

岩溶隧道施工过程中大型溶洞的综合预报及治理方案研究

袁永才 李术才 李利平 石少帅 周宗青 雷 霆

(山东大学岩土与结构工程研究中心,济南 250061)

摘要 根据尚家湾隧道隧址区地表水文点观察情况,并结合地形地貌特征、岩性和构造条件,判断尚家湾隧道在施工过程中可能揭露大型溶洞,出现突水突泥等工程灾害。文章针对前期隧道施工风险评价结果,采用综合地质预报方法对隧道前方不良地质体进行探测:采用TSP(隧道地震预测)法对ZK67+835处溶洞位置进行了准确预报;采用地质雷达法准确预报了YK67+805处的溶洞;采用超前钻探探明了溶洞在隧道底板下方的具体位置、走向及规模。探测结果表明,左右线隧道溶洞相互连通,为特大下伏无充填型溶洞。针对揭露的溶洞特点,分别采取填堵法和跨越法进行治理。左线在雨季期间无水流通过,采取填堵法;右线采取跨越法,梁板分离,分别承担隧道结构荷载和路面车辆荷载。通过对治理后围岩的变形监测,验证了治理方案的有效性,为后期类似溶洞治理提供了借鉴。

关键词 岩溶隧道 大型溶洞 地质预报 溶洞治理

中图分类号:U453.61 **文献标识码:**A

1 引言

随着我国交通建设的迅速发展,在岩溶发育地区修建长大公路隧道工程将会遇到各种大小不一、形态各异的溶洞,给隧道施工带来不便甚至影响施工安全。

由于溶洞存在的隐蔽性与不可预见性,在隧道施工中未揭露出来的隐伏溶洞因事先未施加安全措施,易遭受猝不及防的破坏,对隧道施工危害性更大^[1]。目前国内外常采用TSP(隧道地震预测)法进行长期(长距离)地质预报,采用地质雷达法进行短期(短距离)地质预报。TSP法可定量反映岩体参数,准确界定掌子面前方遇到与隧道轴线近垂直的不连续体(节理、裂隙、断层破碎带等),预报距离可达120 m。地质雷达法弥补了TSP法对掌子面前方水体、小型溶洞预报精度较差的不足,可有效识别掌子面前方30 m范围内含水带、破碎带以及地层岩性的变化。在采用物探手段进行溶洞定性判断之后,实施超前钻探,对含水构造进行进一步的精确判断。查明水

压、水量、充填介质。同时根据钻孔涌出物来判断是否连通暗河。

因此,采用长期与短期预报相结合,辅以超前钻探的综合超前地质预报方法可为隧道安全施工提供有利保障。

伴随溶洞的揭露,将会发生突水、涌泥等工程灾害。2003年,大风垭口隧道施工至K255+274时,发生突水、涌泥事故,整个过程突水总量达214万m³,涌出泥砂达11万m³^[2];2004年,五指山隧道进口段开挖至K28+880段时,隧道出现较大的涌水,最大涌水量约1.1万m³/d^[3];2005年,拉之洞隧道出口掘进至DK174+610处突发涌泥,数秒内近2 000 m³软塑状粘土挤垮已喷护好的钢架,挤满45 m长开挖断面^[4];2006年,八卦山隧道上导坑DK132+340处发生突水、涌泥事故,总突水量约15 000 m³,涌出角砾碎石约1 800 m³^[5];2007年,龙潭隧道ZK72+185附近有2个集中出水点,整个坍塌区最初出水达到60 m³/h,稳定后维持在28 m³/h,由于突水、涌泥的影响导致ZK72+167~ZK72+178段发生坍塌,并使

修改稿返回日期:2014-02-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036000)。

作者简介:袁永才(1987-),男,博士研究生,主要从事地下工程灾害预测预警与控制方面的研究,E-mail:yuanyc924@163.com.

