

溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析

宋战平^{1, 2}, 杨腾添¹, 张丹锋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 300300;

3. 西安理工大学水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 依托武都水库的导流隧洞工程建设, 就既有岩溶溶洞对隧道(洞)稳定性的影响进行了跟踪现场施工的动态监测及数值模拟分析, 就不同位置及尺寸的既有溶洞对隧道(洞)围岩受力、变形以及支护结构的受力特性的变化进行了深入研究。既有溶洞影响的数值模拟和现场监测分析表明: 受顶部既有岩溶溶洞的影响, 隧道(洞)围岩的变形特性明显不同于无溶洞时的变形特性, 其围岩超前掌子面的先期变形量增加, 即围岩位移具有明显的超前释放性。就变形量而言, 当既有溶洞的尺寸大于隧洞最大跨度时, 既有顶部溶洞将引起隧道(洞)顶拱沉降位移的减小, 而当既有溶洞尺寸大于隧道(洞)的最大尺寸时, 隧道(洞)顶拱位移反而增加。同时, 既有顶部溶洞将引起隧道(洞)水平收敛位移的增加, 且位移的增加量随着既有溶洞尺寸的增加而随之增加。隧道(洞)边墙附近的既有侧边溶洞的出现将引起隧道(洞)水平收敛位移的增加, 且位移的增加量随着既有溶洞尺寸的增加而增加。就支护结构受力特性而言, 隧道(洞)边墙附近的既有溶洞的存在造成隧道(洞)近溶洞一侧喷层轴力的减小, 而远离溶洞一侧喷层轴力的增加。

关键词: 隧道工程; 溶洞; 稳定性; 现场测试; 数值分析

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0484-08

我国岩溶发育区的工程建设量大面广^[1-5]。在岩溶发育区的隧道(洞)工程建设中, 岩溶溶洞对工程建设的影响除常规的涌水、突泥灾害之外, 其主要表现为隧道(洞)周边围岩的变形和失稳以及在隧道(洞)掌子面施工过程中的局部的掉块、落石和坍塌等^[5-9]。目前对既有岩溶溶洞对隧道和地下工程建设的影响更多地关注于施工中突泥、涌水的探测和防止; 对既有岩溶溶洞对隧道(洞)围岩受力、变形以及围岩稳定性的影响, 特别是既有溶洞导致的隧道初始应力场发生变化而引起的支护结构受力性态的变化研究还鲜见报道^[9-12]。因此, 依托岩溶区在建的隧道(洞)工程的建设, 对既有岩溶溶洞对隧道(洞)变形、受力特性及隧道结构施工稳定性进行深入、系统地研究, 对岩溶隧道施工措施的可行性及有效性进行现场试验, 探讨既有溶洞影响的规律性及有针对性的处置措施的可行性和实施效果, 以确保岩溶隧道与地下工程施工的安全性, 提高岩溶区隧道与地下工程建设的预见性和效率, 减少溶岩地质灾害^[13-14]。

武都水库导流洞工程地处西南岩溶发育区, 隧洞在施工中揭示多处岩溶溶洞, 岩溶突泥、突水灾害频发。为确保该工程施工期的安全, 评价既有溶洞对隧洞运营的影响, 跟踪该隧洞的施工, 对隧洞周边既有溶洞对隧洞施工的影响及隧洞支护结构的受力特性进行了系统的监测; 以该工程为背景对既有溶洞对隧洞稳定性的影响进行了系统的数值模拟分析。在此基础上就数值模拟分析结果和现场监测结果进行了对比分析, 验证了数值模拟分析结果的可信性及数值模拟分析的可行性。论文的研究为我国岩溶区隧道和地下工程的建设提供了必要的基础数据, 研究成果将进一步推进我国岩溶隧道和地下工程设计、施工和营运维护的科学化和定量化。

1 既有溶洞对隧洞施工影响的现场监测

1.1 武都水库导流洞工程概况

武引二期工程的武都水库导流隧洞工程位于四川省的江油市武都镇。武都水库导流隧洞全长 374.23 m, 隧洞断面设计为城门洞型, 隧洞的最大开挖断面尺寸为宽 13.50 m, 高为 17.50 m。武都水库导流洞穿越的主要地层为泥盆系的碳酸盐岩、泥灰岩、灰岩和白云岩, 在以往长期的地质作用和典型南方岩溶溶蚀化作用下, 隧洞隧址泥盆系的碳酸盐岩地层中, 岩溶溶蚀发育, 岩溶溶槽、岩溶溶沟及岩溶漏斗、溶洞及落水洞遍布, 其中岩溶溶洞是主要的岩溶类型^[13]。

收稿日期: 2013-12-26

修改稿日期: 2014-07-28

基金项目: 西部交通项目(200831800030)

作者简介: 宋战平(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、隧道与地下工程方面的研究。E-mail: songzhp@xauat.edu.cn

