

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0118

任梅芳,徐宗学,初祁,等.济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):09-15. REN M F, XU Z X, CHU Q, et al. Simulation of rainstorm waterlogging processes at the Lixia overpass bridge in Ji nan city[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 09-15. (in Chinese)

济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟

任梅芳^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 初 祁^{1,2}, 汪中华³, 杜成玉⁴

(1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术
北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 济南市水文局, 济南 250014; 4. 滨州市水文局, 山东 滨州 256609)

摘要: 城市下凹式立交桥因其桥下路面常低于周边区域地形, 极易形成城市区域的“人为滞水点”, 在遭遇降雨时频繁发生内涝积水灾害, 对城市交通、行人和车辆的安全构成了严重的危害。因此, 有效模拟城市立交桥区域的暴雨洪水淹没程度, 对城市防洪减灾和交通应急管理具有重要的现实意义, 同时可以为解决城市内涝问题提供重要的科技支撑。以济南市历下区立交桥为例, 采用 Mike Urban 模型和 Mike21 FM 模型, 依据研究区域数字高程数据, 2007年7月18日黄台桥雨量站实测3h降雨数据以及不同重现期的设计降雨过程, 对立交桥区域的暴雨积水程度进行模拟计算与分析。研究结果表明, 2007年“7·18”暴雨发生时, 济南市历下区立交桥桥下最低洼区域积水深度可达近1.95m左右, 其积水深度高于济南市100年一遇暴雨的积水深度。

关键词: 暴雨积水; 立交桥; MIKE 模型

中图分类号: TV 122 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)05-0009-07

Simulation of rainstorm waterlogging processes at the Lixia overpass bridge in Ji nan city

REN Meifang^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, CHU Qi^{1,2}, WANG Zhonghua³, DU Chengyu⁴

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China;

3. Ji nan Hydrology Bureau, Ji nan 250014, China; 4. Binzhou Hydrology Bureau, Binzhou 256609, China)

Abstract: The urban concave overpass bridges can easily become "artificial waterlogging zone" since the area beneath the bridge is usually lower than the surrounding areas, which leads to frequent waterlogging disasters, endangering the safety of urban traffic, pedestrians, and vehicles. Therefore, effective simulation of rainstorm waterlogging processes in urban overpass bridge area will have important practical significance for urban flood control, disaster reduction, and traffic emergency management. It can provide important technical support for solving the urban waterlogging problems. In this study, both Mike Urban and Mike21 FM models were used to simulate the waterlogging processes of the 3 h rainstorm observed in July 18, 2007 at Huangtai Bridge rain gauge station and the design precipitation with different return periods at the Lixia overpass bridge area in Ji nan city. The results of this study showed that the depth of waterlogging in the lowest area under the Lixia overpass bridge could reach about 1.95 m during the 2007.07.18 rainstorm event, which was higher than that in a 100-year rainstorm in Ji nan city.

Key words: rainstorm waterlogging; overpass bridge; MIKE model

近年来,城市内涝问题已成为了继人口拥挤、交通堵塞、环境污染等城市问题之后的又一大城市病。

收稿日期: 2018-02-25 修回日期: 2018-06-15 网络出版时间: 2018-07-04
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180703.1836.002.html>
基金项目: 济南市海绵城市水循环演变与水文过程模拟项目(230200064)

Fund: Water Cycle Evolution and Hydrological Process of Sponge City in Ji nan (230200064)

作者简介: 任梅芳(1987-), 女, 青海海东人, 博士生, 主要从事城市防洪与排涝方面研究。E-mail: renmeifang@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 徐宗学(1962-), 男, 山东淄博人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学水资源、城市防洪与减灾等方面研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

自 2012 年 7 月 21 日北京市遭遇强降雨造成巨大的损失之后,各级政府及学术界对城市雨水管理方面的研究给予了高度重视^[1]。根据《国家新型城镇化规划(2014—2020)》我国城镇化率已由 1986 年的 24.52% 上升到 2015 年的 56.10%,增长了 1.29 倍,预计到 2020 年、2030 年我国城镇化率将分别达到 60% 和 67% 左右^[2]。随着城市化进程的不断推进,城市区域中不透水地面的面积不断扩张,城市区域的产汇流特点较天然流域产汇流特点相比发生了较大的变化。目前,我国已有很多城市发生了严重的城市洪涝灾害,例如 2007 年 7 月 18 日济南市 3 h 平均降雨量 167 mm 暴雨形成了水位暴涨缓落的洪水过程,市区河道满溢、马路行洪现象严重,仅 3 小时,全市变成了水城,因灾死亡 34 人,造成经济损失 12.5 亿元^[3],北京市“7·21”暴雨导致城区交通严重受阻,部分路段和立交桥下积水成灾,导致 77 人死亡以及 60 000 人被迫撤离,直接经济损失可达 100 亿人民币左右^[4]。