ZK72+178~ZK72+205 段初期支护个别部位变形、环向开裂、剥落;2008 年,三阳隧道左洞入口掘进至 ZK150+409.2 时,发生突水事故,最大涌水量为 1.12 万 m^3/h ^[6]。因此,溶洞及岩溶水的治理也成为亟待解决的工程安全问题。

2 隧址区岩溶发育特征

2.1 工程概况

尚家湾隧道为湖北省保康至宜昌高速公路(襄阳段)的一座分离式隧道,全长 3 864 m,属特长隧道,最大埋深约为 485 m。单洞净空(宽×高)为 10.25 m×5.0 m。区内断裂构造发育,主体构造规模巨大的有通城河断裂带;洞身地层为上白垩系罗镜滩组石灰质砾岩,地表岩溶发育,分布大量的洼地、落水洞、漏斗;大气降水直接通过落水洞,漏斗灌入地下,并通过地下河排向深切河谷,为典型的强岩溶隧道。隧道剖面如图 1 所示。

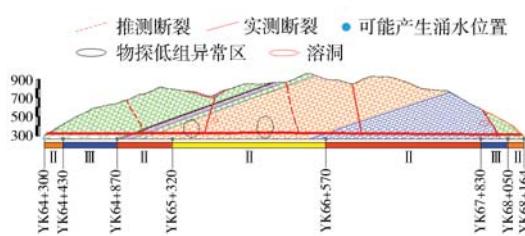


图 1 隧道剖面示意

Fig.1 Profile of the tunnel

2.2 隧址区岩溶发育特征

根据地表水文点观察,结合地形地貌、岩性和构造条件,判断隧址区 K65+200~K67+200 段地表水排泄条件较差,地下水比较发育,以岩溶水及第四系孔隙水和基岩裂隙水为主,且在 K66+380~K67+200 段地形相对平缓,排水不畅,溶蚀洼地发育。

从图 1 中可以看出,隧道穿越区主要为白垩系红花套组(K_2hn)泥质粉砂岩、块状砾岩;白垩系罗镜滩组(K_2lj)块状砾岩、泥岩及泥质粉砂岩;三叠系嘉陵江组(T_1j)中厚层白云质灰岩及大冶组(T_1d)薄层灰岩。隧道白垩系砾岩的岩石成分主要为灰岩,且胶结物以钙质为主,加上存在裂隙及地表汇水作用,导致部分段落岩溶发育。地质调查显示隧址区岩溶洼地较多,K65+520 两侧发育有落水洞,故隧道开挖过程中可能出现突水突泥等工程事故,系最大的风险因素。

3 尚家湾隧道综合超前地质预报

3.1 尚家湾隧道左线

3.1.1 TSP203 超前地质预报

采用 TSP 203plus 系统,对尚家湾隧道出口左线进行了 TSP 超前地质预报,预报范围是 ZK67+864~ZK67+764,共 100 m。图 2、图 3 分别是深度偏移图和 2D 结果显示与岩体物性图。

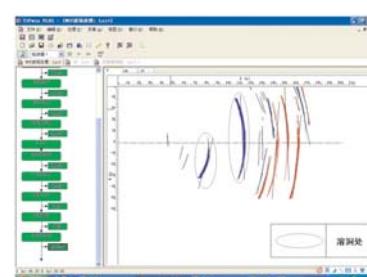


图 2 ZK67+864~ZK67+764 段深度偏移图

Fig.2 Depth migration at ZK67+864~ZK67+764

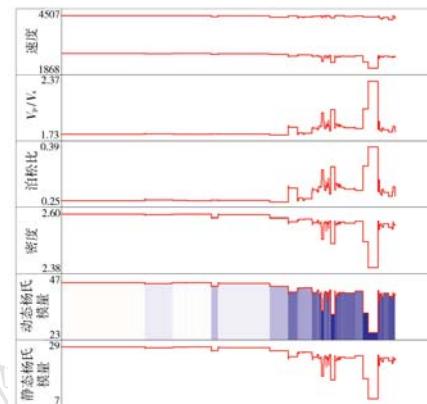


图 3 ZK67+864~ZK67+764 段 2D 结果显示与岩体物性

Fig.3 2D view of the prediction results and physical properties of the rock mass at ZK67+864~ZK67+764

