

文章编号: 1674—8247(2023)04—0035—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.04.007

溶岩与非溶岩地区隧道排水系统堵塞机理

曹艳妮

(中国邮政集团有限公司西安市分公司, 西安 710068)

摘 要: 岩溶与非岩溶地区隧道排水系统频繁发生堵塞灾害。溶岩地区排水系统堵塞物质主要为白色碳酸钙(CaCO_3),而非溶岩地区排水系统堵塞物质为黑色土颗粒。以法国 Meyssiez 隧道排水系统堵塞灾害为依托,通过测试隧道围岩孔隙比 e 和地下水电导率 EC ,分析了岩溶地区隧道排水系统的堵塞机理。试验结果表明:(1)溶岩地区排水系统堵塞主要由以下过程引起:①雨水入渗地下后,溶解了围岩内部的碳酸钙,形成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子;②含有 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子的地下水通过排水孔流入隧道内部的排水系统。由于气温和气压等外部因素改变, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子反向沉积形成固态 CaCO_3 结晶,最终引发排水系统堵塞;(2)非溶岩地区隧道排水系统堵塞灾害由以下过程引起:①地下水流作用引发围岩内部细小土颗粒迁移流失;②流失的细小土颗粒通过排水孔进入隧道内部排水系统,而后逐步堆积,最终引发排水系统堵塞。

关键词: 溶岩与非溶岩地区;隧道排水系统堵塞;碳酸钙溶解;土颗粒迁移

中图分类号: U453.6

文献标志码: A

Blockage Mechanism of Tunnel Drainage System in Karst and Non-karst Areas

CAO Yanni

(Xi'an Branch of China Post Group Corporation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Tunnel drainage systems in karst and non-karst areas are frequently blocked. The plugging material of the drainage system in the karst area is mainly white calcium carbonate (CaCO_3), while that in the non-karst area are black soil particles. Based on the engineering disaster of drainage system blockage in the Meyssiez Tunnel in France, this paper analyzed the blocking mechanism of tunnel drainage system in karst areas by testing the void ratio of surrounding rock and the electrical conductivity groundwater. The test results indicate that: (1) the blockage of the drainage system in the karst area is mainly caused by two processes: ① after rainwater infiltrates underground, calcium carbonate inside the surrounding rock is dissolved to form Ca^{2+} and HCO_3^- ions; ② groundwater containing Ca^{2+} and HCO_3^- ions flows into the drainage system inside the tunnel through drainage holes. Due to the change of external factors such as air temperature and pressure, Ca^{2+} and HCO_3^- ions are reversely deposited to form solid CaCO_3 crystals, which eventually cause blockage of the drainage system. (2) The blocking disaster of the tunnel drainage system in non-karst areas is caused by the following processes: ① migration and loss of fine soil particles inside surrounding rocks due to groundwater flow; ② the lost fine soil particles enter the internal drainage system of the tunnel through drainage holes, then gradually accumulate, and finally cause the blockage of the drainage system.

Key words: karst and non-karst areas; tunnel drainage system blockage; calcium carbonate dissolution; soil particle migration

收稿日期: 2022-05-21

作者简介: 曹艳妮(1993-),女,工程师。

引文格式: 曹艳妮. 溶岩与非溶岩地区隧道排水系统堵塞机理[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 35-39.

CAO Yanni. Blockage Mechanism of Tunnel Drainage System in Karst and Non-karst Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 35-39.

