

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.018

广州深隧排水系统东濠涌试验段物理模型试验研究

王建平^{1,2}, 何贞俊^{1,2}, 潘文慰^{1,2}, 邢方亮^{1,2}

(1. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东 广州 510611)

摘要: 为了验证广州市深层隧道排水系统东濠涌试验段工程设计方案的合理性,建立了国内首个深层隧道整体物理模型,对深隧运行过程中的排气、浪涌、消能等关键水力学问题进行了模拟和分析。试验结果表明,折板竖井消能充分,并可兼顾主隧道排气,工程运行期间产生的涌浪和气泡强度较弱,泵站集水池的空间能够满足水泵运行的要求,利用排洪和补水进行水力冲刷具有一定可行性。

关键词: 深层隧道排水系统; 物理模型; 水力学模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0108-05

Physical Model Test of Donghaochong Test Section of Deep Tunnel Drainage System in Guangzhou City

WANG Jian-ping^{1,2}, HE Zhen-jun^{1,2}, PAN Wen-wei^{1,2}, XING Fang-liang^{1,2}

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation <Ministry of Water Resources>, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In order to verify the rationality of a design scheme for Donghaochong test section of deep tunnel drainage system in Guangzhou City, the first integral physical model of deep tunnel in China was established to simulate and analyze the key hydraulic problems such as exhaustion, surge and energy dissipation during operation of the deep tunnel. Most of the energy could be dissipated by the folded plate shaft, in which exhaustion of the main tunnel could be achieved. The surge and gas explosion intensity generated during the operation of the project was weak. Space of the sump of the pump station could meet the requirement of the pump operation. It was feasible to use flood discharge and water replenishment for hydraulic scouring and silting.

Key words: deep tunnel drainage system; physical model; hydraulic simulation

深层隧道排水系统,是指埋设在深度超过30 m的深层地下空间的大型排水隧道,已广泛应用于巴黎、伦敦、芝加哥、东京、新加坡等发达国家和地区的众多大城市,并取得了较好的效果。广州市雨季频频出现污水溢流和内涝,以老城区的东濠涌流域为例,大约每年出现60次溢流污染,浅层排水系统也仅能承受1年一遇的降雨,为满足广州市社会和经济迅速发展的要求,保护城市河涌水环境质量,建设

深层隧道排水系统是必要的。但深层隧道排水系统在国内城市的应用尚属空白,工程的设计、施工、运行调度、维护等方面都缺乏经验。考虑到东濠涌流域在控制溢流污染和缓解内涝方面问题比较突出,且流域范围较小,沿线地质条件较好,深隧工程规模小,相应投资也小,加上东濠涌流域地处老城区,对深隧在中心城区运用的探索有重要指导意义,故广州市中心城区深层隧道排水系统总体规划选取东濠

涌试验段作为试点工程开展前期研究工作。

深层隧道由于埋设深、输水流量大,运行初期消能问题突出;水流从浅层系统进入隧道时为非恒定流过程,明满流交替流动会导致各种瞬变工况或深隧浪涌;运行中存在水流振荡、有压排气、泥沙淤积等多种水力学相关的技术风险。有必要开展水力学物理模型试验,复演深层隧道运行过程中的水流状态,预见原型工程中可能存在的问题,用少量的经费,完善工程设计,节省建设投资,保障工程安全。本项研究建立了广州深隧东濠涌试验段整体物理模型,模拟各典型工况下入流竖井、主隧道和泵站的联合调度过程,观测了各关键部位的典型流态和水力学参数,对试验数据进行处理分析,评估深层隧道方案的有效性和可行性,以期方案比选、设计和运行方式的优化提供科学依据。

1 工程概况

东濠涌试验段主要包括一条长 1.77 km、内径为 5.3 m 的排水隧道,东风路(孖鱼岗涌)、中山三路、玉带濠、沿江路 4 个入流井及相应的预处理设施,直径为 3.0 m 的新河涌涌支管,1 座综合泵站(兼顾补水、排空、排洪三重功能),运行调度控制系统等^[1]。东濠涌深隧系统的调蓄能力为 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,隧道最大排洪能力为 $48 \text{ m}^3/\text{s}$,可将河涌防洪标准由 15 年一遇提高到 50 年一遇,实现削减溢流污染 70% 以上。