根据 TSP 探测成果解释:

(1) 反射层提取图中 ZK67+855~ZK67+831 附近 P 波出现较明显负反射面,偏移图中负反射明显,推测该处可能存溶洞;

(2) ZK67+834~ZK67+808 与上段围岩相比,该段围岩节理裂隙异常发育,软弱蚀变结构面发育,岩体较为破碎,完整性较差;ZK67+820 附近波速、密度、杨氏模量下降,泊松比增大,反射层提取图中存在强烈负反射,推测该处裂隙异常发育,裂隙含水量

增多,可能存在溶洞;

(3) ZK67+804~ZK67+764 段偏移图中正负反射波组较明显且杂乱,在岩性图中,各曲线都呈较明显、密集的起伏变化;反射层提取图中反射面较多,且相互重叠,推测该段围岩节理裂隙异常发育,岩体破碎,完整性差。尤其是 ZK67+805~ZK67+795 段和 ZK67+780~ZK67+770 段各参数曲线起伏变化较大,推测此段岩体异常破碎,且含水量增多,可能存在溶洞。

3.1.2 开挖及勘测验证

隧道施工至掌子面里程桩号 ZK67+835 处,开挖爆破后揭露一大型无充填型溶洞,如图 4 所示。专家对溶洞的规模、空间分布进行了勘测,勘察结果如图 5、图 6 所示。溶洞纵向长 18.75 m,最大高度 13.1 m,沿横向向右洞方向发展,同时沿竖直向斜下方方向发展,距离洞口越远,溶洞断面尺寸越大,属于下伏大型无水溶洞。



图 4 ZK67+835 处揭露溶洞

Fig.4 Disclosed karst cave at ZK67+835

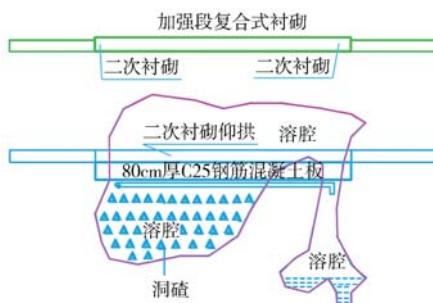


图 5 左线溶洞纵断面示意

Fig.5 Vertical section of the left karst cave

验证表明,TSP 超前地质预报比较准确地预报了溶洞的位置和规模,为隧道的安全施工和岩溶应急治理的开展起到了指导作用。

3.2 尚家湾隧道右线

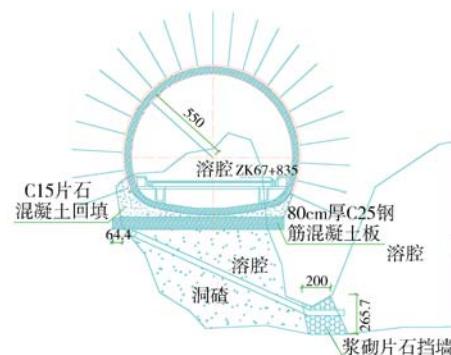


图 6 左线溶洞横断面(单位:cm)

Fig.6 Cross section of the left karst cave

3.2.1 地质雷达超前预报

2013 年 6 月 8 日,采用地质雷达对尚家湾隧道 YK67+825 掌子面开展短距离超前预报,预报距离为 22 m。处理后雷达图像如图 7 所示。

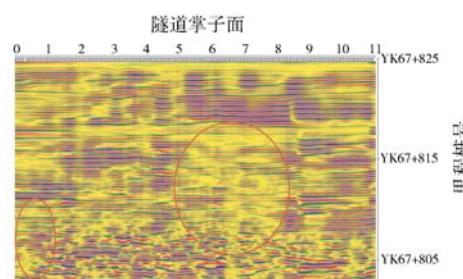


图 7 处理后雷达图像

Fig.7 Processed GPR image

解译成果: 推测 YK67+817~YK67+805 段蚀变软弱、结构面发育,存在空洞,局部夹杂泥质或含裂隙水。

3.2.2 开挖及勘测验证

2013 年 6 月 12 日,掌子面里程为 YK67+805,开挖爆破后揭露一无充填型溶洞,如图 8 所示。溶洞位于掌子面底部位置,左右延伸至边墙,沿横向向左洞方向发展,同时沿竖直向斜下方方向发展,距离洞口越远,溶洞断面尺寸越大,属于下伏大型无水溶洞。

