

基于 TAP 模型的前海-南山排水深隧浪涌分析

杨园晶¹, 黄 鹤¹, 孙海峰¹, 黄 瑜², 王 醒¹

[1.中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000; 2.艾奕康咨询(深圳)有限公司,广东 深圳 518001]

摘 要:采用 TAP(Transient Analysis Program)模型模拟了深圳市前海-南山排水深隧入流过程,通过对设计标准、超标及事故工况的情景模拟,分析系统涌浪产生的风险,并提出了控制涌浪的相关措施。研究表明,在 50 a 一遇和 100 a 一遇设计降雨情景下,系统最高总水头线处于地面之下,系统采用的大直径竖井结构和增设通风竖井,能有效控制浪涌的影响。

关键词:深隧排水系统;浪涌;TAP 模型

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0144-04

0 引言

近年来,合流制溢流带来的和初期雨水导致的污染问题制约了城市水环境质量的进一步提高^[1]。深层隧道排水系统能很好地破解这一难题,这种埋设在地下空间的大型、特大型排水隧道,能够有效调蓄雨水和排水、控制合流溢流污染^[2]。但是,深层隧道排水系统的入流过程是一个复杂的流体动力学过程,有时入流过快,深隧中的气体不能及时排除,会产生间歇喷涌现象,大量水体从竖井中喷出,危害附近行人及车辆^[3]。在深隧的设计、施工、运行及维护的各个环节,应确保主隧道、竖井、提升泵等关键部位通风排气通畅,需避免包气引起的间歇喷涌现象、控制流体状态的瞬变等^[4]。

瞬态分析程序(Transient Analysis Program, TAP)由 Applied Science Inc.公司开发,用于模拟在水流快速充满隧道的情况下,浪涌及相关现象产生时的水流状况。TAP 利用有限元分析方法解决动态、一维流动连续方程和动量问题,实现了在急变流情况下,对明渠和管道中水流的各个瞬态的分析。可以对明渠或有压管中由于闸门的启闭升降,泵的开停及管道迅速充水而造成的明渠中的水面波动和有压管的压力波进行模拟。

采用 TAP 模型对深圳前海-南山排水深隧进行浪涌分析,通过对设计标准、超标及事故工况的

情景模拟,分析浪涌的产生原因和过程,用以指导工程设计和运行管理。

1 工程概况

深圳前海-南山深层排水隧道系统位于前海片区,隧洞主体线路布置位于月亮湾大道西侧,起点为关口渠,终点为铲湾河,沿途分别收集上游南山区三条城市主干渠关口渠、郑宝坑渠、桂庙渠的雨水,总流域面积 8.15 km²。前海-南山排水深隧系统主要包括一条长约 4 km、内径为 6 m 的深层主隧道,3 条深层支隧、3 条浅层支隧、3 座预处理站、3 座进水竖井、3 座旋流跌水竖井、4 座主隧结合井,1 座排水泵站,见图 1。

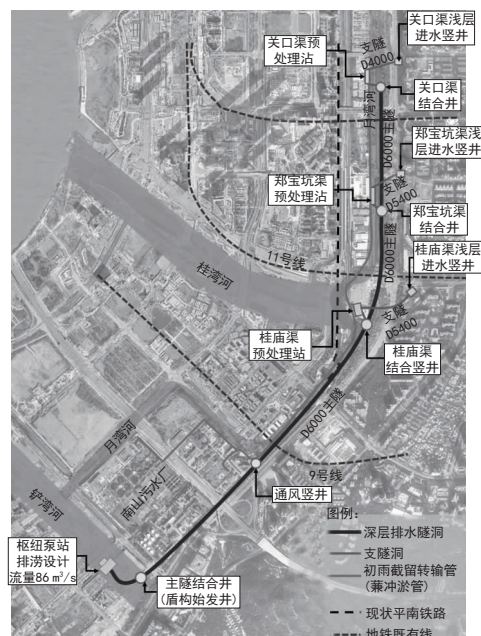


图 1 前海-南山排水深隧系统工程平面图

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 中建股份科技研发资助课题(CSCEC-2021-Z-33)

作者简介: 杨园晶(1983—),女,硕士,高级工程师,从事城市洪涝控制与水污染防治理论与技术工作。

深圳市前海-南山排水深隧是前海南山区域内涝防治和溢流污染控制体系的重要组成部分,主要目的是将服务范围内涝水提升至铲湾河水廊道排放,以及调蓄初(小)雨并提升至南山污水厂处理后排放,解决雨季南山片区排涝、前海片区控污的问题。