然而,城市下凹式立交桥因其桥下地面高程常比周边区域地形低 2~3 m,形成了城市区域的人为滞水点,在遭遇瞬时雨量较大的暴雨时,极易造成内涝积水灾害,对城市交通、行人和车辆的安全构成了严重的危害^[5,6]。因此,有效模拟城市立交桥区域的暴雨洪水淹没程度,对城市防洪减灾和交通应急具有重要的现实意义。目前,在城市立交桥区域进行暴雨积水模拟的研究并不多见,王昊等^[7]基于改进的 SWMM(Storm Water Management Model)模型对城市下凹式立交桥的内涝灾害进行模拟;施南征等^[8]基于 SWMM 模型,结合 GIS 和 SCADA(数据采集和监控系统)对杭州市某铁路涵洞的暴雨积水情况进行模拟研究;赵欢欢^[9]以西安市某下穿式立交桥为例,采用 SWMM 模型对该立交桥不同重现期的排水情况进行分析。本文以济南市历下区立交桥为例,采用 Mike Urban 模型和 Mike21 FM 模型,依据研究区域数字高程数据,2007 年 7 月 18 日黄台桥雨量站实测 3 h 降雨数据(以下简称“7·18”暴雨)以及不同重现期的设计降雨过程,对济南市历下区立交桥区域的暴雨积水程度进行综合模拟计算与分析。文中根据济南市“7·18”实测 3 h 降雨数据,从研究区产流、管道汇流及整个研究区坡面汇流三个方面对“7·18”暴雨造成的积水进行了模拟计算,同时,为了分析不同重现期降雨造成的内涝积水程度,对历下区立交桥区域 1 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇暴雨情景下的内涝积水情况进行

行了模拟分析。

1 模型介绍

1.1 Mike Urban 模型

Mike Urban 模型是丹麦水力学研究所(DHI)在地理信息系统(ArcGIS)基础上所研发的用于模拟城市排水管网系统的模型。Mike Urban 模型包括了降雨径流计算和管网水力学计算两个计算模块,其中,降雨径流计算模块分为降雨径流模拟和集水区汇流过程模拟两部分,管网水力学计算模块可以对雨水进入管网之后的水流流态及水质等进行模拟。在计算过程当中,管网水力学计算模型将降雨径流模型的计算结果作为计算的边界条件^[10,11]。

Mike Urban 模型中的管流计算模块将管流视为一维模型,模型采用六点隐式差分法求解一维圣维南方程组,具体方程如下所示^[12,14]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2)$$

式中: t 为时间(s); A 为管道过水断面面积(m^2); Q 为管道流量(m^3/s); x 为管道计算长度(m); g 为重力加速度(m/s^2); h 为管道内的水深(m); S_0 为管底坡度; S_f 为管道摩阻坡度。

1.2 Mike21 FM 模型

Mike21 Flow Model FM(Mike21 FM)水动力模型是一个基于非结构网格的模拟系统,模型采用二维浅水方程,具体方程详见参考文献[15]。

2 实例计算与分析

2.1 研究区概况

济南市历下区立交桥位于济南市历下区历山路与胶济铁路的交汇处,位于济南市大明湖东北部,由于立交桥桥下路面低于周边区域,形成了低洼滞水点,每逢暴雨极易形成内涝积水。本文基于 ArcGIS 地理信息系统,采用 Mike Urban 模型,依据数字高程(DEM)数据和降雨数据,在历下区立交桥区域对“7·18”黄台桥雨量站实测 3 h 降雨造成的内涝积水进行模拟计算与分析,并对不同重现期降雨情景下的积水深度进行模拟研究。

根据历下区立交桥区域周边的地形和地下排水管网布置情况,本次模拟研究将研究区域的范围定

为:北至历山北路,南至明湖东路和花园路,东西两侧范围到现状河道;分析该区域的排水管网可知,本研究区域可视为相对于周边区域的一个较为独立的汇水区域(无较大外来客水)。研究区域面积约为 3.88 km²,模拟范围内胶济铁路贯穿东西,长约 2.8 km,历山路长约 1.1 km,路宽约为 30 m,模拟区域地理位置见图 1。