我国幅员辽阔,隧道修建过程中不可避免地会遇到各种复杂地质情况,例如在云南、贵州及广西等溶岩发育极其强烈的地区(以下简称“岩溶地区”)常遇到溶岩地质背景,而在上海、江苏、浙江、山东及福建等省份(非溶岩地区)常遭遇复杂的软黏土地质背景^[1-3]。

为降低地下水位作用在隧道衬砌上的水压、改善隧道排水情况,会在衬砌内部布设大量排水孔及在隧道内部修筑排水沟。营运期间隧道排水系统(排水孔和内部排水沟)频繁遭遇堵塞灾害。在岩溶地区,隧道排水孔和排水沟内部堵塞物主要为白色碳酸钙(CaCO_3)。在非溶岩地区,隧道排水系统堵塞物主要为黑色土颗粒。隧道排水系统发生严重堵塞时,地下水不能从排水孔流入隧道内部排水沟,导致地下水位升高,提高作用在混凝土衬砌上的水压力,进而增加隧道衬砌失效风险。此外,排水孔畅通而隧道内部排水沟堵塞亦会导致工程灾害,如2017年法国Marseille隧道内部排水沟发生碳酸钙堵塞,地下水越过排水沟,流入附近的电缆沟以及高速铁路路轨,导致高速铁路信号暂停和12条高速铁路延误^[4]。

综上所述,排水系统严重堵塞会造成一系列问题,明晰堵塞灾害发生机制具有重要工程意义。基于以上背景,本文分别研究了岩溶与非岩溶地区系统堵塞机理。研究成果可为排水系统堵塞灾害的后续治理提供支撑。

1 溶岩地区隧道排水系统堵塞机理

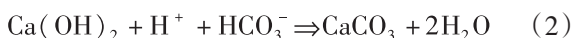
1.1 溶岩地区隧道排水堵塞机理提出

针对岩溶地区隧道排水系统碳酸钙堵塞灾害,周卓^[5]、翟民^[6]及蒋雅君^[7]认为隧道排水堵塞与隧道衬砌和注浆材料相关,即:

(1)当含有 H^+ 和 HCO_3^- 离子的水分进入隧道周围后,会溶解注浆材料和混凝土衬砌里的氢氧化钙,形成碳酸钙结晶,如式(1)、式(2)所示。

(2)碳酸钙进一步溶解,生成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,如式(3)所示。

(3)含有 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子的地下水经排水孔流入隧道内部排水沟。由于空气压力以及温度等外部环境的改变, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子会反向沉积,形成 CaCO_3 晶体,如式(3)所示,最终堵塞排水孔和排水沟。



然而,溶岩和非溶岩地区隧道建设中采用相同的

注浆和混凝土衬砌材料,溶岩地区排水系统堵塞物质主要为白色碳酸钙,而非岩溶地区堵塞物质主要为黑色土颗粒。这种工程现象表明岩溶地区隧道排水系统堵塞与注浆和混凝土衬砌材料关系不大。考虑到工程地质背景,推测岩溶地区隧道排水系统碳酸钙堵塞灾害与地质围岩(富含碳酸钙)密切相关,即:

(1)雨水入渗进入隧道周围后,溶解围岩内部碳酸钙,形成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 。这个溶解过程会增加围岩孔隙比 e 和地下水电导率 EC 。

(2)含有 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子的地下水经过排水孔,流入隧道内部排水沟。由于外部环境改变, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子会反向沉积,形成 CaCO_3 晶体,最终堵塞排水孔和隧道排水沟。

本文以法国Meyssiez隧道排水系统堵塞灾害为例,通过分析围岩孔隙比 e 和地下水电导率 EC 变化,来研究溶岩地区隧道排水系统的堵塞机理。

1.2 Meyssiez隧道排水堵塞机理研究

1.2.1 隧道地质环境

Meyssiez隧道位于法国Meyssiez镇,修建于1990—1993年。隧道围岩由上覆杂填土层、Mill砂石层、Mill岩石层及Mill砂石层组成,如图1所示。上覆杂填土层分布厚度与位置有关;山顶处杂填土厚度为12.7 m,而山脚处为5 m。下部3种土层(Mill砂石层、Mill岩石层及Mill砂石层)分布厚度也随着位置的变化而变化,且均富含 CaCO_3 。

