.70	15.90	贯通	4.70	1.10	0.30	
	3.00	3.50	7.80	14.20	1.90	0.00	0.00	
0.50	0.20	13.90	11.30	78.10	7.80	0.00	0.00	以近溶洞侧边墙底部影响最大.
	0.5	13.10	8.90	41.90	4.90	0.00	0.00	
	1.00	11.70	3.50	11.70	3.50	0.0	0.00	
0.20	0.20	0.00	1.10	29.80	1.10	0.00	0.00	以近溶洞侧边墙底部影响最大.
	0.50	0.00	2.10	2.90	0.00	0.00	0.00	

注:塑性区深度误差率定义为既有溶洞引起的隧洞围岩塑性区深度变化量除以无溶洞时隧洞围岩塑性区的深度,以百分数表示。

2.3.2 喷层内力的影响分析

由图 7 给出的隧洞侧边既有溶洞导致的隧洞喷层轴力沿洞周的变化特征曲线可见:(1)当溶洞位于隧洞边墙中部以上或隧洞底板中部时,隧洞起拱线以上喷层内力增加;且以隧洞顶部溶洞的影响程度最大.在 $\lambda_R \geq 1.2$, $K_R \leq 1.0$ 时,顶拱溶洞将使得喷层轴力增加到无溶洞时的 1.2~2.0 倍.随着溶洞向边墙中部的移近,隧洞顶拱喷层轴力将随之减小,在边墙中部时,喷层轴力基本接近于无溶洞时的轴力.(2)在边墙中部以下,随着溶洞逐渐向基角附近移动,隧洞围岩将出现偏压现象,并导致近溶洞一侧隧洞顶部喷层轴力的减小,而远离溶洞一侧喷层的轴力增加现象.在既有溶洞接近隧洞边墙底部时,隧洞近

溶洞一侧拱顶喷层轴力出现最小值;此时,如 $\lambda_R \geq 1.5$, $K_R \leq 0.5$ 时,该部位喷层轴力基本接近于0.

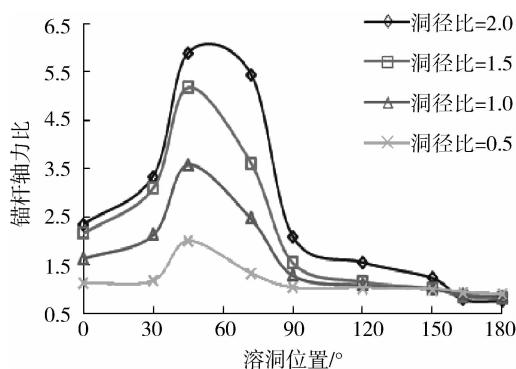


图6 锚杆轴力随溶洞位置的变化特征

Fig. 6 Changing characteristics of rockbolt axial force with karst caverns position

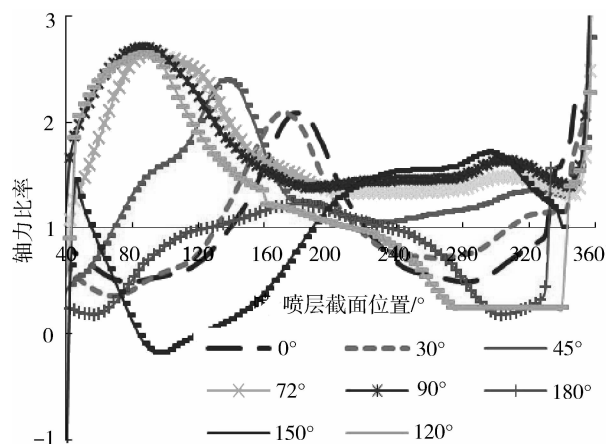


图7 喷层轴力随溶洞位置变化特征

Fig. 7 Changing characteristics of spray layer axial force with karst caverns position

