

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.004

综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析

李雄飞¹, 田甜¹, 程香菊^{1,2}, 尹小玲¹, 宋琢³

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641; 3. 广州市市政工程机械施工有限公司, 广东 广州 510010)

摘要:为了探究综合管廊雨水舱缓解内涝的效果,以广州市杨梅河为例,建立了杨梅河区域现状排水系统、现状排水系统结合综合管廊雨水舱两种工况的暴雨洪水管理模型(SWMM),计算了4种降雨重现期下各工况杨梅河出口流量和典型内涝点溢流量。结果表明:雨水舱较优断面为宽4 m、高3.3 m,此时各降雨重现期下雨水舱对研究区总溢流量的缓解效果已达上限;综合管廊雨水舱可缓解杨梅河下游内涝,对下游两处典型内涝点的溢流量平均削减率分别为86.5%和42.2%,但对杨梅河上游内涝几乎不起作用;综合管廊雨水舱会增大杨梅河出口的峰值流量,在20年一遇降雨条件下杨梅河出口达到最大出流能力。

关键词:综合管廊;雨水舱;城市内涝;SWMM模型;杨梅河

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0020-07

Effects of rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging // LI Xiongfei¹, TIAN Tian¹, CHENG Xiangju^{1,2}, YIN Xiaoling¹, SONG Zhuo³ (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Guangzhou Municipal Engineering Machinery Construction Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: Taking the Yangmei River region in Guangzhou as an example, this study was performed to explore effects of the rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging. The SWMM models were established for cases of the current drainage system and current drainage system combined with rainwater tank. Then, the outlet flow of the Yangmei River and overflow at typical flood-prone spots were calculated under the conditions of rainfall events of four return periods. Results show that the optimal size of the rainwater tank is 4 m in width and 3.3 m in height, with which the rainwater tank has reached its upper limit of effects on reducing the total amount of overflow in the study area; the rainwater tank can alleviate waterlogging in the lower reach of the Yangmei River, with the average overflow reduction rates reaching 86.5% and 42.5%, respectively, at two typical flood-prone spots in the lower reach, while the rainwater tank has little effect on waterlogging in the upper reach of the Yangmei River; the rainwater tank can increase the peak flow at the outlet of the Yangmei River, and the river outlet reaches its maximum outflow capacity under the condition of a 20-year return period rainfall.

Key words: integrated pipe gallery; rainwater tank; urban waterlogging; SWMM model; Yangmei River

近年来我国大力发展城市地下综合管廊,管廊的建设对改善城市交通状况、提升城市总体形象、创造城市和谐生态环境及提高城市防灾减灾能力均起到了积极推动作用^[1-2]。针对多地爆发的洪涝灾害,习近平总书记、李克强总理多次对加快城市地下综合管廊建设、补齐城市防洪排涝能力不足短板作

出重要指示^[3]。2016年住房和城乡建设部发布《关于提高城市排水防涝能力推进城市地下综合管廊建设的通知》,2021年4月国务院办公厅印发《关于加强城市内涝治理的实施意见》,均对城市排水防涝体系的完善提出了要求。因此将地下综合管廊和排水防涝设施相结合以缓解城市洪涝灾害是十分必要

