

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.02.013

# 利用雨水管理模型模拟推理公式法设计计算管渠系统

卓 雄<sup>1</sup>, 格日乐<sup>2</sup>, 梁小光<sup>1</sup>, 李树平<sup>2</sup>

(1. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 2. 同济大学 环境科学与工程  
学院, 上海 200092)

**摘 要:** 传统雨水管渠系统设计计算采用推理公式法,而雨水管渠系统日常运行模拟中考虑时变降雨、降雨损失变化等情况时,需要采用雨水管理模型。与推理公式法相比,雨水管理模型需要更多的数据输入,且需要适当处理径流系数和集水时间。首先提出了雨水管理模型模拟推理公式法设计计算管渠系统的方法,然后通过算例讨论了推理公式法和雨水管理模型模拟的计算结果。小型算例说明,雨水管理模型可近似再现推理公式法的计算结果。

**关键词:** 雨水管渠系统; 设计计算; 推理公式法; 雨水管理模型

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)02-0069-05

## Application of Simulation Rational Formula Method of Stormwater Management Model in Design and Calculation of Sewer System

ZHUO Xiong<sup>1</sup>, GE Ri-le<sup>2</sup>, LIANG Xiao-guang<sup>1</sup>, LI Shu-ping<sup>2</sup>

(1. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The rational formula method is widely used in the traditional design and calculation of storm sewer system. However, stormwater management model is needed when time-varying rainfall and rainfall loss change are considered in the daily operation simulation of the storm sewer system. Compared with the rational formula method, the stormwater management model needs more data input, and requires to deal with the runoff coefficient and catchment time properly. The paper firstly introduced the application of simulation rational formula method of stormwater management model in design and calculation of sewer system, and then discussed the calculation results of rational formula method and stormwater management model simulation through an example. The small example showed that the stormwater management model approximately reproduced the calculation results of the rational formula method.

**Key words:** storm sewer system; design and calculation; rational formula method; stormwater management model

推理公式法基于水量平衡,结合降雨强度数据和汇水区特性,预测降雨事件下的高峰径流量,用

作雨水管渠的设计流量。推理公式利用集水时间考虑汇水区的水流路径长度和坡度的影响(即考虑

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(2019-K-49)

通信作者: 李树平 E-mail: lishuping@tongji.edu.cn

了降雨的演算效应),利用径流系数考虑降雨损失量。由于该方法使用简单,因此是雨水管渠系统设计计算的常用方法<sup>[1]</sup>。

雨水管渠系统运行中,应考虑时变降雨、降雨损失变化等情况时,推理公式法将不再适用,这时常采用雨水管理模型(SWMM)软件模拟,这样的模拟软件有EPA SWMM、MIKE SWMM、PCSWMM、XPSWMM等<sup>[2]</sup>。

从雨水管渠系统设计计算中采用的推理公式法过渡到运行管理中采用的雨水管理模型,需要克服推理公式法与雨水管理模型之间的差异。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中规定:当汇水面积大于2 km<sup>2</sup>时,应考虑区域降雨和地面渗透性能的时空分布不均匀性和管网汇流过程等因素,采用数学模型法确定雨水设计流量。也就是说在计算机协助下,雨水管渠系统设计计算可以使用复杂的模型,模拟详细的径流过程,表示排水管网各个节点的流量和水力坡度线。与推理公式法相比,复杂模型需要更多的数据输入。

近年已有学者关注到这种情况,探索了雨水管渠系统设计计算中雨水管理模型的应用。2015年Waikar等<sup>[3]</sup>利用EPA SWMM模拟流域对降雨事件的响应,得到径流过程线,利用推理公式法获得设计降雨强度并进行了频率分析。2017年,Mali等<sup>[4]</sup>借助SWMM软件,输入流域面积、降雨数据、下渗特征等数据经模拟后,与推理公式法的计算结果进行了比较,认为SWMM软件更容易确定降水事件的设计径流和设计重现期。2018年,Kyi<sup>[5]</sup>首先利用曼宁公式设计了新建排水管渠断面尺寸,然后用SWMM检查了拟定排水管渠的尺寸容量。

