

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.008

溶蚀与侵蚀对间歇性运行供水隧洞安全运行的影响

廖定佳¹, 袁明道², 谭彩², 兰建洪¹, 史永胜², 张旭辉², 徐云乾²

(1. 深圳市东部水源管理中心, 广东 深圳 518172; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 为分析溶蚀与侵蚀对某间歇性运行供水隧洞安全运行的影响,采用现场调查、取样测试和无损探测等方法进行研究。结果表明:隧洞混凝土抗压强度与溶蚀呈显著负相关,隧洞脱空与侵蚀呈显著正相关;溶蚀部位混凝土强度降低,是导致隧洞混凝土抗压强度存在空间变异性的主要原因;目前溶蚀与侵蚀导致的混凝土强度损失与隧洞脱空尚不足以影响供水隧洞结构稳定,但随着溶蚀与侵蚀的进一步加剧,可能导致供水隧洞破坏。

关键词: 供水隧洞; 间歇性运行; 溶蚀; 侵蚀; Spearman 相关性分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0051-06

Effect of Corrosion and Erosion on Stability of Intermittently Operating Water Supply Tunnel

LIAO Ding-jia¹, YUAN Ming-dao², TAN Cai², LAN Jian-hong¹, SHI Yong-sheng², ZHANG Xu-hui², XU Yun-qian²

(1. Shenzhen Eastern Water Resources Management Center, Shenzhen 518172, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Field investigation, sampling analysis and non-destructive detection were used to explore the effect of corrosion and erosion on intermittently operating water supply tunnel. The compressive strength of tunnel concrete was negatively correlated with corrosion, and cavity of the tunnel was positively correlated with erosion. The decrease of the concrete strength at the corrosion site was the main reason for spatial variability of concrete compressive strength in the tunnel. At present, the loss of concrete strength and tunnel voids caused by corrosion and erosion was not enough to affect the structural stability of water supply tunnel. However, water supply tunnels might be damaged with the aggravation of corrosion and erosion.

Key words: water supply tunnel; intermittent operation; corrosion; erosion; Spearman correlation analysis

随着我国经济快速发展,水资源的需求日益增大,水资源短缺问题日益凸显。为保障重点区域或

城市供水,除常年运行的供水工程外,亦建有间歇性运行的应急备用供水工程。但是,间歇性运行供水

基金项目: 深圳市水务发展专项资金科技创新项目(20170103); 水利部水利技术示范项目(SF-201910); 广东省水利科技创新项目(2020-17)

通信作者: 谭彩 E-mail: sancytan@163.com

隧洞的溶蚀与侵蚀等病害较突出,因此研究溶蚀与侵蚀对间歇性运行供水隧洞的影响具有重要意义。

溶蚀是水工混凝土结构本质性病害之一,随钙离子溶出,混凝土强度显著降低,对结构的承载力、稳定性及使用寿命均有明显影响^[1-3]。由于溶蚀作用,丰满重力坝坝体的混凝土强度呈现出明显的空间变异性,溶蚀部位混凝土强度仅为非溶蚀部位的20%~70%^[4]。罗湾大坝溶蚀区域混凝土12年强度仅达到设计值的83%,而非溶蚀区域则满足要求^[5]。某碾压混凝土坝1998年1月竣工,2000年廊道上下游边墙出现溶蚀,截至2003年12月溶蚀物总质量达到9.21 t,2004年1月—2005年3月溶蚀物达8.12 t^[6]。古田溪三级混凝土支墩坝于1961年6月下闸蓄水,2000年3月共发现溶蚀36处,混凝土平均强度为37.91 MPa,局部区域强度为14.7 MPa,仅为设计强度的74%^[7]。

供水隧洞外土体侵蚀导致的隧洞脱空是严重的隧洞病害之一,是导致隧洞结构坍塌破坏的主要因素^[8-10]。张顶立等^[11]采用地质雷达对100余座铁路隧道进行探测,发现隧洞脱空长度约占总检测长度的14.78%。杨吴礼等^[12]对11座公路隧道进行探测,探明隧道脱空约占总长的11.3%。王立川等^[13]研究得到隧洞脱空将引起围岩松弛,塑性区扩大,从而导致隧洞变形增大直至破坏。郑刚等^[14-16]研究了隧洞事故成灾历程,发现隧洞裂缝、接缝张开导致土体侵蚀,进而引发隧洞灾害。叶艺超等^[17]对不同脱空模式下隧道结构的安全性态进行了分析,指出拱腰脱空比拱顶脱空对隧道结构更为不利。综上所述,目前对溶蚀与侵蚀影响的研究主要针对大坝及隧道工程,缺乏针对间歇性运行供水隧洞的研究。