作者简介:李雄飞(1995—),男,硕士研究生,研究方向为城市雨洪管理。E-mail: 201920107117@mail.scut.edu.cn

通信作者:程香菊(1974—),女,教授,博士,主要从事城市雨洪管理和水生态相关研究。E-mail: chengxiangju@scut.edu.cn

和可行的^[4]。

目前国内外地下综合管廊与排水防涝设施的结合主要采取雨水管渠入廊的工程措施。Canto-Perello 等^[5-6]对多种入廊管线存在的风险与危害进行了深入分析,指出排水系统的设计要考虑城市暴雨时的排水容量,地形、管廊内的雨污水管道、地块的利用价值都是影响管廊与高速路兼容性的因素。刘羽^[7]建议雨水管采用单舱形式布置,在污水管直径较小且周边空间受限情况下可以采用雨污水管道共舱形式。曾庆红^[8]提出了地下综合管廊与海绵城市相结合的污水零排放新型城市体系规划建设方案,研究表明,大的城市管廊系统可截留雨水总量达百万立方米。张国钟^[9]以福州东部新区福泉高速 A 标段三舱综合管廊设计为例,分析了综合管廊断面布置、管道准入原则、雨水管廊设计方法和要点。邱壮等^[10]结合已有工程案例,从雨水舱滞蓄雨水的角度出发,对雨水舱的断面和入廊雨水的水质、调蓄、回用等进行了研究。向帆等^[11]以成都市某综合管廊工程为例,分析了雨污水管道入廊后的排水可行性。张瑞峰^[12]采用了理想中心点多目标决策理论,建立了排水管道入廊适宜性评价体系,明确了排水管道入廊方案的主要优化方向。张韵等^[13]认为可将海绵城市和综合管廊进行有机融合,利用管廊本体设置雨水舱。从文献资料可以看出,由于雨水排水管线一般按重力流排水系统设计,且管廊埋深和断面尺寸较大导致工程投资较多,为了使雨水管渠有效减缓内涝并节约投资成本,必须根据当地的气象、水文等信息,对雨水管渠的尺寸进行优化,分析综合管廊雨水舱缓解当地内涝的效果,为设计和施工部门提供定量数据依据。

本文以广州市杨梅河地下综合管廊为例,采用暴雨洪水管理模型^[14-15] (storm water management model, SWMM) 构建不同工况水文模型,模拟不同设计降雨条件下杨梅河出口流量和典型内涝点溢流量,以揭示综合管廊雨水舱对研究区域防洪排涝的作用。

1 研究区概况

杨梅河研究区域位于广州市天河区,面积 15.83 km²,北至天麓湖公园南端,南至车陂路,西至凌塘村,东至风信路,属亚热带季风气候区,年平均降水量 1 725 mm,雨量充沛,降雨多集中于 4—9 月,占全年降水量的 81%。目前区域内没有水闸和泵站等排涝设施,排涝主要由市政管网和杨梅河承担。该区域内有 4 处易涝点(图 1),分别为位于杨梅河上游的柯目塆南路口和高唐石科技园以及位于

杨梅河下游的新塘实验幼儿园和老虎佛村^[16]。为了缓解区域内涝以及分担杨梅河下游洪水,计划实施天河智慧城地下综合管廊工程,在杨梅河下游(横六路处)新增雨水单舱,接入高唐路综合管廊(管廊横断面由三舱变四舱),至高唐路综合管廊末端,再转变为雨水单舱,最后汇入杨梅河。工程包括 4 个部分(图 1):① G1 段为雨水单舱,长度为 620 m;② G2 段为高唐路段综合管廊,长度为 670 m,共有 4 舱,分别为电力舱、综合舱、天然气舱和雨水舱;③ G3 段长度为 160 m,布设直径为 3 m 的 2 根圆管;④ G4 段为雨水单舱,长度为 750 m。

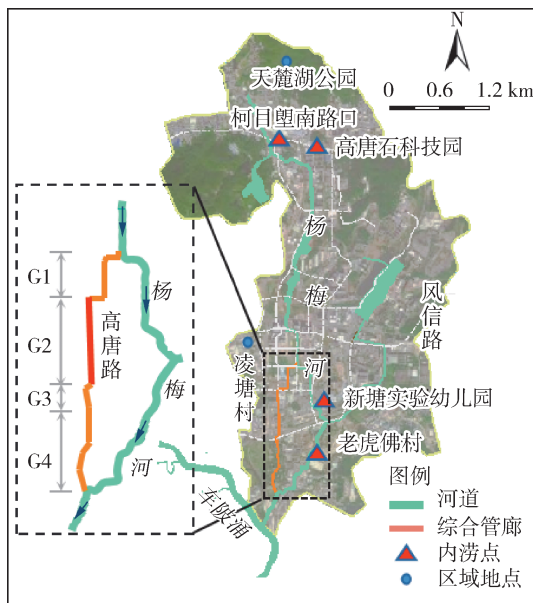


图 1 杨梅河区域概况和综合管廊位置

Fig. 1 General situation of Yangmei River region and location of integrated pipe gallery

