

基于 SWMM 的城市排涝与排水体系重现期衔接关系研究

陈鑫¹ 邓慧萍¹ 马细霞²

(1 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092 2 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要 城市化进程对城市水文特性产生了重大影响, 造成城市排涝与排水体系的复杂性。其中一个较为突出的问题是两者重现期的衔接关系。城市区域排涝与城市小区管网排水两者密切相关, 概念却不尽相同。对用 SWMM 模拟的 24 h 长历时雨洪峰值与用城市室外排水法计算的 2 h 短历时雨洪峰值进行比较, 从流量角度进行研究, 得出两者采用不同暴雨选样方法重现期的衔接关系。

关键词 城市 排涝 排水 重现期 衔接关系 SWMM 模型

0 引言

城市排涝与排水体系都用于排除城市区域的雨洪, 但在我国其设计与管理分别由水利部门和市政部门负责, 两部门在进行排涝和排水设计时, 均以一定频率的设计暴雨推求设计流量, 但却采用不同的暴雨选样方法、设计标准、流量计算方法等, 从而导致两者设计重现期不相衔接。

目前, 两种排水体系衔接关系研究中, 第一种思路是从数学角度出发, 根据数理统计原理, 推导出两者的对应关系^[1], 但是概率关系不是函数关系, 概率关系只有在资料年份很长的情况下, 特别是符合推理过程假设的条件下才可靠^[2]; 第二种思路是用不同的选样方法对暴雨样本进行选择, 然后通过频率计算得出暴雨重现期之间的关系^[3,4]; 第三种思路, 是通过运用不同的雨洪计算方法, 得出流量重现期的关系^[5]。但是, 以上三种思路均没有考虑雨型对城市排涝体系以及排水体系所造成的影响。本文在考虑降雨选样不同的基础上, 设计出长历时降雨情景, 运用 SWMM 模型对研究区域进行雨洪模拟。将用 SWMM 模拟的长历时雨洪峰值与用城市室外排水法计算的短历时雨洪峰值进行比较, 探索其中的规律, 力求从流量角度得出更具有说服力的重现期衔接关系。

1 城市排涝与排水体系的关系

城市排涝与排水是城市建设发展的一项重要工作, 二者既有相同之处, 又有不同之处^[5]。城市排涝与排水都是要把城市暴雨产生的径流排放到江河湖海中, 城市排涝是解决较大汇流面积上较长历时暴雨产生的涝水排放问题, 由水利部门主管, 对城市低洼地

带、次要区域和郊区允许有一定的耐淹水深和耐淹历时, 对城市重要区域一般不允许涝水漫溢。城市排水是解决较小汇流面积上短历时暴雨产生的排水问题, 雨水排水系统旨在将雨水经管网的收集、泵站的提升, 排入河道, 它是一种强度设计^[6], 一般由市政部门主管。

同时, 城市排涝与城市排水之间又是相互联系, 相互影响的。小区雨水经雨水管网进入雨水干渠、内河, 与山坡、溪河等其他区域来水汇合后排入江河湖海。城市的排涝与排水从本质上隶属于同一自然系统, 但由于现行的管理体制, 城市排涝与排水成为跨部门不同专业研究的对象, 因此城市排涝与城市排水系统应当综合规划, 相互协调。

2 SWMM 模型与城市室外排水(雨水)公式简介

2.1 Storm Water Management Model (SWMM)

该模型是美国环保署(EPA)为设计和管理城市雨洪而研制的一个综合性数学模型。它可以模拟完整的城市降雨径流和污染物运动过程, 包括地表径流和排水系统中的水流, 雨洪的调蓄处理过程, 以及接纳水体模式和水质影响评价^[7]。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。在模拟具有复杂下垫面条件的城区时, 模型可将流域离散成多个子流域, 根据各个子流域的地表性质逐一模拟, 因此运用该模型可以很方便地解决多特征的城市雨洪径流模拟问题, 特别适合于大型城市化地区。SWMM 由 4 个计算模块和 1 个服务模块组成。4 个计算模块分别为: 径流模块(Runoff), 输送模块(Transport), 扩展输送模块(Extran)和储存/处理模块(Storage/Treatment)^[8]; 服务模块的主要功能

是进行一些计算后的处理,如统计、绘图等。

2.1.1 分区概化

在模型中,分区概化为透水面积、有滞蓄库容的不透水面积和无滞蓄库容的不透水面积。整个分区的总出流量为三部分面积上的出流量之和。

2.1.2 产流计算

对于不透水区地表净雨量,只需扣除初损(主要是指填洼量)即可。对于透水地表,除填洼损失外,还有入渗损失,SWMM 提供了 Horton 模型、Green-Ampt 模型和 SCS 模型。本次计算中选用 Horton 模型进行产流计算。