武都水库导流隧洞的进口段岩体主要为薄至中等厚层结构的泥盆系的碳酸盐岩,隧洞的岩层产状为偏山内侧而倾向于河流的下游,为弱风化的岩体,该段隧洞溶岩为中等发育的地段;导流隧洞该段隧道埋深 17.0 m~31.0 m,隧洞围岩的完整性变化大,岩体的完整性系数 0.5~0.7,为 IV 级围岩段.武都导流隧洞洞身穿越武都向斜核部的南东翼,该段隧洞的埋深 48.0 m~73.0 m,为深埋隧洞;导流隧洞穿越的地层的岩层基本上为陡倾,倾向河流的上游.武都水库导流隧洞洞身穿越的地层岩性成份复杂,其岩性主要为灰岩夹泥灰岩,局部地段为灰岩、白云岩;隧洞洞身段深埋,为微风化带岩体,除局部因岩溶围岩级别降低为 IV 级外,其余围岩设计级别 III 级.

1.2 现场原位试验方案与思路

鉴于隧洞围岩中岩溶溶洞分布的复杂多变性^[10、16、17]、隧洞地质条件的复杂性及监测数据的离散性,根据确定的现场监测的目的并结合隧洞施工中的安全监测的要求,确定的监测方案及监测布置情况如下:

(1)为确定既有溶洞对隧洞施工空间效应全过程的影响,采用洞外提前预埋多点位移计的方法监测有无溶洞时隧洞变形全过程曲线的变化特征.既有溶洞对隧洞施工空间效应全过程的影响观测共布设监测仪器三套.第一套监测仪器设置桩号 K+15,该桩号处导流隧洞的顶拱偏左的位置拱腰部位发育一尺寸等同于导流隧道跨度的近水平发育的圆形溶洞,施工揭示的该洞段岩溶溶洞见图 1(a)所示;第二套仪器设置于桩号 K+315 处,该处导流隧洞靠近河流的一侧的边墙处存在一直径约 10.0 m 的似圆形的岩溶溶洞,导流洞施工中揭示出来的 K+315 桩号处的岩溶溶洞见图 1(b)所示;第三观测断面选取在隧洞桩号 K+126 处,该处隧洞围岩完整,隧洞周边 2.0 倍范围内的地质探测表明,该处无可见的岩溶溶蚀现象.在仪器的埋设中,考虑到导流隧洞开挖中已出现的超欠挖等的影响,监测仪器第一个测点位置放置于距导流隧洞顶拱 0.7 m 处.

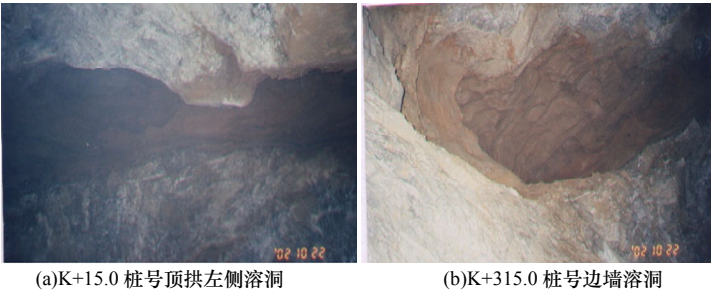


图 1. 武都水库导流洞典型开挖揭露溶洞照片

Fig.1 The typical excavation to expose the cave at the diversion tunnel of Wudu reservoir

(2)为了分析不同位置、尺寸的既有溶洞对隧洞围岩位移的影响,结合武都水库导流隧洞施工中进行的洞内的安全监测,在导流隧洞不同洞段布设了变形监测断面 130 余组,收集有效监测数据断面 107 组.

(3)既有岩溶溶洞对导流隧洞支护结构的受力变化的影响监测主要进行了喷射混凝土轴力和锚杆轴力的监测.区别有无溶洞情况下导流隧洞喷层轴力、锚杆轴力的变化特性进行对比分析和研究.

武都水库导流洞现场监测的项目、监测所用仪器、仪器布设部位及监测的目的见表 1 所示.

表 1 武都水库导流隧洞现场的监测项目、监测仪器布置

Tab. 1 The laid situations of the testing purposes and observational instruments at typical cross-section

监测项目		仪器	仪器埋设部位	试验目的
位移监测	收敛位移	收敛仪	隧洞边墙中部及顶拱中部	既有溶洞对隧洞位移的影响规律
	岩体内部位移	多点位移计	测点 1 距离隧洞顶拱开挖轮廓线外 0.7 m	既有溶洞引起的隧洞空间效应特性
应力监测	锚杆的轴力	锚杆测力计	隧洞的拱腰中部	既有溶洞对隧洞锚杆轴力的影响
			隧洞的拱腰中部	
	喷层的内力	喷层应变计	隧道的拱顶及拱腰中、底部 隧洞左拱腰和右拱腰底部	既有溶洞对喷层轴力的影响

1.3 位移空间效应的监测及分析

理论分析和工程监测分析均表明,在无溶洞影响时,隧道(洞)位移随掌子面推进曲线成倒“s”型曲线;在掌子面推进至监测点时,观测断面理论上的累积变形量占总累积变形的 33.0 %^[15、17].图 2 给出了导流隧洞预埋的多点位移计监测结果的分析图.