图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

2.2 输入数据

2.2.1 降水数据

(1) 实测降水数据。

本次模拟研究所需的历下区立交桥“7·18”降雨数据采用济南市黄台桥雨量站 2007 年 7 月 18 日实测 3 h 降雨值,“7·18”3 h 降雨量为 167 mm,最大 1 h 降水量约达 93 mm。

(2) 不同频率设计暴雨。

本研究所需不同频率的降水数据采用济南市暴雨强度公式进行计算^[16],具体公式如下所示,不同重现期设计暴雨强度见表 1,图 2 为“7·18”实测降雨及不同重现期 24 h 设计降雨过程。

$$i = \frac{35.0185 \times (1 + 1.6868 \lg T)}{(t + 27.7543)^{0.9973}} \quad (3)$$

式中: i 为暴雨强度[L/(S·hm²)]; T 为重现期(a); t 为降雨历时(min)。

表 1 不同重现期设计暴雨强度

Tab. 1 Design rainstorm intensity for different return periods

| mm/min | | mm/min | |
|---------|------------|---------|------------|
| 重现期 T | 历时(60 min) | 重现期 T | 历时(60 min) |
| 1 年一遇 | 0.40 | 50 年一遇 | 1.56 |
| 5 年一遇 | 0.88 | 20 年一遇 | 1.30 |
| 10 年一遇 | 1.09 | 100 年一遇 | 1.77 |

2.2.2 地形高程

本次模拟研究中地表部分采用三角形不规则网格,边长取为 30 m,分割后三角形网格总数共计 9 924 个。模型中所采用的数字高程(DEM)数据分

辨率为 10 × 10 m,地形高程见图 3。

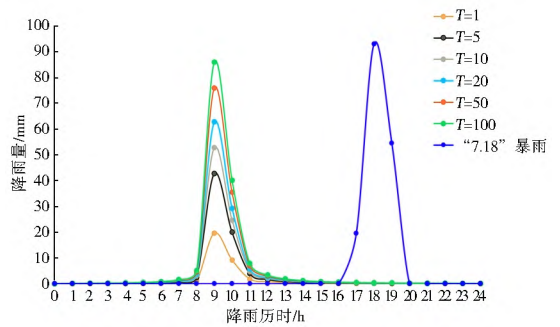


图 2 “7·18”实测降雨及不同重现期 24 h 设计暴雨过程

Fig. 2 “7.18” observed precipitation and 24 hour design rainstorm for different return periods

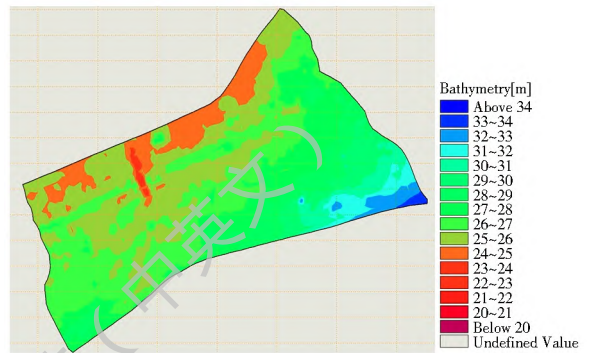


图 3 研究区域地形概化图

Fig. 3 Generalized topographical map of the study area

2.2.3 研究区管网数据

本研究区域内管网分布见图 4,检查井个数共计 489 个,排水口共计 24 个,排水管道共计 20.86 km。

2.2.4 模型参数设置

Mike Urban 模型的产汇流计算中不透水面积率根据不同的地块类型进行设置。结合已有文献综合考虑,本次将研究区内建筑物区域及道路区域的不透水系数设置为 0.9,城市绿地部分的不透水系数设置为 0.15^[11];Mike21 FM 模型进行计算时,需要对不同地块类型设置相应的地表糙率值,根据《水力计算手册》^[17],本次将建筑物区域地面糙率取为 0.02,道路部分糙率取为 0.02,城市绿地部分地面糙率取为 0.03;研究区域内不同的地块属性见图 5。

2.3 模型计算结果

本次模拟计算以济南市历下区立交桥区域为研究对象,以“7·18”暴雨为例,采用 Mike Urban 模型,对该区域管道排水能力和检查井溢流情况进行模拟分析,并且采用 Mike21 FM 模型对研究区域内最大内涝风险进行模拟计算分析。

