

SWMM模型原理及其在霞凝港区的应用*

任伯帜¹, 邓仁健², 李文健²

(1.湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 2.长沙理工大学河海工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 介绍了 SWMM 模型原理, 包括地表产流子系统演算、地表汇流子系统演算和传输子系统流量演算。经长沙市霞凝港区的实测资料检验, 证明该模型在港区小流域的雨洪分析中有较高的精度, 洪峰流量最大相对误差仅为 7.85%, 可用于港区雨水排水的径流模拟。

关键词: SWMM 模型; 径流模拟; 霞凝港区

中图分类号: TU992.03

文献标识码: B

文章编号: 1002-4972(2006)04-0041-04

Principles of SWMM Model and Its Application in Xianing Port Area

REN Bo-zhi¹, DENG Ren-jian², LI Wen-jian²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Institute of River and Sea Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: This paper presents the principles of SWMM model, which consists mainly of three parts, i.e. ground surface rainfall sub-system calculation, overland flow sub-system calculation and storm-sewer flow sub-system calculation. It is verified by the observed data of Xianing Port Area in Changsha City that the model is of high accuracy, with the greatest relative error of the peak flow of only 7.85%, thus can be used in runoff simulation of harbor rainfall drainage system.

Key words: SWMM model; run-off simulation; Xianing Port Area

近年来, 我国对城市暴雨模型的研究和应用已经取得了一定的成效, 其中比较著名的是对美国环保局研制的雨洪管理模型 SWMM(Storm Water Management Model) 的应用^[1]。河海大学和南京水文水资源研究所将 SWMM 模型引入天津市的雨洪分析, 取得了不错的效果^[2]; 赵雅娟等人将该模型用于我国华南地区城市地表径流的研究, 效果也不错^[3]。港区作为城市的一个子区域, 具有独特的水文特征。为了检验 SWMM 模型在港口区域的适用性, 准确计算该地区港区暴雨的设计排洪量, 为港区的雨水排水系统的设计、校核和管理提供科学依据, 本文将 SWMM 模型应用于长沙市霞凝港

区雨水排水系统的模拟和检验。经实测资料检验, 认为该模型有较高的精度, 可用于港区雨水排水的径流模拟。

1 SWMM 模型的概述

SWMM 模型是美国环保局为了设计和管理城市暴雨而研制的综合性数学模型, 它可以模拟完整的城市降雨径流和污染物运动过程。SWMM 模型包括径流模块、输送模块、扩展的输送模块、调蓄/处理模块和接纳水体模块等主要模块。它们之间的关系如图 1。SWMM 模型可以根据输入的资料归纳总结, 输出任何断面的流量过程线和污

收稿日期: 2005-08-31

* 基金项目: 湖南省自然科学基金 (05jy2055) 资助; 湖南省教委资助项目 (59838300)

作者简介: 任伯帜 (1968-), 男, 博士, 副教授, 从事港区给水排水系统优化及水污染治理专业。

染过程线。

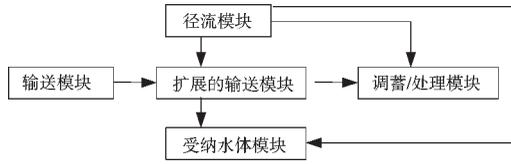


图 1 SWMM 模型结构图

2 SWMM 模型的原理

2.1 子流域的概化

在 SWMM 模型中一般将 1 个流域划分为若干个子流域，根据各子流域的特点分别计算径流过程，最后通过流量演算方法将各子流域的出流叠加组合起来。为了表示不同的子流域特征该流域概化成图 2 所示的形状。

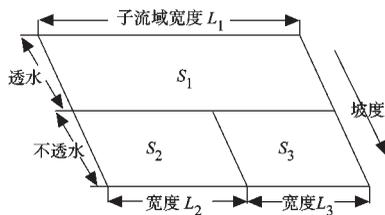


图 2 子流域概化图

每个子流域的地表可划分为透水面积 S_1 、有滞蓄库容的不透水面积 S_2 和无滞蓄库容的不透水面积 S_3 三部分。在图 2 中， S_1 的宽度等于整个子流域的宽度 L_1 ，而 S_2 、 S_3 的宽度 L_2 、 L_3 与它们各自的面积占总不透水面积的比例成正比。即：

$$L_2 = \frac{S_2}{S_2 + S_3} \cdot L_1 \quad L_3 = \frac{S_3}{S_2 + S_3} \cdot L_1 \quad (1)$$