由以上分析可见,位于隧洞顶拱附近的既有隐伏溶洞将导致隧洞拱顶喷层的轴力增加和隧洞边墙处附近喷层轴力的减小.在论文讨论的溶洞尺度范围内,隧洞顶拱喷层轴力将增大约2.0倍,隧洞边墙中部附近喷层的轴力将减小约50%.而位于隧洞拱腰30°以下至边墙中部附近的侧边既有溶洞将导致隧洞顶拱和靠近溶洞一侧边墙中部附近喷层轴力的进一步增加,在论文讨论的溶洞尺度范围内,边墙中部轴力最大将增加到无溶洞时轴力的3.0倍.位于隧洞边墙中部以下的溶洞将导致隧洞近溶洞一侧喷层轴力的减小和远离溶洞一侧喷层轴力的增加;在论文讨论的溶洞尺度范围内,隧洞远离溶洞侧拱腰喷层轴力最大将增加到无溶洞时轴力的2.5倍.而隧洞底部附近的既有隐伏溶洞对隧洞喷层轴力的影响较小,因此,一般情况下该部位溶洞引起的隧洞喷层轴力的变化可不考虑.

3 隐伏溶洞对隧洞稳定性影响的范围探讨

根据论文数值试验结果和有关隧洞力学的基本规律,并参考已有文献的研究成果^[10-14],根据隧洞不同位置既有隐伏溶洞导致的隧洞围岩应力、变形和塑性区的变化以及隧洞支护结构内力的变化,对既有隐伏溶洞对隧洞的影响范围进行划分,将处于不同位置的溶洞区分为强影响溶洞、有影响溶洞和无影响溶洞.考虑不同位置溶洞引起的隧洞围岩塑性区的变化,以IV类围岩为基准,将溶洞与隧洞间岩层出现贯穿性塑性区时溶洞距隧洞间的距离定义为强影响距.考虑岩体的强度特性,以最大拉应力变化量为分区指标,将引起拉应力变化量超过无溶洞时隧洞最大拉应力10%的溶洞定义为有影响溶洞.反之称之为无影响溶洞.

当溶洞洞径小于 $1/5D$ 时,溶洞对隧洞围岩应力等的影响将小于无溶洞时的10%,因此,对此范围内的溶洞可不考虑其对隧洞的影响.当溶洞洞径大于 $1/5D$ 时,不同位置溶洞的影响距如图8所示.当溶洞处于强影响带内时,在隧洞施工过程中,为保证隧洞安全,必须采取一些特殊开挖方式和支护措施;当溶洞处于影响带内时,施工中须考虑溶洞对隧洞围岩应力、位移和支护结构内力的影响,并采取相应的支护措施或施工对策;对处于影响带以外的溶洞,一般可不考虑其对隧洞的影响.

以上给出的不同位置溶洞对隧洞影响范围的划分是以IV类围岩为基础提出的.当围岩类别提高时,须对以上给出的影响范围进行修正.当围岩类别为III类时,溶洞影响范围

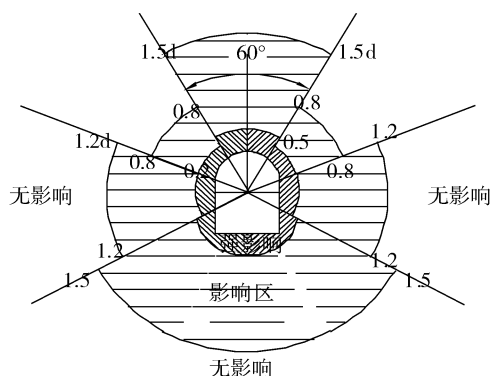


图8 隐伏溶洞影响范围划分图

(d为溶洞洞径;D为隧道跨度)

Fig. 8 Influence sphere zone of concealed karst caverns
(d; karst caverns diameter; D; tunnel span)

将减小20%;当围岩类别为II类时,溶洞影响范围将减小30%。

溶洞对圆形隧洞的影响划分,根据已有研究成果分析^[10-14],溶洞对圆形隧洞围岩应力和塑性区的影响较城门洞型隧洞小10%~20%。因此,为安全计,可以图8为依据,将以上影响距减小10%即可得到溶洞对圆形隧洞影响划分图。