2.3.1 “7·18”暴雨模拟结果

(1) 产流模型计算结果。

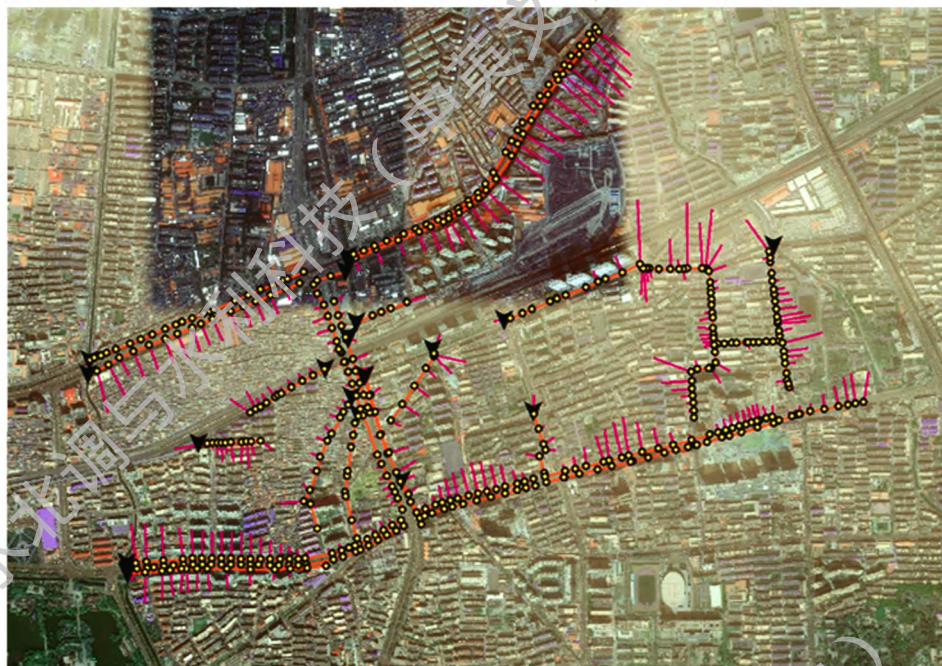


图 4 研究区域内管网布置

Fig. 4 Layout of pipe network in the study area



图 5 研究区域内土地属性

Fig. 5 Land property in the study area

本次模拟计算中,按照检查井的分布将排水区域共划分为 489 个子排水片区,子排水片区中最大累计片区径流量为 1.55 万 m^3 ,最小累计片区径流量为 23.21 m^3 ,整个排水区域总径流量为 50.94 万 m^3 ,各个子排水片区累计径流总量分布见图 6。

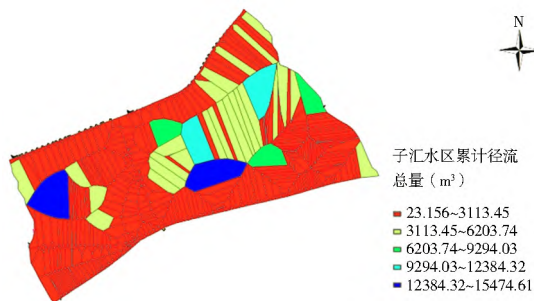


图 6 研究区域内各子排水区累计径流总量

Fig. 6 Total accumulative runoff of each sub catchment in the study area

(2) 管流模型计算结果。

经计算,“7·18”暴雨发生时,历下区立交桥桥下区域排水井会发生溢流而产生地表漫流,图 7 为研究区域历山路路面下排水管道及地表排水井溢流水面线纵剖面图,从图中可以看出,由于立交桥桥下为本研究区域内历山路地面高程最低洼的区域,是积水最深的区域,桥下管道管底高程约为 21.55~21.77 m,水位在 23.5~23.8 m 之间,立交桥下最大积水深度可达 1.95 m。由于论文篇幅有限,本次只列出立交桥桥下最低洼处排水管道水位与时间、流速与时间的变化过程曲线,由图 8 可以看出桥下积水最深处排水管道最大积水大约发生在 7 月 18 日晚 19:30 左右,最高水位为 23.5 m 左右。由图 9 可以看出桥下积水最深处排水管道最大流速大约发生在 7 月 18 日晚 19:44 左右,最大流速可达 1.1 m/s 左右。

