

基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析

丛翔宇¹, 倪广恒¹, 惠士博¹, 田富强¹, 张彤²

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044)

【摘要】以 SWMM 为基础, 选取北京市典型小区, 计算不同频率设计暴雨下小区排水效果以及积水、道路坡面流等情况, 同时进行不同情景下的暴雨洪水模拟并评价其影响, 包括改凸式绿地为平式和凹式、设置蓄洪区等。模拟计算的结果显示, 以上 3 种方式对入渗、径流、洪峰流量、坡面流等均有较大影响, 作为城市防洪排水的重要辅助措施, 可以极大地缓解排水管道压力, 同时削减洪峰、增加入渗。

【关键词】SWMM; 暴雨洪水; 凹式绿地; 蓄水池; 北京市

中图分类号: P33 (21)

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860 (2006) 04-0064-04

Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM

CONG Xiang-yu¹, NI Guang-heng¹, HUI Shi-bo¹, TIAN Fu-qiang¹, ZHANG Tong²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Municipal Institute of Hydraulic Engineering Planning, Design & Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on SWMM (Storm Water Management Model), a typical urban region is selected to calculate the status under the design storms with different frequencies in the region, such as drainage effect and water-logging, overland flow on road etc., and simultaneously, the storm floods under different conditions, including reforming the protruding green belts into plain or concave ones, placing flood storage areas etc., are simulated with the evaluation on their effects. The simulative calculation results show that all the three measures mentioned herein have larger effects on the infiltration, runoff, flood peak flow and overland flow and can greatly alleviate the pressure of the draining pipeline, clip the flood peak and increase the infiltration as well, if they are taken as the additional important measures of urban drainage for flood control.

Key words: SWMM; storm flood; concave green belt; flood storage pond; Beijing

1 引言

随着城市化进程的加快, 城区下垫面条件发生了很大变化, 而排水管网的铺设直接改变了当地产汇流条件, 引起雨洪径流量的加大, 洪峰流量加高, 峰现时间提前等, 加剧了城市本身及下游地区防洪负担。另外, 大量水体短时间内无法排走, 则在城区低洼处形成积水, 严重影响交通和人民的生产和生活。北京 2004 年 7 月份的几场暴雨致使城区数十处严重积水, 城市交通瘫痪长达十几个小时, 造成巨大的损失和不良的影响^[1]。

为了实现对暴雨雨水的有效管理, 必须对雨水径流过程和地面积水有更深入的认识、准确的预测和模拟。这方面的进展集中体现在当今众多的城市污水、暴雨雨水模型。SWMM (Storm Water Management Model, 暴雨洪水管理模型) 是一个动态的降雨—径流模拟模型, 可以进行城市地区某一场次或者长期的水质和水量的模拟, 该模型曾在我国天津、上海等地区有过应用^[2]。本文以 SWMM 为基础, 选

收稿日期: 2005-12-05

作者简介: 丛翔宇, 男, 23 岁, 硕士研究生。

择北京典型城市小区 1 个, 对不同设计暴雨条件下地面积水情况和管网的排水能力, 以及各种雨洪应对能力改善措施的效果进行计算分析, 为城区防洪排涝提供技术支持。

2 SWMM 模型简介

SWMM 是一个综合性的数学模型, 它可以模拟完整的城市降雨径流过程, 包括地面径流和排水系统中的水流、雨洪的调蓄处理过程。模型输出可以显示系统内和受纳水体中各点的水流和水质状况。

(1) 子流域概化。在 SWMM 中, 一般将一个流域划分成若干个子流域, 根据各子流域的特性分别计算其径流过程, 并通过流量演算方法将各子流域的出流组合起来。各子流域概化成不透水面积和透水面积两部分, 以反映不同的地表特性。

(2) 地表产流计算。对不透水地表净雨量, 只需从降雨过程中扣除初损 (主要是填洼量) 即可。在未满足初损前, 地表不产流, 一旦初损满足, 便全面产流。对透水地表, 除填洼损失外, 还有入渗的损失, SWMM 提供了霍顿 (Horton) 模型及格林—安普特 (Green-Ampt) 模型 2 种方法计算入渗量。

