

基于TAP模型的深层隧道水力学流态分析

滕益莉¹, 董进波^{1,2}, 汤燕¹, 曹冬青¹

(1. 江苏满江春城市规划设计研究有限责任公司, 江苏 镇江 212001; 2. 镇江市水业有限责任公司, 江苏 镇江 212001)

摘要: 以镇江金山湖多功能大口径管道系统为研究对象, 利用TAP(Transient Analysis Program)模型对深层排水隧道内的水力学流态进行模拟分析, 重点研究浪涌现象的成因及其危害。通过模拟不同降雨工况下的水流状态, 发现浪涌现象主要表现为负压、气穴和掺气等, 尤其是在50年一遇的3h降雨工况下, 隧道内出现较大的负压和水面震荡; 此外, 末端泵站的启停水位设置不合理, 导致泵组启停过于频繁, 可能对水泵造成损害。通过对竖井尺寸的敏感性分析, 发现较大的竖井直径有助于减少浪涌现象的发生。

关键词: 深层排水隧道; 浪涌现象; TAP模型; 水力学流态; 合流制溢流污染; 泵站优化; 竖井设计

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0156-05

Analysis on Hydraulic Flow Pattern of Deep Tunnels Based on TAP Model

TENG Yili¹, DONG Jinbo^{1,2}, TANG Yan¹, CAO Dongqing¹

(1. Jiangsu Manjiangchun Urban Planning and Design Research Co., Ltd., Zhenjiang 212000, China; 2. Zhenjiang Water Service Co., Ltd., Zhenjiang 212008, China)

Abstract: Taking the multifunctional large-diameter pipeline system of Jinshan Lake in Zhenjiang as the research object, the TAP (Transient Analysis Program) model is utilized to simulate and analyze the hydraulic flow patterns in the deep drainage tunnel, and the focus is on studying the causes and hazards of surge phenomena. By simulating the water flow conditions under various rainfall scenarios, it is found that the surge phenomena primarily manifest as the negative pressure, cavitation and aeration. Especially under the 3-hour rainfall condition that occurs once every 50 years, the significant negative pressure and water surface oscillations are observed in the tunnel. Additionally, the inappropriate start-stop water level settings in the terminal pumping station will lead to excessively frequent pump start and stop, which may cause damage to the water pump. Through the sensitivity analysis of shaft dimensions, it is found that the larger shaft diameter helps to reduce the occurrence of surge phenomena.

Keywords: deep drainage tunnel; surge phenomena; TAP (transient analysis program) model; hydraulic flow regime; combined sewer overflow (CSO) pollution; pumping station optimization; shaft design

0 引言

近年来,我国陆续出台了《城市黑臭水体整治工作指南》、《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021)》、《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》、《关于加强城市生活污水管网建设和运行维护的通知》等一系列文件,逐步明确了对合流制溢流污染控制要求,全国各城市也在不断推进海绵城市建设、城市黑臭水体治理和城市污水处理提质增效等工作。传统的雨污分流工作,用地性质

复杂,涉及单位多,工程量大,施工周期长,投资费用高,见效慢,难以实现彻底的雨污分流。而调蓄池占地面积大,在密集的城区难以实施。为了解决合流制溢流污染问题,提升河道水质,控制下河污染物,深层排水隧道系统逐渐成为了国内外许多城市的选择^[1]。深层排水隧道系统通过在地下深层空间建设大口径管道,能够有效收集和调蓄合流制溢流污水及初期雨水,并在强降雨时与浅层排涝系统协同工作,提升区域的排涝能力,保证城区的排涝安全。深隧排水系统在国外已有多年实践应用经验,并与其他低影响开发措施形成了较为完整的城市雨洪管理模式^[2]。

然而,国内对于深隧排水系统的研究还处于初步阶段,主要集中在案例分析、方案比选、规划设计、

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 2023年度江苏省建设系统科技项目(2023ZD010)

作者简介: 滕益莉(1991—),女,硕士,工程师,从事城市雨洪控制利用及排水工程规划设计工作。

调度运行和效果评价等方面^[1-6]。深层排水隧道系统在运行过程中,尤其是在暴雨期间,进水跌落必然会产生高速水流,从而出现掺气、雾化、流激振动和空化空蚀等许多特殊水流现象^[7],容易产生浪涌(瞬变流)现象。浪涌现象不仅会影响隧道的水力安全,发生气爆,对隧道结构及竖井造成破坏,甚至引发严重的事故^[8-9]。如今,深层大管径在我国得到广泛应用,如武汉大东湖深隧系统^[10]、广州东濠深隧排水系统^[11]、上海苏州河深隧系统^[12]。因此,对深层隧道内的水力学流态进行分析,并提出相应的改进措施,具有重要的现实意义。