3.2.3 超前钻探补充验证

2013 年 6 月 17 日,对尚家湾隧道 YK67+806~YK67+809 段底板进行短距离超前钻探探测。设置 21 个钻探点,各点布设及钻探成果如图 9 所示。通过钻探结果判断底板下方溶洞走向以及底板距溶洞距离。据此推断底板下方 4.2 m(垂直距离)处为揭



图 8 YK67+805 处揭露溶洞

Fig.8 Disclosed karst cave at YK67+805

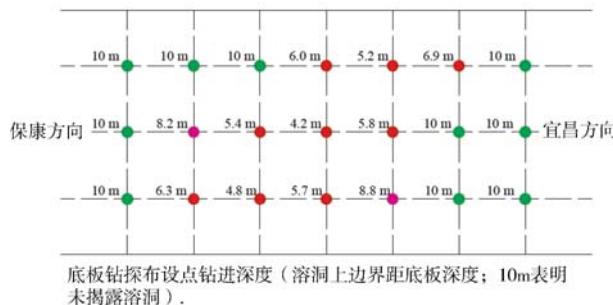


图 9 超前钻探成果示意

Fig.9 Advanced drilling results

露溶洞上边界。

结合探测段地质情况及开挖揭露溶洞情况,推断隧道开挖揭露的溶洞与底板探测揭露的溶洞相通,溶洞为干溶洞。

4 尚家湾隧道溶洞治理

4.1 确定治理方案

隧道施工过程中遭遇溶洞,通常采用跨越法、填堵法、引排水法和绕避法^[7-9]对溶洞进行治理,针对溶洞充填物土石二元的特点,董志明等^[10]采用大直径自进式锚杆进行超前支护,对于富水溶洞,王伟^[11]采取先钻孔排水和增设排水支洞排水减压,后采用加强型复合式衬砌隧道结构、复合地基等综合措施进行治理。通过前期的综合探测和钻探揭露,确定了左右洞溶洞发育位置、规模、形态和充填物等信息。揭露溶洞影响隧道施工安全,亟需进行治理。

尚家湾隧道揭露溶洞为大型无充填型溶洞。隧道出口左线溶洞采用回填方式(图 5、图 6):回填、注浆加固,并预留过水通道,防止水流堵塞引起水压力增大,造成二次衬砌的水力劈裂破坏;出口右线采用跨越法(图 10):底板下方有一定岩石覆盖厚度,采用跨梁方式经过,下方溶洞不回填,作为过水通道。

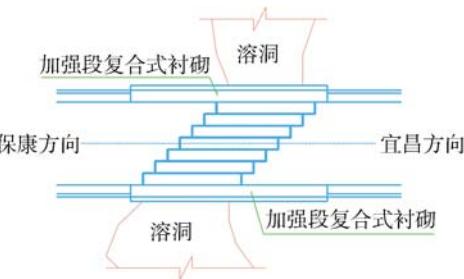


图 10 右线溶洞治理示意

Fig.10 Treatment of the right karst cave

4.2 详细治理措施

(1) 隧道出口左线

采用喷锚支护,锚杆为 $\phi 22$ 药卷锚杆, $L=300$ cm, 纵环向间距 80 (纵) $\times 120$ (环), 梅花型布置。溶洞治理采用洞碴回填。回填时预埋 $\phi 400$ mm HDPE 双壁波纹管, 用于治理后岩溶水的汇集, 及时将岩溶水排至溶洞底部空腔处。洞碴上部铺设 80 cm 厚 C25 钢筋混凝土板, 然后采用 C15 片石混凝土回填。上层铺设 $\phi 400$ mm HDPE 双壁波纹管, 防止水流堵塞引起水压力增大, 造成二次衬砌的水力劈裂破坏。