2.2 SWMM 模型的建立

SWMM 模型包括坡面汇流、边沟汇流、干管汇流和出流排水等部分，模型的流程图如图 3 所示。整个演算过程可分为地表产流子系统演算、地表汇流子系统演算和传输子系统流量演算。

2.2.1 地表产流子系统演算

由子流域概化图可知，产流由 3 部分组成：对于不透水面积 S_3 上的产流就等于其上的降雨量；对于带有蓄水的不透水面积上的产流等于其上的降雨量减去初损即填注量；对于透水面积 S_1 上的产流不仅要扣除填注量，还要扣除下渗引起的初

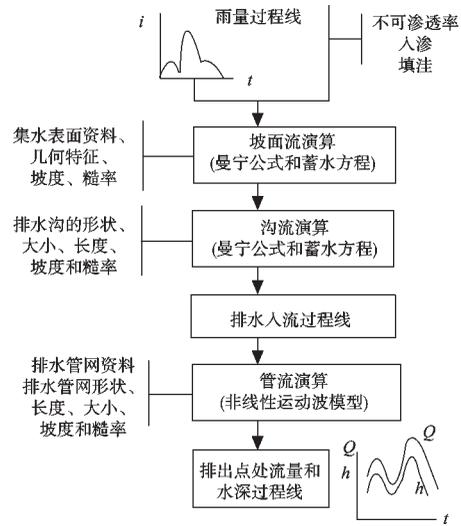


图 3 SWMM 模型水量演算原理图

损。SWMM 模型中采用 Horton 公式计算下渗量^[1-4]。

2.2.2 地表汇流子系统演算

地表汇流演算是通过把概化子流域的 3 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方程。

$$\text{连续方程: } \frac{d}{dt} = S \frac{dh}{dt} = S \cdot i - Q \quad (2)$$

$$\text{曼宁方程: } Q = L \cdot \frac{1.49}{n} \cdot (h - h_p)^{5/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (3)$$

式中： $S \cdot h$ 为地表集水量 (m^3)； h 为水深 (m)； t 为时间 (s)； S 为地表面积 (m^2)； i 为净雨强度 (m/s)； Q 为出流量 (m^3/s)； L 为子流域宽度 (m)； n 为曼宁糙率系数； h_p 为地面蓄水深 (mm)； S_0 为子流域坡度。

对方程(2)、(3)用有限差分法求解，以下标 1 和 2 分别表示一个时段 (t) 水深的初始值和终值。方程(2)、(3)合并变成：

$$\frac{h_2 - h_1}{t} = i + \frac{1.49 \cdot L}{S \cdot n} [h_1 - \frac{1}{2} (h_2 - h_1) - h_p]^{5/3} \quad (4)$$

方程(4)可采用 Newton—Raphson 迭代法求解^[5-6]，得到 h_2 ，从而得到 t 末的瞬时出流量。计算不透水面积的产流量时，只要改变上述 h_p 的值。

2.2.3 管网汇流子系统演算

管网汇流子系统演算在 SWMM 模型中可以通过输送模块或扩展的输送模块来演算。都是采用对圣维南方程组 (Saint-Venant) 求解^[1]。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (5)$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 = 0 \quad (6)$$

式中: Q 为流量; A 为过水断面面积; v 为管内流速; h 为管内水深; t 为时间; x 为距离; S_f 摩擦坡度; S_0 为底坡; q 为单位长度旁侧入流量。

对于港区雨水管道只有节点入流而无旁侧入流, 则 $q=0$ 。式(6)第一、二项为惯性项时, 第三项为压力项, 当忽略惯性项和压力项时, 得到运动波方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{1}{C} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$S_f - S_0 = 0 \quad (8)$$