本研究以镇江金山湖多功能大口径管道系统为研究对象,利用TAP(transient analysis program)模型对隧道内的水力学流态进行模拟分析,重点研究浪涌现象的成因及其危害,并提出相应的改进措施,以期为深层排水隧道系统的设计和运行提供科学依据。

1 工程概况

镇江沿金山湖多功能大口径管道通过“深层截流主干管+末端调蓄及雨水处理”的建设,对现状排水系统进行有效补强,以解决老城区合流截流制溢流污染问题,实现金山湖水质改善、排水防涝标准提升。镇江市沿金山湖多功能大口径管道工程由过程管网、末端多功能泵站及处理设备组成。

1.1 过程管网

过程管网系统改造和建设主要包括深层截流主干管和浅层管网建设。

(1)多功能大口径截流主干管建设。沿金山湖敷设多功能大口径截流主干管,对区域范围内沿线雨水排水口初期雨水以及泵站CSO溢流进行截流。截流主干管包括沿金山湖近岸、过金山湖以及征润州岛上顶管,采用DN4000管道,管径直径4.00 m,长度约6.4 km,坡度1‰。共设置竖井7座,其中自西向东段结合现状排水泵站设置竖井5座,包括江南泵站节点、迎江路泵站节点、平政桥泵站节点、解放路泵站节点、江滨泵站节点,井深为20~30 m,全部采用折板消能竖井的型式。

(2)浅层管网建设。新建3条浅层管网,收集区域内的初期雨水,结合末端雨水泵站及处理设施,削减服务范围内的合流制溢流污染。

1.2 末端处理

新建多功能雨水泵站、雨水处理站和生态湿地,

对截流主干管系统的初雨进行提升处理。

(1)末端多功能雨水泵站。该泵站用于截流主干管系统的初雨提升处理、暴雨排涝及晴天雨水放空处理。

(2)雨水处理站与生态湿地。采用雨水处理站和垂直流人工湿地,主要用于降雨时净化大口径管道输送初期雨水。

1.3 运行模式

镇江市沿金山湖多功能大口径管道工程系统示意图见图1。

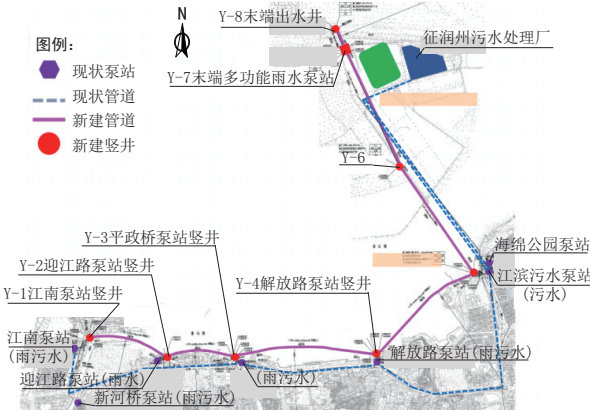


图1 镇江市沿金山湖多功能大口径管道工程系统示意图

初雨(0~8.4 mm)工况下,片区雨污水通过截流管进入污水系统,再进入征润州污水处理厂进行处理。

小到中雨(8.4~15 mm)及中到大雨(15~60 mm)工况下,片区内雨污水经过格栅处理后通过浅层管网汇入节点竖井,通过大口径系统主干管传输至新建末端多功能雨水泵站,提升至雨水处理站进行处理。

暴雨(85~220 mm)工况下,末端多功能雨水泵站进入排涝模式,此时,浅层管网的后雨直接排入附近河道。

2 浪涌的危害与成因

2.1 浪涌的危害

浪涌,也称为瞬变流,是指水流在短时间内出现超出稳定值的峰值。在深层排水隧道系统中,浪涌现象可能导致以下危害:

(1)隧道结构破坏。浪涌现象会导致隧道内的压力、流速和水头发生瞬时剧烈变化,可能对隧道的内衬结构造成破坏,尤其是在负压区域,可能导致管片开裂或脱落。

(2)水流不稳定。浪涌现象伴随着喷涌、水面震

荡、回冲等现象,导致隧道内的水流不稳定,影响系统的正常运行。

(3)气穴和气蚀。浪涌现象可能导致气穴和气蚀的产生,尤其是在隧道内的空气腔被压缩时,高压气体的释放可能引发气爆水柱,对浅层系统和地表构筑物造成破坏。

2.2 浪涌的成因

浪涌现象的成因复杂,主要与以下几个因素有关:

(1)空腔的形成。当隧道被快速充满时,隧道下游的水流与连接管道之间的连接处会形成空腔。空腔向上游移动,反射的压力波会在隧道内产生反冲作用,导致浪涌现象(见图2)。

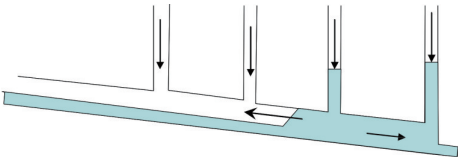


图2 在快速充满水的隧道中空腔的形成

(2)空气的夹带。在竖井处,尤其是跌水竖井处,可能会产生过量的空气夹带。夹带的气泡在隧道顶部合并形成气穴,气穴通过逸出点时,可能导致压强增加或强制逸出,形成气爆水柱(见图3)。

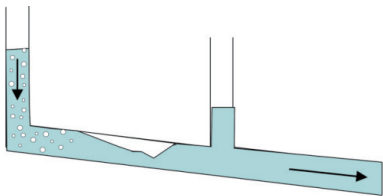


图3 由于过量气体夹带而形成的气穴

(3)通风不良。隧道系统如果没有足够的空气排放点,空气可能会被困在管网内,压力不断增加,导致高压气体通过反喷作用或气爆水柱逸出,引发浪涌现象。

(4)气穴的产生。上游来水的迅速增加,超过了下游隧道的重力流承载能力,隧道内的气体未能及时排放,形成空腔,导致气穴的产生(见图4)。

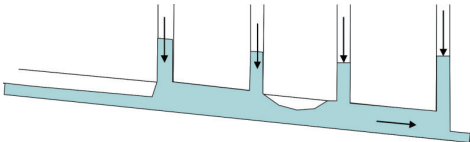


图4 由于高速水流而造成的气穴现象

3 不同工况的深层管道流态

多功能大口径截流主干管设计进水水量大、埋深和水头落差大,沿程汇流过程中会出现非满流、无压满流、压力流等不同工况,自由表面流和压力流的

交替出现,空气夹带进入隧洞,将导致各种瞬变流工况甚至浪涌。利用TAP模型软件,分析快速填充雨季状况与稳定状态下雨季状况所产生的浪涌现象对隧道及构筑物的影响,然后根据基础模型的模拟结果,提出相关的优化方案。由于末端多功能雨水泵站的输送能力只有30 m³/s,所以对进入多功能大口径截流主干管的流量峰值作了限制。各入流竖井峰值流量分配见表1。

表1 各入流竖井峰值流量分配表

标号	入流竖井节点	峰值流量分配/(m ³ ·s ⁻¹)
Y1	江南泵站节点	2.47
Y2	迎江路泵站节点	2.20
Y3	平政桥泵站节点	10.27
Y4	解放路泵站节点	5.45
Y5	江滨泵站节点	9.62
总计		30.0

3.1 快速填充雨季状况(3 h,50 年一遇)