(3) 最大内涝积水风险计算结果。

通过 Mike21 FM 模型对研究区域最大内涝积水风险进行模拟计算,在“7·18”暴雨的情况下,研究区域内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.60 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.60~1.50 m 之间,桥下最低洼区域积水深度高达 1.50~1.95 m,局部区域甚至大于 1.95 m,桥下最低洼区域最高流速可达 1.04 m/s 左右。

据济南市水文局提供的记载资料及《济南城市水文年鉴 2010》专题研究中的专题一“济南市 2007

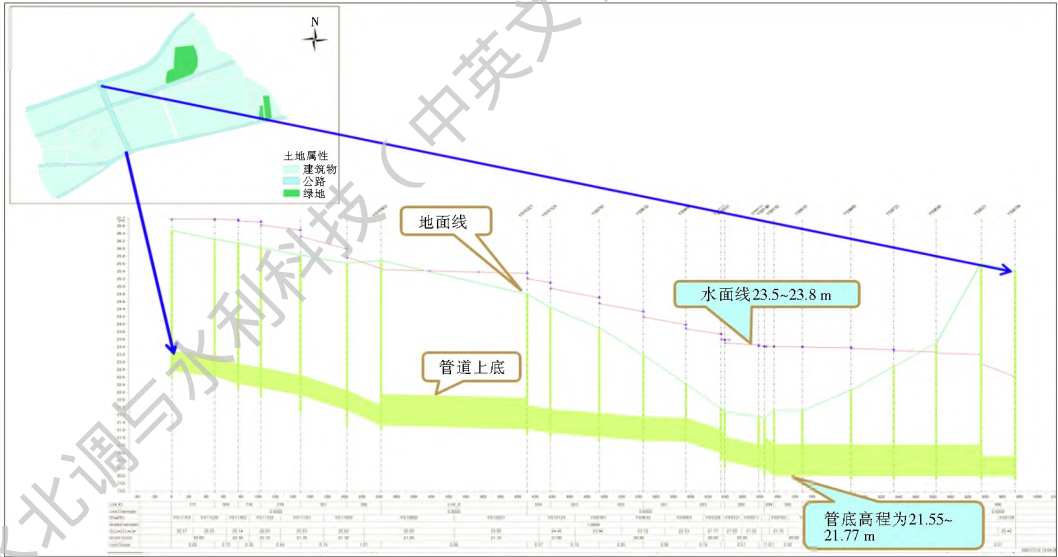


图7 历下区立交桥桥下管道水位数据纵剖面图

Fig. 7 Vertical section diagram of the pipeline water level under the Lixia overpass bridge

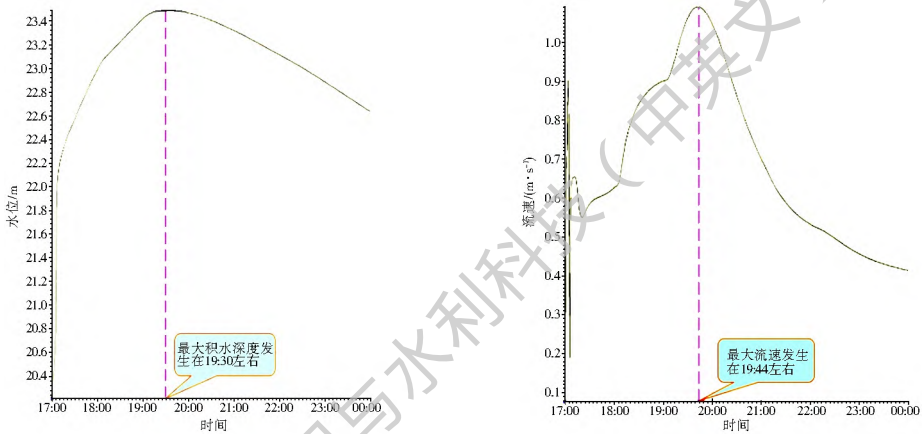


图8 立交桥桥下管道水位-时间及流速-时间变化过程

Fig. 8 Water level time and flow velocity time diagrams of the pipeline under the overpass bridge