2.1.3 汇流计算

汇流计算的任务是把各个子流域的净雨过程转化为子流域的出流过程,是通过把概化子流域的三个部分近似作为非线性水库而实现的,即联立求解曼宁公式和连续性方程。

2.1.4 排水流量演算

通常把雨水管网内的水流运动简化为一维运动,用圣维南方程组 (Saint-venant) 来进行描述。SWMM 模型提供了稳定流、运动波和动力波三种演算方法。本次研究采用动力波法,这种方法能模拟管渠槽蓄、滞水、进出口的损失、逆流或者有压流。

2.2 城市室外排水(雨水)公式介绍

市政部门推求市区设计洪水一般采用城市室外排水(雨水)公式,如郑州市采用:

$$\begin{cases} Q = \phi q F \\ q = \frac{2387(1 + 0.257 \lg P)}{(t + 10.605)^{0.792}} \\ t = t_1 + m t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 Q ——设计洪峰流量, L/s

ϕ ——综合径流系数;

q ——设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$;

F ——汇水面积, hm^2 ;

t ——设计降雨历时, min

t_1 ——地面集水时间, min

t_2 ——管渠内雨水流行时间, min

m ——折减系数;

P ——重现期, a

编制该暴雨强度公式^[9]采用 1971~2000 年,共计 30 年的各历时降雨强度统计资料。依据《室外排水设计规范》(GBJ 14—87, 97 版),降雨历时采用 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、45 min、60 min、90 min、120 min, 共计 9 个时段;重现期采用 0.25 a、0.33 a、0.5 a、1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、30 a 共计 9 个期限。采用年多个样法,即将 N 年数据不论年次,按照资料数值由大到小进行排列,根据需要选择各时段资料的总数,一般选择资料年数的 3~4 倍作为资料统计的基础。这种选样方法不仅简单,而且克服了大雨年大强度资料被遗弃的缺点。本次共选出 120 场暴雨,作为资料的基础。该公式系郑州市暴雨强度最新的研究成果,更科学地反映了郑州市的暴雨特性。

3 应用分析

3.1 SWMM 模拟计算

本次研究区域位于郑州市中原西路以南,淮南路以北,华山路以东,金水河以西的城市区域,该区域隶属于金水河水系。以下以伊河路排水区域(见图 1)为例进行模拟计算,汇水面积 184.85 hm^2 。

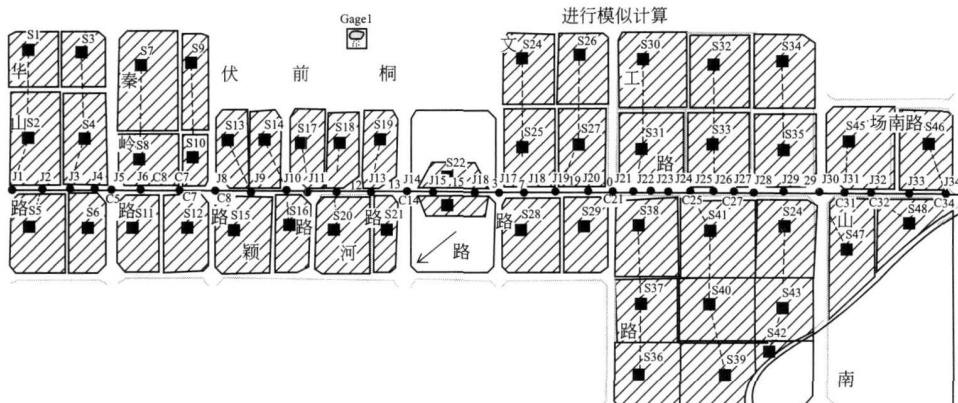


图 1 伊河路排水区域

3.1.1 降雨情景模拟

降雨显著影响径流的产生,暴雨雨头、雨核、雨尾三个组成部分在时程上的分布情况不同,即雨型不同,对径流流量具有决定性的影响。可见城市地表雨水径流计算必须考虑降雨过程的时间分布,即雨型对城市地表径流流量的影响。

选取计算范围内的降雨强度高、量值大、积水难以自排的暴雨典型,以 1 h 6 h 24 h 为控制时段进行同频率缩放,可得到重现期分别为 5 a 10 a 20 a 50 a 的设计暴雨过程。本次计算采用 1978 年 8 月 24 日 12 时到 25 日 12 时的降雨作为典型暴雨过程。