TAP模型模拟结果显示,在50年一遇的3 h降雨工况下,隧道内的水流状态最为不利,在不同时段出现了负压、气穴、掺气和水面震荡等现象,如图5至图9所示。

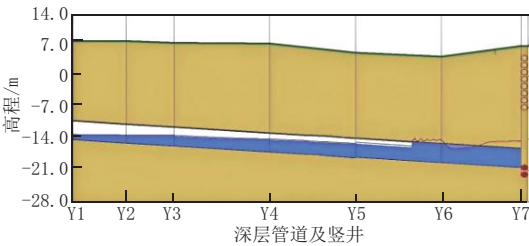


图5 1:34:05多功能大口径截流主干管沿程水头线

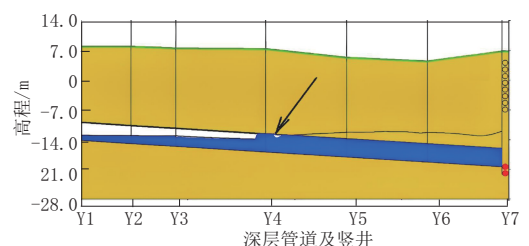


图6 1:40:43多功能大口径截流主干管沿程水头线

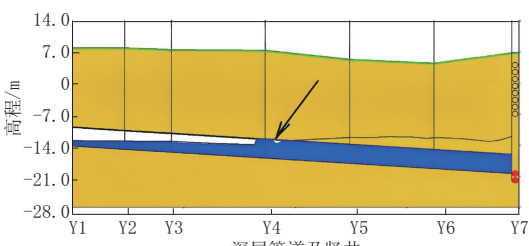


图7 1:51:53多功能大口径截流主干管沿程水头线

(1)负压现象。由图5可知,在1:34:05时,系统中产生了负压。通过观察模型模拟动态结果发现,在末端多功能泵站处形成负压(小于1.0 m),并向上

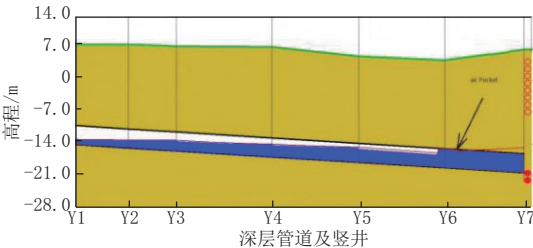


图8 1:33:09 多功能大口径截流主干管沿程水头线

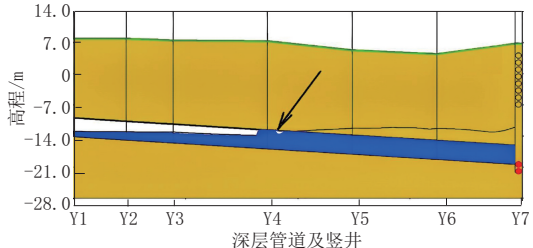


图9 1:40:03 多功能大口径截流主干管沿程水头线

游方向发展。但是这种负压很快在下一个时刻遇到竖井时消失。由图6可见,在1:40:43时,在4号竖井与5号竖井之间再次出现负压(小于2.0 m),并向上迅速发展,在遇到4号竖井时消失。由图7可见,在1:51:53时,在2号竖井与3号竖井之间的隧道内出现负压段,而且负压较大,其压力水头为-3.0 m,这也是所有工况中出现的最大负压值,表明该深隧段为浪涌高危区。这种负压有可能对管片内衬造成破坏性影响,但是考虑到这一过程出现的概率很小,仅在50 a一遇3 h短历时出现,而且持续时间很短,不到5 s,所以仍然在可容忍范围之内。

(2)气穴和掺气现象。由图8、图9可见,在1:33:09和1:40:03时刻,在泵站和6号竖井、4号竖井与5号竖井之间均有气穴形成并迅速向上游传播,在遇到上游下一个竖井后释放并消失。持续时间短,没有破坏性的现象发生。

(3)水面震荡。图5显示在1:34:05时刻,在5号竖井与6号竖井之间水面出现震荡,水位变幅较大,流态较为不利。

图10展示了系统中大口径管道在模拟过程中可能出现的最不利水头线(最大水头线),结果显示最不利水头线均未超出地面标高。证明每个竖井的入流量在竖井和泵站的设计能力范围内,不会发生大口径溢流和超出地面现象。

3.2 稳定状态雨季状况(24 h,1 年一遇)

在1年一遇的24 h降雨工况下,隧道内的水流状态相对平稳,未出现明显的浪涌现象。然而,模型模拟结果显示,过小启停水位间隔会导致泵组启停过于频繁(见图11至图14),可能对水泵造成损害。

