

基于 SWMM 的排水管网系统模拟分析技术

刘兴坡^{1, 2} 刘遂庆² 李树平² 胡 坚³ 喻一萍³

(1 上海海事大学海洋环境与安全工程学院, 上海 200135; 2 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;

3 镇江市给排水管理处, 镇江 212002)

摘要 道路积水是排水管网系统功能失效的宏观反映。为了防止并减轻此类灾害,应用系统建模仿真以及情境分析方法对排水管网系统进行分析。以镇江市中心城区解放南路雨水排放子系统为实例,采用排水管网建模仿真软件 SWMM 和典型情境分析对该系统运行的总体性能和瓶颈进行了模拟分析,为排水管网系统的改造策略提供科学参考。

关键词 排水管网 系统分析 系统建模与仿真 SWMM 情境分析

0 引言

排水管网系统是由众多排水管道、检查井及其他构筑物组合而成的大型工程系统,其总体运行性能的优劣取决于系统中各个组件的平衡与协调,并由系统中最薄弱环节的水平所决定。这可以用经济学中的“木桶原理”来说明,即一个木桶能盛多少水不是取决于其最长的那块木板,而是取决于其最短的那块木板。因此,研究排水管网系统分析技术,识别排水管网系统的运行“瓶颈”对于提升排水管网系统的服务性能具有重要作用。

1 排水管网系统分析的必要性

排水管网系统的主要功能之一是安全地将降雨径流、生活污水和工业废水等输送至特定场所。如果系统中一个或多个组件不能协调工作,系统功能就会失效,从而导致许多问题,譬如道路积水等。系统组件功能失效不但与降雨过程、下游水体相关,还与排水管网系统的设计与运行过程关系密切。

1.1 设计方面

(1) 现行的排水管网系统设计方法存在诸多弊端:基于恒定均匀流假设,仅以峰值流量作为设计核心;隐含采用恒定降雨过程和污水入流过程;未能考虑排水管网不同组件之间水流,以及管网水流与受纳水体之间的交互作用。因此,现行设计方法采用的设计情境与排水管网系统的实际运行情境存在较

大偏差。

(2) 排水管网系统由多种构筑物组件构成,不同类型组件的优化设计目标存在较大差异。譬如,排水管道的设计关注峰值流量,而调蓄池的设计关注污水总量。现行设计方法未能从系统的角度协调不同组件设计目标之间的差异,这在一定程度上会影响系统整体运行性能的优化。

现行设计方法不以流量过程线作为设计线索,未能采用非恒定流模拟技术和系统分析方法对设计成果进行复核,从而影响排水管网系统后续的运行性能。

1.2 运行方面

(1) 排水管网系统在运行过程中,内部组件的物理状态会发生不同程度的改变,譬如管道淤积使得管径变小等。

(2) 排水管网系统在运行过程中,外部汇水区域的特性也会发生变化,譬如土地利用功能的变化、接驳管道的变更等。这些外部环境条件的变化会干扰系统的运行状态,从而对系统功能发挥产生影响。

2 排水管网系统分析途径

系统建模与计算机仿真技术以及情境分析是排水管网系统分析的两个重要手段。系统建模与计算机仿真是系统分析的基础和平台,它能够模拟系统不同组件之间的关系、系统及其组件的动态特性。目前,排水管网系统建模仿真主要采用以水文模拟和水力模拟为主的模型软件,如 SWMM、MOUSE 等。情境分析是系统分析的重要手段。排水管网系统的情境分析主要包括降雨情境、下游边界条件和

上海市科委博士后基金科研项目(05R214144);江苏省建设系统研究项目(J S2004ZD02)。

系统内边界条件等。一般通过假设、历史重演、预测、模拟等手段来生成未来情境。

3 实例研究

3.1 建模区域概况

此处以镇江市中心城区解放南路雨水排放子系统为例进行说明。该排水管网系统全部由分流制雨水管道组成,包括 80 个检查井节点(含排放口)和 79 条管段,管道总长度约为 2 594 m,管径范围为 400~1 500 mm,系统排放口位于古运河边,出水管段管径为 1 500 mm,底部高程为 3.37 m;汇水区域总面积约为 38 hm²,被划分为 74 个汇水子区域,汇水子区域最大面积小于 2 hm²,汇水子区域水流距离为 50~168 m,各个汇水子区域的径流作为节点入流量连接到检查井节点或邻近的汇水子区域上。