年“7·18”暴雨洪水分析”一栏,2007年7月18日受高空槽、切变线、低涡等天气系统共同影响,济南市出现了特大暴雨天气,小清河黄台桥水文站以上流域平均降雨量达143.2 mm,最大点降雨量高达182.7 mm,小清河黄台桥水文站出现了实测历史最高水位。由于暴雨强度大、水流汇集迅速,致使济南市市区出现大面积积水,部分河道漫溢,低洼处房屋进水,市区内普遍存在道路行洪的现象,其中胶济铁路以南附近低洼区积水高达1.3 m左右,历山路与历山北路交口西侧积水深度约为30 cm^[18];根据以上资料对本次模拟结果进行验证,如表2积水点误差分析所示,本次模拟结果与实测值的误差在0.07~0.17 m之间,从模拟结果来看,本次模拟结果与实测资料偏差不大,模型基本能够反映洪水的淹没过程,计算所采用的参数及模拟结果比较合理,这说明了采用Mike模型进行计算是可行的。“7·18”暴雨模拟具体结果见图9和图10。

表2 积水点积水深度误差分析

Tab. 2 Error analysis of waterlogging points

| 编号 | x 坐标 | y 坐标 | 实测值/m | 模拟值/m |
|----|---------|-----------|-------|-------|
| 1 | 503 181 | 4 061 942 | 0.30 | 0.23 |
| 2 | 503 367 | 4 061 638 | 1.3 | 1.47 |

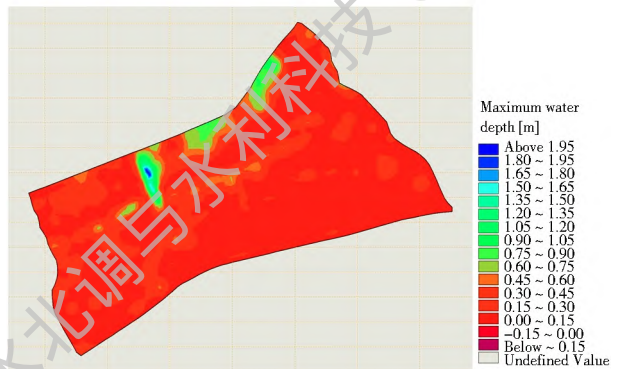


图9 研究区域“7·18”暴雨最大积水深度

Fig. 9 The maximum waterlogging depth at the study area during “7·18” precipitation

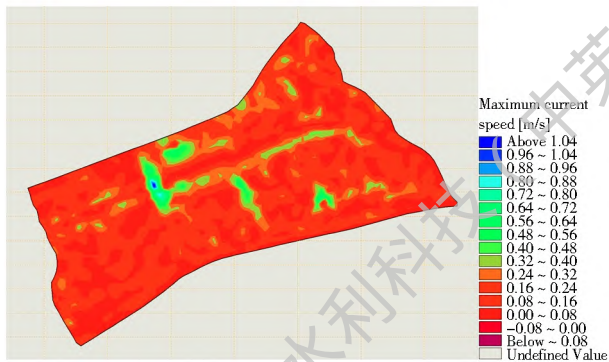


图 10 研究区域 7·18 暴雨最大流速

Fig. 10 The maximum flow velocity at the study area during "7.18" precipitation

2.3.2 不同重现期暴雨历下区立交桥区域淹没模拟

根据以上的模拟计算方法,本次对历下区立交桥区域不同重现期降雨情景下的最大淹没深度进行模拟分析,模拟情景分别为 1 年一遇,5 年一遇,10 年一遇,20 年一遇,50 年一遇和 100 年一遇,不同频率研究区域内最大积水深度模拟结果见图 11。

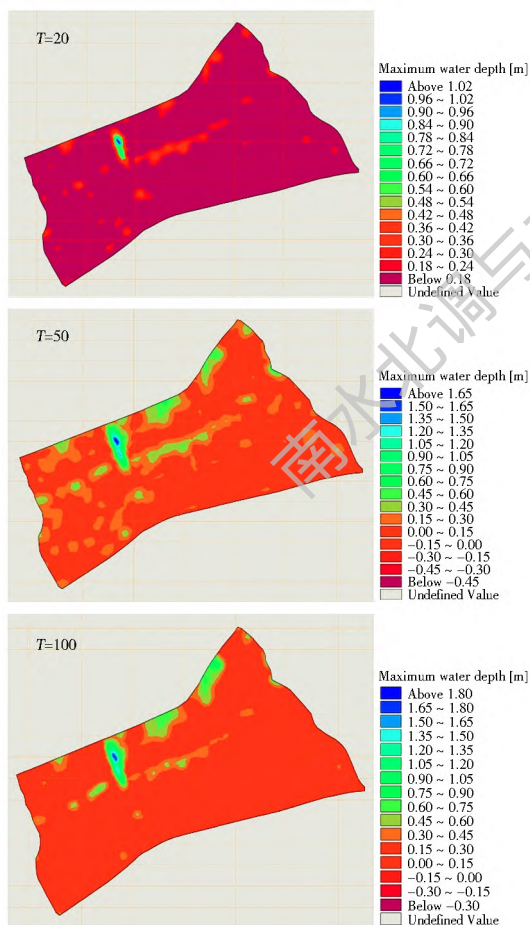


图 11 不同重现期降雨情景下研究区域最大积水深度

Fig. 11 The maximum waterlogging depth at the study area under different precipitation scenarios