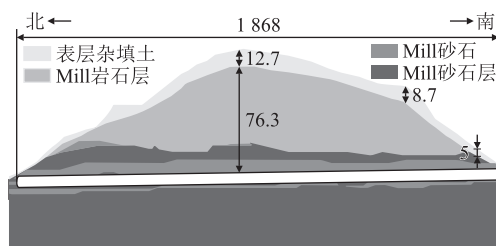


图1 Meyssiez隧道周围地质情况图(m)

Meyssiez隧道支护结构由混凝土衬砌和水泥注浆材料组成,厚度分别为55 cm和25 cm。为减小地下水压对隧道衬砌安全性的影响,隧道衬砌内部布置了一系列排水孔,与隧道内排水沟连通。

Meyssiez隧道已经运营了30年(1993—2023年),在此期间隧道排水系统一直发生碳酸钙(CaCO_3)堵塞灾害。考虑到隧道衬砌和注浆材料厚度、堵塞灾害持续时间及隧道衬砌未见劣化漏水的良好运营状态,可认为堵塞灾害主要由围岩中碳酸钙的溶解再反向沉积引起,而与隧道衬砌和注浆材料关系不大。

1.2.2 室内试验材料与方法

距离 Meyssiez 隧道南部 50 m 位置处,从地面往下钻取了现场原状土样,直径 10 cm,总长 20 m。取样结束后利用所获钻孔定期测试地下水位,并采取地下水样。基于 ASTM 规范测试了所取水样的电导率 EC 。

针对不同深度处土样,基于土工试验规范测试了其天然含水率 w 、天然密度 ρ 及比重 G_s ,以此计算了土体孔隙比 e 。利用 AFNRO 规范测试了土样的碳酸钙含量 w_{caT} 。土样基本参数与碳酸钙含量关系如图 2 所示。

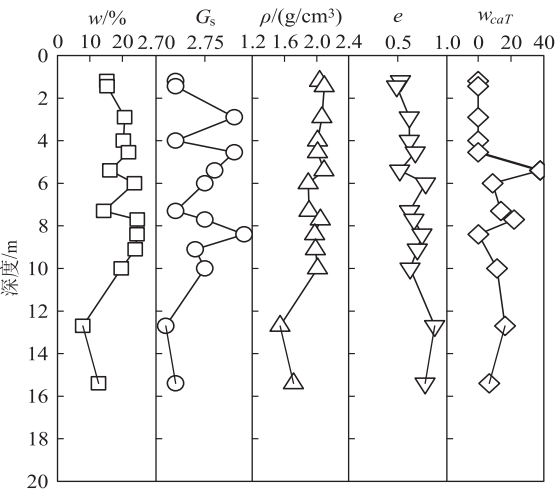


图2 土样基本参数与碳酸钙含量图

1.2.3 围岩孔隙比变化

土样孔隙比与碳酸钙含量的关系如图 3 所示,考虑到 5 m 以上深度范围内土层是杂填土层,土体内不含碳酸钙,在隧道修建和运行过程中不存在碳酸钙溶解情况,因此,未对该深度范围内的试验数据进行分析。

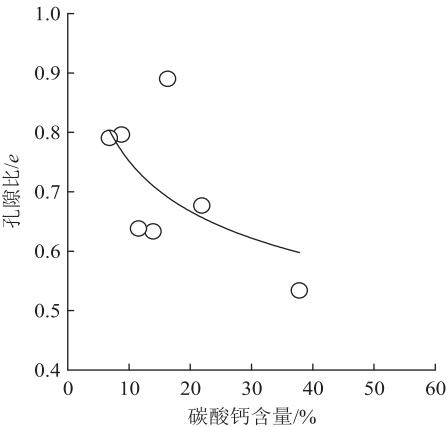


图3 孔隙比与碳酸钙含量的关系图

由图 3 可知,随着围岩中碳酸钙的溶解和溶出(含量减小),围岩试样的总孔隙比 e 呈逐渐增加趋势,这在一定程度上表明隧道排水系统堵塞主要由围岩中碳酸钙溶解再反向沉积引起的。