隧道起点标高为 -28.5 m、埋深为 38.8 m,隧道终点标高为 -31.61 m、埋深为 40.2 m。纵向坡度为 0.1%~0.2%。4 个入流竖井均采用折板跌水消能方式,以沿江路竖井为例,如图 1 所示,竖井直径为 14.0 m,入流量为 $23 \text{ m}^3/\text{s}$,竖井深度为 39.36 m,折板间距为 3.2 m,竖井干区和湿区的通风孔尺寸为 $1.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。排水泵站包括尾端排洪泵组和排空泵组等。排洪泵 8 台,设计排洪规模为 $48 \text{ m}^3/\text{s}$;排空泵 3 台,泵组规模为 $0.89 \text{ m}^3/\text{s}$,满足 24 h 深层隧道排空。

旱季及小雨(降雨地表径流量 < 1 倍旱季污水量)工况,深层隧道不启动运行,污水全部通过现有浅层管网收集输送到污水厂进行处理;中雨工况(降雨量 < 15 mm),充分利用现有浅层管网输送能力的基础上,利用深层隧道对浅层溢流的合流污水进行调蓄,雨后通过深层隧道排空泵将污水送到浅层管网,输送到污水厂进行处理;大雨工况(降雨量

超过浅层排水系统和深层隧道调蓄能力之和),在中雨工况的基础上,启动深层隧道污水泵组,将合流污水泵入临江主渠箱,输送到污水厂进行处理;暴雨工况(降雨量导致流域范围内有水浸风险时),在大雨工况的基础上,同时启动深层隧道尾端和涌口的排洪泵组,利用东濠涌和深层隧道同时排洪。

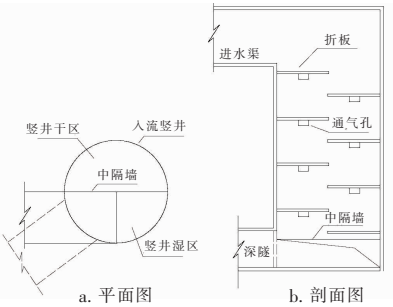


图 1 沿江路竖井布置示意

Fig. 1 Illustration of shaft arrangement of Yanjiang Road

2 模型设计与制作

模型与原型应当遵循几何相似、运动相似和动力相似的基本原则。由于竖井和主隧道内的水流均处于紊流平方区,阻力处于自模拟区,因此试验模型只需满足重力相似准则即可,模型上观测到的各水力要素可按重力相似准则换算到原型。进行泥沙冲淤试验时,根据运动相似和动力相似的基本原则,由原型泥沙起动流速换算成模型值后选取相对应的模型沙进行模拟。本次模型试验为常压试验,不涉及重演空化和高速水流掺气现象等,可不考虑缩尺影响;深层隧道行使调蓄功能时主隧道排气过程的气流流速和承受压力较小,空气压缩性可忽略不计。

根据《水工(常规)模型试验规程》(SL 155—2012),应采用正态模型,按重力相似准则进行设计,在试验场地、供水流量等条件满足的情况下尽量选用较大的模型比尺,结合工程结构尺寸和模型制作材料规格,确定整体模型几何比尺为 31,其他比尺关系见表 1。

表 1 模型试验各物理量比尺关系及数值

Tab. 1 Relationship and numerical value of various physical scales in model test

项目	几何比尺 λ_L	流速比尺 $\lambda_V = \lambda_L^{0.5}$	流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	压强比尺 $\lambda_P = \lambda_L$	时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{0.5}$	糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$
数值	31	5.57	5 350.6	31	5.57	1.77

水力学整体模型范围包括深层隧道、各竖井及内部结构、竖井前的沉砂池和格栅间、主隧道调蓄池、泵站及前池,模拟深层隧道整体的水力学过程。

模型采用有机玻璃制作,深层隧道平面走向、纵向坡度和各个部位尺寸与设计相符。泵站体型根据三维数值模拟分析研究结果,采用推荐的闭式进水流道^[2]。模型范围和比尺满足试验大纲要求,模型制作和安装精度均满足相关试验规程要求。整体模型见图2,沿江路竖井模型见图3。



