

# 城市立交桥暴雨积水数值模拟

丛翔宇<sup>1</sup>,倪广恒<sup>1</sup>,惠士博<sup>1</sup>,田富强<sup>1</sup>,赵月芬<sup>2</sup>

(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:**立交桥及其周围地形特殊,雨天较易发生积水,一旦积水则对交通产生较大影响,因此有必要对积水成因及对策措施进行分析研究。文中以SWMM为基础,将立交桥排水系统概化为排水管网,易积水地段概化为蓄水池,对北京市万泉河立交桥的暴雨积水进行数值模拟,计算不同频率降雨、排水控制条件下路面积水和排水情况,给出桥体附近各个积水点的积水深和积水历时,并分析原因、提出改进措施。该研究可作为城区暴雨积水决策支持系统的一部分,以供防汛和交通部门参考。

**关键词:**城市排水;SWMM;立交桥;暴雨积水

**中图分类号:**U448.17;TV125 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)02-0052-04

## 1 概述

城市排水设施是保证城市正常生产生活、防治城市水污染和保障城市安全的重要基础设施。由于立交桥的最低点一般比周围低2~3 m,形成封闭洼地,且道路纵坡较大,极易造成内涝积水,若不及时排除,便会严重影响交通,甚至造成事故。城市的交通是城市经济发展和城市建设中的重要问题,而解决好立交排水的问题,关系到交通的正常运行,人民生命财产安全以及立交方案是否经济合理等重要环节。随着城市交通事业的发展,道路跨越铁路、公路等立交排水已成为城市排水的新课题。

本文以北京市海淀区万泉河立交桥积水为例,对暴雨洪水进行数值模拟,得出不同降雨条件下立交桥附近各个积水点的积水深和积水历时,其思路 and 结果可为城市防汛以及立交排水管道的设计、校核提供参考和依据。

## 2 万泉河立交桥简介

万泉河立交桥位于北京市海淀区北四环路西侧,该立交的排水为来自西侧的雨污水从西向东穿过本立交之后,雨水排入万泉河,污水穿过万泉河底后进入河东岸污水干管内。整个立交范围雨水入河共有5个出水口。

立交桥西部的排水设计,以四环路中心为界,以北流域面积 $F=143.8$ 万 $m^2$ ,实际汇水面积100.9万 $m^2$ ,管线在四环路以北自兰靛厂立交终止点开始

东入万泉河,负担北四环路以北及立交北部范围内排水任务。四环路以南雨水管同北侧一样,其流域面积 $F=49.4$ 万 $m^2$ ,实际汇水面积39.2万 $m^2$ 。立交桥南北部分,配合道路的南北延伸增设部分雨污水管就近入河和排入现有雨污水设施内<sup>[1]</sup>。

万泉河立交桥采取的是自流式排水。桥体设计分上中下三层,南北向万泉河路在顶层,东西向四环主路在中层,另有辅路在底层,每两层之间高差在4 m左右,层与层之间以环线相接,坡度比较大,汇水速度很快。其中,尤以南北向辅路地势最为低洼,虽靠近万泉河,但因排水能力不够,经常积水阻碍交通。

## 3 SWMM模型简介

美国EPA(环境保护署)开发的SWMM(暴雨洪水管理模型)<sup>[2]</sup>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接纳水体中各点的水流和水质状况。

在SWMM中,一般将实际情况概化为排水小区、节点和管道等参数,根据各排水区的特性分别计算其径流过程,并通过流量演算方法将各排水区的出流组合起来。各排水区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。

排水小区的输入数据有小区编号、降雨过程、排水出口(节点或其它小区)、小区面积、特征宽度、坡度、不透水面积比、透水区和不透水区的曼宁系数、填洼深、径流形式、土壤入渗参数、土地利用情况等;节点的输入数据有节点编号、底高程、埋深、初始水

收稿日期:2005-11-29

作者简介:丛翔宇(1982-),男,吉林农安人,清华大学,水利水电工程系,在读硕士生,研究方向为城市防洪工程。

深等;管道的输入数据有管道形状、规格、管长、粗糙系数、进出口节点处跌水高度(管道底高程高出节点底高程部分)、初始流量、进出口处以及沿程水头损失系数、有无控制回流的阀门等。