2 研究方法

本文首先收集研究区地形地貌、管网、降雨等基础数据,基于 SWMM 模型,构建两种不同工况水文模型,并对模型进行率定和验证;通过改变雨水舱断面尺寸、设置情景工况进行模拟预测,分析不同断面雨水舱缓解区域内涝的效果,获得较优断面的雨水舱;再通过对分析杨梅河出口流量和易涝点溢流量,探究综合管廊雨水舱缓解区域内涝的效果。

2.1 SWMM 模型构建

2.1.1 研究区概化

研究区概化如图 2 所示。根据高唐路综合管廊及杨梅河实际情况划定研究区范围后,由区域内现状管网的 CAD 图直接提取概化管网。概化后,市政管网目前包括节点 132 个、管道 131 条,管道断面形状为矩形或圆形,市政管网均排水至杨梅河。在模型中将杨梅河概化为明渠,概化后节点 152 个、河段

数 171 条,断面形状为矩形、梯形或复合断面。综合管廊雨水舱概化后节点 28 个、管段数 30 条,断面形状为矩形或圆形。研究区排放口仅 1 个,为杨梅河出口。

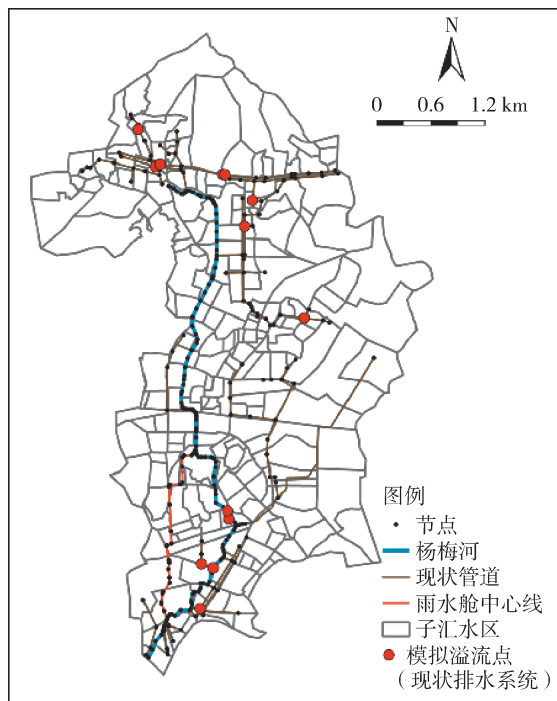


图2 研究区概化结果和实测降雨条件下溢流点分布模拟结果

Fig.2 Generalization of study area and distribution of overflow spots simulated with measured rainfall

研究区内包括未开发的森林用地和已开发的城市用地,因此子汇水区的划分采用两种方式:未开发区域采用 ArcGIS 中的水文分析工具划分,已开发区域根据卫星图中的建筑物、交通道路分布和管网走向进行人工划分。整个研究区共划分出 302 个子汇水区,平均面积为 0.052 km^2 ,最大的子汇水区面积为 0.4 km^2 。

2.1.2 模型参数输入

子汇水区的确定性参数,如面积、特征宽度、平均坡度、不透水率等通过 ArcGIS 获取^[17-18];子汇水区的不确定性参数根据文献[19]并参考邻近地区经验数据获取,具体取值如下:透水和不透水地表曼宁系数分别为 0.6、0.013,透水和不透水地表注蓄深度分别为 6.5 mm、2.1 mm,不透水区无注蓄的不透水面积占比为 30%,最大、最小入渗率分别为 115.511 mm/h 、 1.725 mm/h ,衰减系数为 6.1 h^{-1} ,管道及雨水舱糙率为 0.012,杨梅河的边坡和底部糙率分别为 0.03 和 0.015。管网水系的井底高程、管道起点和终点与井底的高程差、管道尺寸以及杨梅河断面尺寸等,通过 CAD 管网资料确定。