4 结 论

针对既有隐伏溶洞引起的隧洞围岩-支护结构的稳定性的变化,论文采用数值模拟方法对隧洞周边既有隐伏溶洞对隧洞变形、受力特征的影响进行了系统数值试验,通过系统的数值试验,并结合已有研究成果提出了溶洞影响范围划分图。通过论文数值试验,对既有隐伏溶洞对城门洞型水工隧洞的稳定性的影响可得以下的结论:

(1)位于隧洞边墙中部附近的溶洞将使得隧洞竖向位移增加。在 d 小于 $0.5D$ 或 L 大于 $1.2D$ 时,竖向位移的增加量将小于10%。在 d 大于 $1.2D$ 时,如 L 小于 $1.0D$,竖向位移增加量将大于20%;如 L 小于 $0.5D$,竖向位移将增加到无溶洞时位移的50%以上。在 d 大于 $1.2D$ 时,如 L 小于 $0.5D$,隧洞近溶洞侧边墙水平位移将增加50%以上;在 L 小于 $0.2D$ 时,水平位移将增加到无溶洞时位移的2.0倍以上。

(2)隐伏溶洞对城门洞型隧洞围岩应力的影响以IV类围岩为例,在自重应力场中,处于隧洞边墙底部附近的溶洞,在 L 小于 $1.0D$,溶洞洞径大于 $1.0D$ 时,受既有隐伏溶洞的影响,隧洞发生了明显的偏压现象,在隧洞近溶洞侧的拱腰到边墙中部围岩将出现大范围的拉应力区,且围岩拉应力区分布深度增加约1.0~2.0倍,近溶洞侧边墙中部也将出现深度达 $0.1D\sim 0.2D$ 的拉应力区。处于隧洞底部的溶洞,在洞间距小于 $0.5D$ 、溶洞洞径大于 $1.2D$ 时,隧洞顶拱和边墙中部拉应力增加量可达无溶洞时顶部拉应力的40%以上。

(3)处于隧洞边墙中部附近的溶洞,在 L 小于 $1.0D$ 时,如溶洞洞径大于 $1.2D$,近溶洞侧锚杆轴力增加量将大于50%。处于隧洞边墙中部附近的并列溶洞,在洞间距小于 $1.0D$,洞径大于 $1.2D$ 时,近溶洞侧喷层轴力将增加到无溶洞时轴力的2.0倍以上,远离溶洞侧起拱线附近喷层轴力将增加到无溶洞时的1.5~2.0倍。但当既有隐伏溶洞处于隧洞边墙底部附近时,隧洞远离溶洞一侧拱腰附近喷层轴力将增加到无溶洞时轴力的1.5以上,近溶洞侧边墙喷层轴力将减小20%以上。

(4)以拉应力的10%为划分标准(拉应力变化量小于10%为无影响区),将不同位置、大小的隐伏溶洞区分为对隧洞稳定性无影响溶洞和对隧洞稳定性有影响溶洞,有、无影响分界处与隧洞间的距离为影响距(L')。对圆拱直墙型隧洞而言,当围岩为IV类时,顶部溶洞 L' 为 $1.5d$ (溶洞洞径);拱肩溶洞 L' 为 $0.8d$;边墙中部溶洞 L' 为 $1.2d$;边墙底部溶洞 L' 为 $1.5d$;隧洞底部溶洞 L' 为 $1.2d$ 。相同条件时隐伏溶洞对城门洞型隧洞围岩应力和支护结构内力的影响较其对圆形隧洞的影响大10%~20%。

参考文献 References

- [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.
ZHOU Cheng-jie. Water conservancy and hydroelectric power karst caverns construction geology[M]. Beijing:China Water Power Press,1994.
- [2] 汪从锦. 鲁布革电站引水隧洞的岩溶发育特征及其工程意义[J]. 中国岩溶,1991,12(4):715-719.
WANG Cong-jin. Karst development and constructional significance of the Lubuge Power Tunnel[J]. Carsologica Sinica, 1991,12(4):715-719.
- [3] 徐则民, 黄润秋. 深埋特长隧道及其施工地质灾害[M]. 成都:西南交通大学出版社,2000.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu. The deep and special long tunnel and construction geology disaster[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2000.
- [4] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993.
YUAN Dao-xian. China karst caverns[M]. Beijing:Geology Press,1993.
- [5] 余波. 深埋隧洞中的岩溶地基工程地质问题及地基处理[J]. 岩石力学与工程学报,2001(3):403-407.
YU Bo. Karst caverns foundation construction geology problem and foundation treatment in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001(3):403-407.