为便于分析,定义在隧洞开挖掌子面推进至观测断面之前,观测断面处隧洞顶拱产生的累积沉降位移为“先期位移”,即先于掌子面的围岩变形.隧洞观测断面处掌子面开挖时产生的沉降位移定义为“开挖瞬时位移”.“开挖瞬时位移”和“先期位移”之和定义为“前期位移”;该位移在隧洞开挖成型后即已经完成,跟踪施工进行的洞内拱顶沉降及水平收敛位移监测获得的累积位移无法反应该位移的变化.在隧洞内跟踪施工监测获得的位移定义为“后期位移”;目前隧洞安全监测的判定均是依据该位移进行的.

按以上所给出的定义,由图 2 可见,隧洞 K+126 桩号处监测到的隧洞拱顶沉降位移随掌子面推进呈倒“s”型,在掌子面推进至该断面时,围岩的“先期位移”约为 33.0 %,同理论分析的结果基本一致.但桩号 K+15 处和桩号 K+315 处隧洞拱顶的位移明显不同于 K+126 桩号处的位移变化情况,以上两断面处观测到得“先期位移”要大于 K+126 处观测的位移量;就变化量而言,隧洞桩号 K+15 断面处的“先期位移”约为 46.0 %,隧洞桩号 K+315 断面处的隧洞的“先期位移”约为 35.0 %,均大于桩号 K+126 断面处的 33.0 %位移量;即受不同位置既有溶洞的影响,隧洞顶拱“先期位移”变化明显,具有超前释放性.

对比有无溶洞时隧洞变形曲线的整体形态可见,无论是顶部存在溶洞的 K+15 洞段或边墙存在溶洞的 K+315 洞段,隧洞位移变化的整体形态同无溶洞时的形态一致,均呈倒“s”型;但受既有溶洞影响的位移变化在掌子面推进前后均变化平缓,而在掌子面开挖的附近出现了大的突变,即隧洞开挖的“瞬时位移”大大增加,变形具有典型的突发性特点,这同隧道和地下工程施工中岩溶突泥、突水灾害突发性的特点一致.文献[15]的室内模型试验同样证明了既有溶洞导致隧洞变形具有超前释放性的特点;文献[10]和文献[13]的数值模拟也得到了这一结论.根据这一结论,在岩溶隧道与地下工程的施工中,特别是浅埋穿越既有变形敏感建(构)筑物施工中,为达到控制隧洞施工过大的变形量,需要对隧洞掌子面前方地层进行提前的加固处理,以限制因溶洞引起的过大的“前期位移”,达到控制总变形的目的.

1.4 洞内位移的监测及分析

跟踪施工进行的变形监测,共取得有效数据 107 组.考虑到隧洞施工位移监测数据的离散性,为减少因随机因素导致的数据离散,对取得的有效数据按围岩级别和区分有无溶洞情况进行统计分析.

对武都导流隧洞现场监测得到的位移监测数据进行统计分析,假定监测数据近似服从正态分布规律,区分有无溶洞情况,求位移的置信度为 0.85 时的位移监测数值置信区间,求出 0.85 置信区间中的隧洞位移监测数据的平均值,并以此求得的值作为隧洞位移的比较值.武都导流隧洞监测数据按以上方法获得的围岩“后期位移”累积值见表 2 所示.

由表 2 可见,武都导流隧洞现场监测得到的 III 级围岩隧洞边墙收敛位移累积值为 2.95 mm;隧洞的顶拱沉降位移(后期位移)累积值为 3.61 mm;顶拱沉降累积位移大于边墙收敛累积位移量.隧洞 IV 级围岩的实测统计位移累积量为 3.51 mm,顶拱沉降位移累积量 5.62 mm,同样是顶拱沉降位移大于边墙的水平收敛位移.

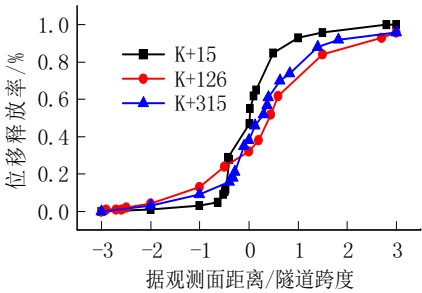


图 2 位移空间效应曲线
Fig.2 The displacement curve measured with multi-point displacement meter

表 2 导流洞位移监测数据统计分析表

Tab. 2 The convergence displacement results of the various types of surrounding rock based on statistics				
围岩级别	实测位移值/mm		实测隧洞位移取值/mm	
	边 墙	拱 顶	边 墙	拱 顶
III	1.07~4.19	2.32~6.41	2.95	3.61
IV	2.19~4.96	3.47~6.85	3.51	5.62

1.5 支护结构内力的监测及分析

根据施工揭示溶洞的情况并结合地质探测资料,对岩溶溶洞对隧洞喷层轴力和锚杆轴力的影响进行了现场监测,表 3 给出了武都水库导流隧洞支护结构受力的监测结果.