系统正常运行工况主要有三种,一是旱季及污染浓度最高的初小雨(截流倍数 $n=2$)经过预处理站内排污泵提升,转输到南山污水厂,通过生物处理后排放;二是随着降雨继续增大,后续雨水可利用隧洞容积来调蓄,调蓄后通过排水泵站内初雨水泵转输到南山污水厂经处理后排海;三是降雨继续增大,隧洞内水位超过排涝泵启动水位时进入排涝工况,涝水由排水泵站排涝泵提升至铲湾河。

2 拟边界条件

2.1 模型构建

本文所述模型范围包括:浅层进水竖井、浅层支隧、预处理站(含进水闸、沉砂池及旋流跌水竖井)、深层支隧、主隧结合井、排涝泵站、月湾河水廊道以及铲湾河水廊道,各部分结构组成尺寸见表 1,模型结构示意图见图 2。

排涝泵站设置排涝泵组、初雨泵组及中间泵组。排涝泵组由 8 台排涝泵组成,扬程为 9.6 m,每台设计流量为 $10.75\text{ m}^3/\text{s}$,启泵水位为 -11.0 m ,设计水位为 -5.5 m 。初雨泵组共设置 4 台水泵,扬程为 46 m,每台设计流量为 $1\,388\text{ m}^3/\text{h}$,最低水位为 -40.0 m 、最高水位为 -29.0 m ,中间泵组共设置 2 台泵,扬程为 34 m,每台设计流量为 $4\,700\text{ m}^3/\text{h}$,启泵水位为 -29.0 m 、最高水位为 -11.0 m 。

2.2 模拟规则

2.2.1 模型简化

TAP 模型无法模拟根据水位依次启动水泵,因此将水泵模拟运行规则简化为根据固定时间依次启动,假定每组中的各台水泵逐个开启,水泵启停的时间间隔为 20 min,延迟时间为 60 s。

2.2.2 模拟工况

本文采用 TAP 模型模拟设计标准降雨(50 a 一遇)、超标降雨(100 a 一遇)以及水泵故障入流过程,研究相应情景下,前海-南山排水深隧系统的浪涌产生的风险及原因,并提出消除浪涌现象的优化设计措施。

2.2.3 入流数据

进入隧道的流量受闸门开闭控制,入流过程曲

表 1 系统组成结构尺寸

项目	几何特征尺寸 /m
关口渠浅层进水竖井	$8\times 15.5\times 13.5$
郑宝坑渠浅层进水竖井	$\Phi 8.0, H\,11.7$
桂庙渠浅层进水竖井	$10\times 12.6\times 10.6$
关口渠浅层支隧	内径 4.0 m, L184, i 0.005
郑宝坑渠浅层支隧	内径 5.4 m, L 196, i 0.005
桂庙渠浅层支隧	内径 5.4 m, L 413, i 0.005
关口渠预处理站	进水闸(2.5×4.0) 沉砂池(90×10×13.9) 旋流竖井($\Phi 3.0, H\,35.5$)
郑宝坑预处理站	进水闸(3.0×4.0) 沉砂池(92.5×11.5×13.9) 旋流竖井($\Phi 4.2, H\,37.2$)
桂庙预处理站	进水闸(3.0×5.0) 沉砂池(10.0×46.5×15.4) 旋流竖井($\Phi 3.8, H\,38.0$)
关口渠浅层支隧	内径 4.0 m, L26, i 0.002
郑宝坑渠浅层支隧	内径 5.4 m, L47, i 0.002
桂庙渠浅层支隧	内径 5.4 m, L12, i 0.002
关口渠主隧接驳井	$\Phi 10.0, H\,40.05$
郑宝坑渠主隧接驳井	$\Phi 10.0, H\,41.55$
桂庙渠主隧接驳井	$\Phi 10.0, H\,42.30$
主隧结合井	$\Phi 10.0, H\,44.35$
深层主隧	内径 4.0 m, L754; 内径 6.0 m, L2786; 内径 7.0 m, L199;
排水泵站	主泵井 $42.8\times 22.0\times 52.0$ 初雨泵区 $22.0\times 12.0\times 48.0$ 排涝泵区 $29.0\times 20.0\times 23.0$ 前池 100×50 (矩形区)+ $\Phi 100$ (半圆区)深 10.0