- [6] 刘招伟,张民庆.隧道深埋充填型溶洞注浆施工技术探讨[J].隧道建设,2003,23(5):48-51.
LIU Zhao-wei,ZHANG Min-qing. Slip casting construction technology study in deep and filling karst caverns tunnel [J]. Tunnel Construction, 2003, 23(5): 48-51.
- [7] 铁道部第二勘察设计院.岩溶工程地质[M].北京:中国铁道出版社,1984.
The Second Exploring and Design Institute of Railway. Karst caverns construction geology[M]. Beijing:China Railway Publishing House, 1984.
- [8] 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.
WU Meng-jun,XU Xi-bin,ZHAO Ming-jie,et al. Construction mechanics response research of highway tunnel in karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(9):1525-1529.
- [9] 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.
ZHAO Ming-jie,LIU Xu-hua,AO Jian-hua,et al. Numerical analysis about tunnel dome karst caverns impact on the stability of surrounding rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(3):445-449.
- [10] 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[D].西安:西安理工大学,2006.
SONG Zhan-ping. Research on the influence of concealed karst caverns upon the stability of tunnel and its support structure[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2006.
- [11] 宋战平,李 宁,綦彦波.顶部既有隐伏溶洞对圆形隧道稳定性影响的数值试验研究[J].岩土力学,2007(S1):304-307.
SONG Zhan-ping,LI Ning,QI Yan-bo. Numerical experiment research about the dome existing concealed karst caverns impact on stability of circular tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(S1): 304-307.
- [12] SONG Zhan-ping,JIANG Annan. Numerical simulation for large section tunnel based on stress mapping return arithmetic and loading releasing method [C]//2011 Applied Mechanics and Materials(Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering), 2011(71-78):3577-3580.
- [13] 傅鹤林,韩汝才.隧道衬砌荷载计算理论及岩溶处治技术[M].长沙:中南大学出版社,2005.
FU He-lin,HAN Ru-cai. Tunnel lining load calculating theory and karst caverns treatment technology[M]. Changsha:Central South University Press,2005.
- [14] 宋战平,党宏斌,李 宁.既有溶洞对隧道围岩位移特征影响的数值试验[J].长江科学院院报,2008,25(5):79-83.
SONG Zhan-ping,DANG Hong-bin,LI Ning. Numerical experimentation of influence of karst caverns on displacement characteristics of rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008,25(5):79-83.

Research on the influence of side existing concealed karst caverns upon the stability of the popular shape type water construction tunnel

SONG Zhan-ping^{1,2},YUAN Chi-yu¹,WANG Li-tao¹,LI Ning³

(1. School of Civil Engineering,Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,Xi'an 710055,China;

2. China Railway 13th Bureau Group Co. LTD,Tianjin 150008,China;

3. Geotechnical Engineering Center,Xi'an University of Technology,Xi'an 710048,China)

Abstract: The karst caverns tunnel problems with tunnel side different position in middle and small size are studied by finite elements numerically with the influence of tunnel surrounding rock stress, displacement, plastic zone and characteristics of support structure force for tunnel with the popular shape type water construction tunnel. Based on the numerical experimentation, karst caverns influence sphere zone is divided into three level in different distance and size from the characteristics of karst caverns impact on tunnel surrounding rock stress, plastic zone and support structure force, including strong influence, influence and non-influence karst caverns, and it gives some technology support to different karst caverns treatment in construction and promotes scientifically and quantificationally the tunnel and underground construction in China karst cavern zones.

Key words: the popular shape type tunnel; existing karst caverns; influence of stability; numerical experiment

Biography: SONG Zhan-ping, Associate Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82202947, E-mail: zhan-pingsong@yahoo. com. cn