

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.020

基于SWMM的大型双曲屋面雨水径流模拟

陈 韬¹, 钟传胤¹, 李 丹², 康 健², 张春苹²

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

摘 要: 以国家速滑馆为例,提出了一种基于暴雨洪水管理模型(SWMM)构建大型双曲屋面雨水径流模型的方法。对研究区域屋面虹吸雨水排水系统在设计暴雨重现期(P)为10、50、100 a情景下的运行状态进行了模拟分析,并结合现场实测数据对模型的可行性进行验证。模拟结果显示,在各重现期下虹吸系统的启动比例均达到了预期,屋面局部积水点比例较小且积水深度处于可控范围内,不会对屋面整体安全性构成威胁,并可根据模拟结果设置挡水板、天沟溢流口等技术措施,对屋面进行雨水系统设计。

关键词: 国家速滑馆; 大型双曲屋面; 暴雨洪水管理模型(SWMM); 虹吸雨水排水系统; 屋面积水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0121-07

Modeling of Stormwater Runoff in Large Hyperbolic Roof Based on SWMM

CHEN Tao¹, ZHONG Chuan-yin¹, LI Dan², KANG Jian², ZHANG Chun-ping²

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Institute of Architectural Design <Group> Co. Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: A method for establishment of large hyperbolic roof stormwater runoff model based on storm water management model (SWMM) was proposed and applied in the National Speed Skating Oval. The operation status of the roof siphon rainwater drainage system in the study area under scenarios with designed rainfall return period (P) of 10 years, 50 years and 100 years was simulated, and the feasibility of the model was verified with on-site measured data. The simulation results showed that the startup ratio of siphon system in each return period was up to the expectation, the proportion of local ponding points in the roof was small and the ponding depth was in a controllable range, which had no threat to the overall safety of the roof. In addition, water baffle, gutter overflow and other technical measures could be adopted to design the roof stormwater system according to the simulation results.

Key words: National Speed Skating Oval; large hyperbolic roof; storm water management model (SWMM); siphon rainwater drainage system; roof ponding

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFF0301502)

通信作者: 钟传胤 E-mail: 953680970@qq.com

屋面雨水排水系统作为建筑物的重要配套系统组成部分,其排水设施的完善程度往往会直接关系到建筑工程的质量和安。国家速滑馆屋面属于大型异形屋面,此类屋面的虹吸雨水排水系统实际运行情况需要重点关注,但目前研究主要集中在雨水系统设计与现场试验测试层面,未涉及对雨水系统的数值模拟与分析。另外,当极端暴雨天气发生时,超过重现期的雨水量不能通过雨水立管及时排放,导致屋面出现局部积水,且如果暴雨持续时间较长、积水深度达到一定值时就会对建筑屋面结构荷载安全产生威胁,因此屋面积水情况同样不可忽视。笔者选用暴雨洪水管理模型(SWMM)软件,以国家速滑馆为研究对象,拟提供一种基于SWMM的双曲屋面模型构建方法,并利用该模型对不同降雨事件下屋面雨水排水系统的运行状态和屋面积水分布进行模拟与分析。

1 工程简介

国家速滑馆位于北京奥林匹克森林公园网球中心南侧,建筑面积约 $13 \times 10^4 \text{ m}^2$,建筑高度为33.8 m,屋面面积约为 $17\,000 \text{ m}^2$,是一个综合性场馆。它采用目前世界体育馆中规模最大的单层双向正交马鞍形索网屋面,外形复杂,高低起伏,表面顺滑但曲面转角多,设计效果如图1所示。速滑馆屋面在视觉上无明确的排水分界线,现有计算方法无法准确计算出屋面雨水的径流分布。因此采用SWMM软件数值模拟手段,针对不同重现期下的降雨事件,跟踪模拟速滑馆屋面雨水的径流分布以及排放过程。

