

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.001

深层隧道与浅层管渠排水系统调度策略研究

周午阳, 王广华, 张 文, 苟德菲, 孙志民, 陈贻龙, 任鹏飞
(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘 要: 基于 InfoWorks ICM 建立东濠涌(D 涌)流域排水水力模型,将深层隧道与浅层管渠排水系统视作一个大排水系统,采用设计降雨输入到模型当中进行多工况模拟研究。通过静态关联液位控制方法将多个闸、泵控制液位归一于在线监测点液位,采用监测点临界控制液位控制闸、泵开启和关闭,以保障调度策略的稳定和可靠。通过评价调度策略下的 D 涌流域内涝、溢流污染控制效果,进一步验证模拟得出的运行调度策略的可靠性,旨在利用此调度策略保障深隧充分发挥减少内涝和溢流污染的工程效能,并为其他复杂排水系统的调度策略研究提供借鉴。

关键词: 深层隧道; 浅层排水系统; 优化调度策略; 内涝; 溢流污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0001-06

Research on Scheduling Strategy of Deep Tunnel and Shallow Drainage System

ZHOU Wu-yang, WANG Guang-hua, ZHANG Wen, GOU De-fei, SUN Zhi-min,
CHEN Yi-long, REN Peng-fei

(Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: The integrated drainage hydraulic model of Donghaochong watershed was established based on InfoWorks ICM. The deep tunnel and shallow drainage system were regarded as a large drainage system, and the design rainfall was put into the model for multi-condition simulation research. The control levels of multiple sluices and pumps were normalized to the liquid levels of online monitoring points through the static associated liquid level control method, and the critical control liquid level was adopted to open and close the sluice and pump, so as to ensure the stability and reliability of the scheduling strategy. The reliability of scheduling strategy was verified by evaluating the control effect of waterlogging and overflow pollution with optimal operation strategy. So that it could be used to guarantee the engineering efficiency of deep tunnel for reducing waterlogging and overflow pollution, and to provide technical reference for scheduling strategy research of similar complex drainage system.

Key words: deep tunnel; shallow drainage system; optimal scheduling strategy; waterlogging; overflow pollution

为提高城市排涝标准和削减雨天溢流污染,增强城市排涝安全性,广州市编制了《广州市中心城

区深层隧道排水系统规划》,规划建设包含 1 条主隧道、7 条副隧道和一座综合污水处理厂的中心城

区深层隧道排水系统(以下简称深隧),深隧系统横跨东濠涌等7大排水系统^[1-4]。目前,东濠涌(以下简称D涌)深隧试验段正在建设中。深隧排水系统位于地下约40 m处,长1.77 km,隧道外径6 m,包含4座入流竖井,尾端泵站包括排涝泵组、排空泵组和补水泵组,运行管理难度较大,并且东濠涌深隧为内地首例,可供参考的运行调度经验较少。

深隧建成后,D涌流域排水系统将由浅层排水系统与深隧排水系统组合而成,系统构成复杂。常规的排水系统调度方式难以充分发挥D涌流域整个排水系统的效能,造成调蓄容积和运行成本的浪费。因此,需借助水力模型模拟尚未建成的深隧和已建成的浅层排水系统,进行优化调度运行研究,形成行之有效的优化调度策略,辅助自控软件编程和管理人员调度决策,从而充分发挥深隧减少内涝和溢流污染的工程效能,降低运行成本。

目前,国内外针对深隧排水系统优化调度研究的相关报道较少。本研究基于课题组所建立的区域综合排水管网水力模型,输入设计降雨,进行深隧和浅层排水系统的多工况模拟,对深隧和浅层排水系统的联合调度策略进行了研究和分析,以期为该实际工程的运行调度提供技术支撑。

1 模型与模拟方法

1.1 模型概述

在D涌流域浅层排水系统布设了26个在线液位监测点、6个雨量监测点,采集了大量在线监测数据。本研究所采用的综合排水水力模型中的浅层排水系统部分已利用上述实际监测数据进行了完整校核和验证^[5],验证了模型的可靠性。在此基础上激活深隧排水系统模块,利用此包含深层隧道和浅层管渠排水系统的D涌区域排水水力模型开展运行调度策略研究。

