doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202002001

基于实地勘测的城市雨洪模型研究

段园煜1,郭 帅2

(1. 合肥学院 城市建设与交通学院,安徽 合肥 230601;

(2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009/

摘要:针对目前内涝分析采用的计算模型缺乏实地勘测数据,准确性难以验证这一问题,将实地 勘察结果与雨洪模型的建立过程相结合,以合肥高校校园为例进行了实地勘测、模型构建和模 拟结果分析。通过构建基于实测数据的 SWMM 模型,模拟不同降雨重现期情景下的地表径流、 节点溢流等情况,结合实地调查结果进行分析,找出了导致校园发生内涝的具体因素。可推广 应用于城市其他易涝区的研究,具有一定工程意义。

关键词:城市内涝;实地勘测;SWMM 模型;地表径流

中图分类号:TU992 文献标志码:A 文章编号:1671-5322(2020)02-0001-06

当前,我国的城市内涝问题较为突出,各地 区开展了广泛的降雨径流模拟分析研究。总体 来看,构建本地雨洪模型的一般步骤包括^[1-4]: (1)收集研究区域内的资料,包括降雨数据资料、 地形地貌资料、道路及排水管网设计资料等,资料 主要来源为当地相关规划设计 CAD 图、GIS 数据 库、卫星地图等;(2)基于成熟的雨洪模拟软件, 如美国环保署的 Storm Water Management Model (SWMM),构建本地区的雨洪模型;(3)模拟不同 降雨情境下地面产汇流过程及排水管网运行状 态;(4)分析区域内涝的形成原因,提出相应的改 进措施。

然而,采用上述方法构建区域雨洪模型的过程中,往往会碰到如下问题:(1)收集的研究区域 资料往往与实际情况有出入,尤其是快速的城市 建设与发展导致某些区域地形地貌特征改变; (2)实际管道存在淤积、错接、混接、节点和管道 数据缺失等问题,依据原始资料构建的模型往往 无法反映排水系统的实际情况;(3)模型参数的 参考经验值或手册推荐值对所研究区域的适用性 有待验证。此外,由于构建的模型可以通过不断 调试某些参数以实现对模型的率定,导致上述问 题并没有得到足够关注。

为解决上述问题,本研究提出了在有条件的 地区开展基于实地勘测的雨洪模型构建方法与思 路,并以合肥工业大学翡翠湖校区为例,介绍该方 法的具体实施方案与研究成果。

1 实地勘测及数据采集

1.1 研究区域概况

合肥工业大学翡翠湖校区位于合肥市蜀山区 经济技术开发区西南部,由丹霞路、翡翠路、环湖 路环绕,东邻锦绣大道商业区,北依合肥大学城公 共建设区和新建的合肥政务区,西傍翡翠湖公园。 面积共 75.83 公顷,其中建筑部分面积占比 29.58%,道路面积占比 18.01%,草地及其他面 积占比 52.41%。参考该校区原始排水系统设计 资料,校园分为 11 个独立的汇水区域,编号为 Y1~Y11。

1.2 实地勘测

实地勘测工作分为以下4步:

(1)区域概况调查:参照校区排水系统设计 图,对雨水分区进行实地勘察,熟悉区域概况和检 查井位置并对其进行梳理、编号,实施情况如图

收稿日期:2020-02-25

基金项目:安徽省自然科学基金项目(1908085QE211);合肥学院人才科研基金(18-19RC04)。

作者简介:段园煜(1986—),女,安徽六安人,高级工程师,博士,主要研究方向为道路工程设计、软黏土地基处理技术、排水管道水土作用机理。

1a 所示。

(2)基础数据勘察:打开检查井,测定检查井 坐标、管径、管底高程以及管道流向,实施过程如 图 1b、图 1c 所示,测量参数及其测量工具如表 1 所示。摸清管网运行现状,包括堵塞、错接、混接 等情况,并基于实测数据进行管网建模。



a 概况调查



b 检查井内部情况

c RTK 设备读取高程数据

图1 管网普查及数据测量

Fig 1 Pipe network census and data measurement

表1 测量参数及其测量工具

类型	参数	测量工具
节点	内底标高 最大深度	卷尺、钢尺、RTK 仪器 卷尺、钢尺、RTK 仪器
管渠	长度、管径 最大深度	皮尺、激光测距仪 卷尺、钢尺、RTK 仪器
子面积	面积 坡度	Google earth、皮尺、激光测距仪 皮尺、激光测距仪