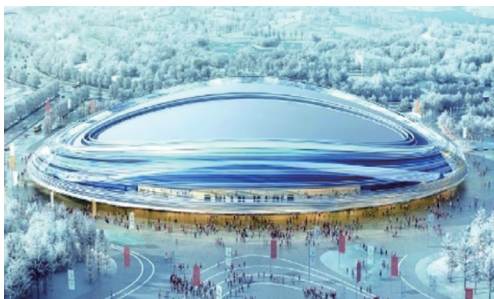


图1 国家速滑馆的设计效果

Fig.1 Design renderings of National Speed Skating Oval

2 SWMM模型构建及参数率定

2.1 研究区域概况

国家速滑馆屋面呈马鞍形对称平面,建模区域选择速滑馆东南角的1/4屋面,其模拟结果可以代

表整个屋面。首先,根据屋面高程、天沟走向、雨水斗分布、屋顶构件及属性等特点人工划分子汇水区;其次,通过研究区域管道数据,构建屋面空间拓扑关系,简化管道结构,并将屋面天沟内虹吸雨水斗设置为接收子汇水区雨水径流的节点,室外雨水井设置为排放口;最终将研究区域概化为24个子汇水区、34条管渠、24个节点、2个排放口。研究区域的SWMM模型如图2所示,为方便观察,管道信息未在图中显示。

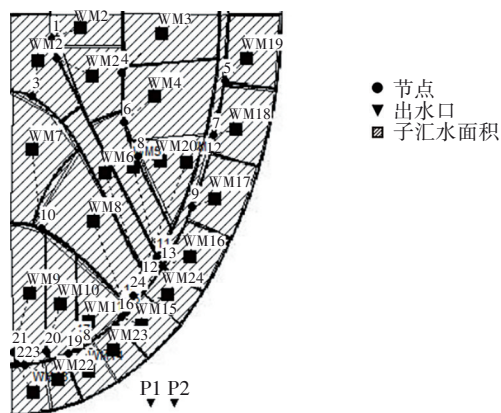


图2 研究区域的SWMM模型

Fig.2 SWMM model of study area

研究区域内共有4条内天沟与2条外环沟,内天沟编号为A、B、C、D,外环沟编号为E、F。为避免单个雨水斗接收多个汇水面积的雨水径流形成局部积水,屋面天沟内设有挡水板,确保作为节点的雨水斗均有自己特定的接收区域。根据屋面南北最低、东西最高的坡度特性,对各个子汇水面积的雨水排出口进行分配,雨水流向如图3所示,依次将24个子汇水区的雨水分配到24个节点。

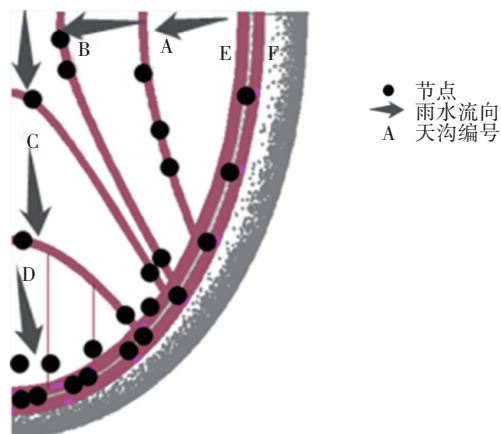


图3 屋面天沟编号及雨水流向

Fig.3 Roof gutter number and rainwater flow direction

2.2 管道系统的搭建

对于模型中管道系统的搭建,总体上将不影响整体格局的次要管道剔除,直径和坡度相同的管道合并为同一管道,以减少节点的分布。具体参照以下规则:①雨水斗连接管的长度作为软件中节点的深度信息输入;②将同一虹吸管道系统中的节点相连以形成各雨水斗间的悬吊管;③主立管最远端节点与立管顶端相连,形成末端悬吊管,长度可根据管径等信息进行相加或剔除;④立管顶端与相应的地下排水井相连,构成虹吸管道系统中的主立管。