2.1.3 设计降雨推求

广州市暴雨雨型 70% 是单峰型,均匀降雨很少,单峰降雨集中,容易造成洪涝危害^[20]。目前常用的单峰雨型包括芝加哥雨型、Huff 雨型、三角雨型等,其中芝加哥雨型模拟效果较好,一般能满足精度要求,且比较容易确定雨强过程,在国内外广泛应用,因此本文采用该雨型作为设计雨型^[21]。杨梅河长 6.7 km,考虑到河道有一定的滞蓄作用^[22],降雨历时取 3 h,雨峰系数 r 取 0.4^[23],采用广州市中心城区区间暴雨强度公式,得到降雨重现期(P)为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 时杨梅河区域的设计降雨过程线,如图 3 所示。

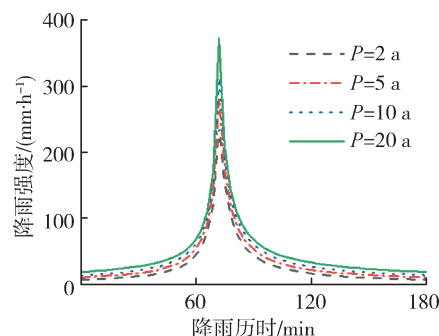


图3 不同降雨重现期设计降雨过程线

Fig.3 Design rainfall processes of different rainfall return periods

2.2 SWMM 模型验证

采用广州萝岗国家气象观测站收集的 2019 年 6 月 24 日 5:45—18:20 的实测降雨资料对模型的适用性进行初步验证。利用模型对实测降雨条件下的现状排水系统溢流进行模拟分析,得到 12:15—12:30 实测峰值降水量下的模拟溢流点分布(图 2),溢流点主要分布在柯目塱南路口、高唐石科技园、新塘实验幼儿园和老虎佛村等 4 处。由于缺乏排水系统流量和水位的实测数据,参考杨梅河区域内涝调研资料^[16,24]发现,模拟的溢流集中在实际的 4 处易涝点,表明模型模拟结果与实际情况相符,可用于研究区在不同降雨重现期下的防洪排涝效果评估。

3 雨水舱断面优化分析

基于上述已率定和验证的现状排水系统水文模型(简称 XZ),根据图 1 综合管廊工程的设计方案,增加雨水舱,构建现状排水系统和雨水舱相结合的水文模型(简称 GL),在 4 个降雨重现期(2 a、5 a、10 a 和 20 a)下,改变雨水舱断面尺寸,评估不同断面雨水舱缓解区域内涝的效果,从而获得较优断面的雨水舱。考虑到综合管廊结构因素,保持雨水舱

断面高度 3.3 m 不变,宽度设计为 2 ~ 6 m,并以 0.4 m 为间距改变。

3.1 研究区总溢流量分析

图 4 给出不同降雨重现期下研究区总溢流量与雨水舱断面宽度的关系。由图 4 可知,随着雨水舱断面宽度增大,研究区总溢流量逐步减小。断面宽度以 0.4 m 间距从 2 m 增至 4 m 时,在重现期分别为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨条件下,总溢流量通过不同断面削减的平均削减率分别为 13.8%、11.0%、9.8% 和 8.7%;断面宽度以 0.4 m 间距从 4 m 增至 6 m 时,总溢流量变化趋于平缓,在重现期分别为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨条件下,总溢流量通过不同断面削减的平均削减率分别为 4.3%、3.0%、2.6% 和 2.1%。以上分析表明断面宽度扩大至 4 m 时,雨水舱对研究区内涝的缓解效果基本已达上限。

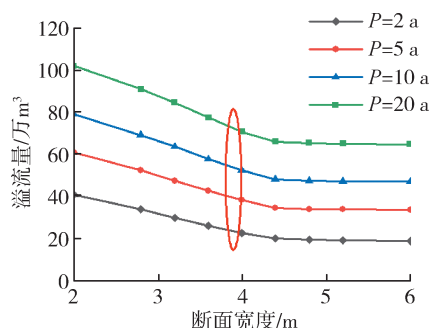


图 4 不同降雨重现期下研究区总溢流量与雨水舱断面宽度的关系

Fig.4 Relationship between total amount of overflow in study area and cross-sectional width of rainwater tank for different rainfall return periods