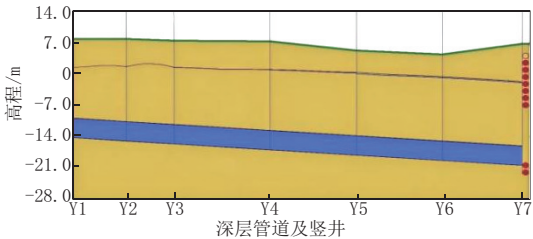


图10 多功能大口径截流主干管沿程水头线最大水头

建议将泵组的启停水位设置在0.5~0.75 m,以减少泵组的频繁启停。

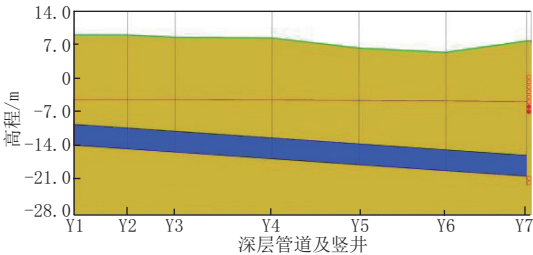


图11 20 h 30 min 36 s,第3台泵关闭

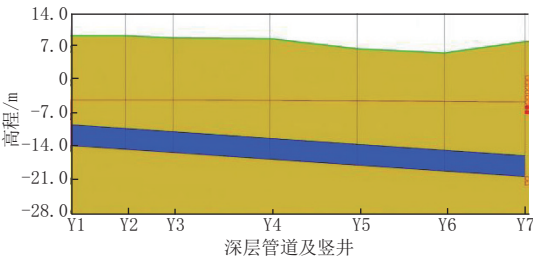


图12 20 h 31 min 0.12 s,第3台泵开启

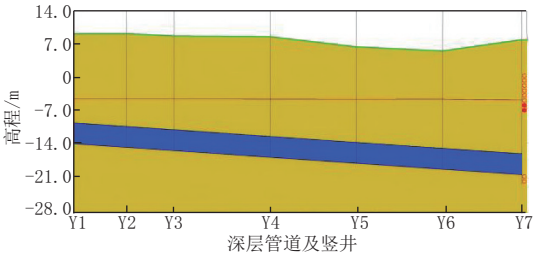


图13 20 h 32 min 0.67 s,第3台泵关闭

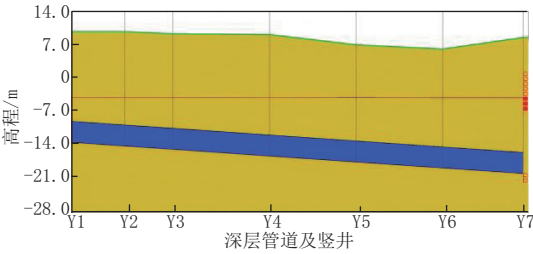


图14 20 h 32 min 37 s,第3台泵开启

3.3 竖井尺寸的敏感性分析

通过对不同尺寸的竖井进行敏感性分析,发现竖井直径对隧道内的水流状态有显著影响。

50年一遇的3 h降雨工况下,当竖井直径为6 m时,2号竖井与3号竖井之间的隧道内出现负压段,而且负压较大,其压力水头为-5.0 m;竖井直径增加

到9 m时,2号竖井与3号竖井之间隧道内的负压为-3.0 m,水位变幅和震荡现象更加明显(见图15);当竖井直径增加到12 m时,2号竖井与3号竖井之间隧道内的负压为-2.2 m,水位变幅和震荡现象仍然存在;竖井直径增加到16 m时,2号竖井与3号竖井之间隧道内的负压为-2.1 m,水位变幅和震荡现象变小(见图16)。Lewis等^[13]指出,靠近主隧道的竖井直径扩大能够显著减少空气诱发气爆事件的可能。因此,建议在设计竖井时,尽量采用较大的直径,以减少浪涌现象的发生。