根据计算结果,发生 1 年一遇降雨时,研究区域

内最大积水深度约为 0.035 m 左右;发生 5 年一遇降雨时研究区域内最大积水深度可达 0.076 m 左右;发生 10 年一遇降雨时研究区域内最大积水深度可达 0.094 m;发生 20 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.48 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.48~0.84 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 0.84~1.02 m,局部区域大于 1.02 m;发生 50 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.30 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.30~1.20 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 1.20~1.65 m,局部区域高于 1.65 m;发生 100 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.45 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.45~1.35 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 1.35~1.80 m,局部区域高于 1.80 m。

3 结果与讨论

城市雨洪模型一方面可以分析降雨产生的径流量及地表淹没情况,另一方面,可以计算排水管网系统的排水能力,是城市洪涝过程模拟研究的主要手段^[19]。本文选用 Mike Urban 模型对济南市历下区立交桥区域的暴雨淹没情况进行模拟分析,并采用 Mike21 FM 模型对研究区域内涝积水风险进行模拟计算,计算结果如下。

(1) “7.18”暴雨时,整个历下区立交桥区域总径流量为 50.94 万 m³;研究区域内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.60 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.60~1.50 m 之间,桥下最低洼区域积水深度高达 1.50~1.95 m,局部区域甚至大于 1.95 m,桥下最低洼区域最高流速可达 1.04 m/s 左右。本次模拟结果与实测值的误差在 0.07~0.17 m 之间,从模拟结果来看,本次模拟结果与实测资料偏差不大,模型基本能够反映洪水的淹没过程,计算所采用的参数及模拟结果比较合理,这说明了采用 Mike 模型进行计算是可行的。

(2) 历下区立交桥区域发生 1 年一遇降雨时,研究区域内最大积水深度约为 0.035 m 左右;发生 5 年一遇降雨时研究区域内最大积水深度可达 0.076 m 左右;发生 10 年一遇降雨时研究区域内最大积水深度可达 0.094 m;发生 20 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.48 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.48~0.84 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 0.84~1.02 m,局部区域大于 1.02 m;发生 50 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.30 m 之间,

立交桥桥下区域积水深度在 0.30~1.20 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 1.20~1.65 m,局部区域高于 1.65 m;发生 100 年一遇暴雨时,研究区内大部分区域的内涝积水深度在 0~0.45 m 之间,立交桥桥下区域积水深度在 0.45~1.35 m 之间,桥身下最低洼区域积水深度高达 1.35~1.80 m,局部区域高于 1.80 m。

(3) 经本次模拟研究表明,“7·18”暴雨的积水深度高于济南市 100 年一遇暴雨时的积水深度;刘志雨^[20]指出 2007 年 7 月中旬济南市发生了特大暴雨,济南市 1 h 降雨量达到 151 mm,3 h 降雨量达到 180 mm,相当于 200 年一遇的标准;这与本次模拟结果基本一致。

为了研究历下区立交桥区域的暴雨积水情况,本文将研究区域四周范围定为北至历山北路,南至明湖东路和花园路,东西两侧范围到现状河道,初步模拟了研究范围内的积水情况,考虑到济南市南高北低的地形条件,研究区南部山区的水有汇入该研究区域的可能性,因此,本次模拟结果可能存在一定的偏差,未来拟进一步开展在开边界条件下的暴雨积水模拟分析计算,使得模拟结果更加合理。

参考文献(References):