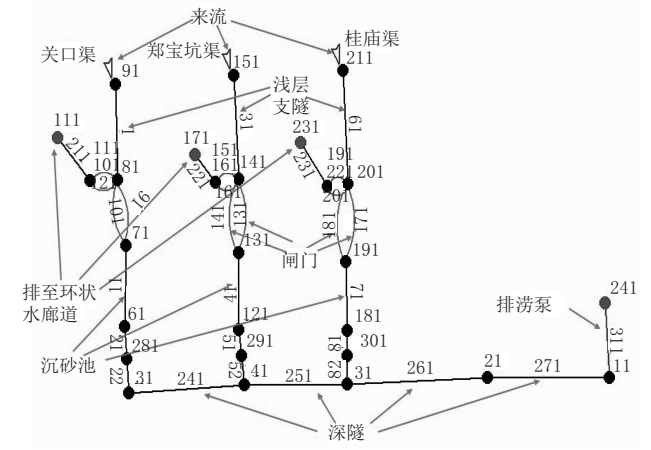


图 2 模型建立示意

线由系统管网 MIKE Urban 模型模拟结果导出,空气通过跌水竖井进入系统。模型采用 50 a 和 100 a 重现期降雨模拟,分别导出 3 个进水口流量曲线,详见图 3、图 4。

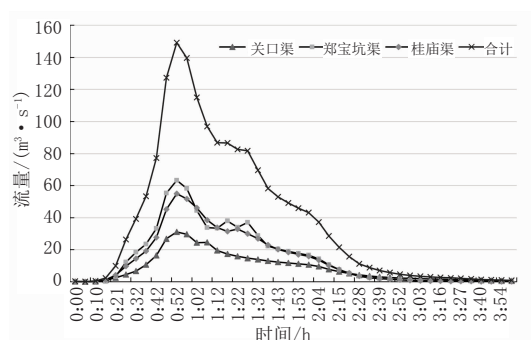


图3 50 a一遇降雨流量过程曲线

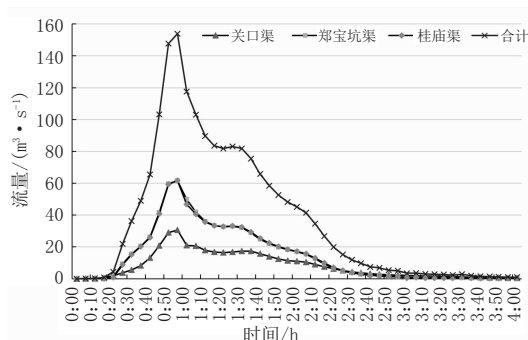


图4 100 a一遇降雨流量过程曲线

3 模拟结果与分析

3.1 50 a一遇降雨工况

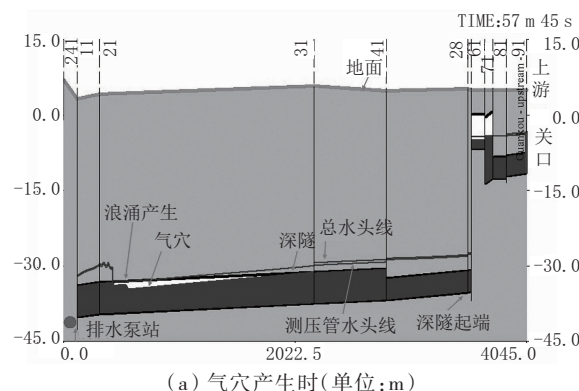
图5显示了在50 a一遇降雨入流过程中的水压线变化。模拟结果发现，在50 a一遇降雨入流过程中，在57:45分时刻时，会有一个空腔和气穴形成，空腔形成于泵站处，并向上游方向发展，见图5(a)。困于其中的气穴将会发生迁移，如果移动到竖井处将产生气爆水柱(geysering)。

图5(b)为系统负压峰值时的水压线，由于水压的波动，系统内会形成负压，负压峰值出现在浪涌和气穴产生后1 min 21 s(59:06时刻)，压力水头为-6 m(以隧道顶部为0 m基准)。负压的产生对隧洞的结构衬砌有破坏作用，影响隧道结构的耐久性，因此需要采取相应的措施予以消除。