图2 广州市深层隧道排水系统东濠涌试验段模型

Fig.2 Model of Donghaochong test section of deep tunnel drainage system in Guangzhou City



图3 沿江路竖井模型

Fig.3 Vertical well model of Yanjiang Road

选取模型沙时,在东濠涌流域内河涌现场采集沙样,进行粒径分析,中值粒径为0.05 mm,粒径变化范围为0.002~0.075 mm,属于粒径较小的粉土。根据窦国仁提出的泥沙起动公式^[3]计算出起动流速后,选用产自株洲的密度为1.45 g/cm³、中值粒径为0.2 mm的煤屑作为轻质模型沙进行冲淤试验。

模型进口流量用电磁流量计测定、电动阀调节,泵站前池水深由压力传感器测定,竖井关键部位的脉动压力由脉动压力传感器测定。测控系统用以太网进行通信,电动阀、电磁流量计和水压传感器通过数据采集输出模块接入交换机与PC通信,脉动压力传感器通过智能集线器接入交换机与PC通信。

3 试验结果与分析

3.1 深层隧道水气两相流态分析

深层隧道系统发挥调蓄功能时,主隧道空管情况下各竖井进水。上游段的东风路竖井、中山三路竖井和玉带濠竖井入流进入主隧道后向下游流动,最下游的沿江路竖井入流进入主隧道后向上游流动。沿江路竖井底部高程最低,随着主隧道内水面抬高,靠近沿江路竖井的主隧道最先形成满流,满流界面向上游快速移动,形成管内涌浪,见图4,主隧道内明满流转变形成的压力波传至中山三路调蓄池时部分能量释放。中山三路调蓄池上游段的主隧道继续形成满流界面并向上游传递,在此过程中,东风路竖井-中山三路竖井区间由于不连续满管形成多个封闭气囊,在水流带动及上游满流界面向下游传递的压力作用下,封闭气囊向下游快速移动,在中山三路调蓄池内有压释放,形成气爆,调蓄池内水面翻腾,见图5。中山三路竖井下游段主隧道内的封闭气囊在末端的泵站前池内有压排放。各竖井内水深值超过2.0倍主隧道管径后,经竖井进入主隧道的气量已经很少,有压排气过程较为平缓。深层隧道运行初期,明流向满流转变形成的水气两相瞬变流态,由于受困气囊排放时水深较浅、排气空间较大,气爆程度较弱,不致于产生严重危害,实际运行中可通过控制初期入流量、增加隧道明满流转变期的排气时长,降低浪涌和气爆的强度。



图4 满流界面向深隧上游移动

Fig.4 Full flow boundary moving towards upper tunnel

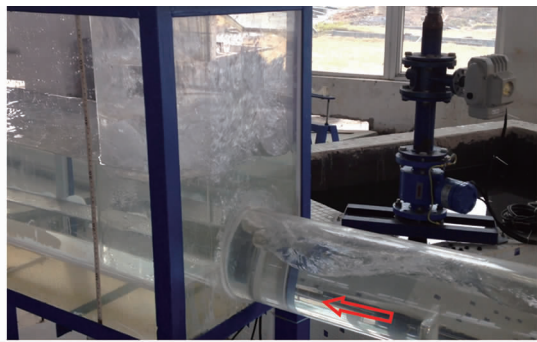


图5 深隧受困气囊有压排放

Fig.5 Pressure discharge of trapped air bag in deep tunnel

3.2 深隧水流参数分析

设计暴雨运行工况下深层隧道系统运行过程中各竖井、泵站集水池和排洪泵站流量的关系见图6。竖井入流前期由于水流要将主隧道灌满,故竖井水位变化不大。主隧道在纵向设计上北高南低,沿江路竖井相接的主隧道最先转为满流状态,沿江路竖井出水受阻,水位最先开始升高。玉带濠竖井和中山三路竖井水位依次升高。位于主隧道最上游端的东风路竖井水位上升时间最晚,水位增加速率最大。随着压力波在主隧道内的来回反射,位于主隧道两端的沿江路竖井和东风路竖井水位呈振荡性上升。