3.2 典型易涝区溢流量分析

图 5 给出不同降雨重现期下典型易涝点新塘实验幼儿园和老虎佛村溢流量与雨水舱断面宽度的关系。由图 5 可知,随着雨水舱断面宽度增大,两处易涝点的溢流量均逐步减小。雨水舱断面宽度以 0.4 m 间距从 2 m 增至 6 m 时,在重现期分别为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨条件下,新塘实验幼儿园周边溢流量通过不同断面削减的平均削减率为 26% ~ 40%,老虎佛村溢流量平均削减率分别为 3.7%、3.0%、2.4% 和 2.5%。由于新塘实验幼儿园位置离管廊较近,其溢流量下降趋势更明显,雨水舱断面宽度的改变对幼儿园周边溢流量的影响更大。

综上所述,随着雨水舱断面宽度增大,研究区总溢流量及两处典型内涝点的溢流量均逐步减小。当断面宽度增大至 4 m 后,总溢流量变化趋于平缓,此时雨水舱对研究区内涝的缓解效果基本已达上限;断面宽度变化对老虎佛村内涝影响不大,对新塘实验幼儿园周边内涝影响显著。考虑到工程投资及用

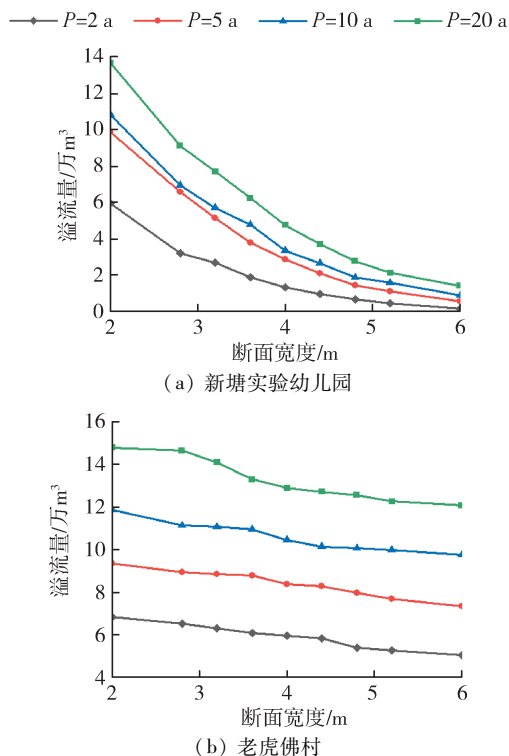


图 5 不同降雨重现期下易涝点溢流量与雨水舱断面宽度的关系

Fig.5 Relationships between amount of overflow at flood-prone spots and cross-sectional width of rainwater tank for different rainfall return periods

地范围的限制,雨水舱较优断面设计为宽 4 m、高 3.3 m。

4 防洪排涝效果分析

4.1 杨梅河出口流量分析

选取研究区排放口即杨梅河出口进行流量过程分析,可较好地反映综合管廊雨水舱的防洪排涝效果。图 6 是重现期分别为 2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨条件下杨梅河出口降雨和径流过程。由图 6 可知,模型 GL 的峰值流量大于模型 XZ,这是由于雨水舱作为分洪通道,可使杨梅河上游来水以及下游两岸的地表径流更顺畅地排至杨梅河出口,导致研究区溢流量减少以及出口峰值流量增加。在重现期分别 2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨条件下,与模型 XZ 相比,模型 GL 的峰值流量依次增加 41.0%、39.8%、28.8% 和 25.2%,表明峰值流量变化率逐步减小。从 $P = 10 a$ 向 $P = 20 a$ 过渡时,峰值流量变化不明显,且杨梅河未出现过流超载的情况,说明管网以及雨水舱的过流承载力有限;在 $P = 20 a$ 时,系统排水能力达到上限,杨梅河出口达到最大出流能力。由图 6 还可看出降雨停止后,相比模型 GL,模型 XZ 的流量更大,主要原因是此时管网排水能力恢复,部分地表溢流逐渐流向管网并排至杨梅河出口。