以 HYL-33 虹吸雨水管道系统为例,如图 4 所示。系统中两个雨水斗节点编号分别为 15、16,连接管长度均为 0.7 m,将节点相连形成雨水斗间的悬吊管,末端悬吊管规格为 De125,长度相加合并,系统中雨水最终排入 P1 雨水井排放口,主立管长 11.2 m,研究区域内共有 10 根主立管。

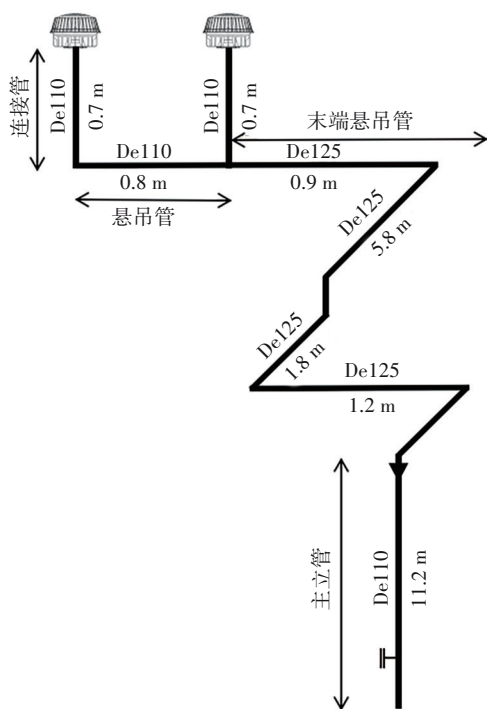


图4 HYL-33虹吸雨水管道系统示意

Fig.4 Diagram of HYL-33 siphon rainwater pipe system

2.3 模型参数率定

管道的全面信息包括管道的长度、断面深度、粗糙系数与进水偏移等;节点的主要参数为内底标高、最大深度。相比于普通排水管道,虹吸式雨水排水管道内的水流状态主要为满管流,SWMM模型在流态模拟时提供了3种计算方法,即恒定流法、运动波法和动力波法。虹吸管道在运行时水流多为

满管有压流,当前多数研究^[1]采用运动波法对此类有压管道进行汇流计算,由于研究区域的屋面坡度较大,为提高计算精度以及较为真实地反映虹吸管道运行情况,最终选取基于圣维南方程组的动力波法进行流态模拟,其中,计算时间步长设置为10 s,报告步长设置为1 min。虹吸管道系统采用HDPE管材,管道的断面深度取值为管径,管道系统内不存在进水偏移;查阅SWMM手册,曼宁系数 n 根据附录中给出的参考范围,经校验后取值为0.013。节点的内底标高以及最大深度均可在施工图中获取,具体如下:编号1~24的节点内底标高分别为13.569、11.265、16.869、19.579、25.850、19.051、24.029、19.051、21.236、15.444、17.845、17.515、18.622、15.006、14.762、14.762、11.681、12.044、12.044、10.988、10.825、11.118、11.118、14.882 m;最大深度分别为1.00、0.70、1.00、0.70、0.70、0.70、0.70、1.05、0.70、0.70、1.00、0.70、1.00、0.70、0.70、0.70、0.70、0.70、0.70、0.70、0.70、0.70、0.71、0.70 m。

速滑馆屋面上均铺有橡胶材质的防水层,根据SWMM手册的建议,子汇水区的不渗透地表面积百分比取100%,橡胶表面的径流曼宁系数 n 取0.024,不渗透性洼地蓄水量取最小值1.27 mm(0.05 in),并在屋面等高线图中通过高程差与水平距离的比值计算出各区域的坡度,子汇水区参数信息汇总如表1所示。

表1 速滑馆屋面雨水系统子汇水区参数

Tab.1 Parameters of subcatchment area of roof rainwater drainage system of National Speed Skating Oval