(2) 隧道出口右线

跨越法采取梁、板分离的形式,中间采用钢筋混凝土暗盖板(HRB235 或 HRB335 钢筋, C30 混凝土), 左右边墙处采用钢筋混凝土梁(HRB235 或 HRB335 钢筋, C30 混凝土)。隧道结构荷载由设置在边墙下的简支梁承担,路面车辆荷载由设置于路面下的暗盖板承担。

尚家湾隧道揭露溶洞为无充填型溶洞;雨季期间无水流通过,但治理时仍需预留过水通道。同时,隧道左右线溶洞段及附近区域,均应加强支护。溶洞处加强初期支护、二次衬砌支护,提高抗变形能力。

4.3 治理效果检查

通过对溶洞段围岩的拱顶沉降和水平收敛进行监控量测,检测溶洞治理效果。分别取 ZK67+834 和 YK67+804 处监测点作为验证点,如图 11、图 12 所示。结果证明,针对尚家湾隧道溶洞治理的措施取得了良好的治理效果,消除了工程隐患。

ZK67+834 断面累计水平收敛值为 13.90 mm, 累计拱顶沉降值为 20.29 mm。拱顶沉降及水平收敛变化趋势(图 11)表明:该断面拱顶沉降和水平收敛均处于稳定状态。

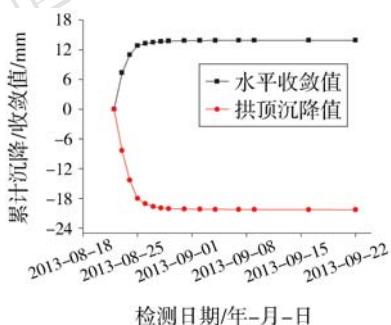


图 11 ZK67+834 处累计沉降/收敛值曲线

Fig.11 Curves of cumulative settlements/convergences at ZK67+834

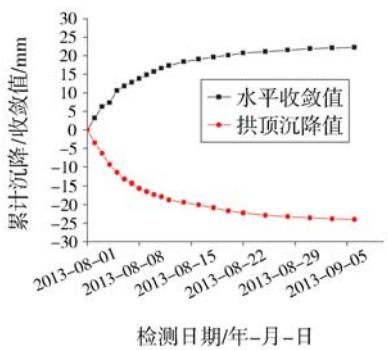


图 12 YK67+804 处累计沉降/收敛值曲线

Fig.12 Curves of cumulative settlements/convergences at YK67+804

YK67+804 断面累计水平收敛值为 22.23 mm, 累计拱顶沉降值为 24.04 mm。拱顶沉降及水平收敛变化趋势表明: 该断面拱顶沉降和水平收敛均趋于稳定。

5 结 论

(1) 采用长期与短期相结合的综合超前地质预报对尚家湾隧道进行地质预报, 可实现隧道地质资料实时更新及修正, 提前判定隧道前方不良地质体的位置和规模, 跟进超前钻探进一步精确判定不良地质体走向及规模, 对岩溶隧道溶洞探测有一定的借鉴意义。

(2) 在地质雷达判定溶洞大体位置后, 采用超前钻探可精确查明溶洞边界范围以及走向, 准确给出溶洞内部是否充填以及充填物性质, 为制定治理方案提供有利帮助。

(3) 针对大型下伏无水溶洞, 宜采用填堵法和跨越法, 达到减少资金投入, 快速开展隧道施工的目的, 同时在跨越法中采用梁板分离方式可有效跨越隧道底板下伏溶洞。为预防意外水流出现, 治理时仍需预留过水通道, 防止二次衬砌的水力劈裂破坏。