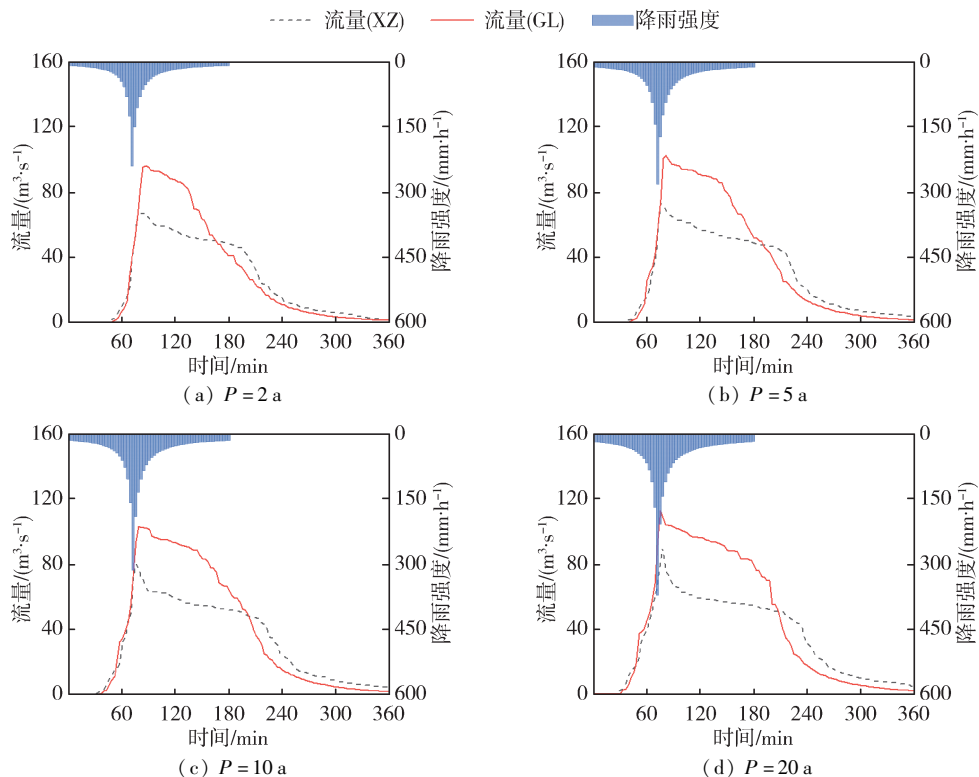


图6 不同降雨重现期下杨梅河出口的降雨强度和各模型的径流过程
Fig.6 Rainfall intensity curves and runoff processes of different models at Yangmei River outlet for different rainfall return periods

4.2 溢流量削减效果分析

选取图1中4处易涝点作为典型内涝点进行分析,统计不同工况下典型内涝点的溢流量,并分析模型GL与模型XZ相比溢流量减少的程度,如表1所示。从表1可知,在 $P=2\text{ a}$ 、 5 a 、 10 a 和 20 a 时,综合管廊雨水舱使新塘实验幼儿园周边的溢流量依次削减了90.5%、85.9%、85.8%和83.7%,均值为86.5%,使老虎佛村的溢流量依次削减了43.0%、42.8%、42.0%和40.9%,均值为42.2%,表明综合管廊雨水舱可缓解杨梅河下游内涝,且对新塘实验幼儿园周边溢流量的削减效果更佳。柯目塍南路口和高唐石科技园溢流量平均削减率分别为1.8%和

0.5%,表明综合管廊雨水舱对上游两处内涝点的溢流基本不起作用。随着降雨重现期增加,各内涝点溢流量削减率逐渐减小,表明雨水舱在低降雨重现期下对溢流量的削减效果更佳。雨水舱承担杨梅河洪水分流的任务,新塘实验幼儿园和老虎佛村均位于分流节点的下游,其中新塘实验幼儿园处的管网节点距离分流节点约0.7 km,仅接收周围的地表径流,而老虎佛村距离分流节点约1.6 km,且与之相关的管网数量较多,因此老虎佛村的溢流受雨水舱影响相对较小。柯目塍南路口和高唐石科技园位于分流节点上游3.2 km处,周边管道直径偏小且管道维护力度不足^[16],两处的溢流受周边管网影响较大,

表1 不同降雨重现期下典型内涝点溢流量及其削减率

Table 1 Amount of overflow and its reduction rate at typical flood-prone spots for different rainfall return periods