为此,采用现场调查、取样测试和无损探测等手段,研究了溶蚀与侵蚀对间歇性运行供水隧洞的影响,通过Spearman相关系数分别定量分析了混凝土抗压强度、脱空与溶蚀、侵蚀的相关性。

1 工程概况

某间歇性运行供水隧洞长为4.27 km,断面为城门洞型,宽×高为2.50 m×2.70 m,直墙段高度为1.45 m,顶拱中心夹角为180°,直墙与底板倒圆角处理,倒圆直径为0.50 m。隧洞进出口底板高程分别为66.00 m和63.90 m,纵坡坡度为1/2 000,设计流量为4.63 m³/s。

隧洞围岩主要为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类,其中Ⅱ、Ⅲ类围岩约3.02 km,Ⅳ、Ⅴ类围岩约1.25 km。隧洞支护结构采用初期支护与二次衬砌组成的复合式衬砌,其中初期支护方式为喷混凝土、锚杆、钢筋网和钢拱架等,二次衬砌方式为模注钢筋混凝土,厚度为300~500 mm。

2 溶蚀对供水隧洞安全运行的影响

2.1 溶蚀特征

隧洞混凝土溶蚀主要发生在隧洞裂缝或接缝部位。溶蚀物呈白色,表面有肉眼可见的白色细小晶体颗粒,锤击声哑且有凹痕,主要成分为碳酸钙,粒径主要集中在0.075~0.5 mm。

以100 m洞段为1个统计单元,隧洞混凝土溶蚀分布情况如图1所示。检查发现隧洞溶蚀共759个,每100 m洞段平均溶蚀数为17.65个,最大和最小溶蚀数分别为26个和6个,分别距隧洞进口2 200~2 300 m和1 100~1 200 m。

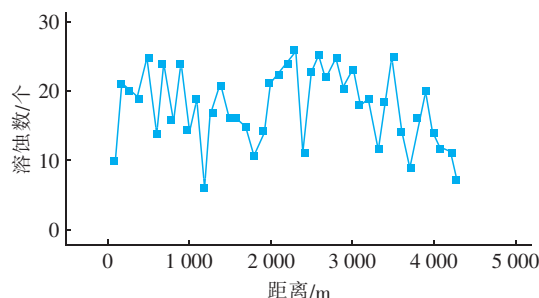


图1 供水隧洞混凝土溶蚀分布情况

Fig. 1 Corrosion distribution of concrete in water supply tunnel

2.2 溶蚀与抗压强度的相关性

采用回弹-取芯法对供水隧洞衬砌混凝土强度进行检测,沿隧洞每隔100 m取一构件进行强度检测,共检测构件43个,每个构件取10个测区进行回弹检测,并在其最小的3个测区各钻取1个芯样,芯样采用薄壁空心钻钻取,直径为83 mm,实测芯样试件高径比为0.95~1.05。因隧洞裂缝的间距在6~15 m,故所取芯样基本在溶蚀影响范围内。

取回弹检测最小的3个测区平均值为回弹法抗压强度,取所有芯样平均值为芯样法抗压强度,供水隧洞混凝土抗压强度分布如图2所示。回弹法抗压强度最大值和最小值分别为51.20 MPa和26.70 MPa,平均值为(36.05±6.38) MPa。芯样法抗压强度最大值和最小值分别为54.40 MPa和26.70

MPa,平均值为 (37.21 ± 7.75) MPa。回弹法与芯样法测得的抗压强度基本一致。回弹法和芯样法抗压强度变异系数分别为0.18和0.21,供水隧洞混凝土抗压强度具有空间变异性。