1.2.4 地下水位与电导率 EC

地下水位、电导率 EC 与取样日期之间的关系如图 4 所示。由图 4 可知,所有地下水样的电导率在 440 ~ 660 us/cm 范围内,均大于雨水的电导率实测值 (45 us/cm),这表明雨水流入地下水后,溶解了围岩中的碳酸钙,生成了大量的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,导致地下水电导率升高。

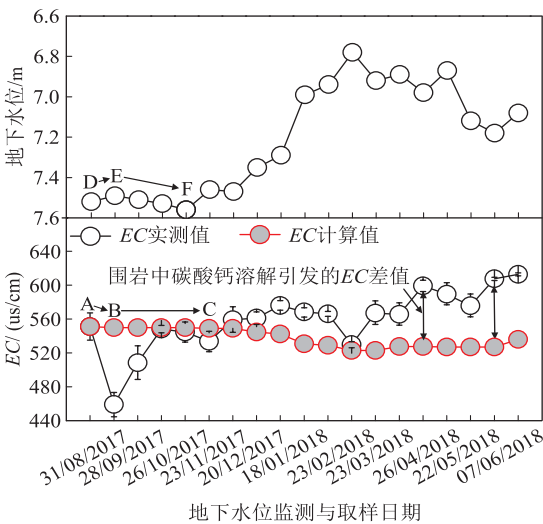


图4 地下水位、实测与计算的电导率图

地下水实测电导率与地下水位的变化规律不一致。事实上地下水 EC 值的变化受到两方面影响:地下水位上升表明雨水入渗量增加。由于雨水 EC 值较低(45 us/cm),雨水流入地下水后,会降低地下水的电导率 EC ;同时,雨水(含有 H^+ 和 HCO_3^-)入渗至地下水内部后,会与围岩中碳酸钙发生化学反应,形成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,进而提高地下水 EC 值。因此,地下水 EC 值变化的本质是一个物理 - 化学反应相互竞争后的结果。

为更加合理地分析地下水 EC 值变化,本文提出了一个仅考虑雨水入渗影响(物理过程)而不考虑化学过程的地下水 EC 值物理计算模型,如图 5 所示。在这个模型中以起始取样时对应的地下水位(图 4 中 D 点)和 EC 值(A 点)为起始点。由于其对应的起始地下水高度(20 m - 7.53 m = 12.47 m)和 EC 值已知,因而可计算出起始阶段地下水 EC 值的分子部分(us)。当地下水位从 D 点上升至 E 点时,流入的雨水体积和 us 可以确定,因而可以计算出仅考虑物理过程的地下

水 EC 理论值,其对应与图中的 B 点。当地下水位从 E 点下降至 F 点时,此时没有雨水入渗,仅存在地下水流失,因而地下水 EC 理论值保持恒值(即 B 点和 C 点处的 EC 理论值不变)。采用这种方法,本文计算了仅考虑物理过程的地下水 EC 理论值,即图 4 中灰色数据点。由图 4 可知,绝大部分地下水的 EC 实测值大于 EC 理论值,这表明围岩与地下水之间发生了化学作用(即围岩中碳酸钙发生了溶解)。需要说明的是,图 4 部分数据点 EC 实测值低于 EC 理论计算值,这可能是由复杂现场水文地质环境所引起。

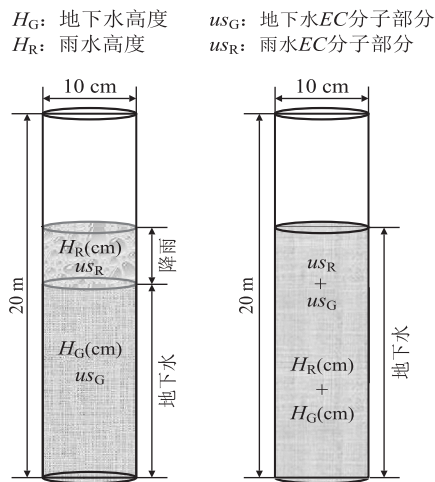


图5 考虑降雨影响的 EC 值计算模型图

此外,图 4 还表明在较大 EC 实测值阶段,2 个电导率之间的差值越大。事实上这个差值代表着碳酸钙溶解反应的激烈程度。基于电导率值,本文提出了碳酸钙溶解度的计算如式(4)所示,试验结果如图 6 所示。