(3) 地表汇流计算。地表汇流演算的任务是把各个子流域的净雨过程转化成流域的出流过程, 在 SWMM 中, 它是通过把子流域的 3 个组成部分近似作为非线性水库处理而实现的, 即联立求解曼宁方程

和连续方程。

(4) 排水系统流量演算。在 SWMM 中, 主要是通过输送模块和扩展输送模块来进行排水系统的演算, 求解圣维南方程组。

SWMM 自首次开发以来, 在世界范围内被广泛用于城市地区暴雨洪水、合流式下水道、排污管道以及其它排水系统的规划、分析和设计, 在非城市地区也有着很多应用。

3 模型输入及参数设定

选择北京市海淀区一典型城市小区进行模拟分析, 总面积 46.7 万 m^2 , 区内包括住宅区、办公楼、广场、草坪、道路、河流等, 地势南高北低, 地面情况复杂。其中, 不透水部分面积为 14.4 万 m^2 , 占总面积的 30.8%, 透水部分面积占总面积的 69.2%。区内排水管网主要沿道路设置, 沿小区西侧南北向主路下铺有两条干管, 分设在道路两侧, 至东西主路西排入河道; 小区东侧南北向路下铺有一条干管, 与东西向主路下干管汇合后西入河道; 支管线则四通八达, 分别就近汇入干管的节点处。

整个模拟区域共划分排水小区 162 个、节点 244 个 (其中 90 个为检修孔, 154 个为雨水口)、管道 245 条 (其中 212 条为地下管线, 33 条为道路)、32 个流量控制设施 (模拟雨篦处泄水能力)、1 个出水口 (河道入口)。