参 考 文 献

References

- [1] 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. Reserch 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
- [2] 刘仁阳. 大风垭口隧道特大土石流及涌水处治[J]. 公路, 2006 (5): 207–212
Liu Renyang. Treatments of Catastrophic Debris Flow and Water Burst in Dafengyakou Tunnel[J]. Highway, 2006 (5): 207–212
- [3] 李扬红, 邓英尔, 于静. 五指山隧道岩溶发育及涌水的特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 138–141
Li Yanghong, Deng Ying'er, Yu Jing. Study on Characteristics of Development of Karst and Gushin gin Wuzhi Mountain Tunnel[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2): 138–141
- [4] 张宗钢. 拉之洞隧道溶洞突泥处理施工技术[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 56–59
Zhang Zonggang. Techniques to Deal with the Mud-outburst in a Karst in Lazhidong Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(6): 56–59
- [5] 王双龙. 八卦山隧道突水突泥段处理技术[J]. 山西交通科技, 2009, 2: 54–60
Wang Shuanglong. Treatment Measures for the Water Inflow and Mud Burst in the Baguashan Tunnel [J]. Shanxi Science and Technology of Communications, 2009, 2: 54–60
- [6] 李江旭. 三阳隧道特大涌水病害综合治理措施[J]. 北方交通, 2009, 5: 115–117
Li Jiangxu. Measures for Comprehensive Treatment of Extra Gushing Water – Disease at Sanyang Tunnel [J]. Northern Communications, 2009, 5: 115–117

- [7] 黄鸿建, 张明庆. 宜万铁路隧道工程岩溶及岩溶水分析与应对[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(2): 22–33
Huang Hongjian, Zhang Mingqing. Analysis and Countermeasures against Karst and Karst-water in Tunnels on Yichang–Wanzhou Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(2): 22–33
- [8] 石少帅, 李术才, 李利平. 岩溶区隧道暗河的综合预报及治理方案研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 227–232
Shi Shaoshuai, Li Shucai, Li Liping. Comprehensive Geological Prediction and Management of Underground River in Karst Areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 227–232
- [9] 陈亮, 王崇良. 兰渝线桐子林隧道岩溶特征及整治方案探讨[J]. 现代隧道技术, 2012, 04: 37–41
Chen Liang, Wang Chonggen. Features of the Karst Encountered in the Tongzilin Tunnel on the Lanzhou–Chongqing Railway and Treatment Schemes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 04: 37–41
- [10] 董志明, 郑鹏武. 大直径自进式锚杆在隧道工程岩溶处治中的应用[J]. 现代隧道技术, 2013, (2): 187–191
Dong Zhiming, Zheng Pengwu. Application of Large-Diameter Self-Drilling Rock Bolts in Karst Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, (2): 187–191
- [11] 王伟. 宜万铁路齐岳山隧道 629 富水溶洞综合处理技术[J]. 现代隧道技术, 2010, (5): 98–102
Wang Wei. Comprehensive Treatment for 629 Water-rich Karst Cave of Qiyueshan Tunnel on Yichang–Wanzhou Railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, (5): 98–102

Comprehensive Geological Prediction and a Relevant Treatment Scheme for a Large Karst Cave in Tunnel Construction

Yuan Yongcai Li Shucai Li Liping Shi Shaoshuai Zhou Zongqing Lei Ting

(Geotechnical and Structure Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract Based on the hydrological conditions of the observation points, topography, lithology and structural features of the Shangjiawan tunnel, it was determined that large karst caves may be encountered during construction, which could result in geological hazards such as water inflow and mud bursts. Based on an early risk assessment, a comprehensive geological prediction method is adopted in this paper to explore the unfavorable geologic bodies in front of the tunnel, utilizing the seismic prediction (TSP) method for the karst cave at ZK67+835, the ground penetrating radar (GPR) method for the cave at YK67+805 and advance drilling for the specific location, strike and dimensions of the cave under the tunnel floor. The results show that the karst caves in the left and right tunnel tubes are interconnected with each other, forming an extra-large underlying unfilled cave. Aimed at the characteristics of the disclosed caves, such measures as filling and bridging are used for this project; backfilling is appropriate for the left tunnel tube, which has no water passing through during the rainy season, and bridging is appropriate for the right tunnel tube, with the structural load borne by a simple beam and the vehicle load by a cover plate. This treatment scheme is verified by rock deformation monitoring after treatment.

Keywords Karst tunnel; Large karst cave; Geological prediction; Treatment of karst cave