编号	面积/ m ²	宽度/m	坡度/ %	出水 节点 编号	编号	面积/ m ²	宽度/m	坡度/ %	出水 节点 编号
WM1	335	18.3	0.27	3	WM13	116.25	10.8	0.20	22
WM2	241.25	15.5	0.13	1	WM14	130	11.4	0.20	19
WM3	172.5	13.1	0.68	4	WM15	290	17.0	0.20	16
WM4	400	20.0	0.45	6	WM16	205	14.3	0.20	13
WM5	290	17.0	0.18	11	WM17	280	16.7	0.20	9
WM6	260	16.1	0.12	12	WM18	300	17.3	0.20	7
WM7	485	22.0	0.14	10	WM19	290	17.0	0.20	5
WM8	282.5	16.8	0.15	14	WM20	400	20.0	0.25	8
WM9	390	19.7	0.30	21	WM21	241.25	15.5	0.13	2
WM10	260	16.1	0.31	20	WM22	116.25	10.8	0.20	23
WM11	220	14.8	0.27	17	WM23	130	11.4	0.20	18
WM12	220	14.8	0.67	15	WM24	282.5	16.8	0.20	24

模型中的雨水均匀分布在24个子汇水区域内,屋面不存在任何低影响开发(LID)措施,模型中水质参数不予设置。

3 设计雨型和雨量

北京位于华北平原北部,属于温带大陆性季风气候,年均降雨量约为600 mm。采用《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016)中的暴雨强度公式[见式(1)和式(2)]计算研究区域的暴雨强度。

$$q = \frac{2001(1 + 0.811 \lg P)}{(t + 8)^{0.711}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为重现期,a; t 为降雨历时,min。

适用范围: $t \leq 120 \text{ min}$, $P \leq 10 \text{ a}$ 。

$$q = \frac{1378(1 + 1.047 \lg P)}{(t + 8)^{0.642}} \quad (2)$$

适用范围: $t \leq 120 \text{ min}$, $P > 10 \text{ a}$ 。

不同暴雨重现期的降雨过程线一般结合当地暴雨强度公式和所选雨型综合确定^[2],根据袁冯等人^[3]对北京市短历时暴雨强度和雨型的研究,本研究采用芝加哥雨型法。根据已有研究^[4-6],设计降雨历时宜取120 min,雨峰系数取0.4。根据速滑馆的雨水设计说明书,屋面排水系统设计重现期为10 a,屋面设置溢流口,排水系统和溢流设施总设计重现期为50 a,并以100 a重现期下的雨量进行系统校核。因此根据暴雨强度公式(1)和(2)分别推求重现期为10、50、100 a时的设计暴雨强度,并利用芝加哥雨型法120 min设计暴雨雨型推求不同重现期下的降雨过程线以及累计降雨量曲线,如图5所示。

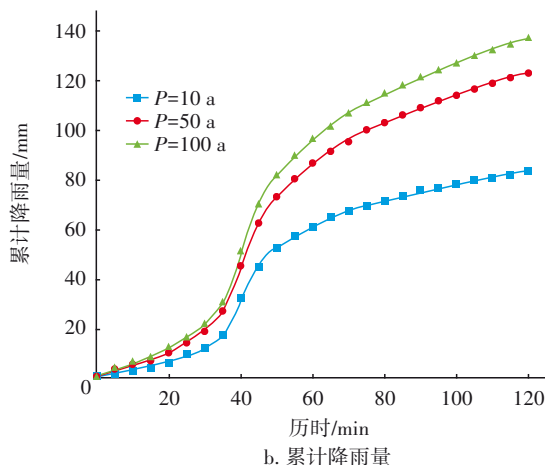
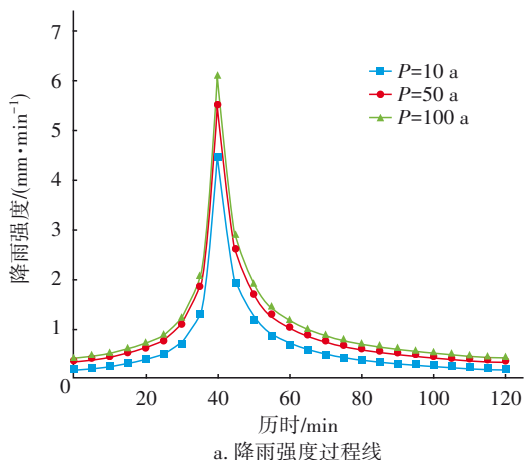