式(7)中: $C = \frac{\partial Q}{\partial A}$

对式(7)采用四点空间和时间偏心加权差分格式进行求解。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1-\epsilon)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\zeta(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1-\zeta)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{x} \quad (10)$$

将式(9)和(10)代入式(7)得:

$$\frac{1}{C} \frac{(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1-\epsilon)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{t} + \frac{\zeta(Q_i^{j+1} - Q_i^j) + (1-\zeta)(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{x} = 0 \quad (11)$$

式中: ϵ 和 ζ 为时间和空间差分的权重: $\epsilon \in (0, 0.5)$, $\zeta \in (0.5, 1)$, i, j 分别为空间和时间的格点号。

求解上式方程时, 还要有一个初始条件和一个边界条件, 初始条件可以为稳定的基流, 若无基流, 为保证计算稳定, 可假设最大流量的 5% 作为基流, 边界条件一般为入流流量过程线。

3 SWMM 模型在霞凝港区的应用

为了验证 SWMM 模型是否适应港口区域的水文特征, 运用长沙市霞凝港区的降雨径流资料, 对该模型作了检验。

3.1 霞凝港区的概况

霞凝港区位于长沙市北部, 一期工程占地面积为 $22.36 \times 10^4 \text{ m}^2$, 整个港区汇集的雨水通过 3 套雨水管道排放, 第 1 套管网的汇水面积为 $9.75 \times$

10^4 m^2 , 第 2 套管网的汇水面积为 $4.27 \times 10^4 \text{ m}^2$, 其余的为第 3 套。限于篇幅, 本文只对第 1 套排水管网中的 24-25 管段进行了分析。该排水管网的汇水面积为 $2.69 \times 10^4 \text{ m}^2$, 不透水区的比率为 87.5%, 地面平均坡度为 0.5%, 管网布置见图 4。本文收集了自 2001 年 8 月以来在该港区的一些观测径流流量资料, 降雨资料采用附近的长沙市水文站和螺岭桥水文站的资料。

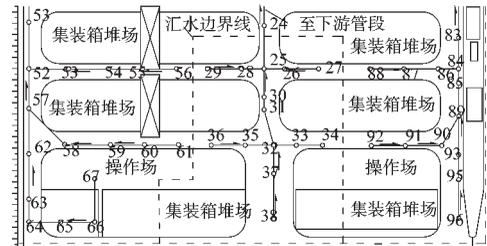


图 4 24-25 管段布置图

3.2 降雨过程及扣损方法

为了比较, 选取 2004 年 7 月 12 日、2004 年 8 月 9 日及 2005 年 6 月 26 日 3 场降雨量非常接近的降雨, 降雨资料见图 5。根据相关研究^[4-6]和实测资料取地面蓄水深 $h_p=2.1 \text{ mm}$, 平均下渗损失率 $\mu=0.20 \text{ mm/min}$ 。在模拟计算时, 当降雨强度小于平均下渗损失率时, 取净雨强度为零。

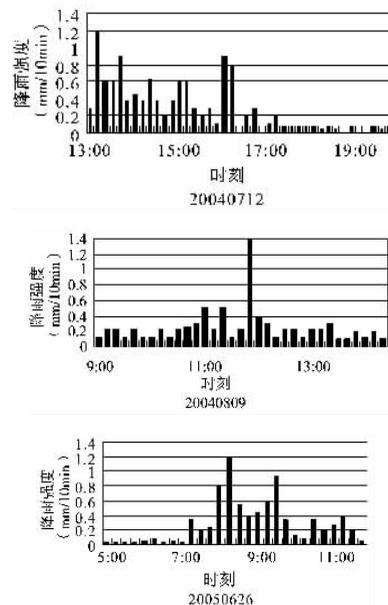
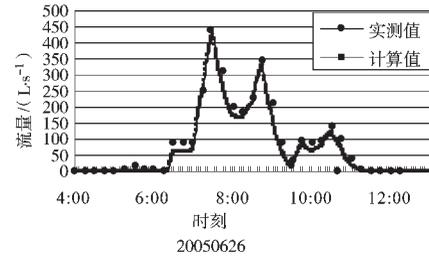