本研究首先提出雨水管理模型模拟推理公式法设计计算管渠系统的方法,然后结合算例讨论了推理公式法和雨水管理模型模拟的计算结果。

## 1 雨水管理模型模拟推理公式法

### 1.1 参数设置

雨水管理模型软件SWMM是由美国环境保护局开发的免费软件,其雨水管理模型是基于物理特征的确定性模型,可以模拟子汇水区内产水、汇流、蒸发、下渗水文过程,雨水管渠输送和调蓄水力过程,雨水中所含污染物累积、冲刷、迁移转化水质过程。它是一个全动态波模拟模型,可用于城市地区

径流量和水质的单事件或长期模拟<sup>[6]</sup>。该软件的汉化版SWMMH由同济大学翻译,相关资料可免费下载(网址 [sese.tongji.edu.cn](http://sese.tongji.edu.cn))<sup>[7]</sup>。

为模拟推理公式法设计计算雨水管渠系统,常用的SWMM模型组件包括子汇水区、暴雨强度时间序列、雨量计、汇接点、管渠等。

子汇水区是利用地形和排水系统元素,将地表径流直接引导到单一排放点的地表水文单元。用户负责将服务区域划分为适当数量的子汇水区,并确定子汇水区的出水口。该模型组件设置关注点是降雨损失的处理。

SWMM中径流系数是输出变量而不是已知变量,为了在SWMM中使用推理公式法,其主要输入属性设置方式为<sup>[8]</sup>:

① 不渗透百分比设置为径流系数值,无坑洼存水不渗透百分比设置为100。

② 渗透面积和不渗透面积坑洼存水深度设置为零。

③ 坡度和宽度可赋以任意数值,渗透和不渗透曼宁粗糙系数采用0。当曼宁粗糙系数为0时,简单将每一时间步长的所有过剩降雨(有效降雨或净降雨)转化为瞬时径流量,忽略了地表漫流的蓄水或滞后效应。

④ 利用Horton下渗选项,使其最大和最小下渗速率相同,即在整个计算中均忽略下渗速率随时间的变化,按照最大下渗速率确定降雨损失。该最大下渗速率可取不小于降雨强度的数值,使渗透面积内的降雨全部转化为降雨损失。

推理公式法认为只有当降雨历时等于集水时间时,径流量最大。因此,计算雨水设计流量时,将汇水区水力最远点的雨水流到设计断面所需时间称作集水时间。集水时间为地面集水时间和管渠内雨水流行时间之和。SWMM软件利用非线性水库模拟子汇水区中降雨-径流转换关系,地面集水时间并非SWMM软件的参数,应用时需要将集水时间纳入暴雨强度时间序列计算中。

处理方式如下:

① 处于雨水管渠系统最上游的子汇水区,在降雨强度计算中采用给定的经验性地面集水时间,或由公式推求的地面集水时间。通常高度开发、不透水性较高、雨水口分布较密的地区,集水时间常采用5~8 min;地块开发强度低、建筑密度小、地形较

平坦、汇水面积较大、雨水口布置较稀疏地区,一般取 10~15 min。

② 处于雨水管渠系统中间,有子汇水区流入点,采用该入流点上游不同分支管渠中最大集水时间作为该子汇水区的集水时间。

③ 暴雨强度时间序列采用常数暴雨强度,该常数暴雨强度值根据设计重现期和以上确定的集水时间,由暴雨强度公式推求。

④ 依据极限强度理论,暴雨强度时间序列总历时应大于服务区域内的总集水时间。

雨量计为研究区域内的一个或多个子汇水区提供降水数据。为模拟推理公式法,雨量计的主要输入属性设置包括:①降雨数据类型采用“暴雨强度”。②记录时间间隔可设置为“1 分钟”。③降雨数据源可采用时间序列或文件形式;如果将降雨强度保存在文件中,则需要输入存有降雨数据的文件名称。为可靠模拟地表径流,不同子汇水区可采用不同的雨量计(这些雨量计采用的降雨时间序列是不同的)。

连接节点(汇接点)是使管渠相互连接的排水系统节点。它们物理上表示地表自然渠道的汇流点、雨水管渠系统中的雨水口或检查井。应用中汇接点的主要输入参数为:内底标高,到地表的深度。因为汇接点的内底标高在模拟计算中是输出结果而不是已知参数,因此需要多次运行软件,进行试算求得。

管渠为从一个汇接点输水到另一个汇接点的管道或渠道。它们的断面可以是圆形、矩形、梯形或用户定义的不规则形状。

管渠的主要输入参数有:进水汇接点名称、出水汇接点名称、进水汇接点内底偏移量、出水汇接点内底偏移量、管渠长度、曼宁粗糙系数(注意管渠曼宁粗糙系数不同于子汇水区曼宁粗糙系数)、断面几何尺寸等。其中断面几何尺寸在模拟计算中是输出结果而不是已知参数,需要多次运行软件,进行试算求得。