当雨篦处的排水能力不足或排水量超过系统向下游的输水能力时,溢出部分的水量将作为积水储存在雨篦上方,当系统输水能力恢复时再把这部分重新引入到系统当中。在易积水路段,按地表高程及雨篦的分布情况划分若干积水点,模型中可以将其概化为蓄水池设施,以模拟积水情况。各积水点互相连通,当某一积水点积水到达一定高度时,则会沿路面流向另外的积水点。积水点的输入数据有底高程、最大积水深、初始水深、积水表面积—积水深曲线、出流曲线等。

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。

#### 4 模型输入数据及参数设定

如图1所示,万泉河立交桥设计排水范围内共划分排水小区19个(图中以正方形表示,四环路北侧5个,总汇水面积100.9万 $\text{m}^2$ ;南侧6个,总汇水面积39.2万 $\text{m}^2$ ;路面汇水区14个,总汇水面积14.1万 $\text{m}^2$ )、节点56个(以圆点表示,四环路南北两侧各28个)、管道69个(以线段表示,连接各个节点)、8个易积水点(以矩形表示,编号分别为S1~S8。其中,S4和S5在四环主路上,其余6个在辅路上)、8个流量控制设施(图中未示出,模拟积水点雨篦泄水能力)、2个出水口(汇入万泉河)。

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,填洼量分别定为2 mm和12 mm<sup>[2]</sup>;选择Horton法计算入渗,土质为壤土,取 $f_0 = 103.81 \text{ mm/h}$ , $f_\infty = 11.44 \text{ mm/h}$ , $\alpha = 8.46 \text{ h}^{-1}$ <sup>[3]</sup>。模拟过程采用动力波法进行流量计算。

模型中采用设计暴雨,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<sup>[4]</sup>。其中, $P=20\%$ 、 $10\%$ 和 $5\%$ 设计暴雨的最大时雨量分别为60.1 mm/h、76.5 mm/h和92.3 mm/h,计算时间步长为5 min,每分钟雨量模型中将线性插值得出。

SWMM在处理蓄水池时提供一个积水表面积—积水深曲线,用来描述积水的表面积随着积水深



图1 万泉河立交桥暴雨积水模拟界面  
度的变化,用公式表示为:

$$S = A \cdot h^B + C \quad (1)$$

式中: $S$ ——积水表面积

$h$ ——积水深

$A$ 、 $B$ 、 $C$ ——待定参数

本模拟中8个积水点的积水表面积—积水深曲线参数均为实际地形图测量并拟合得出,其中积水点3的积水曲线因中间有突变,采用的是手动输入的方法,将积水表面积—积水深对应的数值逐个送入模型。

另外,SWMM在处理泄水能力时提供一个泄水量—积水深曲线,用来描述泄水量随着积水深度的变化,用公式表示为:

$$Q = A \cdot h^B \quad (2)$$

立交桥附近雨篦均为顶向(平式)进水口,当雨量较小时以跌水为主,雨量大时,水流漫过格栅,可简化为孔口入流,其泄水量<sup>[5]</sup>:

$$Q = \mu \omega (2gh)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

式中: $\mu$ ——孔口有效面积

$\omega$ ——孔口流量系数取0.61

$h$ ——雨水口上积水深

由式3即可算出式2中的参数 $A$ 、 $B$ 。

经实地测量,万泉河立交桥附近单个排水雨篦尺寸为400 mm×700 mm,全开面积为0.28  $\text{m}^2$ ,有效过水面积为0.1152  $\text{m}^2$ 。代入泄流量公式,计算得 $Q = 0.31 h^{0.5}$ 。如果有 $n$ 个雨篦并列联合排水,则 $Q = 0.31 nh^{0.5}$ 。

各个积水点的输入参数见表1。其中,连通高度指该积水点处积水深超过该值时将流向与之连通的其它积水点。

#### 5 不同频率设计暴雨模拟结果及分析

图2所示为不同频率设计暴雨各个积水点最大

表1 万泉河立交桥积水点参数

积水点		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
最低点高程	m	46.07	47.85	47.54	47.87	47.41	45.65	45.55	46.22
最大积水深	m	2.26	0.62	0.93	0.47	0.56	0.78	2.13	1.19
积水表面积	系数 A	5984	2106	描点	10502	8003	3607	2205	3802
一积水深	系数 B	1.27	0.4		0.82	0.46	1.3	0.48	0.47
关系曲线系数	系数 C	0	0		0	0	0	0	0
雨篦个数		2	2	2	4	4	1	5	2
泄水量—积水深	系数 A	0.62	0.62	0.62	1.24	1.24	0.31	1.55	0.62
关系曲线系数	系数 B	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
连通积水点		S6	S3	S1	无连通积水点		S7	S6	S7
连通高度	m	0.07	0.15	0.14			0.21	0.31	0.05
路面汇水面积	m <sup>2</sup>	5385	6000	4000	9900	7650	2140	4485	4050
绿地汇水面积	m <sup>2</sup>	5736	9330	29833	无绿地汇水进入		15648	12906	24308