1.2 模型模拟方法

随着国内外的建模手段不断完善,将实际复杂工程系统转化为模型进行模拟成为新趋势,经过校核和验证的模型一般可以代表实际工程系统进行分析研究^[6-7]。本研究利用上述D涌排水水力模型,通过芝加哥雨型生成器将1年、2年、5年、10年、20年、50年一遇等多种降雨情景输入到模型中,进行多工况模拟运行。观察各分区流域内涝点和溢流点的发生情况,可知出现内涝点和溢流点的原因主要包括:下游水位顶托、地势低洼、管渠过水断面小等。

在上述D涌流域内布设的26个在线液位监测点中,筛选最早发生内涝和溢流污染的点作为目标控制点,通过对目标控制点的控制,进而控制整个分区流域的内涝和溢流情况。

根据大系统分散控制理论,将D涌流域分为9个调度子系统,并基于各子系统进行全局性调度,充分利用浅层排水系统管网内的调蓄容积,减少下游水位顶托作用。

本研究基于布设的26个在线液位监测点,将调度策略的实现建立于在线监测系统的基础上,因此,将运行策略转化为在线监测点的监测数据,以实时监测数据进行运行控制。在模型中确定调度设施每个执行水位值的发生时刻,以该时刻为基准找出相应监测点在此时刻的水位值,即将调度设施的执行水位转化为监测点水位值。综合考虑监测点数据的可靠性与实用性,划分优先级,选用可靠性强、实用性高的监测点。

根据排水系统上、中、下游之间的关系,考虑相互间的影响,采用递阶与循环往复的方法,从流域上游第一个子系统开始调度,从单个系统到部分系统,经过循环往复,最终完成整个大系统的调度。最后对运行调度策略下的排水系统进行削减溢流污染的效果评价。

2 结果与讨论

由于D涌流域范围广、闸泵繁多且组合结构多样,本研究结合深隧玉带濠竖井(以下简称Ⅲ竖井)及其排水控制区域的实际情况,根据广州市水务局于2018年9月印发的《广州市排水管理办法实施细则》中心城区暴雨强度公式^[8],采用芝加哥雨型生成器,生成1年、2年、5年、10年、20年、50年一遇等多种降雨情景,降雨历时采用120 min,时间步长1 min,输入到水力模型中,进行深隧和浅层排水系统工况模拟,对深隧和浅层排水系统的联合调度策略进行研究和分析。

2.1 深隧Ⅲ竖井子系统概况

D涌流域深层隧道Ⅲ竖井排水系统中的主要管网概化如图1所示。D涌西侧截污管 $d2\ 200\ \text{mm}$ 和玉带濠渠箱(此下简称Y渠箱)的污水共同经西侧截污管 $d2\ 400\ \text{mm}$ 进入D涌泵站,再由D涌泵站抽送至污水处理厂。D涌东侧 $d800\ \text{mm}$ 管污水直接进入D涌泵站。