## 1.2 应用流程

当利用雨水管理模型进行雨水管渠系统模拟计算时,计算流程见图 1。

在雨水管渠系统设计计算之前,首先要收集和整理设计地区的各种原始资料,包括地形图、城市或工业区的总体规划、水文、地质、降雨状况等,作

为基本设计依据。

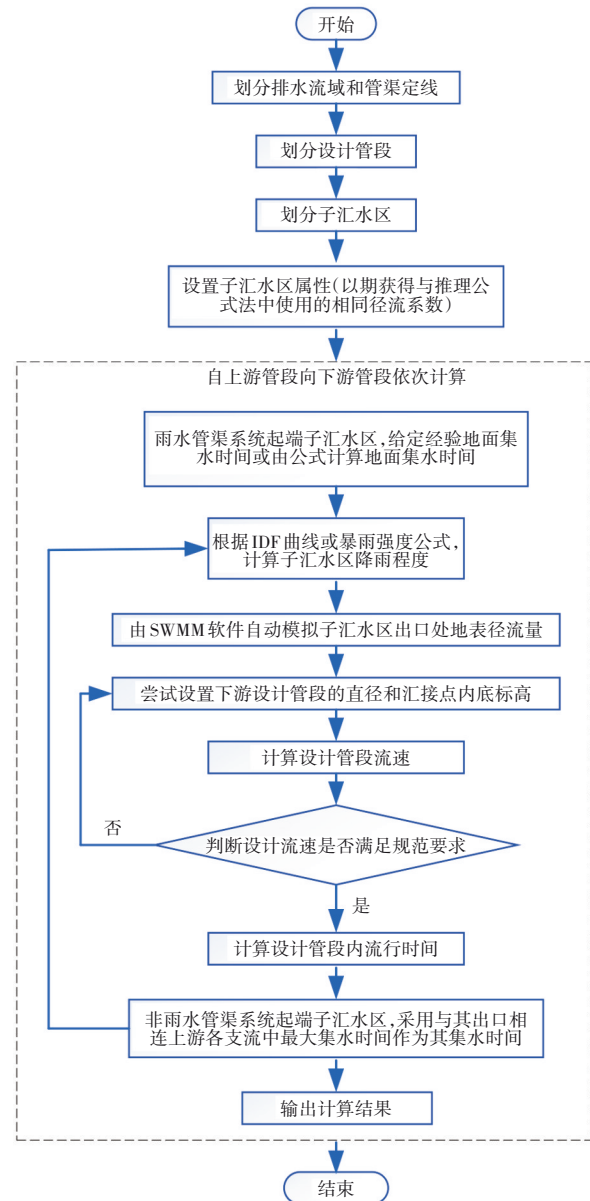


图 1 雨水管理模型模拟推理公式法设计计算管渠系统流程

Fig.1 Flow chart of design and calculation of sewer system based on simulation rational formula method of stormwater management model

## 2 算例分析

简单雨水管网如图 2 所示。

S1~S5 为 5 个子汇水区;J1~J4 为汇水区出水口,也是管道系统中的节点;O5 为管道系统出水口;L1~L4 为 4 条设计管段。

排水区域的特性见表 1。



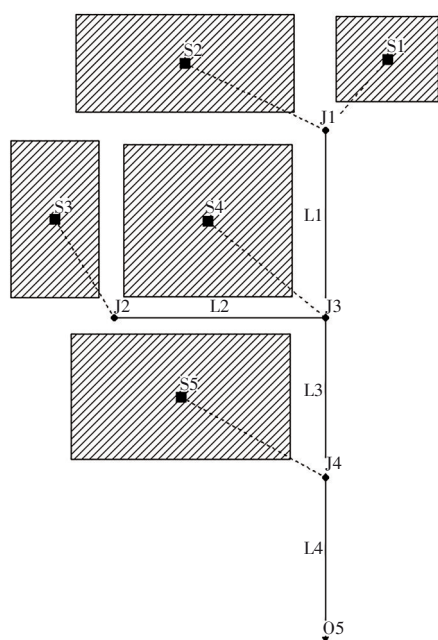


图2 子汇水区 and 设计管段布局示意

Fig.2 Schematic diagram of subcatchment area and design pipe layout

表1 排水区域特性

Tab.1 Drainage area properties

子汇水区编号	面积/hm <sup>2</sup>	地表漫流长度L <sub>s</sub> /m	坡度S	地表粗糙系数n	集水时间t <sub>s</sub> /min	径流系数C
S1	1.0	140	0.010	0.015	5.9	0.8
S2	1.5	220	0.010	0.016	8.4	0.7
S3	1.5	200	0.012	0.030	11.2	0.4
S4	1.8	240	0.010	0.020	10.7	0.6
S5	1.8	260	0.010	0.021	11.1	0.6