- [1] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 144-149. (ZHANG D D, YAN D H, WANG Yi C, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 144-149. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.01.026.
- [2] 刘晔. 我国城镇化率对建成区绿化覆盖率的影响研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017. (LIU Y. Research on the relationship between green coverage rate of built district and urbanization rate in China [D]. Suzhou university of science and technology, 2017. (in Chinese))
- [3] 王通. 城市规划视角下的中国城市雨水内涝问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (WANG T. The study on urban water logging issue based on urban planning theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. (in Chinese))
- [4] 何文华. 城市化对济南市暴雨洪水的影响及其洪水模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (HE W H. Study on effect of urbanization on storm flood and flood simulation at Jinan city [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [5] 孔祥瑞, 陈淑芬, 李梅, 等. 济南短时暴雨强度公式研究[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(5): 445-448. (KONG X R, CHEN S F, LI M, et al. Study on short-duration rainstorm intensity formula of Jinan [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, 28(5): 445-448. (in Chinese))
- [6] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 等. 城市立交桥暴雨积水数值模拟[J]. 城市道桥与防洪, 2006, 3(2): 52-55. (CONG X Y, NI G H, HUI S B, et al. Simulation of storm waterlogging value of urban interchange bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2006(2): 52-55. (in Chinese))
- [7] 王昊, 张永祥, 唐颖, 等. 改进 SWMM 的下凹式立交桥内涝灾害模拟方法[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(9): 1422-1427. (WANG H, ZHANG Y X, TANG Y, et al. Urban flooding disaster method for concave down overpass bridges by developing SWMM [J]. Journal of Beijing university technology, 2016, 42(9): 1422-1427. (in Chinese))
- [8] 施南征, 朱亚萍, 杨成忠, 等. 城市立交桥积水数值模拟研究[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(2): 27-28. (SHI N Z, ZHU Y P, YANG C Z, et al. Research on city flyover model of water logging [J]. Industrial control computer, 2015, 28(2): 27-28. (in Chinese))
- [9] 赵欢欢. 城市立交桥雨排系统模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (ZHAO H H. Study on the rain drainage system simulation of city cloverleaf junction [D]. Xi'an: Chang'an university, 2013. (in Chinese))
- [10] 杜小洲. MIKE URBAN 在供水管网设计和管理中的应用研究[J]. 陕西水利, 2012(6): 25-27. (DU X Z. Research on the application of MIKE URBAN in the design and management of water supply network [J]. Shaanxi Water Resource, 2012(6): 25-27. (in Chinese))
- [11] 韩君良. 基于 Mike Urban 的小城市排水内涝规划[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015. (HAN J L. Drainage waterlogging planning of a small city based on MIKE URBAN [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [12] 谢家强, 廖振良, 顾献勇. 基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估—以上海市霍山—惠民系统为例[J]. 能源环境保护, 2016, 30(5): 44-49. (XIE J Q, LIAO Z L, GU X Y. Prediction and evaluation of waterlogging in highly urbanized areas based on MIKE URBAN: demonstrated on the example of huoshanhuimin drainage system in Shanghai [J]. Energy Environmental Protection, 2016, 30(5): 44-49. (in Chinese))
- [13] ARTINA S, BOLOGNESI A, LISSERRA T, et al. Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(8): 1221-1228.
- [14] DHI Software. Mouse pipe flow reference manual [R]. Copenhagen: DHI Software 2004.
- [15] 任梅芳, 徐宗学, 苏广新. 基于二维水动力模型与经验公式的桥梁壅水计算及其对比分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 78-87. (REN M F, XU Z X, SU G X. Comparative analysis on bridge backwater depths estimated using 2-D hydrodynamic model and empirical formulas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 78-87. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20170509.
- [16] 孔祥瑞, 陈淑芬, 李梅, 等. 济南短时暴雨强度公式研究[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(5): 445-448. (KONG X R, CHEN S F, LI M, et al. Study on short duration rainstorm intensity formula of Jinan [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, 28(5): 445-448. (in Chinese))
- [17] 李炜. 水力计算手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI W. Handbook of hydraulic calculation [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [18] 济南市水文局. 济南城市水文年鉴 2010 [M]. 济南市水文局, 2011. (Jinan Hydrology Bureau. Jinan urban hydrology yearbook [M]. Jinan Hydrology Bureau, 2011. (in Chinese))
- [19] 刘佳明. 城市雨洪放大效应及分布式城市雨洪模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015. (LIU J M. Research on the amplified hydrological effect and distributed model of urban storm water [D]. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese))
- [20] 刘志雨. 城市暴雨径流变化成因分析及有关问题探讨[J]. 水文, 2009, 29(3): 55-57. (LIU Z Y. Analysis of characteristics and cause of urban storm runoff change and discussion on some issues [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 55-57. (in Chinese))