设计暴雨所需参数均通过 2005 版《河南省暴雨参数图集》查得。设计暴雨值见表 1。

表 1 设计暴雨计算

历时 /h	H_{ij}	C_v	5年(20%)		10年(10%)		20年(5%)		50年(2%)	
			K_p	H_{tp}	K_p	H_{tp}	K_p	H_{tp}	K_p	H_{tp}
1	43.00	0.52	1.33	57.19	1.69	72.67	2.03	87.29	2.48	106.64
6	63.00	0.58	1.35	85.05	1.75	110.25	2.16	136.08	2.69	169.47
24	90.00	0.54	1.34	120.60	1.71	153.90	2.07	186.30	2.55	229.50

注: H_{ij} 为点雨量均值; H_{tp} 为设计暴雨雨量; C_v 为变差系数; K_p 为皮尔逊 III 型频率曲线的横比系数。

3.1.2 管网概化

根据雨水管网现状图,经过合理的简化,确定该研究区域有节点 34 个、管段 33 条。排水管网基础数据包括管道形状 (Shape)、管道长度 (Length)、管径 (Diameter)、管道糙率 (Roughness) 以及检查井的井底标高 (Invert El) 和最大水深 (Max. Depth) 等。

3.1.3 划分汇水子流域

为将地表径流分配到相应的排水管网集流点 (即检查井节点),按照以下原则进行汇水子流域划分:①根据地形资料,按照坡度定汇流方向;②为保证计算精度,划分各汇水子流域,一般控制在 5 hm^2 之内;③子流域径流排入最近检查井。

本次建模区共分 48 块汇水子流域,参数主要包括子流域面积 (Area)、特征宽度 (Width) 和地表平均坡度 (Slope%) 等主要基础数据。

3.1.4 确定模型参数

SWMM 中参数有两类:一类是通过测量或可资利用的信息能够获得其值的参数,在模型校准中一般不需要调整,相当于模型的基础数据,如平均坡

度、管径和管长等;另一类是需要通过模型校准算法求解确定,或者多项调查研究加经验取值确定,如地表粗糙系数、洼蓄量等^[10],即第二类参数。

模型参数应由实测流量资料率定选取。对于缺乏雨水管网排洪口实测流量资料的情况,模型参数应根据参数的物理含义及其影响因素选取,并通过与相似区域的对比,分析其合理性。参数选择见表 2。

表 2 模型参数选择

不透水面积的洼蓄量 (Dstore-Im perv) /mm	可透水面积的洼蓄量 (Dstore-Perv) /mm	不透水区曼宁粗糙系数 (N-Im perv)	透水区曼宁粗糙系数 (N-Perv)	管道粗糙系数 (Roughness)	最大入渗率 (Max Infil Rate) /mm /h	最小入渗率 (Min Infil Rate) /mm /h
2	4	0.011	0.05	0.013	76.2	10.92

3.1.5 计算结果

长历时模拟降雨情形下,5 年一遇雨水管网入金水河排洪口处洪水过程见图 2。

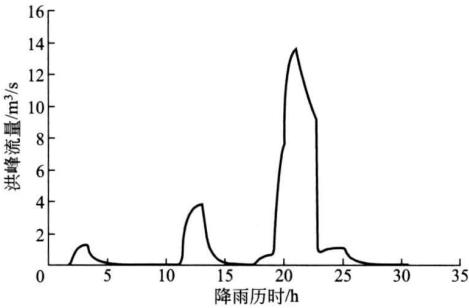


图 2 5 年一遇洪水过程线

10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇雨水管网入金水河排洪口处洪水过程线,因篇幅有限,不再一一列出。各个重现期,洪峰流量值为: $Q_{5a} = 13.63 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{10a} = 14.14 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{20a} = 14.99 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{50a} = 16.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 城市室外排水 (雨水) 公式应用

3.2.1 参数选取说明

参考经过市政部门调查所得出的金水河流域城区的径流系数, ϕ 取 0.6 将各子流域面积进行叠加,得出总的汇水面积 F 为 184.85 hm^2 。

按照经验,一般对在建筑密度较大、地形较陡、雨水口分布较为密的地区或街区内设置的雨水暗管,宜采用较小的 t_1 值 (5~8 min)。本次计算采用 6 min。

管内流行时间 t_2 按照式 (2) 计算。

$$t_2 = \sum \frac{L}{60v} \quad (2)$$

式中 L ——各管段的长度, m;

v ——各管段满流时的水流速度, m/s。

L 由设计图纸统计得到, 各个重现期下的各管段的流速由 SWMM 模型模拟得出。

暗管的折减系数 m 取 1.6。

3.2.2 计算结果

将以上各参数代入式 (1), 计算结果见表 3。

表 3 排水公式计算结果

重现期 T /a	降雨历时 /min	降雨强度 /L/(s·hm ²)	汇流面积 /hm ²	Q /m ³ /s
1	32.32	121.54	184.85	13.48
3	32.21	136.72	184.85	15.16
5	31.85	144.63	184.85	16.04