由表 3 可见: III 级围岩时无溶洞条件下隧洞的顶拱喷层轴力最大值约 0.41 MPa,其边墙中部位位置左、

右侧喷层轴力分别为 0.52 MPa 和 0.47 MPa; 喷层受力较小, 且靠近山内侧的支护结构受力大于远离山一侧. 受既有下部溶洞的影响, 顶部喷层轴力变化到了 0.82 MPa, 增加为无溶洞时 1.0 倍; 而近岩溶溶洞侧的隧洞边墙中部喷层轴力减小, 远离溶洞侧轴力增加, 其最大增加了约 2.6 倍. 分析溶洞对锚杆轴力的影响, 无溶洞时隧洞顶部锚杆轴力 8.68 t, 隧道左右边墙中设置的锚杆的轴力分别为 5.35 t 和 1.63 t; 受溶洞影响时, 顶部锚杆轴力减少到了 4.56 t, 此时左边墙及右边墙锚杆的轴力分别减少到了 3.16 t 和 1.24 t, 锚杆轴力减少量超过了 20 %.

表 3 支护结构的内力影响监测分析及数值模拟分析对比
Tab. 3 The observational internal force of the tunnel support structures based on different rock classification

监测项目	地质条件	仪器布设位置	应力/MPa	轴力比(实测)	轴力比(数值计算)
喷层轴力	无溶洞	拱顶	0.41	/	
		左边墙中部	0.52	/	
		右边墙中部	0.47	/	
	隧洞左侧边墙下部有溶洞	顶拱	0.82	2.00	1.43
		左拱腰中部	0.34	0.65	0.82
		右拱腰中部	1.47	3.13	2.61
监测项目	地质条件	仪器布设位置	轴力/t	轴力比(实测)	轴力比(数值计算)
锚杆轴力	无溶洞	顶拱部位	8.68	/	
		拱腰中部	5.35	/	
		拱腰下部	1.63	/	
	隧洞左侧边墙下部有溶洞	顶拱部位	4.56	0.53	0.61
		左侧拱腰中部	3.16	0.59	0.77
		左侧拱腰下部	1.24	0.76	0.93

2 溶洞对隧洞受力和变形影响的对比分析

2.1 数值分析模型

为进一步深入研究不同位置、尺寸溶洞对隧洞围岩及支护结构性态的影响, 以武都水库导流洞工程为依托工程, 建立数值模拟模型. 同时, 为验证数值模拟模型的可行性和可信性, 首先按现场监测的断面围岩条件建立有限元模型, 分别分析有无溶洞及不同位置、尺寸溶洞影响条件下隧洞围岩及支护结构变形和受力性态的变化.

武都水库导流洞采用城门洞型隧洞, 其宽、高分别为 11.50 m 和 13.50 m. 为方便计算, 数值分析中假定溶洞的轴线同隧洞轴线近似水平, 模型中溶洞位置和规模按现场实际揭示的溶洞尺寸确定, 溶洞断面近似为圆形. 武都水库导流隧洞数值分析中隧洞岩体的物理、力学参数见表 4 所示, 支护参数按现场实际支护参数进行模拟.

表 4 隧洞围岩的物理力学参数
Tab. 4 The physical and mechanical parameters of the surrounding rocks in tunnels

围岩级别	容重 kN/m ³	弹性模量(×10 ⁴)/MPa	横向泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角	抗拉强度/MPa
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

2.2 位移影响的对比分析

根据现场施工揭示溶洞情况, 武都水库导流隧洞在桩号 K+160.0 至桩号 K+185.0 间、桩号 K+204.0 至桩号 K+225.0 间、桩号 K280.0 至桩号 K+300.0 间以及隧洞桩号 K+260.0 和桩号 K+053.0 的隧洞边墙附近均存在有岩溶溶洞; 为之, 将隧洞以上洞段的典型断面的位移观测结果和按现场条件建立模型进行的系统数值模拟结果列于表 5, 图 3 给出了现场监测和数值分析得到的侧边既有溶洞影响的对比图. 由表 5 给出的现场实测侧边溶洞的影响结果及数值模拟分析结果的对比以及图 3 给出的比较图可见: 受既有侧边溶洞影响时, 不论围岩级别是 III 级或 IV 级, 既有侧边溶洞均将引起隧洞水平收敛位移的增加, 且隧洞水平收敛位移的增加量将随着既有溶洞尺寸的增大而增加; 但就位移增加的程度比较, 实测得到的溶洞的影响结果要远小于数值模拟分析的结果.