本系统排水调度设施有Ⅲ竖井深隧入口闸和Y

渠箱截污闸。本系统区域内有2个内涝点以及8个溢流点(溢流井),通过模型模拟最先发生溢流的点位为最不利溢流点。

Ⅲ竖井子系统区域管网中最不利溢流点的位置见图1。

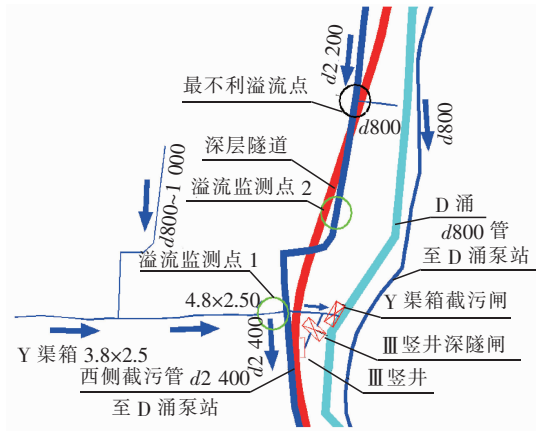


图1 Ⅲ竖井子系统区域管网

Fig. 1 Subsystem III well area pipeline network diagram

该深隧Ⅲ竖井子系统的拓扑关系如图2所示。

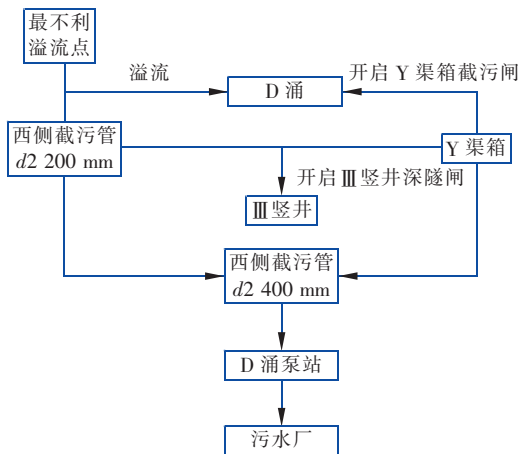


图2 Ⅲ竖井子系统拓扑关系

Fig. 2 Topological diagram of subsystem III well

一般降雨情况下,本区域的最不利溢流点在即将发生溢流时,开启Ⅲ竖井深隧入口闸,可将西侧截污管 $d2\ 200\ \text{mm}$ 和 Y 渠箱的污水纳入深层隧道进行调蓄,待雨后再将污水提升至污水处理厂进行处理,从而达到削减溢流污染、减少内涝的目的;大暴雨及以上降雨情况下,当深隧调蓄容积已满,尾端竖井及 I 竖井液位达到设计液位时,会触发排涝工况,深隧作为排涝通道使用,深隧尾端排涝泵开启且深隧入口闸继续保持开启, Y 渠箱截污闸开闸泄流至

D 涌以缓解城区内涝。

2.2 深隧Ⅲ竖井子系统运行调度策略

为了充分发挥深隧和浅层排水系统的调蓄、溢流污染控制及内涝控制作用,结合 InfoWorks ICM 水力模型计算模拟,确定调度策略及调度规则逻辑(见图3)。

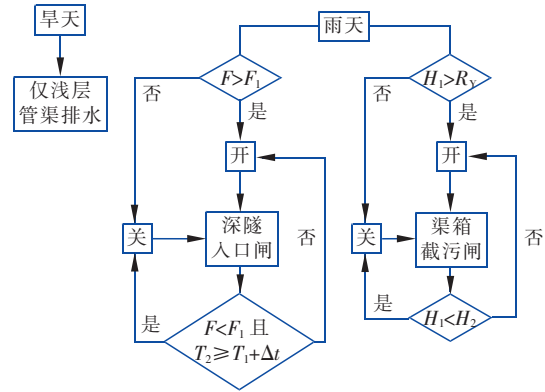


图3 基本运行调度策略逻辑

Fig. 3 Basic logic diagram of operation scheduling principle

① 旱天

只使用浅层排水管渠进行排水。

② 雨天

优先使用浅层排水管渠进行排水;在浅层管渠排水仍不能解决内涝及溢流污染的情况下,开启深隧系统进行调蓄;在深隧系统调蓄容积已满或者深隧系统调蓄功能仍不能解决内涝及溢流污染的情况下,再开启渠箱截污闸泄洪,同时关闭深隧系统;最后,在以上情况均不能解决内涝及溢流污染情况下,同时开启渠箱截污闸和深隧系统排涝功能,同时泄洪排涝。

③ 调度策略参数定义

F 为最不利溢流点的实时监测水位, F_1 为最不利溢流点的溢流水位, H_1 为 Y 渠箱截污闸前水位, H_2 为 Y 渠箱截污闸后水位, R_y 为 Y 渠箱危险水位, T_1 为深隧入口闸开闸指令时刻, T_2 为深隧入口闸关闸指令时刻。

2.3 深隧Ⅲ竖井子系统运行调度模拟结果

基于上述调度策略,提出了一种静态关联液位控制方法(见图4)。依据模型中管道动态剖面图,可知管渠内水面线呈现一定线性关系。为使闸门启闭策略不发生重合矛盾,采用实时监测点液位替代渠箱截污闸液位及最不利溢流点液位进行闸门启闭控制。