该地区的暴雨强度公式:

$$q = \frac{2457.435(1 + 0.633 \lg P)}{(t + 11.951)^{0.724}} \quad (1)$$

式中:  $q$  为设计暴雨强度,  $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$  为设计暴雨重现期,  $a$ ;  $t$  为降雨历时 (等于集水时间),  $\text{min}$ 。

设计中, 取设计重现期  $P=3$  a。各管段的汇水面积、管段长度、径流系数、检查井的地面标高计算见表2。管道起点埋深采用4.00 m。试进行雨水管道的水力计算。

表2 雨水管渠水力计算

Tab.2 Hydraulic calculation of storm sewer

设计管段编号	管长L/m	汇水面积A/hm <sup>2</sup>	径流系数C	有效面积CA/hm <sup>2</sup>	总有效汇水面积ΣCA/hm <sup>2</sup>	集水时间t <sub>c</sub> /min	本段流行时间t <sub>2</sub> /min	降雨强度q/(L·s <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	设计流量Q/(L·s <sup>-1</sup> )	管径D/mm	坡度I	流速v/(m·s <sup>-1</sup> )	坡降I·L/m	设计地面标高/m		设计管内底标高/m		埋深/m	
														起点	终点	起点	终点	起点	终点
J1-J3	170	1.0(1.5)	0.8(0.7)	0.8(1.05)	1.85	8.40	3.37	361.12	668.08	1000	0.000 75	0.84	0.128	10.50	9.60	6.500	6.372	4.00	3.23
J2-J3	140	1.5	0.4	0.60	0.60	11.20	2.54	328.95	197.37	600	0.001 40	0.92	0.196	12.45	9.60	8.450	8.250	4.00	1.35
J3-J4	140	1.8	0.6	1.08	3.53	13.74	2.75	305.08	1076.93	1250	0.000 55	0.83	0.077	9.60	8.60	6.122	6.045	3.48	2.56
J4-O5	100	1.8	0.6	1.08	4.61	16.49	1.85	283.43	1306.61	1300	0.000 60	0.90	0.060	8.60	8.00	5.995	5.935	2.61	2.07

地表漫流集水时间通常与降雨强度、地表粗糙系数、流经距离和地表坡度相关, 本例中  $t_s$  计算如下<sup>[9]</sup>:

$$t_s = \frac{K_c}{i^{0.4}} \left( \frac{nL_s}{\sqrt{S}} \right)^{0.6} \quad (2)$$

式中:  $t_s$  为地表漫流集水时间,  $\text{min}$ ;  $K_c$  为经验系数, 6.943;  $i$  为降雨历时等于地表漫流集水时间时的降雨强度,  $\text{mm/h}$ ;  $n$  为曼宁粗糙系数;  $L_s$  为地表漫流流行距离,  $\text{m}$ ;  $S$  为地表坡度。

由式(2)可知, 地表漫流集水时间  $t_s$  与降雨强度  $i$  相关, 而  $i$  是在降雨历时等于地表漫流集水时间  $t_s$  时的降雨强度, 事先它是一个未知数, 因此式(2)的求解需要一个迭代过程。在该迭代过程中, 首先假设一个  $t_s$  值, 然后从地区降雨强度-历时-频率关系

数据中得到降雨强度  $i$ 。由式(2)计算出新的  $t_s'$  值, 将其与  $t_s$  值相比较, 如果它们不相等, 则以  $t_s'$  值代替  $t_s$  值, 重复计算, 直到新的  $t_s'$  值与原  $t_s$  相等为止。经计算后各子汇水区地表漫流集水时间见表1。