就 IV 级围岩的计算结果的对比分析可见, 在既有溶洞的尺寸大于隧洞的跨度时, 现场监测得到的位

移增加量为无溶洞时位移量的 2.50 倍左右,但数值模拟得到的水平收敛位移的增加量为无溶洞时位移的 3.0 倍左右.就对比分析现场测量得到的 III 级围岩和 IV 级围岩的影响程度而言,侧边既有溶洞对隧洞水平收敛位移的影响程度随着隧洞围岩级别的降低,其影响程度增加.就影响量而言,当隧洞围岩由 III 级降低为 IV 级时,隧洞水平收敛位移的增加量将提高约 20%.数值模拟分析的结果同样证明了这一影响规律.但就顶拱沉降位移影响而言,由表 5 所给出的实测结果和数值计算的结果可见,既有侧边溶洞将引起隧洞顶拱沉降位移的增加;但就影响程度而言其位移的变化量远远小于侧边溶洞对水平收敛位移的影响量.数值分析可以得出同样的结论,且现场监测结果和数值分析得出的影响程度差别不大.

表 5 侧边溶洞对隧洞位移影响的实测结果和数值分析结果统计表
Tab.5 The displacements of tunnel measured and numerical analysis subjected to side cave

试验洞段	围岩条件	数值模拟结果			现场监测结果		
		洞径比	水平位移/mm	位移比	沉降位移/mm	位移比	沉降位移比
K+160.0~ K+185.0	III 级围岩洞 径比为 2.00	0.20	7.01	2.37			2.94
		0.30	6.60	2.23			2.53
		0.40	5.97	2.02			1.99
		0.80	3.72	1.26	4.84	1.03	1.61
		1.20	2.96	1.00	4.71	1.00	1.23
K+204.0~ K+225.0	III 级围岩洞 径比为 0.80	0.20	4.54	1.43			2.21
		0.40	4.14	1.30	6.37	1.35	1.83
		0.70	3.43	1.08			1.22
		1.30	3.17	1.00			1.08
K+053 桩号 附近	III 级围岩洞 径比为 0.40	0.20	3.49	1.13			1.36
		0.50	3.28	1.06			1.15
K+280.0~ K+300.0	IV 级围岩洞 径比为 1.50	0.20	8.61	2.67			3.21
		0.30	7.02	2.17			2.79
		2.00	3.23	1.00			1.21
K+260 桩号 附近	IV 级围岩洞 径比为 0.60	0.60	5.51	1.41			1.78
		1.00	4.35	1.27	6.64	1.18	1.47
		1.70	3.43	1.00			1.16

注:位移比为受溶洞影响时位移观测值与无溶洞时相应位移的比值.

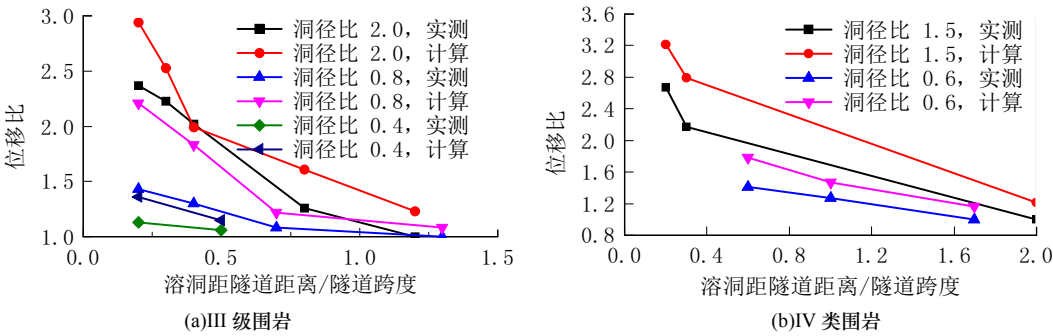


图 3 侧边溶洞对隧道位移影响
Fig. 3 The influence to tunnel displacement subjected to the side cave

实测得到了既有顶部溶洞对隧洞位移影响的结果同数值分析得到的影响结果的对比见表 6 所示.图 4 给出了既有顶部溶洞对隧洞位移影响的数值模拟分析结果及实测结果的对比图.

由表 6 和图 4 可见:顶部溶洞对隧洞位移的影响不同于侧边溶洞的影响,其影响程度受顶部溶洞的尺寸控制;即在顶部溶洞尺寸大于隧洞的最大跨度时,隧洞顶拱的位移将增加;但在既有溶洞的尺寸小于隧洞的最大跨度时,隧洞顶拱的沉降位移反之增加.深入的数值模拟分析同样证明了既有顶部溶洞影响的这一规律,只是数值模拟得出的影响程度较现场监测得到了影响程度减少了大约 20%.但就顶部溶洞对隧洞水平收敛位移的影响而言,其规律不同于顶部位移的影响规律,即不论顶部既有溶洞的尺寸大小,隧洞水平收敛位移均将增加,且其增加的程度随着既有溶洞尺寸的增加而增大.数值分析的结果同现场监测的规律一致,但数值模拟分析得到的既有溶洞的影响程度要远大于现场监测得到了影响程度.