图5 各重现期下的降雨强度过程线和累计降雨量

Fig.5 Rainfall intensity process line and accumulated rainfall at each return period

4 模型验证

4.1 综合径流系数法

为保证模型的可靠性及精确度,需对构建的模型进行验证。本研究采用综合径流系数法进行模型的验证,即将模型模拟所得的径流系数与汇水区综合径流系数进行对比,看其结果是否在取值范围内。其中综合径流系数按照《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)中5.3.13规定取值:非绿化屋面、绿地、块石路面、级配碎石路面、混凝土和沥青路面、非铺砌路面的径流系数分别为0.90、0.15、0.60、0.45、0.90、0.30。

本研究区域对应于GB 50015—2019中的非绿化屋面,综合径流系数为0.90。将上述设计雨型10 a重现期下的降雨强度输入模型中,模拟结果显示,地表径流误差为-0.19%,流量演算误差为0.02%,两者皆在误差允许范围内。并且模型的径流系数为0.88,误差处于允许范围内,模拟结果真实可信。为了验证模型的稳定性,再将50 a和100 a重现期下的降雨强度代入模型中,计算得到的径流系数分别为0.90和0.91,说明所构建的模型具有一定的可靠性。

4.2 现场试验验证

为进一步验证模型模拟过程的准确性,选择2021年7月12日北京市的一场实测降雨,将超声波流量计安装在研究区域南侧一室外雨水井内,以测量监测时段内雨水井雨水流量数据。获得数据后,将降雨历时内雨水井的排放流量和模型模拟的系统出流量进行比较。在SWMM模型中共构建了9个

虹吸雨水排水系统,而本次试验所用雨水井承接其中6个虹吸雨水系统的雨水排放,所以存在一定的流量差值,但对整体流量的变化趋势并没有影响。雨水井排放流量与系统出流量曲线拟合情况如图6所示。可以看出,两种情况下的流量变化趋势基本相同,拟合度较好,由此证明所构建的SWMM模型能够对国家速滑馆的屋面雨水排水系统进行较好的模拟。

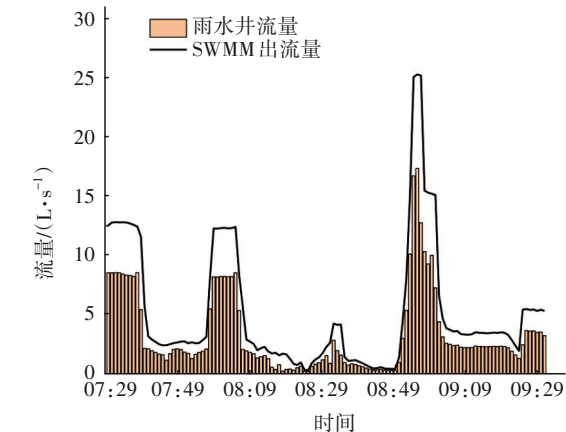


图6 雨水井排放流量与系统出流量拟合情况
Fig.6 Fitting diagram of rainwater well discharge and system discharge

5 模拟结果及分析

5.1 不同降雨情景下虹吸管道系统的流量变化

通过模拟虹吸雨水排水系统中管道内流量的变化,可以反映管道系统的虹吸启动情况,模型中管道信息包括进流水深和满流时数等。以HYL-31虹吸雨水系统中节点2与节点11之间的管渠2-11为例,绘制悬吊管进流水深随降雨时间的变化曲线,如图7所示。降雨开始后,管段内水气比不断增加,由设计雨型的降雨强度变化可知,在达到雨强峰值前,降雨量约为总量的1/3,管道系统内的流态大多为重力流,水位上升相对平缓;随着雨强的不断增大,管段内水位迅速上升,10 a重现期下悬吊管在降雨39 min时断面水气比达到70%;国外的研究表明^[7],当雨水悬吊管断面水气比达到70%以上时,即可在系统中形成相对稳定的虹吸状态,最终水位达到最大水深即管径0.125 m处,管段处于满管流状态,此时系统完全启动虹吸。50 a和100 a重现期降雨情景下系统虹吸启动时刻不断提前,分别为29、25 min。