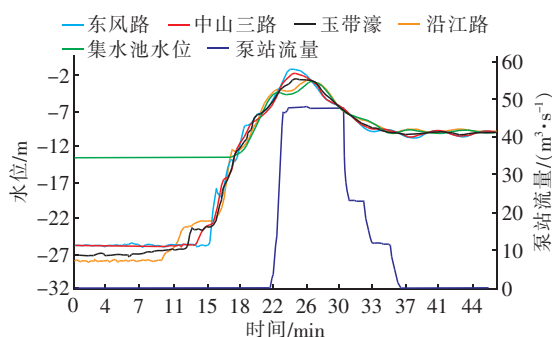


图6 设计暴雨工况下竖井水位和排洪泵流量的关系

Fig. 6 Relationship between water level of shaft and discharge of flood pump under design rainstorm condition

集水池水位升至 -6.20 m ,4台排洪泵启动,因排洪量小于入流量,各竖井水位仍同步上升。泵站集水池水位上升较快,排洪泵组按启泵水位阶梯开启,随着排洪流量的增加,超出集水池的进水量,集水池水位开始下降,因沿江路竖井距离泵站很近,二者之间相互影响且敏感性较高,沿江路竖井水位也略有降低。距离较远的其他3个竖井水位继续上升,东风路竖井水位达到峰值时高出泵站集水池水面 3.5 m 。主隧道上下游水头差增大,使得隧道内水流的速度增加,以补充集水池的水量。泵站集水池水位短时微降后即开始回升,表明泵站集水池的空间能够满足水泵运行的要求。

若集水池水位升至 -4.0 m 的警戒水位时,所有排洪泵组事故停机,则需立即关闭各竖井入流,由于主隧道内水流在惯性作用下继续向下游流动,泵站集水池水位仍保持上升趋势至 -1.84 m 的峰值,然后开始回落振荡,泵站前池水面振荡幅度达到 1.30 m 。正常排洪后期,随着集水池水位下降,排洪泵组阶梯关闭,主隧道内流速产生瞬变,集水池进出水量均处于非恒定状态,诸多因素叠加产生波动效

应。停泵后集水池和各竖井水位仍然交替振荡,集水井水面振荡幅度约为 0.50 m 。建议泵组关闭时,2台泵为一组,以增加泵组关闭时长,使泵站流量变化更为平顺,降低集水井水面振荡的幅度。

各个竖井与主隧道的连接处下游隧道底部布置有压力传感器,各测点压力变化过程与相邻竖井水位变化过程较为一致,可见主隧道的压力大小主要由竖井水深决定。

3.3 竖井消能效果分析

折板式竖井的中隔墙把竖井分成两部分:干区和湿区。干区可用于缓解浪涌现象造成的冲击,也可以用来作为维护和检修的进出口;所有的折板装置在湿区,水流进入竖井后在折板上逐级跌落形成左右折转的连续跌流,各折板之间流态相似性较好,见图3,跌落水流在折板上的落点垂向基本成一条直线,没有出现落点向竖井壁偏移的情况,说明水流跌落过程中重力做功增加的能量基本消去,入流过程中没有发生能量累积的现象,竖井半径和折板间距布置合理,通气口尺寸满足水流掺气的需要,消能效果较好。

在最大过流流量下,折板上方水面距离上一层折板底面有一定的高度空间 h_v ,用于空气的流通,为保证最大流量下不阻碍空气流动、拥堵通气孔,试验观察测得 h_v 的限制条件为 $h_v/B=0.04$ ^[4],其中 B 为折板宽度(竖井半径),该限制条件也是最大过流流量的限制条件。实际折板竖井设计中不仅要满足最大过流流量条件,还要满足稳定消能的要求。根据模型试验及分析^[5],当竖井折板间距 h 、折板厚度 t 和折板宽度 B 满足 $(h-t)/B<0.408$ 时即可满足稳定消能的要求。沿江路竖井的设计流量均在最大过流量线与稳定消能边界以下,表明设计方案充分满足过流要求与消能要求,并留有一定富余空间。