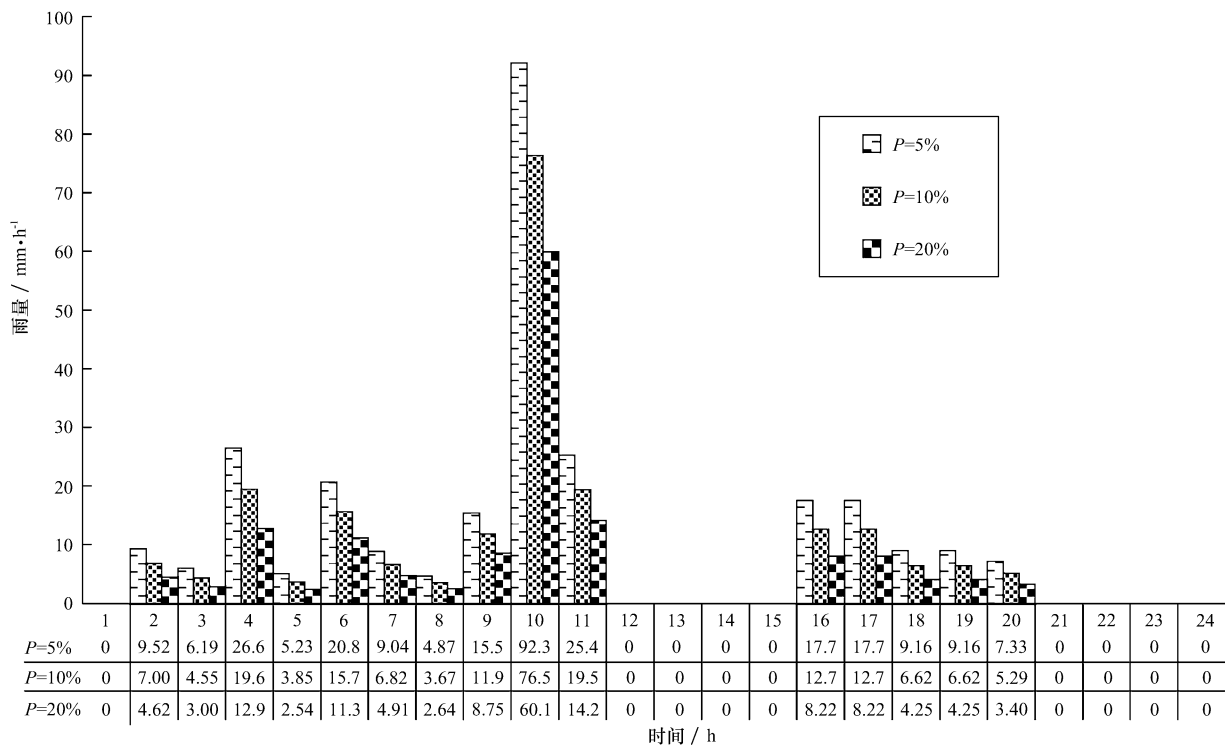


图 1 北京市不同频率设计日雨量雨型分配

每个排水小区分为透水区域和不透水区域，其地表径流的曼宁系数分别定为 0.012和 0.24^[3]，填注量分别定为 2 mm和 12 mm^[2]；选择 Horton法计算入渗，土质为壤土，取 $f_0 = 103.81 \text{ mm/h}$ ， $f = 11.44 \text{ mm/h}$ ， $=8.46 \text{ h}^{-1}$ ^[4]。模拟过程采用动力波法进行流量计算。

计算中采用设计暴雨，根据《北京市水文手册》暴雨图集中所附公式和图表，计算得到不同频率的设计日降雨过程见图 1^[5]。设计雨型的最高峰值出现在 23时，之后需要较长的汇水时间，模型所需的计算时间比较长，因此将雨型中的主、次峰对换，将主峰值提前至 10时，经验证，对模拟结果不会造成影响。

模拟计算均采用以上 3种雨量和雨型，计算时间步长为 1 min，每分钟雨量模型中将线性插值得出。

4 结果及分析

SWMM有强大的结果显示和查询功能，可以在图上动态显示所有的模型计算输出结果，也可以查询任一时刻小区、节点、管道的各项参数和计算结果。经实地考察，模拟计算得到的积水点与小区实际积水情况相吻合。 $P = 5\%$ 设计暴雨某一时刻管道中水流情况显示，不同灰度表示该时刻管道内水深与最大水深（管道直径）的比值，比值为 1时表示该管道达到满流。图 2为模拟区不同频率设计暴雨出水口处的流量对比图，取 10时至 13时的时间段，这一时间内出口处流量最大，对比明显。

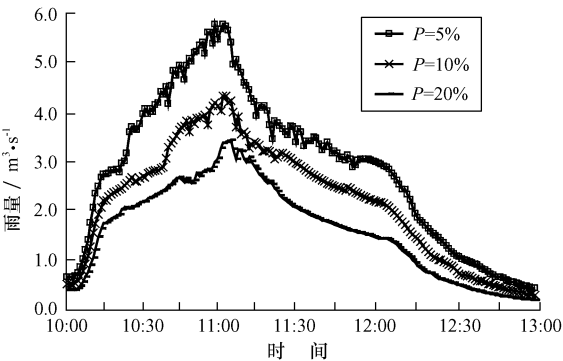


图 2 小区出口流量对比

表 1是三种频率暴雨模拟主要结果的对比，从中可以看出，入渗雨量占总雨量的比例比较大，这主要因为模拟区的不透水面积比例比较大，占到区域总面积的 69.2%。表中的径流量是指小区产流，其中一部分通过管网汇入到河道中，另一部分以坡面流的形式经道路汇集后或进入河道或停留在地表低洼处。

表 1 不同频率设计暴雨模拟结果对比

P /%	总雨量 /mm	入渗量 /mm	径流量 /mm	积水点 个数	达到满流 管道数
5	276.6	137.0	134.4	23	153
10	213.4	115.7	94.2	21	134
20	153.4	87.9	63.3	15	98