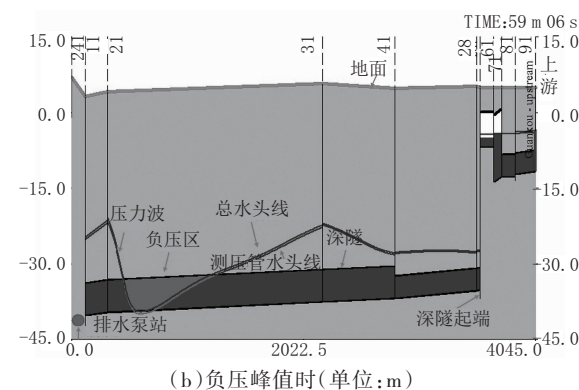
图5(c)显示了隧道在模拟过程中可能出现的最不利水头线(最大水头线)，结果表明系统各个部分的最不利水头线均未超出地面标高。观察各入流节点的最高测压管水头，均低于上游浅层渠道设计水位，说明在50 a一遇降雨入流过程中，系统实现了浅层入流渠道的自由流出。

3.2 100a一遇降雨工况

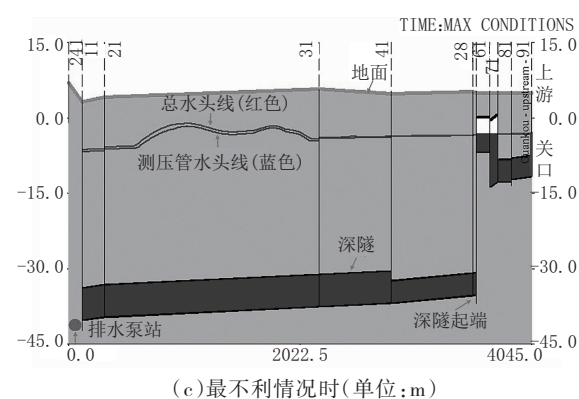
由于系统中100 a一遇降雨和50 a一遇降雨的入流流量相比只有少量增大，因此整体模拟结果与



(a) 气穴产生时(单位:m)



(b) 负压峰值时(单位:m)



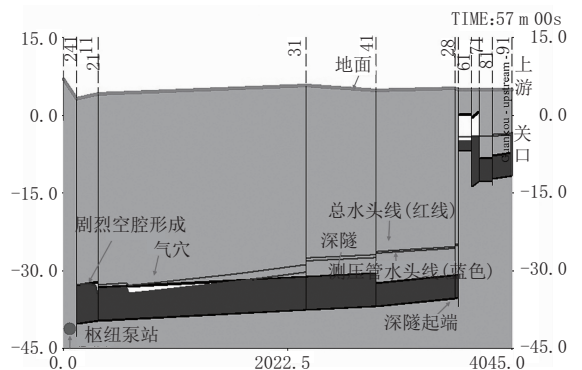
(c) 最不利情况时(单位:m)

图5 隧道水头线变化(50 a一遇降雨)

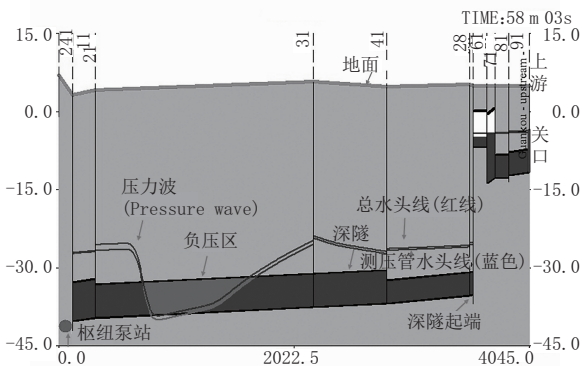
50 a一遇降雨情景结果相似。模拟结果表明，在100 a一遇降雨情景下，系统在57:00时刻产生气穴，见图6(a)。浪涌在泵站处产生，形成气穴，并向上游方向发展。系统内会形成负压，负压峰值出现在浪涌和气穴产生后1 min 03 s(58:03时刻)，压力水头为-6 m，见图6(b)。

图6(c)为100 a一遇降雨入流过程中，深隧系统的最大水压线，结果表明最大水压线均未超出地面标高，各入流节点的最高测压管水头虽略高于50 a一遇降雨情况，但仍低于上游浅层渠道设计水位，说明在100 a一遇降雨入流过程中，系统也可实现浅层入流渠道的自由流出。