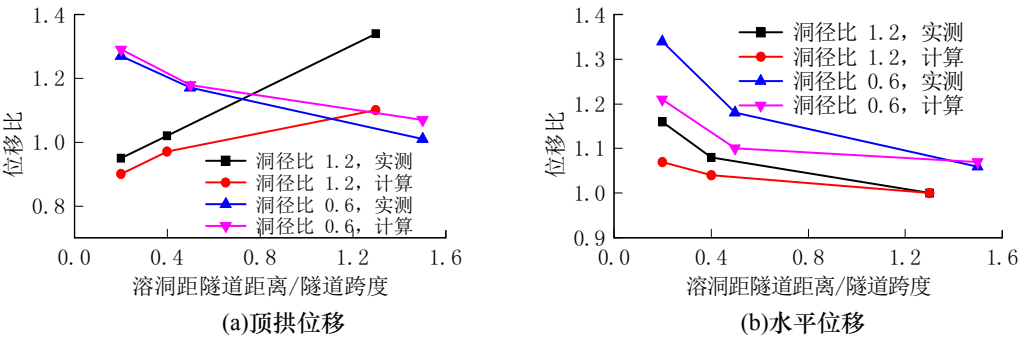


图 4. 顶部溶洞对隧道顶拱位移及隧道水平位移的影响
Fig. 4 The influence on displacements of vault and horizontal of tunnel subjected to the top cave

表 6 现场监测及数值分析得到的顶部溶洞的影响分析结果
Tab. 6 Results on top of the cave tunnel displacement effect and the results of numerical analysis

试验洞段	围岩条件	围岩条件		数值分析结果			
		洞间距	顶拱沉降位移/mm	顶部位移比	水平位移比	顶部位移比	水平位移比
K+100.0 桩号附近	III 级围岩 洞径比 1.20	0.20	3.42	0.95	1.16	0.90	1.34
		0.40	3.70	1.02	1.08	0.97	1.18
		1.30	4.83	1.34	1.00	1.10	1.06
K+086 桩号附近	III 级围岩 洞径比 0.60	0.20	4.57	1.27	1.07	1.29	1.21
		0.50	4.21	1.17	1.04	1.18	1.10
		1.50	3.65	1.01	1.00	1.07	1.07

注: 位移比为受溶洞影响时位移观测值与无溶洞时相应位移的比值。

综合以上既有溶洞对隧洞位移影响的监测及数值模拟分析的对比结果可见, 基于连续介质理论进行的数值模拟的分析所得到的既有溶洞对隧洞位移影响的范围要远大于现场监测的影响范围. 现场监测分析表明, 当既有岩溶溶洞距离隧洞开挖轮廓线间的距离大于溶洞最大尺寸的 1.5 倍时, 既有溶洞引起的隧洞位移的变化量将降低到 10% 以下, 即接近于无岩溶溶洞时的隧洞位移量; 但是采用数值模拟计算得到的既有岩溶溶洞的影响范围大于 2.0 倍的既有溶洞的最大尺寸. 分析造成以上数值模拟结果同实测结果差异的主要因素, 可能是在数值模拟分析中将围岩作为均质连续介质进行模拟, 但实际的岩体并非均质、连续体, 按均质连续介质模型分析其影响范围较实际测试得到的范围大. 同时, 现场溶洞的形态千变万化, 并非圆形, 但分析时为便于建模, 按测量尺寸采用等面积圆概化模拟, 因此数值模拟分析不同于实际的溶洞; 且现场监测工作受施工等多方面的因素影响也是导致两者出现差异的原因之一.

2.3 溶洞对隧洞围岩应力及支护结构轴力影响的对比分析

现场监测得到的隧洞典型断面支护结构内力的观测结果以及按现场施工揭示条件进行的数值模拟分析结果的对比见表 3 所示. 图 5 给出了武都水库导流隧洞施工中揭示的隧洞桩号 K+200.0 左侧边墙偏下的, 溶洞尺寸约 10.0 m 的侧边溶洞对隧洞围岩应力影响的分析结果图.