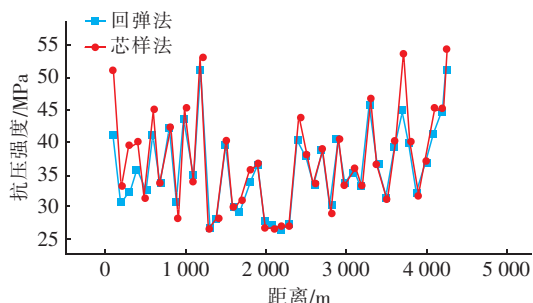


图2 供水隧洞混凝土抗压强度分布

Fig. 2 Compressive strength of concrete in water supply tunnel

溶蚀与隧洞混凝土抗压强度的关系曲线如图3所示。随着溶蚀数的增加,该洞段混凝土抗压强度逐渐降低,这主要是由于溶蚀导致隧洞混凝土中水化产物分解溶出,固相钙含量逐渐降低,孔结构逐渐劣化。

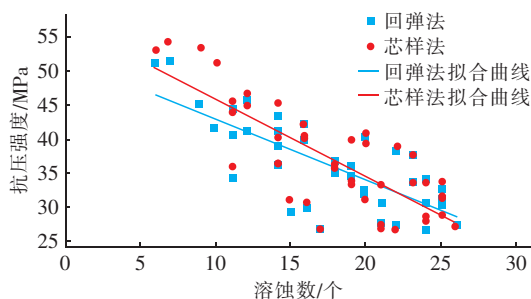


图3 混凝土抗压强度与溶蚀的关系曲线

Fig. 3 Relationship between compressive strength and corrosion of concrete

Spearman 相关系数是定量评价两个变量相关性的重要指标^[18],对供水隧洞混凝土抗压强度与溶蚀进行 Spearman 相关分析,结果表明,回弹法和芯样法所测混凝土抗压强度与溶蚀的相关系数分别为-0.717和-0.737,说明混凝土抗压强度与溶蚀存在显著负相关关系,溶蚀是导致该供水隧洞混凝土强度降低的主要原因。显著性值 <0.001 ,说明混凝土抗压强度与溶蚀之间的相关关系具有统计学意义。芯样法测得的抗压强度与溶蚀相关系数的绝对值大于回弹法,说明芯样法测得的抗压强度与溶蚀的相关性更好,相较于回弹法,芯样法测得的抗压强度更接近于真值,这也间接验证了混凝土抗压强度

与溶蚀呈显著负相关结论的合理性与正确性。

2.3 溶蚀对供水隧洞影响评价

根据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2015),当芯样平均抗压强度达到设计值的88%或芯样最小抗压强度大于设计值的80%,可判定结构实体的混凝土强度合格。本次共抽取43个构件,芯样平均抗压强度最小值为26.7 MPa,大于设计强度C30的88%,单个芯样最小值均大于设计强度C30的80%,说明截至检测时间供水隧洞混凝土结构整体合格,但距隧洞进水口900、1300、1400、2000、2100、2200、2300和2800 m处的8个构件混凝土芯样强度小于设计要求的混凝土强度等级C30。虽然目前溶蚀导致的混凝土强度损失尚不足以影响供水隧洞结构稳定,但随溶蚀进一步加剧,隧洞衬砌混凝土抗压强度会进一步降低,可能导致供水隧洞破坏。

3 侵蚀对供水隧洞安全运行的影响

3.1 侵蚀特征

隧洞侵蚀主要包括砂质侵蚀和泥质侵蚀。砂质侵蚀物呈黄白色,锤击有较深凹痕,手捏砂感明显,用力可捏散,粒径主要集中在0.25~2 mm。泥质侵蚀物呈棕黄色,结构松散,土质很轻,干缩现象非常明显,稍有扰动表面便会有水析出,粒径均小于0.075 mm。

以100 m洞段为1个统计单元,供水隧洞侵蚀点数分布情况如图4所示。检查发现隧洞侵蚀点共65个,每100 m洞段平均侵蚀点数为1.51个,标准差为1.62,距隧洞进水口2800~2900 m处侵蚀点数最多。