积水量和最大积水深的对比,由图中可以看出,当 $P=20\%$ ,S3积水点的积水最深,为0.12 m,积水量为 $24.3\text{ m}^3$ ,此处路宽为9 m,积水沿路共37.6 m长,此时8个积水点的积水互相独立,并未连通; $P=10\%$ 时,S6积水点的积水最深,为0.23 m,此时,除S2外,辅路上其余5个积水点均已连通,连通的积水点之间有水量的交换; $P=5\%$ 时,S6积水点的积水已达0.29 m,此时,S2处积水也越过0.15 m连通高度,积水流向S3。S7虽然高程最低,但因为4个雨篦同时排水,积水深并不是最大。

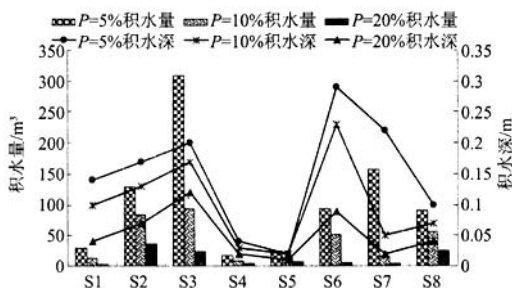


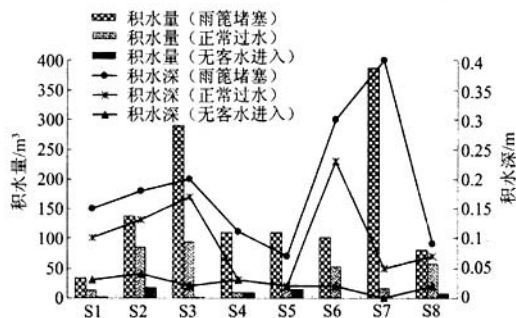
图2 不同频率设计暴雨各积水点水量与水深对比

S6积水点处只有1个雨篦,排水能力受到很大限制,现考虑将雨篦个数改为4个后的积水情况。从模拟结果中可以得出,增加雨篦后,S6的泄流量加大,使得积水深和积水量变小,最大积水深由0.29 m降为0.12 m,最大积水量由 $93.5\text{ m}^3$ 降为 $12.6\text{ m}^3$ ;同时流入S7的水量也变小,从而使得S7的积水深和积水量也大幅度减小,最大积水深由0.22 m降为0.11 m,最大积水量由 $156.5\text{ m}^3$ 降为 $57.3\text{ m}^3$ 。

雨天时,会有一些塑料袋、废纸等垃圾散落在道路上,这些垃圾堵在进水口,使进水口的孔口有效面积减少,使得排水能力大大降低,从而使积水更加严重。另外,万泉河桥下辅路低于周围绿地,雨强较大时,将会有绿地的汇流进入辅路,使积水增多。如采

用下凹式绿地或在路边设置挡墙等设施则可以阻止道路以外绿地汇水的进入,大大减少积水。

图3所示为 $P=10\%$ 设计暴雨下分别考虑了以上两种情景与正常过水时的道路积水情况对比,雨篦堵塞按面积减为原来的一半处理。从图中可以看出,雨篦的过水能力对积水的影响很大,如雨篦不及时清理,同样条件的降雨,积水量可能会增长几倍甚至十几倍,而且当积水增多时,积水会漫过道路,流向其它的积水点,形成更大范围的积水。当道路无绿地汇水进入时,只有道路的坡面汇流流入各个积水点,来流量比较小,只有几个厘米的积水,且持续时间较短,不会对交通造成明显影响。