由图 5 和表 3 给出的分析对比结果可见: 在无溶洞的正常情况下, 导流隧洞的顶拱的喷层轴力最大为 0.41 MPa, 导流隧洞边墙附近的溶洞的出现造成了近岩溶溶洞一侧的隧洞喷层轴力的减小, 而导流隧洞远离既有溶洞侧的隧洞喷层轴力的增加; 分析导流隧洞桩号 K+200.0 洞段的数值模拟结果, 该桩号导流隧洞右侧边墙的喷层轴力增加了 2.60 倍, 而导流隧洞左侧边墙喷层的轴力减小了约 30 %. 对比数值模拟分析结果和实测结果的影响规律可见, 数值模拟分析结果同实测结果基本一致, 但就其影响的程度而言, 数值模拟分析的结果要远小于现场监测得到的结果. 对导流隧洞现场锚杆轴力进行的监测分析和数值模拟分析的对比分析同样表明, 导流隧洞侧边的既有溶洞的存在将引起导流隧洞周边锚杆轴力的减小, 且以近溶洞侧导流隧洞边墙的锚杆的轴力的减小量最小, 而导流隧洞的拱顶锚杆的轴力减小量最大. 造成现场实测和数值分析差别的主要原因可能是实际的非连续介质等同于连续介质进行计算的必然差别; 但数值模拟分析中把岩体作为均质、连续的介质分析所得的既有岩溶溶洞对导流隧洞的支护结构内力的影响规律同现场监测得到的实测结果相吻合, 因此采用基于均质连续介质理论的既有岩溶溶洞对隧洞稳定性影响的数值模拟分析方法可行, 结论可信. 但由于隧洞施工条件及现场条件等多方面条件的限制, 武都水库导流隧洞施工中, 对不同尺寸及距隧洞不同距离和位置的既有岩溶溶洞对隧洞的支护结构内力的影响, 目前监测到的数

据有限;在下一步的研究中将重点进行这一方面实测资料的收集、整理和分析,进一步验证和完善数值分析得到的相关结论。

3 结论

在岩溶发育地区的隧道(洞)工程建设中,既有岩溶溶洞对隧道(洞)围岩及隧道支护结构性态的影响是岩溶隧道(洞)稳定性评价的基础,但目前对既有岩溶溶洞对隧道稳定性的系统深入分析及现场监测的分析还鲜见报道。为之,论文依托岩溶发育区的武都水库导流洞工程的建设,对既有岩溶溶洞的存在引起的隧道(洞)稳定性态的变化进行了现场监测及数值仿真模拟分析,通过对既有岩溶溶洞对隧道(洞)施工性态及稳定性的影响可得出如下的研究结论:

(1)在既有隧道(洞)顶部和侧边溶洞影响下,隧道(洞)开挖时的瞬时释放位移将由无溶洞时的30%(总变形量的30%)增加到40%(总

变形量的40%)以上。即受既有溶洞的影响时的隧道(洞),在掌子面推进至观测断面之前围岩已产生了较大的“前期变形”,因此,围岩在开挖时的“瞬时释放位移”和开挖前的“前期位移”均较无溶洞影响时的位移量大,这反应出了既有溶洞影响下隧道(洞)围岩变形既有明显的超前释放性特点,施工过程中需增加必要的超前支护措施,以达到限制围岩的“前期变形”,增加隧道(洞)在施工时掌子面的稳定性。

(2)数值分析和现场监测分析均表明,在围岩级别为III级和IV级情况下,侧边既有溶洞将引起隧道(洞)水平收敛位移的增加,且其位移的增加程度将随着既有溶洞尺寸的增加而增加;但就其位移的增加量值而言,现场监测得到的增加量要小于数值试验得到的增加量。

(3)隧道(洞)顶部既有溶洞与隧道(洞)跨度的相对大小对隧道(洞)拱顶沉降位移的变形影响显著,当顶部既有岩溶溶洞的尺寸不大于隧道(洞)开挖的最大轮廓尺寸时,顶部既有溶洞的存在将引起隧道(洞)顶拱沉降位移的减小;而当顶部既有溶洞的尺寸小于隧洞最大跨度时,隧洞顶部既有岩溶溶洞将导致隧道(洞)顶拱的沉降位移增加。

(4)既有隧道(洞)边墙附近的既有溶洞将引起隧道(洞)近溶洞侧支护结构内力的减小,而远离既有溶洞一侧隧洞的支护结构内力的增加。就隧道(洞)支护结构中的锚杆受力而言,隧洞顶部的既有溶洞的存在将引起隧洞锚杆轴力减小,其中以隧道(洞)拱顶部位的锚杆的轴力减小量最大。

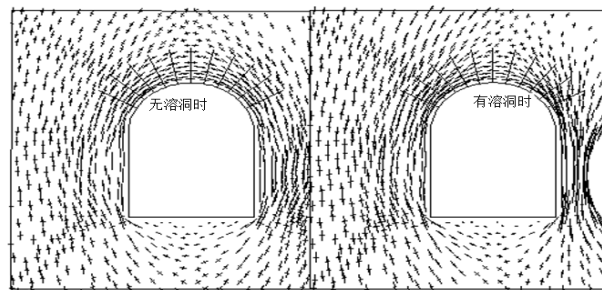


图5 既有溶洞对隧道围岩应力场分布影响对比图
Fig. 5 The comparison of stress distribution of surrounding rock subjected to the cave