表 2所示为任取小区西侧南北向路靠近出口处的一段道路（编号 C231）坡面流对比，由表中可以看出，随着暴雨频率的加大，坡面流的流量、水深、持续时间都有明显的增大。

表 2 道路坡面流对比

编号	最大流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			最大水深 /m			坡面流持续时间 /min		
	$P=20\%$	$P=10\%$	$P=5\%$	$P=20\%$	$P=10\%$	$P=5\%$	$P=20\%$	$P=10\%$	$P=5\%$
C231	0.71	1.25	1.93	0.09	0.12	0.16	63	109	131

5 不同情景暴雨洪水模拟分析

5.1 不同绿地模式模拟结果

绿地和路面的形式分为 3种：绿地高于周围路面，称为凸式绿地；绿地和地面齐平，称为平式绿地；绿地低于周围路面，称为凹式绿地。模拟小区绿地为凸式，为对比分析，将绿地分别改为平式、凹式进行模拟，凹式绿地下凹深取 5 cm。

图 3~图 5所示为 3种设计暴雨下不同绿地模式的模拟结果对比，在 $P = 20\%$ 设计暴雨下，平式绿地和凹式绿地比凸式绿地的入渗量分别增加了 19%和 45%，径流量减少了 39%和 70%，出口洪峰流量减少了 27%和 57%；在 $P = 10\%$ 设计暴雨下，入渗量增加了 14%和 36%，径流量减少了 30%和 53%，出口洪峰流量减少了 10%和 35%；在 $P = 5\%$ 设计暴雨下，入渗量增加了 7%和 25%，径流量减少了 20%和 40%，出口洪峰流量减少了 14%和 26%。

5.2 增设蓄水池模拟结果

考虑到道路坡面对交通的影响，沿小区西侧南北向路设置一蓄水池，蓄水池大小及设置方式应考虑技术经济情况比较后选定。现拟建面积为 500 m^2 ，最大蓄水深为 1 m的蓄水池，该蓄水池在 $P = 20\%$ 设计暴雨时可蓄满。在 $P = 5\%$ 设计暴雨下进行计算，图 6所示为编号为 C231段道路在加蓄水池前后的水深对比，最大水深由 0.16 m降至 0.05 m，坡面流持续时间也由原来的 131 min减少到 47 min。加蓄水池还可以有效地减少洪峰流量，如图 7所示，出口处的洪峰流量由原来的 $5.48 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $3.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