3.3 结果分析 (见表 4)

表 4 不同模拟降雨情景下结果对比 (单位 m³/s)

重现期	水利 (5 年)	水利 (10 年)	水利 (20 年)	水利 (50 年)
SWMM	13.63	14.14	14.99	16.52
重现期	市政 (1 年)	市政 (3 年)	市政 (5 年)	
排水公式	13.48	15.16	16.04	

观察以上结果可以发现: 市政部门 1 年一遇的雨洪峰值略小于水利部门 5 年一遇的雨洪峰值。而市政 3 年一遇、5 年一遇的雨洪峰值均大于水利部门的 20 年一遇的雨洪峰值, 而小于 50 年一遇的峰值, 位于两者之间。将其与已有的相关结论进行比较分析, 反映的衔接关系趋势是一致的。

张晓波^[11]得出如下结论: 管网设计暴雨重现期 1 年时, 河道相应的排涝设计暴雨重现期为 10~20 年; 管网设计暴雨重现期 3 年时, 河道相应的排涝设计暴雨重现期为 15~30 年; 管网设计暴雨重现期 5 年时, 河道相应的排涝设计暴雨重现期为 20~35 年。

《给水排水设计手册》(第五册) 列有城市小流域河湖防洪标准, 也粗略反映了两者在设计重现期及流量数值上的相应关系, 见表 5。

表 5 设计重现期对应关系

区域性质	设计重现期 /a	
	雨水管网计算公式	水利计算公式
城市重点地区	20~50	50~100
一般区域	5~20	20~50
局部一般区域	1~5	5~20

4 总结与建议

(1) 建议城市暴雨尽早改用年最大值法选样, 以解决现行年多个样法资料不易取得, 统计工作量大的缺点。随着城市化步伐的日益加快, 原有的河道、沟渠等逐渐纳入城市区域, 城市防洪排涝与排水的界限日益模糊, 两者的关系日渐紧密。建议将两者进行统一管理, 有利于城市管网排水标准与城市内河防洪排涝标准的协调与统一, 符合水务一体化管理的大趋势。

(2) 以上的研究结果可以共同反映出两者的对应关系, 但是由于城市防洪排涝与排水工程的复杂性, 以及各地区暴雨特性存在的差异性, 导致现有的这些结论只能作为一种宏观规律进行参考。诸如暴雨选样方法之间的重现期衔接关系与流量重现期衔接关系之间的联系与区别等问题还有待深入研究。

参考文献

- 胡斌. 城市排水与防洪排涝设计中重现期的确定. 中国市政工程, 2004 (3): 44~45
- 邓培德. 城市暴雨两种选样方法的概率关系与应用评述. 给水排水, 2006, 6(32): 39~42
- 谢淑琴. 城市小区管网排水及区域排涝水文计算方法初步探讨. 人民珠江, 2003 (6): 30~32
- 金光炎. 城市设计暴雨频率计算问题. 水文, 2000 20(2): 14~18
- 陈斌. 城市排涝与排水研究. 给水排水, 1996 22(9): 17~20
- 贾卫红. 传统市政雨水排水模式的优化. 中国市政工程, 2003, (1): 55~58
- Rossman L.A. Storm water management model user's manual version 5.0 2005
- 董欣, 陈吉宁, 赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用. 给水排水, 2006, 32(5): 106~109
- 中国市政工程华北设计研究院. 郑州市建成区排水专项规划专题研究—郑州市暴雨强度公式修订研究报告四卷. 2002
- Liong S Y, Chan W T, Lun L H. Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration. Journal of Water Resources Planning and Management 1991 117(5): 507~524
- 张晓波. 城市管渠排水标准衔接及方法研究: [学位论文]. 南京: 河海大学, 2005

✉ 通讯处: 200092 上海市杨浦区四平路 1239 号 同济大学环境科学与工程学院明净楼 215 室

电话: 13601968692

E-mail: c410@163.com

收稿日期: 2009-03-11