参考文献 References

- [1] 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 Zhaowei, ZHANG Mingqing. Strengthening technique by grouting with filling silty clay for deep burying karst cave in Yuanliangshan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(5): 48-51.
- [2] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
ZOU Chengjie. Water resources and hydro-power karst engineering geology[M]. Beijing: Water Power Press, 1994.
- [3] 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, 20(3): 403-407
YU Bo. Engineering geology problem of karst foundation with tunnel and treatment of the foundation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 403-407
- [4] 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 Congjin. Karst development and constructional significance of the lubuge power tunnel [J]. Carsologica Sinica, 1991, 12(4): 715-719.
- [5] 石新栋. 圆梁山隧道主要工程地质及施工对策[J]. 隧道建设, 2004, 25(4): 72-74.
SHI Xindong. The main problems and countermeasures of engineering geology of Yuanliangshan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2004, 25(4): 72-74.
- [6] 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 Zemin, HUANG Runqiu. Deep and long tunnel and its construction of geological disasters[M]. Chengdu: Southwest jiaotong University Press, 2000.
- [7] 程建铝, 宋战平. 喀斯特地区铁路隧道工程地质灾害研究初探-以宜(昌)万(州)铁路金子山岩溶隧道为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(3): 18-21.
CHENG Jianlü, SONG Zhanping. Research on geologic disaster of railway tunnel in karst zone-taking Jinzishan karst tunnel

- of Yiwan railway for example[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(3):18-21.
- [8] 傅鹤林. 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 Helin. The tunnel lining theoretical load and karst treatment technology[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [9] BUTTON E, BRETTEREBNER H, SCHWAB P. The application of TRT-true reflection tomography at the Unterwald tunnel in Felsbau[J]. Geophysics, 2002, 20(2): 51-56.
- [10] 宋战平, 綦彦波, 赵国祝, 等. 岩溶隧道施工关键技术及工程应用研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2013.
SONG Zhanping, QI Yanbo, ZHAO Guozhu, et al. Research on the Key Technologies of the Large Tunnel Construction Under Complex Geology [M]. Xi'an: Shaanxi science and technology, 2013.
- [11] BROOKS J W. Applications of GPR technology to humanitarian demining operations in Cambodia: some lessons learned[R]. Memorial University: Brooks Enterprises International, Inc., 1996.
- [12] 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 Mengjun, XU Xibin, ZHAO Mingjie, et al. Construction mechanics response study of highway tunnel in karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1525-1529.
- [13] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩—支护结构稳定性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
SONG Zhanping. Research on the influence of concealed karst caverns upon the stability of tunnels and its support structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [14] SONG Zhanping, 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), Shangri-La: Hong Kong Industrial Technology Research Centre, 2011.
- [15] 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 Mingjie, LIU Xuhua, AO Jianhua, et al. Numerical analysis of influence of karst caves in top of tunnel on stability of surrounding rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 445-449.
- [16] 张岩, 李宁. 多因素对高温隧洞稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学:自然科学版, 2012, 40(2):219-226.
ZHAN Yan, LI Ning. Influence of various factors on tunnel stability in temperature field[J]. Journal of Northwest A & F University:Natural Science Edition, 2012, 40(2):219-226.
- [17] 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 Zhanping, DANG Hongbin, LI Ning. Numerical experimentation of influence of karst cave on displacement characteristics of rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(5):79-83.

Experiments and field monitoring and analysis about the impact of existing cave on the stability of the tunnel

SONG Zhanping^{1,2}, YANG Tengtian¹, ZHANG Danfeng¹, LI Ning³

(1. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. China Railway 13th Bureau Group Co., LTD., Tianjing 300300; 3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: based on the construction of Wudu reservoir diversion tunnel, this paper make a situ measurement of the tunnel under the impact of concealed cave When the tunnel is under construction, the change of about tunnel's surrounding rock stress, displacement, and supporting structural state under the impact of the different cave are analyzed and field observations with numerical results were compared. The analysis showed that: (1) Under the impact of the cave at the top, the deformation of tunnel surrounding rock ahead release. Under the impact of the cave aside, tunnel horizontal convergence displacement increase; and will increase the amount of displacement increases along with the increase of the cave diameter. (2) Under the impact of the cave at the top, the displacement of the top of the tunnel arch settlement will reduce when the cave diameter is larger than the tunnel span, and the displacement of the top of the tunnel arch settlement will increase when diameter ratio is less than 1.0; A affected by the cave at the top, the horizontal displacement of the tunnel will increase; and the impact of the cave diameter increase in caves also increases. (3) When the tunnel sidewall nearby the cave, tunnel periphery near cave side spray layer axial force will cause the cave side spray layer axial force to increase. (4) The change of the cave tunnel surrounding rock stress and characteristics of displacement with the results of numerical experiments are consistent. Therefore, the results of the theoretical analysis and numerical analysis show that the change about the impact of the cave tunnel surrounding rock displacement and stress become less. But in-situ measurement, the joint fissures of rock mass cave's scale and the behavior change have an effect on the result. Due to the impact of the cave, the extent and scope of the cave of the field measurement of tunnel surrounding rock stress and displacement by field measurement is lower than the numerical analysis results by 20% to 30%. The impact of the cave on the supporting structure internal force is 20% larger than the numerical analysis results.

Key words: tunnel engineering; existing cave; stability; site testing; numerical analysis

(本文编辑 沈波)