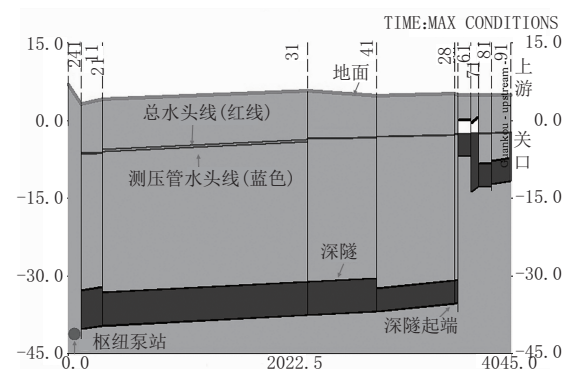
TAP模拟总体结果表明，隧道规模可满足设计标准(50 a一遇)过流能力要求，对100 a一遇的超标降雨也有一定的应对能力。针对系统出现的气穴



(a)气穴产生时(单位:m)



(b)负压峰值时(单位:m)



(c)最不利情况时(单位:m)

图6 隧道水头线变化(100 a一遇降雨)

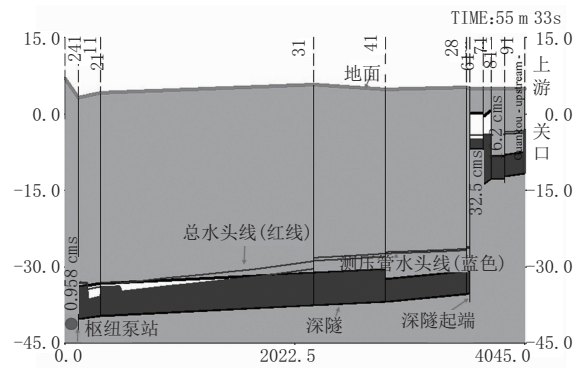
现象和消除隧洞内负压作用,拟在桂庙结合竖井与主隧结合井之间增设一座内径3m的通风竖井。

3.3 泵站故障工况评估

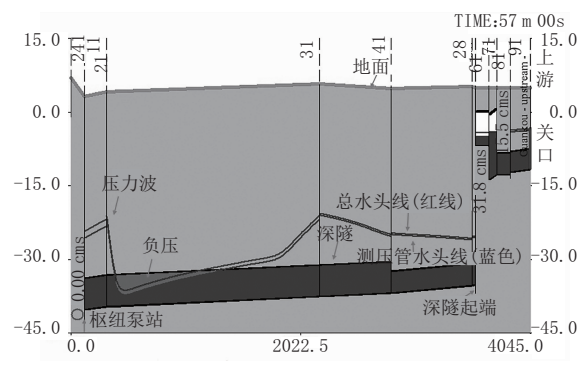
对泵站突发完全故障时进行模拟,评估所造成的后果。针对降雨初始时和峰值流量时两种情景发生故障进行评估。

3.3.1 泵站初始启动时发生故障

这种事故情况模拟的是水位达到隧道顶部时泵站发生故障。根据泵站运行规则,此时只有初小雨泵运行。图7(a)显示了泵站故障,流量降至0之前时刻的水位情况,模拟表明,随着气穴从下游边界处反射,产生了压力波与负压见图7(b),然而,由于只有初小雨泵在运行,泵站前池拥有足够的存储空间,因此突然停泵对深隧的浪涌现象不会产生严重的影响。



(a)气穴产生时(单位:m)



(b)负压峰值时(单位:m)

图7 降雨初始时泵站出现故障的水头线

3.3.2 峰值流量时泵站发生故障

第二种情景为在洪峰流量附近时泵站运行出现故障。图8所示为泵站发生故障前一刻的深隧水位。此时,隧道中的压力波已经减弱,水位已达到稳定状态。由于前池较大,突然停泵并不会造成浪涌现象,水将平稳的充满深隧。