$$D_E = \frac{EC_{\text{实测}} - EC_{\text{理论}}}{EC_{\text{理论}}} \tag{4}$$

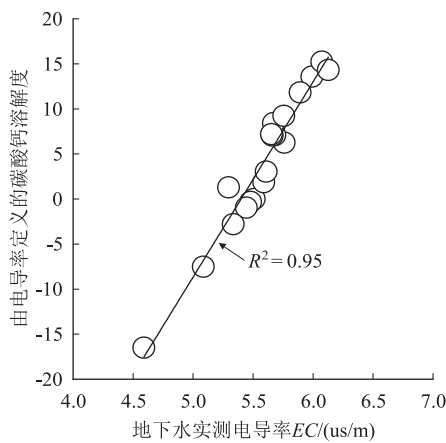


图6 碳酸钙溶解度与实测电导率间的关系图

由图 6 可知,随着实测电导率增加,碳酸钙溶解度亦逐渐增加。此外,良好的线性关系表明在进行现场监测时可采用地下水电导率 EC 指标,用以分析围岩中碳酸钙的溶解程度。

由试验结果可知,地下水与围岩中的碳酸钙发生了溶解反应,其会增加围岩的孔隙比和提高地下水电导率 EC 。以上结果表明岩溶地区隧道排水的碳酸钙堵塞灾害主要与地质围岩密切相关。

2 非岩溶区隧道排水系统堵塞机理

以上论述表明岩溶地区隧道排水堵塞灾害的本质机理是一个化学过程:水分入渗围岩周围后,围岩内部碳酸钙发生了溶解,生成了 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,此后含有 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子的地下水经过排水孔流入隧道内部排水沟。由于空气压力以及温度等外部环境的改变, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子会反向反应,形成 $CaCO_3$ 晶体,最终堵塞排水系统。

非溶岩地区隧道排水系统亦会频繁发生堵塞灾害,堵塞物质主要为黑色土颗粒。借用岩溶地区隧道排水系统堵塞案例的分析方法,可认为非溶岩地区隧道排水堵塞灾害是由以下过程引起:(1)地下水流作用使得围岩内部细小土颗粒发生迁移流失,这个过程会增加围岩的孔隙比和渗透系数;(2)流失的细小土颗粒通过排水孔进入隧道内部的排水系统,而后逐步堆积,最终引发排水系统堵塞,其本质是一个物理迁移过程。需要说明的是,该机理需基于具体工程案例对其进行深入研究。

3 结论

溶岩和非溶岩地区隧道排水系统频繁发生堵塞灾害。为此本文对堵塞机理进行了系统研究,得出结论如下:

岩溶地区隧道排水系统堵塞灾害与注浆和混凝土衬砌材料关系不大,而与围岩内部的碳酸钙溶解密切相关。含有 H^+ 和 HCO_3^- 离子的雨水入渗后溶解了围岩内部的碳酸钙,生成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,此过程增加了围岩的孔隙比。此后含有 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子的地下水经过排水孔流入隧道内部排水沟。由于空气压力以及温度等外部环境的改变, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子反向反应,形成 $CaCO_3$ 晶体,最终堵塞排水排水系统。

围岩内部的碳酸钙溶解后,生成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子,其会增加地下水的电导率 EC 。本文基于 Meyssiez 隧道排水系统堵塞案例,提出了围岩内部碳酸钙溶解