图3  $P=10\%$ 设计暴雨不同情景各积水点水量与水深对比

经万泉河立交桥管理处的现场管理人员确认,遇暴雨时桥下各处积水点的积水情况和模拟结果大致相同。

## 6 结论

(1) 基于SWMM模型的立交桥暴雨洪水模拟能够很好地反映立交桥复杂的地面状况,计算得出地下管网与道路坡面水流以及积水情况,可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

# 城市防洪规划的理念转变——从改造到适应

于卫红, 崔 毅

(济南市规划设计研究院, 山东 济南 250001)

**摘 要:**频繁爆发的洪水灾害证明人定胜天、改造自然的防洪思路已不能解决防洪问题, 人类必须探索更为理智的、科学的防洪方法, 适应洪水、与洪和谐相处的现代防洪理念应运而生。为此, 结合新一轮济南市城市总体规划——城市防洪规划的编制, 探讨了基于现代防洪理念编制城市防洪规划的热点问题, 认为在编制城市防洪规划时要合理利用土地、强调雨洪资源化利用、重视滞蓄洪区的规划、河道治理采用生态型河道, 并采取防洪非工程措施。

**关键词:**现代防洪理念; 城市防洪; 规划; 济南市

**中图分类号:**TV87 **文献标识码:**B **文章编号:**1009-7716(2006)02-0055-04

## 0 前言

20世纪以来, 面对全球不断发生的日益严重的洪水灾害, 人们不得不承认, 尽管对防洪减灾的投入不断增加, 但根治洪水灾害的理想却难以实现, 而且随着人类社会经济的不断发展, 洪水灾害造成的损失将与日俱增。严峻的形势促使人们必须重新思考人类应该如何面对洪水, 如何应对洪水带来的威胁。在这种背景下, 学界及实务界提出了洪水风险只能减轻不能消除, 以及洪水灾害双重性的现代防洪理念。这种理念在2002年召开的第二届国际防洪学

术讨论会中得以统一和明确: 建立洪水管理新理念, 即从试图消除洪水灾害转变为承受适度的风险, 实现减灾与社会经济的协调发展; 从单纯与洪水抗争转变为在保证生命安全的前提下, 合理地调整人与洪水的关系。可见, 现代防洪理念的实质就是人类要学会与洪水和谐相处。在强调自然、社会、经济可持续发展、人与自然和谐发展的今天, 用现代防洪理念指导防洪工作是符合时代进步要求的, 因此在城市防洪规划中理应融入现代防洪理念, 用科学理念指导防洪减灾工作。

作为全国首批25座重点防洪城市的济南市, 南靠群山, 北临黄河, 地势南高北低, 南部山区的山洪经多条山洪沟穿过市区排入小清河, 然后东流入海。这种地形使济南市处于外受黄河威胁, 内受山洪困

收稿日期: 2005-12-12

作者简介: 于卫红(1968-), 男, 山东济南人, 高级工程师, 从事市政工程设计工作。

等, 可为城区的防洪排涝提供技术支持。

(2) 道路上设置的雨篦个数对泄流能力的影响很大。桥下积水最严重的积水点处只设置了1个雨篦, 模拟结果表明, 如增加该处雨篦个数会大大缓解积水情况, 对与其临近的其它积水点的积水也有明显影响。

(3) 道路上的雨篦经常被人造的垃圾等堵塞, 汛期前如果未能及时清理, 会影响过流能力, 形成更大范围的积水。模拟结果表明, 同样条件的降雨, 如雨篦被堵住一半面积, 各个积水点处的积水量可以增长几倍甚至十几倍, 积水深也会大幅度增长, 人为地带来很多不必要的麻烦。

(4) 另外, 如果能阻止道路以外的绿地汇水流到路面, 则可以大大地减少坡面流, 缓解积水状况。将道路两旁绿地设置为凹式绿地, 在道路两边设置

挡墙等都可以实现这种效果。

## 参考文献

- [1] 北京市四环路工程(北四环)万泉河立交桥排水设计(工程编号: 98P084-C0401P)[P]. 北京: 北京市市政工程设计研究总院, 1999-11.
- [2] Storm water management model user's manual, Version 5.0[R]. National risk management research laboratory. Office of research and development, U. S. Environmental Protection Agency, May 2005.
- [3] 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, 2004-10.
- [4] 北京市水文手册第一分册暴雨图集[R]. 北京: 北京市水利局, 1999-9.
- [5] 钮建强. 内环高架通路排水设施更新改造[J]. 中国市政工程, 2003, (4): 34-36.