P/a	模型	溢流量/万 m^3				溢流量削减率/%			
		新塘实验 幼儿园	老虎 佛村	柯目塍 南路口	高唐石 科技园	新塘实验 幼儿园	老虎 佛村	柯目塍 南路口	高唐石 科技园
2	XZ	13.82	10.81	0.58	1.47	90.5	43.0	4.7	0.9
	GL	1.32	6.16	0.55	1.46				
5	XZ	20.20	14.61	0.75	2.36	85.9	42.8	1.4	0.6
	GL	2.85	8.36	0.74	2.35				
10	XZ	23.56	18.02	0.91	3.16	85.8	42.0	0.9	0.4
	GL	3.34	10.45	0.90	3.15				
20	XZ	29.03	21.80	1.08	4.21	83.7	40.9	0.1	0.1
	GL	4.73	12.88	1.07	4.20				

注:溢流量削减率表示GL模型溢流量相对于XZ模型溢流量的削减。

基本不受雨水舱的影响。

5 结 论

a. 构建了杨梅河区域现状排水系统和现状排水系统结合雨水舱两种工况的 SWMM 模型,在实测降雨条件下,对现状排水系统的模拟结果与实际情况相符,说明模型可用于研究区不同降雨重现期下、不同工况的防洪排涝效果评估。

b. 保持雨水舱断面高度 3.3 m 不变,当断面宽度增大至 4 m 后,研究区总溢流量变化趋于平缓,此时雨水舱对研究区内涝的缓解效果基本已达上限。受工程投资及用地范围的限制,雨水舱较优断面设计为宽 4 m、高 3.3 m。

c. 综合管廊雨水舱增大了杨梅河出口峰值流量,在 $P=20$ a 降雨条件下,杨梅河出口达到最大出流能力;综合管廊雨水舱可缓解杨梅河下游内涝,下游典型内涝点新塘实验幼儿园和老虎佛村溢流量平均削减率分别约 86.5% 和 42.2%,表明雨水舱对新塘实验幼儿园易涝点溢流量的削减效果更佳;雨水舱对上游典型内涝点溢流量的削减基本不起作用。

参考文献:

[1] GENDER T K, LUO Y, HAMMAD A. Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104073.

[2] LUO Y, ALAGHBANDRAD A, GENDER T K, et al. History and recent development of multi-purpose utility tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103(1/2): 103511.

[3] 住房和城乡建设部. 关于提高城市排水防涝能力推进城市地下综合管廊建设的通知: 建城[2016]174号[A/OL]. (2016-08-16)[2020-09-04]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201608/t20160823_228649.html.

[4] 许云骅, 金善朝, 徐浩煜. 综合管廊运维目标、原则及新技术应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 53-58. (XU Yunhua, JIN Shanchao, XU Haoyu. Targets, principles and new technologies application of the comprehensive utility tunnel operation and maintenance [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 53-58. (in Chinese))

[5] CANTO-PERELLO J, CURIEL-ESPARZA J, CALVO V. Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 185-189.

[6] CANTO-PERELLO J, CURIEL-ESPARZA J. Risks and potential hazards in utility tunnels for urban areas [J]. Municipal Engineer, 2003, 156(ME1): 51-56.

[7] 刘羽. 城市道路综合管廊排水管线入廊相关技术研究

[J]. 山西建筑, 2017, 43(19): 123-125. (LIU Yu. Study on comprehensive pipe gallery drainage and pipeline corridor entrance of the town road [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(19): 123-125. (in Chinese))

[8] 曾庆红. 地下综合管廊、海绵城市相结合的污水零排放新型城市体系研究[J]. 建设科技, 2017(19): 108-111. (ZENG Qinghong. Research on new sewage zero discharge urban system combining underground utility tunnel with sponge city [J]. Construction Science and Technology, 2017(19): 108-111. (in Chinese))

[9] 张国钟. 雨水管渠入廊设计要点探讨[J]. 中国市政工程, 2016(2): 56-59. (ZHANG Guozhong. A discussion of design key points of storm sewer drainage into utility tunnel [J]. China Municipal Engineering, 2016(2): 56-59. (in Chinese))