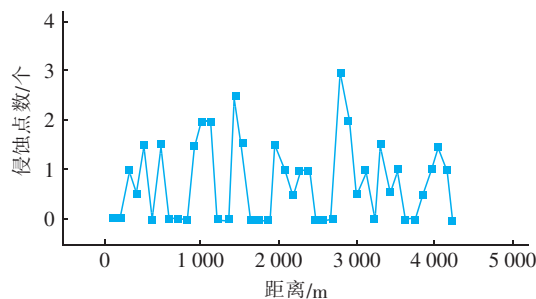


图4 侵蚀分布

Fig. 4 Erosion distribution

3.2 侵蚀与脱空的相关性

采用 pulseEKKO PRO 型地质雷达对供水隧洞脱空进行探测,探测中心以里程轮跟踪记录里程。

探测方式为剖面法,天线中心频率为1 000 MHz,天线叠加次数为8次,时窗为25 ns。地质雷达测线布置方式为:①顺水流方向每隔100 m(第1段为82 m,最后一段为65 m)布置一条测线,左右墙及拱顶中心位置各布置43条测线,共布置129条测线,左右墙测线分别布置于距底板1.4 m和1.6 m处,拱顶测线布置于拱顶中心线位置处;②在典型裂缝位置布置61条测线,左右墙裂缝位置水平方向顺水流方向检测、垂直方向则从上往下检测,拱顶裂缝处顺水流方向检测、垂直水流方向则从右往左检测。

将探测的地质雷达数据进行反滤波、偏移和增强处理,供水隧洞典型地质雷达探测图像如图5所示,时窗为2~9 ns区域连续的双曲线弯拱为供水隧洞衬砌钢筋。位置在8.5~9.4 m、时窗为9~16 ns区域波形较为杂乱,同相轴中断推测为脱空。根据地质雷达探测结果推测供水隧洞脱空分布情况如图6所示。供水隧洞脱空总数为34个,每100 m洞段平均脱空数为0.81个,在距隧洞进水口2 800~2 900 m处脱空数最多。

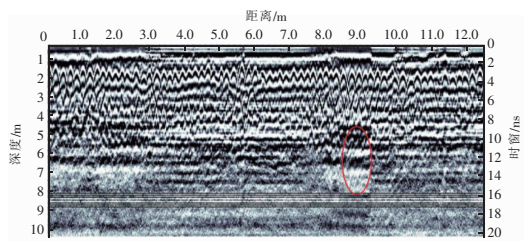


图5 典型地质雷达探测图像

Fig.5 Typical ground penetrating radar image

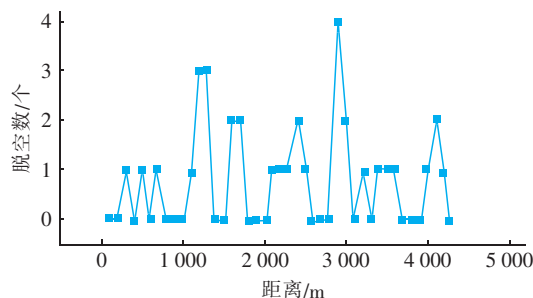


图6 隧洞脱空分布

Fig.6 Distribution of cavity

侵蚀数与供水隧洞脱空数的关系曲线如图7所示。随侵蚀数增多,该洞段脱空数整体呈增加趋势,这主要是由于隧洞接缝、裂缝外的全风化、强风化围岩或软弱夹层中的细小颗粒随渗(漏)水逐步侵蚀入隧洞内,导致隧洞脱空。侵蚀是引起隧洞脱空的

主要因素,但是施工质量缺陷、设计不合理以及地质运动等均可能导致脱空,故部分脱空位置并未发生侵蚀。

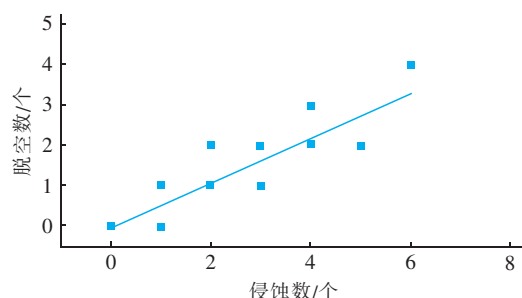


图7 侵蚀与脱空的关系曲线

Fig.7 Relationship between erosion and cavity

对供水隧洞脱空数与侵蚀数进行Spearman相关分析,其相关系数为0.930,说明隧洞脱空数与侵蚀数存在显著正相关关系,侵蚀是导致该供水隧洞脱空的主要原因。显著性值 <0.001 ,说明隧洞脱空与侵蚀之间的相关关系具有统计学意义。