(3)雨天实地观测:观察各子区域下雨时地 面雨水径流流向,对模型内各子汇水区域进行合 理调整,查看是否有区域积水或检查井溢流现象, 做好记录,实施过程如图2所示。



a 地面径流观测

b 溢流节点观测

c 区域积水观测

图 2 雨天实地观测(2018 年 9 月 1 日) Fig 2 Field investigation and observation in a rainy day(September 1,2018) (4)复核勘察:在后期模型参数率定过程中, 通过实地考察,对建模时存在疑问的地方再次确 认(如对"透水区洼蓄量"进行简单观测等),确保 参数优化的合理性。

1.3 流量数据与降雨数据采集

选择在 Y3 排水分区末端的检查井安装多普



所示。

a 流量计安装图

b 流量数据图

勒式管道流量计(型号 DX-RTU-1),采集该区域

总径流流量,流量计每5 min 记录一次数据,并上

传至云端,流量计安装示意图及流量数据如图3

图 3 流量计安装示意图及流量数据图 Fig 3 Diagram of flowmeter installation and flow data

此外,在3号教学楼顶部安装了1台翻桶式 自记雨量计,以实现对校区内降雨数据的实时测 量与记录,并与流量数据进行对比分析,对模型模 拟的校区产汇流过程进行验证。

2 SWMM 模型构建、参数率定及模拟结果 分析

2.1 模型构建与参数率定

整个校区 SWMM 模型包含子汇水区域 190 个,含有节点 113 个,管渠 113 条,排放口 17 个, 模型图如图 4 所示。

模型对形状参数(宽度、坡度等)、入渗系数、 挂蓄量的变化等最为敏感^[5-6],利用实测数据对 模型各影响参数进行率定,最终的各参数率定值 如表2所示。

纳什效率系数可用来评定水文模型模拟的精度,衡量水文模型模拟值和实际观测值之间的拟合度,其值愈接近于1,模型模拟效果愈好^[7-8]。 本研究利用2018年9月份4场降雨数据计算出 实测总流量与模拟总流量的相对误差(*E*_r)和纳 什效率系数(*E*_w)来评估模型准确性。

相对误差 E_r:

$$E_{\rm r} = \left[\left(\overline{Q}_{\rm sim} - \overline{Q}_{\rm obs} \right) / \overline{Q}_{\rm obs} \right] \times 100\%$$

纳什效率系数 $E_{\rm ns}$:

$$E_{\rm ns} = 1 - \frac{\sum \left(Q_{\rm obs} - Q_{\rm sim} \right)^2}{\sum \left(Q_{\rm obs} - \overline{Q}_{obs} \right)^2}$$

式中: \overline{Q}_{obs} 为实测平均流量,m³/h; \overline{Q}_{sim} 为模拟平均流量,m³/h; Q_{obs} 为实测流量,m³/h; Q_{sim} 为模拟流量,m³/h; Q_{sim} 为模拟流量,m³/h。

4 场降雨中,每场降雨总流量相对误差分别为6.02%、6.38%、6.59%和-11.12%,均在20%以内,4 场降雨综合相对误差为4.54%。根据模拟结果和实际测量数据计算出的纳什效率系数为0.97,接近于1,说明模型可信度高,参数设置合理。

2.2 降雨情境设计与模拟结果分析

根据合肥市上游董铺雨量站 1965~2012 年 暴雨资料推导的暴雨强度公式,结合芝加哥雨型 生成器生成模拟降雨量,分别模拟降雨历时为 360 min,重现期 *P*=1 a、2 a、10 a、50 a 的降雨过 程^[9-10]。不同降雨重现期的节点溢流情况模拟 结果统计如表 3 所示。



图 4 翡翠湖校区 SWMM 模型图 Fig 4 SWMM model map of Emerald Lake Campus

化二 快至了奴平足权	表 2	模型参数率定表
------------	-----	---------

Table 2	Table of	model	parameter	calibration
---------	----------	-------	-----------	-------------

	参 数	推荐范围	最终取值
HORTON	最大滲透率/(m・h ⁻¹)	72. 4 ~ 78. 1	76.2
	最小滲透率/(m・h ⁻¹)	3. 18 ~ 3. 82	3.81
	人滲递减率/h ⁻¹	2 ~ 4	2.5
洼蓄量	透水区洼蓄量/mm	2 ~ 10	12
	不透水区洼蓄量/mm	1.5 ~ 2.5	2.5
粗糙系数	管道粗糙率	0.013 ~ 0.015	0.013
	不透水区曼宁系数	0.02 ~ 0.03	0.03
	透水区曼宁系数	0.1 ~ 0.3	0.25