竖井中隔墙及最底层折板与深层隧道进口的空间位置布置不理想,导致水流从最底层折板流出后顶冲隧道进口,掺气水流进隧道前的行程较短,气泡来不及逸出,大量气泡被带入隧道,主隧道入口段水面波动较大。脉动压力数据表明,隧道进口段的压力脉动值最大,达到 44.1 kPa 。在工程布置允许的前提下,建议调整折流板消能室与深层隧道进口的空间关系,将主隧道进口布置在最底一块折板同侧下方或干区一侧,以增加掺气水流的行程,延长气泡逸出时间,减少汇流前期主隧道进气量,改善隧

道的进水流态。

3.4 深层隧道水力冲淤分析

浅层管网来流经过格栅、沉砂池等预处理后进入竖井。格栅可去除尺寸比较大的杂物,沉砂池可去除粒径比较大的泥沙,故进入竖井和主隧道的泥沙粒径较小并且数量有限。深层隧道调蓄和排空泵运行排空期间,因为主隧道内流速较慢(平均流速不超过 0.04 m/s),泥沙容易在主隧道内淤积。

深层隧道行使排洪功能时,主隧道内水流速度为 $1.0\sim 2.0\text{ m/s}$,落淤泥沙有可能重新起动经排洪泵排出。另外根据泥沙起动特性,水深减小时泥沙起动流速会随之降低,故试验还验证了深层隧道排空后上游端竖井补水、排空泵满负荷运行工况的补充冲淤效果。

试验显示,暴雨运行工况下深层隧道行使排洪功能时,深层隧道内淤积的泥沙大量起动,随水流沿程输移,挟沙水流经泵站集水井进入泵站前池,经排洪泵组排出深层隧道系统,与泵站三维数值模拟分析结果相一致^[2]。这表明可以利用深层隧道排洪的时机进行冲淤。东风路竖井补水、泵站排空泵组运行工况下,深层隧道内水深较浅,虽然补水流量较小,管道底部淤积的泥沙仍然能够起动,只要时间够长,深层隧道内淤积的泥沙即可到达泵站集水井,通过排空泵组抽取排出。

4 结论

通过物理模型试验,对深层隧道运行过程中的涌浪与气爆强度、多竖井入流水位与泵排流量的响应关系、折板竖井消能效果、主隧道水力冲淤可行性等重点内容进行了研究和分析。工程运行期间浪涌与气爆强度不大,竖井体型满足入流及消能的要求,泵站集水池的空间布置能够满足水泵运行的要求,试验结果表明,深层隧道整体布置方案可行。利用深层隧道排洪工况和补水工况进行水力冲淤,避免了大型机械清淤成本高、清淤工作量大的缺点。

本工程中的气爆强度虽然不大,但国外排水隧道在实际运行过程中已发生多起气爆事故,国内尚未开展专题研究,气爆现象的临界条件及关键性因素影响规律有待于后续研究。

参考文献:

- [1] 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).

- [2] 王广华,陈彦,李昀涛,等. 深层排水隧道系统泵站的三维数值模拟分析[J]. 中国给水排水,2017,33(6): 13-17.

Wang Guanghua, Chen Yan, Li Yuntao, *et al.* Three-dimensional numerical analog analysis on pumping station in deep drainage tunnel[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 13-17 (in Chinese).

- [3] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究,1999(6): 1-9.

Dou Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9 (in Chinese).

- [4] Odgaard A J, Lyons T C, Craig A J, *et al.* Baffle-drop structure design relationships[J]. J Hydraul Eng, 2013, 139(9): 995-1002.

- [5] 王斌,邓家泉,何贞俊,等. 折板跌落竖井设计约束条件研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13(5): 363-367.

Wang Bin, Deng Jiaquan, He Zhenjun, *et al.* A study on design constraints for baffle-drop shaft structure [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 363-367 (in Chinese).



作者简介:王建平(1979-),男,河南武陟人,硕士,正高级工程师,主要从事水力学模型试验研究等工作。

E-mail: 234420472@qq.com

收稿日期:2019-04-25