根据模拟总结报告中各管道的进水深度信息,

统计出本工程在不同重现期降雨情景下管道系统的虹吸启动情况,如表2所示。通过对超载管道系统比例和超载时长的统计,可作为分析速滑馆管道系统排水能力的依据。

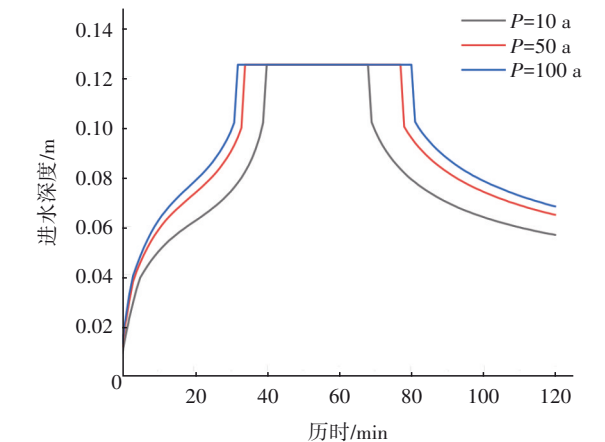


图7 不同重现期降雨情景下悬吊管2-11的断面深度变化
Fig.7 Depth variation of suspended pipe 2-11 at rainfall scenarios with different return periods

表2 管道超载情况统计
Tab.2 Statistics of pipeline overload

重现期/a	虹吸管道系统启动数量/个	虹吸管道系统启动比例/%	启动时长≥1 h管道系统数量/个	启动时长≥1 h管道系统比例/%
10	9	90	1	10
50	10	100	2	20
100	10	100	3	30

5.2 不同降雨情景下屋面积水情况

当降雨量超过屋面雨水排水系统的排放能力时,天沟内会形成局部积水;当积水深度达到一定值时,会影响天沟甚至整个屋面的正常功能使用。因此节点积水和节点深度是本工程需要重点关注的信息。

以多斗虹吸雨水排水系统HYL-31为例分析屋面积水情况,系统中有3个雨水斗位于同一条天沟B内,绘制50 a重现期降雨情景下节点1、2、11的积水量随降雨时间的变化曲线,如图8(a)所示。节点1在天沟B内的高程值最大,当降雨持续至12 min时,雨水流量超过雨水斗的设定流量,雨水斗发生溢流并在天沟内产生局部积水,随着降雨强度的持续增大,积水深度不断增加,在降雨43 min后,节点2开始产生局部积水;降雨58 min后,各节点的积水量达到峰值,之后随着降雨强度的减小,积水量由

于雨水斗排水能力的恢复而逐渐减少。节点11在整个降雨过程中积水量较小,从排水管长的角度分析,可能是由于节点2与节点11之间的悬吊管长度长达115.3 m,相比于节点1与节点2之间的悬吊管长9.5 m,进入节点11的雨水具有足够的流动空间。