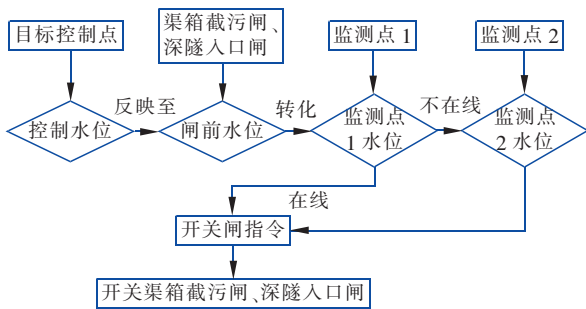


图4 静态关联液位控制方法

Fig.4 Static correlation liquid level control method

① 依据模型模拟结果可知,在0.5年一遇降雨情况下,最不利溢流点开始发生溢流,需要打开深隧入口闸进行调蓄,此时Y渠箱截污闸闸前水位为6.24 m,为控制溢流发生,确定最晚开闸液位6.24 m,最早开闸液位为6.0 m;而2年一遇降雨情况下,由于深隧达到警戒水位,需要关闭Ⅲ竖井深隧入口闸,此时Y渠箱截污闸闸前水位为6.57 m,为更好地衔接泄洪,需提早打开Y渠箱截污闸,则最早开闸液位为6.5 m。

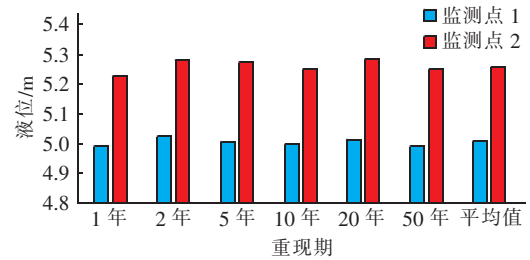
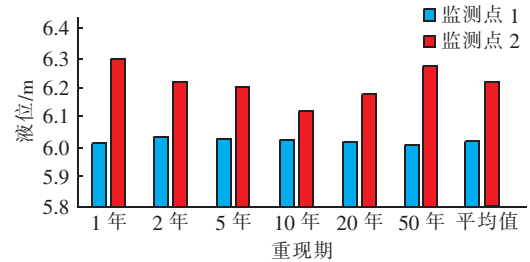
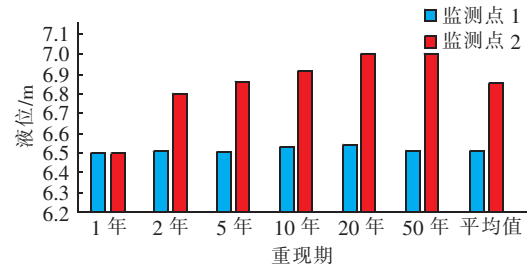
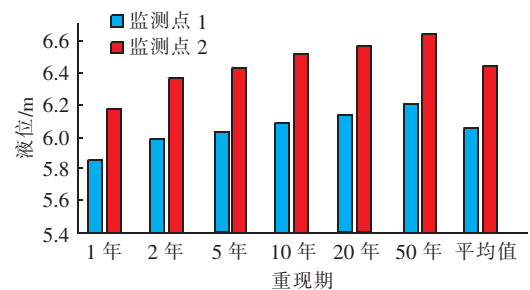
② 统筹所有降雨情况,在全局性降雨情景下,由于降雨强度不断变化,溢流点的液位可能会在溢流液位附近上下波动,若液位低于溢流液位就关闸,会造成频繁开关闸状况。

为避免此状况发生,对开闸时间加以控制,模拟结果发现,最后一次关闸时间距第一次开闸时间 Δt 为35 min,故设定在Ⅲ竖井深隧入口闸开启35 min后,Y渠箱截污闸闸前水位 <6.0 m,才关闭Ⅲ竖井深隧入口闸。