Table 3 Simulated results on overflow points					
重现期/a	迷法士士卡米	溢流节点	长时间积水节点数	长时间积水	
		发生区域	(溢流 >1 h)	发生区域	
1	2	Y6	1	Y6	
2	4	Y1 \Y6	2	Y6	
10	8	Y1 Y3 Y6 Y8	4	Y1 \Y6	
50	23	Y1 \Y3 \Y4 \Y6 \Y7 \Y8	4	Y1 \Y6	

表 3 节点溢流情况模拟结果

以上模拟结果与9月1日雨天实际观测结果 相符,且与在校园内工作生活的师生所反映的易 涝区域相符。

3 校园内涝成因分析

降雨模拟结果结合实地勘察所获资料,归纳 总结导致该校区内涝的主要因素为:(1)检查井、 雨水篦子堵塞。Y1 区域检查井存在严重堵塞现 象,失去传输能力,且有部分雨水口没有管道接入 检查井而形成小型蓄水池,导致该区域在 P = 1 a 时就出现溢流。(2)管渠排放能力不足。宿舍楼 区、教学楼区、图书馆区建筑面积大,渗透性面积 小,当降雨强度大时,产生的径流量大,管渠因管 径有限不能及时排出所有雨水导致积水。(3)坡 度设置不合理。部分汇流区域地面坡度小,雨水 无法迅速汇入雨水口进入雨水系统造成大量积 水。(4)雨污合流。食堂周围的雨水管路都采用 雨污合流的排水方式,因管道中存在污水,一旦降 雨强度大,管道的承载能力不足,易发生节点溢 流,溢出的水混有污水,气味难闻且污染大,影响 恶劣。(5)建筑屋顶集中排水。考察中发现,存 在将屋顶雨水直接排到硬质路面上,没有导入绿 化带的情况,一定程度上造成了路面水流速度快、 排水压力大的问题。

综上所述,提出基于实地勘测的城市雨洪模 型构建与内涝分析方案的实施步骤如图5所示。



图 5 结合实测的内涝分析方法路线图

Fig 5 Roadmap of waterlogging analysis method combined with actual measurement

4 结论

基于实测数据构建的 SWMM 模型,有效地重 现了暴雨情景下校园易发生积水和内涝的区域。 根据模拟结果结合实地调查结果进行分析,找出 了导致校园发生内涝的具体因素。积累形成了一 套基于实地勘测进行内涝分析的科学方法,可推 广应用于市区其他易涝区的研究,具有一定工程 意义。

参考文献:

- [1] 石赟赟,万东辉,陈黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学,2014,32(6):57-60,12.
- [2] 陈国芬,郭帅,段园煜.海绵城市道路雨水口截流率研究[J].中国给水排水,2019,35(11):135-138.
- [3] DJORDJEVI ĆS, SAUL A J, TABOR G R, et al. Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems[J]. Water Science and Technology, 2013,67(3):535-542.
- [4] 邵迟,吕伟娅. 基于 MIKE 模型对学校场地雨水系统内涝风险评估的案例分析[J]. 净水技术,2018,37(11):129-133.
- [5] 高学珑,陈奕,蔡辉艺,等. 城市发展变化背景下的内涝防治顶层设计研究[J]. 给水排水,2019,45(2):53-57.
- [6] 王成坤,黄纪萍.基于水力耦合模型的城市内涝积水特征与综合防治方案研究[J]. 给水排水,2018,44(S2):112-114.
- [7] 周毅,余明辉,陈永祥. SWMM 子汇水区域宽度参数的估算方法介绍[J]. 中国给水排水,2014,30(22):61-64.
- [8] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等.城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J].水科学进展,2009,20(1):45-51.
- [9] 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水,2006,22(21):64-66, 70.
- [10] 刘春春,刘万青,张悦,等. 基于 SWMM 模型的西安市清河流域暴雨洪峰流量模拟[J]. 干旱区研究,2018,35(1): 35-42.

Research on Urban Rainfall Runoff Model Based on Field Survey

DUAN Yuanyu¹, GUO Shuai²

1. College of Urban Construction and Transportation, Hefei University, Hefei Anhui 230601, China;

2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China

Abstract: In view of the lack of field survey data and the difficulty in verifying the accuracy of the current calculation model used for waterlogging analysis, the field survey results and the establishment process of the rainfall runoff model are combined, and the field survey, model construction and simulation results are analyzed with the university campus in Hefei as an example. By constructing the SWMM model based on the measured data, the surface runoff and node overflow under different rainfall recurrence periods were simulated, and the specific factors leading to the waterlogging in the campus were analyzed in combination with the field investigation results. It can be popularized and applied to the research of other waterlogged prone areas in the city, and has great engineering significance.

Keywords: urban waterlogging; field investigation; SWMM; surface runoff

(责任编辑:熊璐璐)