3.3 侵蚀对供水隧洞影响评价

侵蚀是导致该供水隧洞脱空的主要原因,隧洞脱空将引起围岩松弛,塑性区扩大,从而导致隧洞变形增大直至破坏。目前隧洞脱空对隧洞安全性态影响尚无成熟规范,郑刚等^[16]将隧洞发生坍塌破坏分为漏水、土体侵蚀和漏水漏砂3个阶段。当隧洞绝对干燥、无渗水漏水、隧洞围岩稳定时,评价为工程安全;当隧洞出现渗水、滴漏和线漏等漏水现象,但围岩稳定且隧洞外细颗粒未进入隧洞时,评价为工程维护;当隧洞外细颗粒随漏水侵入隧洞内,产生局部脱空,但短时间内细颗粒并不会大量流失时,评价为工程预警;当地下水携带大量土体不断涌入隧洞,围岩失稳,评价为工程事故。该间歇性运行供水隧洞可评价为工程预警,隧洞外细颗粒虽随漏水侵入隧洞内,并导致了局部脱空,但短时间内细颗粒并不会大量流失,暂不影响工程整体安全。但随细颗粒逐步流失,隧洞受力调整,局部变形增大,可能导致水土流失加剧,从而导致隧洞变形增大甚至破坏。

4 结论

采用现场调查、取样测试和无损探测等手段分析了溶蚀与侵蚀对间歇性运行供水隧洞的影响。主要结论如下:

① 混凝土抗压强度与溶蚀呈显著负相关,溶蚀是导致该供水隧洞混凝土强度降低的主要因素,

隧洞混凝土抗压强度存在空间变异性的主要原因为溶蚀导致混凝土强度降低。

② 该间歇性运行供水隧洞侵蚀主要包括砂质侵蚀和泥质侵蚀,侵蚀是引起隧洞脱空的主要因素,脱空与侵蚀呈显著正相关。

③ 当前溶蚀与侵蚀引起的混凝土强度损失与隧洞脱空对供水隧洞有一定影响,但尚不影响其整体结构稳定。

参考文献:

- [1] 吕全伟,王东,何鹏,等. 宝珠寺水电站坝基析出物的聚类分析[J]. 中国农村水利水电,2013(8):155-157,165.
LÜ Quanwei, WANG Dong, HE Peng, *et al.* Cluster analysis of precipitates from dam foundation of Baozhushi Hydropower Station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(8):155-157,165 (in Chinese).
- [2] 王海龙,郭崇波,邹道勤,等. 侵蚀性水作用下混凝土的钙溶蚀模型[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):26-31.
WANG Hailong, GUO Chongbo, ZOU Daoqin, *et al.* Modelling of calcium leaching of concrete subjected to aggressive water [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):26-31 (in Chinese).
- [3] 罗黎,王健平,宋汉周. 基于渗流动态的富春江大坝基础运行性态分析评价[J]. 水电能源科学,2016,34(2):60-64.
LUO Li, WANG Jianping, SONG Hanzhou. Analysis and evaluation of Fuchunjiang dam foundation operating performance based on seepage dynamic [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2):60-64 (in Chinese).
- [4] 胡江,马福恒,李子阳,等. 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):87-94.
HU Jiang, MA Fuheng, LI Ziyang, *et al.* Review of spatial variability of mechanical properties of concrete dams impacted by leakage dissolution[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4):87-94 (in Chinese).
- [5] 邢林生,周建波. 在役混凝土坝耐久性研探[J]. 大坝与安全,2012(2):9-18.
XING Linsheng, ZHOU Jianbo. The durability of concrete dams in service[J]. Dam & Safety, 2012(2):9-18 (in Chinese).
- [6] 张志敏,龙建辉,周子东. 某 RCC 坝体廊道大量白色异物析出成因及对坝体的危害分析[J]. 太原理工大学学报,2013,44(6):776-780.
ZHANG Zhimin, LONG Jianhui, ZHOU Zidong. The precipitation causes and hazard analysis of a large number of white foreign body in RCC dams [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(6):776-780 (in Chinese).
- [7] 邢林生,徐世元. 古田溪三级大坝老化病害及其治理[J]. 水力发电,2005,31(9):69-71,74.
XING Linsheng, XU Shiyan. Deterioration and its treatment of Gutianxi cascade-III dam [J]. Water Power, 2005, 31(9):69-71,74.
- [8] 孙景来,刘保国,储昭飞,等. 隧道坍塌事故类型划分及其主要特征[J]. 中国铁道科学,2018,39(6):44-51.
SUN Jinglai, LIU Baoguo, CHU Zhaoifei, *et al.* Type classification and main characteristics of tunnel collapses [J]. China Railway Science, 2018, 39(6):44-51 (in Chinese).
- [9] 赵阳川,李亚林,卫敏,等. 隧道衬砌脱空及厚度不足的原因分析与防治措施初探[J]. 现代隧道技术,2019,56(2):40-43.
ZHAO Yangchuan, LI Yalin, WEI Min, *et al.* Discussion on causes of and preventive measures against tunnel lining voids and inadequate thickness [J]. Chinese Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2):40-43 (in Chinese).
- [10] 张冬梅,杜伟伟,高程鹏. 间断级配砂土中管线破损引起的渗流侵蚀模型试验[J]. 岩土工程学报,2018,40(11):2129-2135.
ZHANG Dongmei, DU Weiwei, GAO Chengpeng. Model test of seepage erosion caused by pipeline damage in gap grading sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):2129-2135 (in Chinese).
- [11] 张顶立,张素磊,房倩,等. 铁路运营隧道衬砌背后接触状态及其分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(2):217-224.
ZHANG Dingli, ZHANG Sulei, FANG Qian, *et al.* Study of contact state behind tunnel lining in process of railway operation and its analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):217-224 (in Chinese).
- [12] 杨吴礼,闵博,张素磊,等. 公路隧道衬砌背后空洞成因及规律研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),

- 2014,10(2):153-154.
- YANG Wuli, MIN Bo, ZHANG Sulei, *et al.* Study on the causes and regularities of void behind lining of highway tunnel [J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2014, 10(2): 153-154 (in Chinese).
- [13] 王立川, 周东伟, 吴剑, 等. 铁路隧道复合衬砌脱空的危害分析与防治[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 56-63.
- WANG Lichuan, ZHOU Dongwei, WU Jian, *et al.* The hazard analysis and the treating measures of the voids in the composite linings of railway tunnels [J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 56-63 (in Chinese).
- [14] 郑刚, 戴轩, 张晓双. 地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2458-2471.
- ZHENG Gang, DAI Xuan, ZHANG Xiaoshuang. Experimental study and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2458-2471 (in Chinese).
- [15] 郑刚, 戴轩. 灾害环境下隧道不同部位漏水对于周围土体及平行隧道的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3196-3207.
- ZHENG Gang, DAI Xuan. Influence of different leakage positions of tunnel on surrounding soils and parallel tunnel under disaster environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3196-3207 (in Chinese).
- [16] 郑刚, 姚杰, 戴轩, 等. 不同管片张开量下隧道外水土流失规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 969-977.
- ZHENG Gang, YAO Jie, DAI Xuan, *et al.* Experimental study on sand inflow under different opening widths of shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 969-977 (in Chinese).
- [17] 叶艺超, 彭立敏, 雷明锋, 等. 不同脱空模式下隧道结构安全状态分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2875-2883.
- YE Yichao, PENG Limin, LEI Mingfeng, *et al.* Safety analysis of tunnel structures with different patterns of voids behind lining [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2875-2883 (in Chinese).
- [18] 刘润红, 姜勇, 常斌, 等. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6881-6893.
- LIU Runhong, JIANG Yong, CHANG Bin, *et al.* Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6881-6893 (in Chinese).
- 作者简介: 廖定佳(1969-), 男, 广东深圳人, 博士, 高级工程师, 长期从事水务工程的建设及运行管理工作。
E-mail: liaodingjia@163.com
收稿日期: 2020-08-26
修回日期: 2020-11-18

(编辑: 任莹莹)

完善水利基础设施网络
增强水安全保障能力