③ 对于Y渠箱截污闸的关闸水位,以不同重现期下流域内不发生内涝及溢流时的最低水位来确定,根据模拟结果可知,当Y渠箱截污闸闸前水位为5.0 m左右时,流域内不发生内涝及溢流,且不会出现水位反复升降导致闸门频繁启闭现象。因此,Y渠箱截污闸的关闸水位为5.0 m,并无需加以时间控制。

④ 对于所有降雨情景下,深隧设计最高警戒水位为-4 m,此为必须满足条件。

为获得闸前液位和各监测点的对应关系,统计1~50年一遇等降雨情景下,当Y渠箱截污闸闸前水位 H_Y 分别为5.0、6.0、6.5 m,以及深隧竖井警戒水位为-4.0 m时,监测点1与监测点2相对应时间点的液位数据,具体如图5所示。

a. $H_Y=5.0$ m时对应监测点液位b. $H_Y=6.0$ m时对应监测点液位c. $H_Y=6.5$ m时对应监测点液位

d. 深隧警戒水位-4 m时对应监测点液位

图5 Ⅲ竖井子系统各重现期降雨下各点液位对应关系

Fig.5 Correspondence of liquid levels at various points under rainfall in each recurrence period of subsystem Ⅲ well

如图5(c)所示,监测点1液位统计最大为6.54 m,最小为6.50 m,极差为0.04 m;监测点2液位统计最大为7.0 m,最小为6.79 m(不考虑1年一遇水位 <6.5 m的情况),极差为0.21 m。为使调度指令液位具有全局有效性,减小偶然试验误差,将监测点的液位数据进行均值处理作为最终的指令液位,统计汇总结果见表1。通过查看模型模拟结果,根据静态关联液位控制方法,对闸门指令液位进行关联转化,作为排水设施指令策略。

表1 各点液位对应值

Tab.1 Correspondence of each liquid level m

监测点	水位值			深隧警戒水位值
Y渠箱截污闸前	6.5	5.0	6.0	-4.0
监测点1	6.9	5.3	6.2	6.5
监测点2	6.5	5.0	6.0	6.1

综上所述,根据运行调度策略,经过数次逐级模拟运行,发现深隧系统与浅层排水系统工作配合较好。

2.4 D涌流域溢流污染控制模拟效果

基于D涌流域各分区调度策略运行结果,选择不同降雨重现期作为降雨情景,在不同降雨情景下,

对比统计现状无深隧策略的运行情况与深隧联合浅层调度策略的运行情况,D涌流域41个溢流点溢流水量见表2。对于各降雨重现期下,深隧联合浅层调度策略运行,D涌流域内各个溢流点的溢流情况均有很大改善,在1年一遇降雨情景下34#溢流点最大溢流削减水量为8487 m³,在2、5、10、20、50年一遇降雨情景下,8#溢流点始终是最大溢流削减点,最大溢流削减水量为11322 m³。

经过对模拟试验数据的统计计算,获得各个降雨情景下溢流削减效果(见表2)。

表2 溢流污染控制效果

Tab.2 Overflow pollution control effect

降雨情景	运行策略	溢流量/m ³	削减溢流量/m ³	溢流削减率/%	COD削减量/kg
1年一遇	现状无深隧策略	84108.08	41145.45	48.92	8846
	深隧+浅层调度策略	42962.63			
2年一遇	现状无深隧策略	110410.15	54399.44	49.27	11695
	深隧+浅层调度策略	56010.71			
5年一遇	现状无深隧策略	126145.97	58239.95	46.17	12521
	深隧+浅层调度策略	67906.02			
10年一遇	现状无深隧策略	135679.00	44721.25	32.96	9615
	深隧+浅层调度策略	90957.75			
20年一遇	现状无深隧策略	166912.83	52760.23	31.61	11343
	深隧+浅层调度策略	114152.60			
50年一遇	现状无深隧策略	207899.39	68050.69	32.73	14630
	深隧+浅层调度策略	139848.70			