度公式。

非溶岩地区隧道排水系统堵塞灾害主要由以下过程引起:①地下水流作用使围岩内部细小土颗粒发生迁移流失,这个过程会增加围岩的孔隙比和渗透系数;②流失的细小土颗粒通过排水孔进入隧道内部的排水系统,而后逐步堆积,最终引发排水系统堵塞,其本质是一个物理迁移过程。在后续研究中,建议开展室内模型试验,以研究不同围岩特性(孔隙比或干密度)、水头高度或流速情况下围岩内部的物质运移规律,以及不同情况下土颗粒的沉积速率。

参考文献:

- [1] 于清浩. 厦门翔安海底隧道防排水技术及防排水系统堵塞可能性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
YU Qinghao. Waterproof and Drainage Technology of Xiamen Xiang'an Submarine Tunnel and Study on the Possibility of Blockage of Waterproof and Drainage System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [2] 张亚琦. 综合管廊排水管道堵塞识别理论与试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
ZHANG Yaqi. Theoretical and Experimental Study on Identification of Drainage Pipeline Blockage in Utility Tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [3] 漆江, 谭展. 浅谈公路隧道排水设计与隧道路基病害防治[J]. 价值工程, 2020, 39(4): 76-78.
QI Jiang, TAN Zhan. Remark on the Drainage Design of Highway Tunnel and the Prevention and Control of Roadbed Damage [J]. Value Engineering, 2020, 39(4): 76-78.
- [4] DIETZEL M, RINDER T, LEIS A, et al. Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems-Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action [J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2008, 1(4): 271-278.
- [5] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHOU Zhuo. Study on Mechanism of Tunnel Drainage Pipe Blocked by Groundwater Seepage Crystallization in Karst Area and Its Treatment Suggestions [D]. Xi'an: Changan University, 2015.
- [6] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
ZHAI Ming. Study on Crystallization Blocking Law of Tunnel Drainage System in Limestone Area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [7] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, et al. Investigation and Discussion on Blocking Mechanism of Drainage System in Karst Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 131-135.
- [8] 李准, 张穷. 浮动平均值在大变形隧道定额测定与分析中的应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 60-63.
LI Zhun, ZHANG Qiong. Application of Floating Average Value in Quota Determination and Analysis of Large Deformation Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 60-63.
- [9] 胡兴华. 建设工程工期索赔问题研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
HU Xinghua. Research on the Claim of Construction Period [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- [10] 李准, 张路刚. 西部山区铁路隧道涌水抽排施工方案探讨[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 88-92.
LI Zhun, ZHANG Lugang. Discussion on Tunnel Water-burst Pumping and Drainage Construction Scheme of Western Mountain Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 88-92.
- [11] 漆江, 谭展. 浅谈公路隧道排水设计与隧道路基病害防治[J]. 价值工程, 2020, 39(4): 76-78.
QI Jiang, TAN Zhan. Remark on the Drainage Design of Highway Tunnel and the Prevention and Control of Roadbed Damage [J]. Value Engineering, 2020, 39(4): 76-78.
- [12] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
ZHAI Ming. Study on Crystallization Blocking Law of Tunnel Drainage System in Limestone Area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [13] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, et al. Investigation and Discussion on Blocking Mechanism of Drainage System in Karst Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 131-135.
- [14] 于清浩. 厦门翔安海底隧道防排水技术及防排水系统堵塞可能性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
YU Qinghao. Waterproof and Drainage Technology of Xiamen Xiang'an Submarine Tunnel and Study on the Possibility of Blockage of Waterproof and Drainage System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [15] 张亚琦. 综合管廊排水管道堵塞识别理论与试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
ZHANG Yaqi. Theoretical and Experimental Study on Identification of Drainage Pipeline Blockage in Utility Tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [16] 郭晓晔, 刘晓渡. 基于定额借用情况下工程计价软件计算间接费的探讨[J]. 工程造价管理, 2018(1): 69-72.
GUO Xiaoye, LIU Xiaodu. Discussion on Calculation of Indirect Costs of Engineering Pricing Software Based on Quota Borrowing [J]. Engineering Cost Management, 2018(1): 69-72.
- [17] 国铁科法[2017]31号, 铁路基本建设工程设计概(预)算费用定