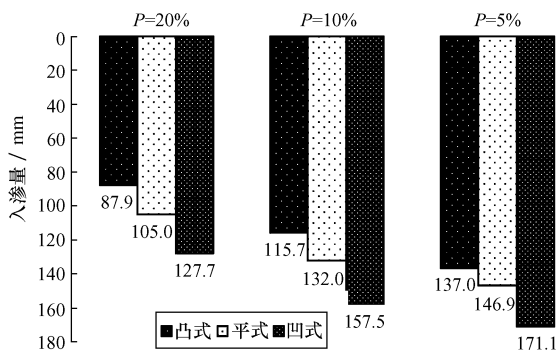


图 3 不同绿地模式入渗量对比

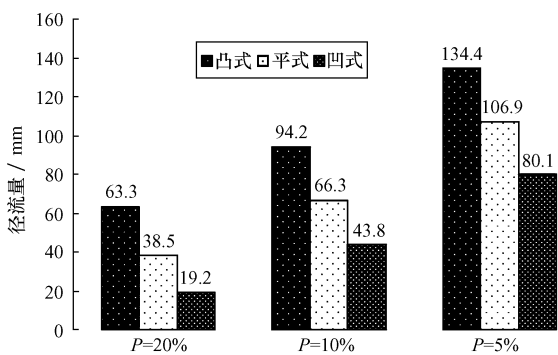


图 4 不同绿地模式径流量对比

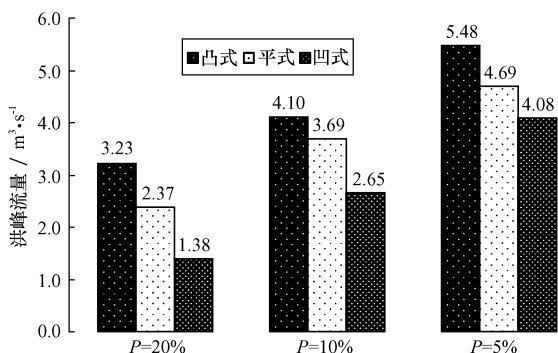


图 5 不同绿地模式出口洪峰流量对比

6 结 论

(1) 基于 SWMM 模型的城市典型小区洪水模拟能够很好地反映城区复杂的地面状况, 计算得出地下管网与道路坡面水流情况, 可用于对管网的设计标准进行校核, 提出优化设计方案; 同时计算得出的各个积水点的积水深、积水范围、积水历时等, 可为城区的防洪排涝提供技术支持。

(2) 改现有的凸式绿地为平式和凹式可以有效地增加入渗、减少径流和洪峰流量。模型计算结果显示, 10年一遇的暴雨洪水, 平式和凹式绿地比凸式

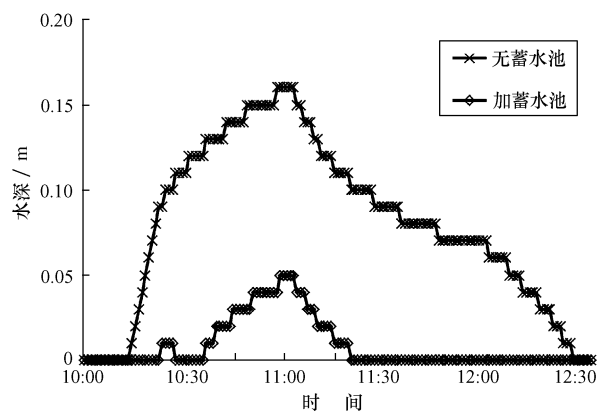


图 6 P=5%设计暴雨道路坡面流水深对比

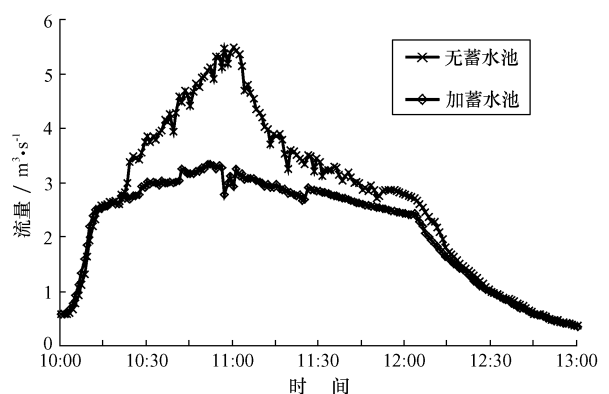


图 7 P=5%设计暴雨出口流量对比

绿地的入渗量分别增加 10% 和 36%, 径流量减少了 30% 和 53%, 洪峰流量降低了 10% 和 35%。

(3) 道路积水严重影响交通, 如在路两旁设置边沟可以起到蓄水池的效果, 模拟结果显示, 增设蓄水设备可以有效地减小道路坡面流量、降低道路积水深、减少坡面流持续时间, 而且可以起到削减洪峰的作用。

参考文献:

- [1] 北京市 2004 年城市暴雨洪水实录与分析 [R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2005.
- [2] 刘俊, 徐向阳. 城市雨洪模型在天津市区排水分析计算中的应用 [J]. 海河水利, 2001, (1): 9-11.
- [3] Storm water management model user's manual. Version 5.0 [Z]. National risk management research laboratory. Office of research and development. U. S. Environmental Protection Agency. 2005.
- [4] 城区绿地雨洪利用技术及土壤净化作用研究技术报告 [R]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2004.
- [5] 北京市水文手册第一分册暴雨图集 [Z]. 北京市水利局, 1999.

(责任编辑 聂建平)