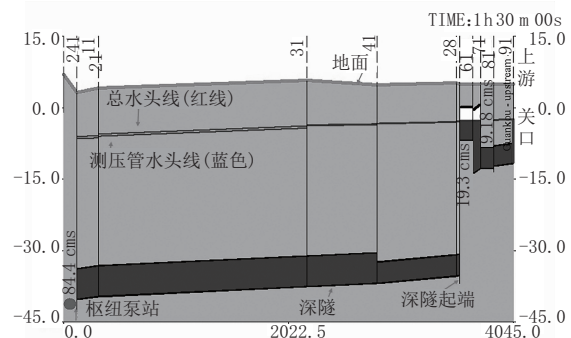


图8 峰值流量时泵站出现故障的最高水头线(单位:m)

4 结论

通过TAP模型对前海-南山排水深隧系统方案进行了分析校核,模拟结果表明:

一是隧道规模可满足设计标准(50 a一遇)过流能力要求,对100 a一遇的超标降雨也有一定的应对能力。系统有可能出现比较剧烈的浪涌、气穴和压力波,需要通过增设通风竖井,消除产生的气穴和负压。

(下转第150页)

水系统的服务面积约为 13.5 km^2 , 且每个排水系统都有相应的雨量计进行雨量记录。

降雨空间分布以 5 个排水系统的雨量计按泰森多边形的原理进行降雨空间分布范围的划分, 确保所划定的降雨空间区域内的降雨采用区域内的雨量计数据, 每个雨量计覆盖的平均范围为 2.7 km^2 , 如图 3 所示。同时, 选择其中一个雨量计数据作为龙华区域 5 个排水系统的降雨进行对比研究。



图 3 5 个雨量计所涵盖的范围示意图

模拟结果表明, 考虑降雨空间分布因素的模型在水位率定时更加接近实测水位, 且整体趋势也与实测水位较为一致; 未考虑降雨空间分布因素的模型在水位率定时其水位峰值偏离监测水位更大一些, 且整体趋势相对监测水位在模拟末段存在一定的偏差, 如图 4 所示。

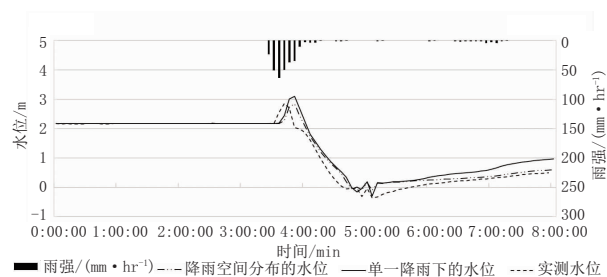


图 4 实测水位、单一降雨和考虑降雨空间分布的模拟水位图

3 结 论

本文根据排水系统水力模型导则编制过程中所遇到的问题, 对集水区和降雨的排水系统水力模型进行分析研究, 研究表明在模型构建时, 集水区面积不应过大, 最好不要超过 2 km^2 以确保模型模拟的准确性; 同时, 对于排水系统面积过大或者多个排水系统时, 应考虑降雨空间分布的影响, 如有条件时可以考虑多个雨量计数据进行降雨空间范围分布的划分。

参考文献:

- [1] GB 50014—2021, 室外排水设计标准[S].
- [2] Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Sewer Systems[S].
- [3] T/CECS 647—2019, 城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程[S].
- [4] Stormwater Drainage Manual[S].

(上接第 147 页)

二是对于泵站突发故障情景, 在降雨初始时发生故障, 会产生较大的浪涌和气穴, 但泵站前池提供了足够的存储空间, 水位波动在较低位置, 不会产生很大影响。在洪峰流量时发生故障, 由于隧道中的水位已经达到稳定状态, 因此不会产生浪涌现象。

参考文献:

- [1] 刘家宏, 夏霖, 王浩, 等. 城市深隧排水系统典型案例[J]. 科学通报, 2017, 62(27): 3269–3276.

- [2] 门绚, 李冬, 张杰. 国内外深隧排水系统建设状况及其启示[J]. 河北工业科技, 2015, 32(5): 438–442.
- [3] Politano M, Odgaard A J, Klecan W. Case Study: Numerical Evaluation of Hydraulic Transients in a Combined Sewer Overflow Tunnel System [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2007, 133 (10): 1103–1110.
- [4] YOVANNI A. CATANO-LOPERA, TALIA E. TOKYAY, J. EZEQUIEL MARTIN, et al. Modeling of a Transient Event in the Tunnel and Reservoir Plan System in Chicago, Illinois [J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 140(9): 5014005.1–5014005.12.