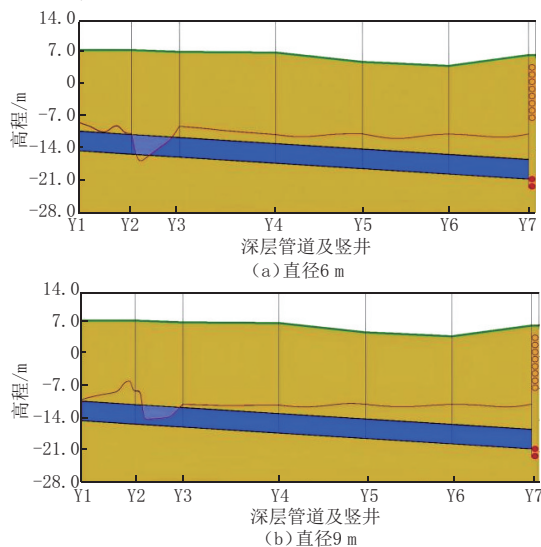


图15 竖井直径为6、9 m时多功能大口径截流主干管沿程水头线

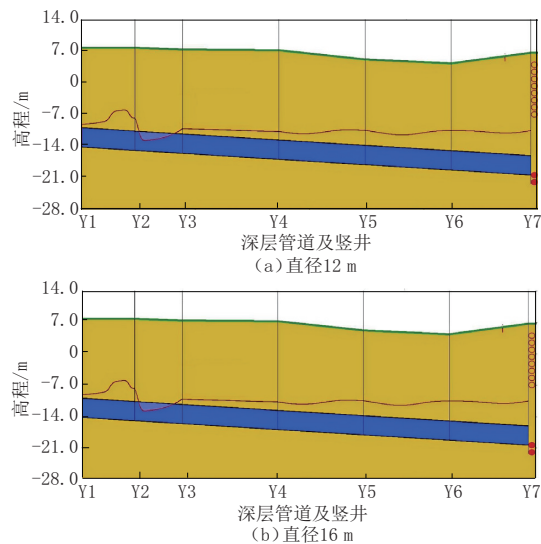


图16 竖井直径为12、16 m时多功能大口径截流主干管沿程水头线

4 结 语

(1)在极端不利情况下,如50 a一遇的3 h降雨工况下,隧道内会出现负压、气穴和掺气等不利现象,但这些现象的持续时间较短,且负压值不超过3 m,不会对钢筋混凝土管壁造成破坏性影响。

(2)在稳定流状态下,过小启停水位间隔会导致泵组启停过于频繁,建议将启停水位间隔增加到0.5~0.75 m。

(3)竖井直径对隧道内的水流状态具有显著影响,较大的竖井直径有助于减少浪涌现象的发生。建议在设计竖井时,尽量采用较大的直径。

(4)为有效的控制浪涌带来的危害,可考虑在竖井中增加通风设备,以解决管道填充过程因空气置换导致的空气压力问题。

(5)需要在入流竖井节点设置流量和液位检测设备,根据实际运行的流量与液位来控制系统的稳定运行,防止出现不利的水力流态。

(6)通过进一步的研究和优化,深层排水隧道系统的设计和运行将更加安全可靠,能够有效应对极端降雨事件,减少城市内涝和合流制溢流污染的发生。

参考文献:

- [1] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等.隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J].中国给水排水,2013,29(24):35-40;48.
- [2] WAHL D E, HEATH J R, LEE W P. Design of a storage tunnel control strategy to eliminate CSO and reduce stormwater discharges to South Boston beaches[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2006, 2006(4): 226-250.
- [3] 何贞俊,王斌,杨聿,等.市政排水系统中竖井研究及应用进展[J].中国给水排水,2017(10):49-53.
- [4] 黄明利,张志恩,谭忠盛.我国城市防洪排涝深层隧道建设模式[J].土木工程学报,2017(增刊1):76-81.
- [5] 刘家宏,夏霖,王浩,等.城市深隧排水系统典型案例剖析[J].科学通报,2017,62(27):3269-3276.
- [6] 杨庆华,杨尧远,杨乾,等.折板型竖井结构设计参数优化[J].长江科学院院报,2020,37(12):72-80.
- [7] 吴持恭.高速水力学学科发展综述[J].成都科技大学学报,1987,35(3):12-15.
- [8] ESTRADA O, POTHOF I, MARILÉS O A F, et al. Failure of a drainage tunnel caused by an entrapped air pocket[J]. Urban Water Journal, 2015, 12(6): 446-454.
- [9] ZOU F, HICKS F E. Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(6): 625-634.
- [10] 曾磊,周毅,王小虎,等.大东湖核心区污水深隧智慧管控平台的设计与应用[J].给水排水,2022,48(6):151-156.
- [11] 王建平,何贞俊,潘文慰,等.广州深隧排水系统东濠涌试验段物理模型试验研究[J].中国给水排水,2020,36(23):108-112.
- [12] 汉京超,徐文征,曹晶.苏州河段深层排水调蓄管道系统工程建设的必要性分析[J].城市道桥与防洪,2019(2):105-108.
- [13] LEWIS J W, WRIGHT S J, VASCONCELOS J G. Physical investigation of discrete air pocket migration and release in CSO storage tunnels[C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Water Resources and Environmental Engineering. New York: ASCE, 2009: 6520-6527.