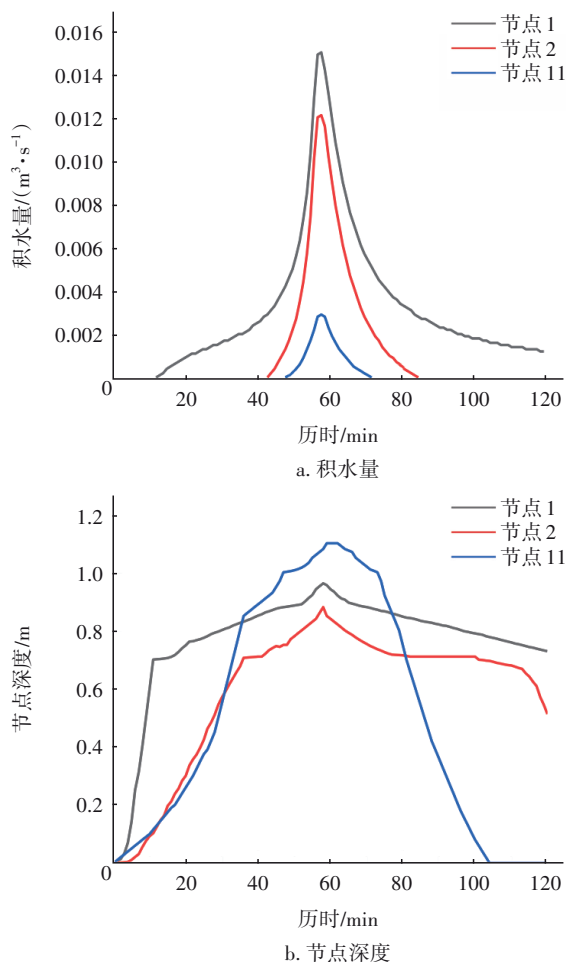


图8 各节点积水量和节点深度随降雨历时的变化曲线

Fig.8 Change curve of water accumulation at each node and node depth with rainfall duration

在模型中设置节点积水面积,雨水斗所在位置的局部积水深度即可通过节点深度随降雨时间的变化得出,如图8(b)所示。节点1在降雨12 min后,雨水水位超过节点最大深度即连接管管长0.7 m处,在58 min时积水深度达到最大值0.262 m。节点2的最大深度为0.71 m,水位最高时积水深度为0.177 m。节点11的最大深度为1 m,积水深度的最大值为0.11 m。

分析提取总结报告中的节点积水信息表,考虑到虹吸雨水斗正常运行时的水深为0.10~0.15 m,积水深度未达到此区间的节点不计入积水节点数,

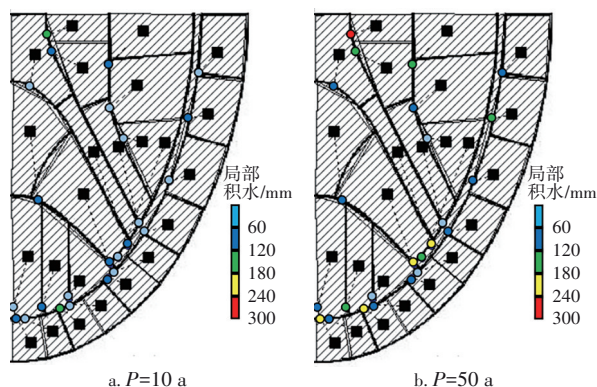
得到节点积水情况如表3所示,进一步分析速滑馆屋面的雨水排放能力。由表3可以看出,在10 a重现期的降雨情景下,并无局部积水情况的发生;在50 a重现期的降雨情景下,积水节点比例及深度皆较小;而且在100 a重现期的降雨情景下,积水时间超过1 h的节点比例亦较小。

表3 节点积水情况统计

Tab.3 Statistics of node ponding

重现期/a	积水节点数量/个	积水节点比例/%	积水时间 ≥ 1 h节点数量/个	积水时间 ≥ 1 h节点比例/%
10	0	—	0	—
50	8	33.3	1	4.2
100	11	45.8	2	8.3

将积水节点的局部积水深度减去正常虹吸启动状态的最大水深150 mm,得到各节点积水情况如下:在50 a重现期的降雨情景下,节点1、2、4、7、12、14、19、22的最大积水深度分别为262、177、161、166、197、195、231、214 mm,平均积水深度分别为141、102、89、92、116、116、125、119 mm;在100 a重现期的降雨情景下,节点1、2、4、5、7、9、12、14、19、20、22的最大积水深度分别为284、203、180、172、186、165、210、221、267、176、239 mm,平均积水深度分别为159、119、105、98、109、91、118、121、151、103、129 mm。可以看出,当 $P=50$ a时,各节点最大积水深度在161~262 mm范围,平均积水深度均处于虹吸雨水系统正常工作水深范围;当 $P=100$ a时,各节点最大积水深度在165~284 mm范围,绝大多数节点的平均积水深度处于虹吸雨水系统正常工作水深范围。这说明虽然降雨会造成部分天沟内局部积水,但大部分天沟内的积水会在短时间内消退,不会造成较大的洪流风险。各重现期下积水节点分布及积水深度情况如图9所示。