[10] 邱壮, 王家良, 龚克娜, 等. 海绵城市理念下雨水入廊设计思考[J]. 四川建筑, 2019, 39(1): 121-122. (QIU Zhuang, WANG Jialiang, GONG Kena, et al. Thoughts on the design of rainwater corridor under the concept of sponge city [J]. Sichuan Architecture, 2019, 39(1): 121-122. (in Chinese))

[11] 向帆, 蒋文岗, 杨晓光, 等. 综合管廊内雨污水管道的管线设计要点[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 41-46. (XIANG Fan, JIANG Wengang, YANG Xiaoguang, et al. Pipeline design key points of the rainwater and wastewater sewer in utility tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 41-46. (in Chinese))

[12] 张瑞峰. 排水管道入廊条件与技术方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

[13] 张韵, 刘成林, 杨京生. 推进城市地下综合管廊建设可持续发展的几点思考[J]. 给水排水, 2016, 52(6): 1-3. (ZHANG Yun, LIU Chenglin, YANG Jingsheng. Several thoughts on promoting sustainable development of urban underground comprehensive utility tunnel construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(6): 1-3. (in Chinese))

[14] 向小华, 陈颖悟, 吴晓玲, 等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 528-533. (in Chinese))

[15] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))

[16] 万杰, 朱理铭. 广州市车陂涌流域内涝分析及治理对策

- 研究[J]. 市政技术, 2014, 32(5): 103-106. (WAN Jie, ZHU Liming. Waterlogging analysis and countermeasures study of Chebei Stream Basin in Guangzhou[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(5): 103-106. (in Chinese))
- [17] 刘兴坡. 城市雨水管网模型参数校准研究综述[J]. 给水排水, 2009, 45(增刊1): 452-455. (LIU Xingpo. Review on parameter calibration of urban rainwater pipeline model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(Sup1): 452-455. (in Chinese))
- [18] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [19] 曾家俊, 麦叶鹏, 李志威, 等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 15-21. (in Chinese))
- [20] 银磊, 陈晓宏, 陈志和, 等. 广州市典型雨量站暴雨雨型研究[J]. 水资源研究, 2013, 2: 409-414. (YIN Lei, CHEN Xiaohong, CHEN Zhihe, et al. Study on storm pattern of typical rainfall station in Guangzhou[J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 2: 409-414. (in Chinese))
- [21] 成志轩, 金家明, 王珺. 雨型对低影响开发设施径流控制效果的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 134-138. (CHENG Zhixuan, JIN Jiaming, WANG Jun. Influence of rainfall pattern on runoff control of low impact development facilities[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 134-138. (in Chinese))
- [22] 黄国如, 王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 1-5. (in Chinese))
- [23] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese))
- [24] 李珊珊, 王兆礼, 赖成光, 等. 杨梅河流域“海绵型”综合管廊水文效应模拟[J/OL]. 水资源保护, 1-11 [2021-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210308.1627.002.html>. (LI Shanshan, WANG Zhaoli, LAI Chengguang, et al. Simulation of hydrological effect of combination between lid and underground integrated pipe corridors in Yangmei River Basin [J/OL]. Water Resources Protection, 1-11 [2021-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210308.1627.002.html>. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-09-04 编辑: 施业)

(上接第 19 页)

- [19] 谢幼琼, 顾圣平. 城市用水时间序列的 Hurst 指数研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 27-29. (XIE Youqiong, GU Shengping. Research on Hurst exponent of time series of urban water consumption[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 27-29. (in Chinese))
- [20] 王小杰, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于分形和 R/S 分析的渭河干流径流变化特征研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 102-108. (WANG Xiaojie, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Analysis of runoff variation characteristics in the mainstream of Weihe River based on fractal theory and R/S analysis method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 102-108. (in Chinese))
- [21] 宋德彬. 黄河三角洲地区近 50 年气温和降水的演变特征及 R/S 分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [22] 李政, 张文太, 轩俊伟. 伊宁市 1956—2015 年强降雨特征及对洪灾的影响[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 49-

55. (LI Zheng, ZHANG Wentai, XUAN Junwei. Characteristics of heavy rainfall in Yining City from 1956 to 2015 and its impact on flood[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 49-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-23 编辑: 施业)