采用传统推理公式法的雨水管渠设计计算结果见表2。

其次采用中文版雨水管理模型 SWMMH5.1.012 对算例模拟计算。模拟前需要构造降雨强度时间序列, 因模型中没有集水时间的计算, 可通过降雨过程线得到径流过程线, 为此针对不同的子汇水区, 构造降雨强度不变的降雨序列。例如 S1 和 S2 将均采用集水时间为 8.4 min (而不是 5.9 min) 下的降雨强度。S3 采用集水时间为 11.2 min 下的降雨强度。而 S4 将采用 11.20 + 2.54 =

13.74 min(而不是 $8.40 + 3.37 = 11.77$  min)的降雨强度;S5将采用16.49 min下的降雨强度。

为了比较雨水管理模型模拟结果与推理公式法计算结果,本例省略了确定各管段直径和各检查井内底标高的试算迭代环节,模拟中直接采用表2中由推理公式法计算出的管道直径和检查井内底标高值。模拟结果见表3。

表3 雨水管理模型模拟结果

Tab.3 Simulation results of stormwater management model

设计管段	输入信息		输出信息	
	集水时间/min	降雨强度/( $L \cdot s^{-1} \cdot hm^{-2}$ )	流量/( $L \cdot s^{-1}$ )	流速/( $m \cdot s^{-1}$ )
J1-J3	8.40	361.12	657.93	0.84
J2-J3	11.20	328.95	196.82	0.92
J3-J4	13.74	305.08	1 019.55	0.83
J4-O5	16.55	283.00	1 282.29	0.89

对照图2、表2和表3可见,设计管段J1-J3、J2-J3均为该小型雨水管渠系统的起始管段,分别收集了它们上游子汇水区S1+S2、S3的雨水径流,仅由地表集水时间计算雨水径流量,因此模拟流量和流速与推理公式法计算结果相同。设计管段J3-J4、J4-O5为该小型雨水管渠系统的汇流管段,模拟流量和流速略小于推理公式法计算结果,但差异不大。总体而言,可以认为在该小型算例中,雨水管理模型可近似再现推理公式法的计算结果。

### 3 结语

推理公式法是雨水管渠系统设计计算常用方法。随着雨水管理模型的应用推广,难免会比较雨水管理模型模拟结果与推理公式法计算结果。考虑到两者的计算原理和输入数据要求存在差异,研究中对雨水管理模型要求的径流系数、集水时间进行了特殊处理,提出了与推理公式法计算结果近似的雨水管理模型模拟方法。

通过含5个子汇水区、4条设计管段的小型案例,对比了推理公式法和雨水管理模型模拟的计算结果,可以看出雨水管理模型可近似再现推理公式法的计算结果。对于雨水管理模型在大型雨水管渠系统设计计算中的应用还需要进一步归纳总结。

地表漫流集水时间通常与降雨强度、地表粗糙

系数、流经距离和地表坡度相关。算例分析中采用了国外文献中的地表漫流集水时间计算公式,建议该方面需要进一步研究和探索,逐步形成适合于国内状况的计算公式。

### 参考文献:

- [1] CIRIA. Designing for Exceedance in Urban Drainage—Good Practice: PUB C635[S]. UK: CIRIA, 2006.
- [2] CROBEDDU E, BENNIS S, RHOULANE S. Improved rational hydrograph method [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338(1/2): 63–72.
- [3] WAIKAR M L, NAMITA U U. Urban flood modeling by using EPA SWMM5 [J]. SRTM University's Research Journal of Science, 2015(1): 73–82.
- [4] MALI D, AGRAWAL D, PARMAR P, et al. Estimation of storm runoff quantity using rational method and SWMM [J]. International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology, 2017, 5(2): 1–8.
- [5] KYI M P. Analysis of drainage capacity by using rational method and storm water management model [J]. International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering, 2018, 5(1): 9–14.
- [6] ROSSMAN L. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1[M]. USA: USEPA, 2015.
- [7] 李树平. 排水管渠系统模拟与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
LI Shuping. Modeling and Computing of Drainage System [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018(in Chinese).
- [8] ROSSMAN L. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I—Hydrology [M]. USA: USEPA, 2016.
- [9] MAYES L. Stormwater Collection Systems Design Handbook [M]. New York: the McGraw-Hill Companies, 2001.

作者简介:卓雄(1971—),男,福建福州人,本科,高级工程师,主要从事设计管理和技术管理工作。

E-mail: 13400570039@163.com

收稿日期:2021-06-26

修回日期:2022-01-18

(编辑:孔红春)