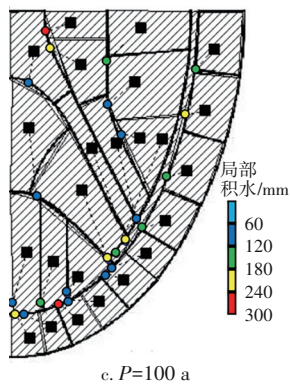


图9 积水节点及积水深度分布

Fig.9 Distribution of ponding nodes and ponding depth

6 结论

① 对于虹吸雨水排水的复杂管道系统模拟,可以在总体上将管道系统分为横管与立管,横管作为正常管渠输入长度、管径等参数;较短的立管作为节点深度信息输入进行简化,较长的主立管需要将管道始端与出户管之间的距离合并作为管长信息输入软件中,可以实现建筑物管道系统在SWMM模型中的构建。

② 基于SWMM模型中的动力波法,将屋面雨水排水系统概化为相应的排水管道可有效对其水文过程进行模拟,将现场数据与模型输出数据进行拟合对比,结果表明,SWMM模型可应用于此类大型异形屋面的雨水径流模拟。

③ 模拟结果显示,速滑馆虹吸雨水系统设计较为合理,在面对短时暴雨天气时,积水不会对屋面荷载构成威胁。

参考文献:

- [1] BARCO J, WONG K M, STENSTROM M K. Automatic calibration of the U. S. EPA SWMM Model for a large urban catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(4): 466-474.
- [2] 蒋明. 新暴雨形势下上海市设计暴雨雨型研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2015, 28(2): 69-73, 80.

JIANG Ming. Study of Shanghai design rainstorm profile under the new rainstorm situation [J]. Journal of Hunan Institute of Technology (Natural Sciences), 2015, 28

(2): 69-73, 80 (in Chinese).

- [3] 袁冯, 张君枝, 王冀, 等. 气候变化背景下北京市短时暴雨的强度及雨型变化特征[J]. 大气科学学报, 2020, 43(5): 802-809.
- YUAN Feng, ZHANG Junzhi, WANG Ji, *et al.* Variation characteristics of intensity and pattern of short duration rainstorm in Beijing under the background of climate change [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(5): 802-809 (in Chinese).
- [4] 李怀民, 常晓栋, 徐宗学, 等. 基于SWMM模型的坡地小区海绵城市改造效果评估[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 43-49, 82.
- LI Huaimin, CHANG Xiaodong, XU Zongxue, *et al.* Assessment of sponge city scheme in a hillside area based on SWMM model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 43-49, 82 (in Chinese).
- [5] 徐雷, 吴正松, 邵知宇, 等. 基于SWMM耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 114-120.
- XU Lei, WU Zhengsong, SHAO Zhiyu, *et al.* Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 114-120 (in Chinese).
- [6] 刘洁, 李玉琼, 张翔, 等. 基于SWMM的不同LID措施城市雨洪控制效果模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 6-11.
- LIU Jie, LI Yuqiong, ZHANG Xiang, *et al.* Research on the urban storm control effect of different LID measures based on SWMM [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(7): 6-11 (in Chinese).
- [7] WRIGHT G B, SWAFFIELD J A, ARTHUR S. Investigation into the performance characteristics of multi-outlet siphonic rainwater systems [J]. American Society of Civil Engineers, 2001, 23(3): 127-141.

作者简介:陈韬(1977-),女,辽宁开原人,博士,教授,研究方向为城市雨水低影响开发。

E-mail:chentao@bucea.edu.cn

收稿日期:2021-11-05

修回日期:2021-12-20

(编辑:刘贵春)