图 5 降雨过程线

3.3 管网汇流流量模拟

根据地面产流流量确定管网入流流量过程线,

再根据式 (11) 进行演算, 求出该管道任意断面流量过程线。第一管段出口的流量过程线与下一管段雨水口的入流过程线叠加以后的流量过程线便是下一管段的入流流量过程线, 依此类推, 便可演算至出口。通过上述 3 场暴雨降雨资料和相关的管道数据资料, 模拟该港区 24-25 管段出口的流量过程线, 模拟值与实测值比较见图 6, 相关分析见表 1。



注:
(1) 计算值的时间步长为 1 min;
(2) 实测值的时间步长为 10 min。

图 6 24-25 管段模拟计算值与实测值流量过程线比较

从图 6 可以得出, 模拟计算的流量过程线与实测的流量过程线比较吻合。表 1 的分析表明: 3 场暴雨的洪峰流量模拟值与计算值非常接近, 相对误差分别为 0.66%、1.69%和 7.85%, 可以满足实际工程的需要。3 场雨洪峰流量模拟值出现的时间都比实测值出现的时间滞后, 但 3 次模拟的流量过程线与实测流量过程线的最大误差比较大, 相对误差分别达到了 30.78%、29.61%和 23.85%, 除了由 SWMM 模型本身引起外, 还有一些其它原因, 如径流观测误差、降雨量观测误差、流域条件变化、地面和其他资料不全面等。

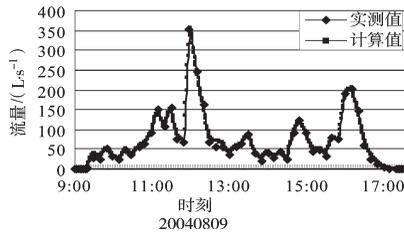
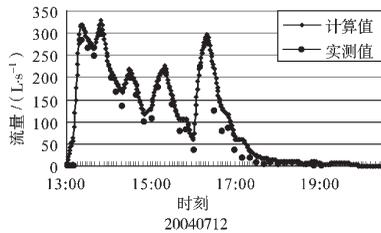


表 1 24-25 管段出口模拟与实测流量比较

洪号	降雨量/ mm	洪峰流量 / (L·s ⁻¹)		洪峰误差		洪峰出现时刻		最大误差	
		实测值	模拟计算值	绝对误差 (L·s ⁻¹)	相对误差 / %	实测时刻	模拟计算时刻	绝对误差 (L·s ⁻¹)	相对误差 / %
20040712	122.6	298.10	321.51	23.41	7.85	11: 55	13: 51	42.12	23.85
20040809	124.9	429.32	432.16	2.84	0.66	07: 26	07: 31	27.02	30.78
20050626	121.1	351.43	357.35	5.92	1.69	11: 55	11: 59	24.01	29.61

4 结论

霞凝港区 3 场雨的检验数据说明, SWMM 模型能够适合港区小流域的雨洪分析, 而且模型的洪峰流量计算精度比较高, 可以用来作为港区雨水排水系统的设计、校核及管理控制的理论依据。当然, 模型也存在一些问题, 如检验的流域过小, 对流域的地表、降雨和管网资料的要求较高, 模型相关参数的取值也存在问题。SWMM 模拟在港区较大流域的适用性有待进一步检验。

参考文献:

[1] Huber WC, Heaney JP, et al. Storm water management model user's manual (Version III) [M]. U.S. Environmental Protection

Agency, 1987.

[2] 徐向阳. 适合我国城市防洪和排水规划设计的雨洪模型[J]. 河海大学学报, 1993(11): 28-33.
 [3] 赵雅娟. 深圳市罗湖小区排水系统模型研究[M]. 广东: 中山大学, 2001(6): 53-54.
 [4] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建工出版社, 2000.
 [5] 颜庆津. 数学分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999: 112-117.
 [6] Chau Kwokwing, Cheung C S. Knowledge Representation on Design of Storm drainage systems[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004(4): 886-894.
 [7] 周玉文, 孟昭鲁, 宋军. 城市雨水管网非线性运动波法模拟技术[J]. 给水排水, 1995(4): 9-11.