根据历史调查统计,D涌流域共存在41个溢流口,流域全年雨天溢流合流污水总量约为 266.2×10^4 m³,溢流COD总量约 57.2×10^4 kg。模拟试验数据表明,深层隧道联合浅层排水系统运行策略对溢流污染的控制效果明显好于现状无深隧策略,在不同重现期下控制效果不同。从溢流量削减率可知,2年一遇降雨情景下溢流削减率最高,达到49.27%,20年一遇重现期下溢流削减率最低,为31.61%;从COD削减量可知,50年一遇降雨情景下削减量最大,达到14630 kg,1年一遇降雨情景下削减量最小,为8846 kg,随着降雨重现期增大,溢流污染削减量增大。

3 结论

① 本研究区域D涌深层隧道排水系统试验段是我国内地首例,缺乏相关调度运行经验,且深隧与浅层排水系统组成复杂排水系统,调度运行难度大。因此,借助InfoWorks ICM水力模型进行复杂排水系统的调度运行策略研究,有利于保障深隧建成

后充分发挥控制溢流污染和缓解内涝的工程效能。

② 根据排水管网实时控制理论,结合排水管网监测系统,将排水系统优化调度运行策略中各调度设施的执行水位值转化为监测点的监测水位数值,将调度设施的控制运行转化为监测点实时监测水位控制运行的方式,有助于提高排水系统调度管理水平。

③ 基于已完成校核、验证的D涌流域水力模型,利用设计降雨作为降雨输入,模拟D涌流域深隧和浅层排水系统联合运行的工况,得出优化调度运行策略。按照最优调度策略运行上述排水系统,最大溢流污染削减率可达49.27%,证明本研究得出的运行调度策略具有较好的溢流污染控制效果。

参考文献:

- [1] 李文涛,王广华,周建华,等. 深层隧道排水系统规划设计中降雨点面关系研究[J]. 中国给水排水,2017,33(2):1-4.

- Li Wentao, Wang Guanghua, Zhou Jianhua, *et al.* Study on relationship between point rainfall and areal rainfall in planning and design of deep tunnel drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (2): 1 - 4 (in Chinese).
- [2] 李文涛,王广华,周建华,等. 深层隧道排水系统规划设计中溢流污染控制标准研究[J]. 中国给水排水, 2016,32(24):1-6.
- Li Wentao, Wang Guanghua, Zhou Jianhua, *et al.* Study on standard of overflow pollution control in planning and design of deep tunnel drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(24):1-6(in Chinese).
- [3] 王广华,李文涛,陈贻龙,等. 广州市东濠涌深层排水隧道工程前期研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (22):7-13.
- Wang Guanghua, Li Wentao, Chen Yilong, *et al.* Preliminary study on deep tunnel drainage engineering at Donghao creek in Guangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(22):7-13(in Chinese).
- [4] 李捷,王宏利,隋军,等. 水质模型在东濠涌深层隧道排水系统中的应用[J]. 中国给水排水, 2017,33(8):15-19.
- Li Jie, Wang Hongli, Sui Jun, *et al.* Application of water quality model in deep tunnel drainage of the test section Donghao creek[J]. China Water & Wastewater, 2017,33 (8):15-19(in Chinese).
- [5] 苟德菲,杨辉,周午阳,等. 基于 InfoWorks ICM 的广州市 H 区流域排水系统模型验证[J]. 净水技术, 2020, 39(4):67-72.
- Gou Defei, Yang Hui, Zhou Wuyang, *et al.* Validation of watershed drainage system based on InfoWorks ICM model for H zone of Guangzhou City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (4): 67 - 72 (in Chinese).
- [6] Yang S N, Chang L C, Chang F J. AI-based design of urban stormwater detention facilities accounting for carryover storage[J]. J Hydrol, 2019, 575:1111-1122.
- [7] Sadler J M, Goodall J L, Behl M, *et al.* Exploring real-time control of stormwater systems for mitigating flood risk due to sea level rise[J]. J Hydrol, 2020, 583:124571.
- [8] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5):643-652.
- Huang Guoru, Luo Haiwan, Chen Wenjie, *et al.* Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science, 2019,30(5):643-652(in Chinese).



作者简介:周午阳(1990-),男,江西萍乡人,硕士,工程师,研究方向为城市排水管网在线监测与优化调度。

E-mail:gdzwy@foxmail.com

收稿日期:2020-10-05

加强水土保持, 打造绿水青山