3.2 建模与仿真方法

排水管网系统建模仿真软件选用 SWMM,排水管网系统入渗模型采用 Horton 模型,管网模拟采用动力波法,以充分模拟下游回水情况。通过水文模型参数灵敏度分析,选用水文模型参数、(透水区)初始入渗率作为模型校准的调整参数。针对镇江市排水管道流量监测资料欠缺的现实,模型校准采用了基于排水管网宏观水文特征(径流系数和积水事件)的模型预校准方案。

3.3 情境设计

3.3.1 模拟降雨情境

由于获得的实测降雨记录时间尺度为 1 h,不适用于汇水时间较短的城市流域的降雨事件模拟,为此采用芝加哥过程线模型合成模拟降雨情境。镇江市暴雨强度公式见式(1)。

$$q = \frac{2\,418.16(1+0.787\lg P)}{(t+10.5)^{0.78}} \quad (1)$$

式中 q ——设计暴雨强度, L/(s·hm²);

P ——设计重现期, a;

t ——降雨历时, min。

为了模拟排水管网系统在不同降雨情境下的表现,分别合成了前峰降雨(雨峰系数 $r=0.2$)、中峰降雨($r=0.5$)、后峰降雨($r=0.8$),重现期分别采用 $P=1\text{ a}$ 、 2 a 、 3 a ,降雨历时采用 120 min。对于芝加哥过程线模型,重现期 P 决定着每场降雨雨强的最大值,而雨峰系数 r 决定着雨强最大值出现的时间。

部分合成降雨情境见图 1,表 1 为合成降雨情境情况,表 2 所示为重现期 $P=3\text{ a}$ 的后峰降雨($r=0.8$)雨强数据。

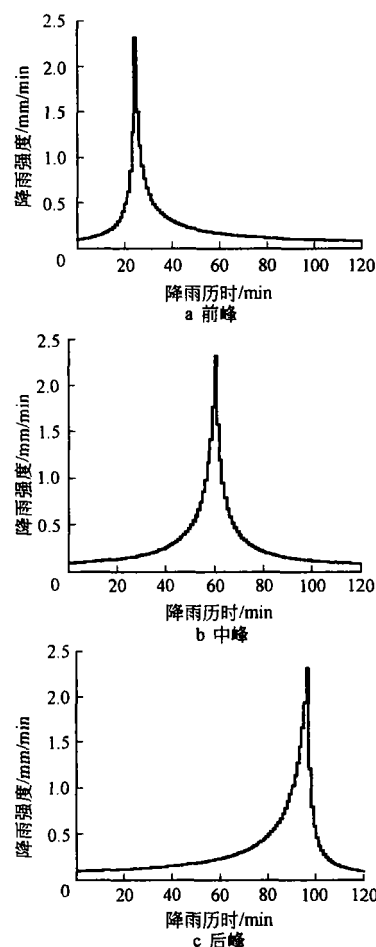


图 1 不同雨型的合成降雨情境($P=1\text{ a}$)

表 1 合成降雨情境

降雨编号	降雨情境	峰值雨强/mm/h	2 h 降雨量/mm
1	$r=0.2, P=3\text{ a}$	190.92	40.09
2	$r=0.2, P=2\text{ a}$	171.68	36.05
3	$r=0.2, P=1\text{ a}$	138.80	29.14
4	$r=0.5, P=3\text{ a}$	190.92	49.37
5	$r=0.5, P=2\text{ a}$	171.68	44.40
6	$r=0.5, P=1\text{ a}$	138.80	35.90
7	$r=0.8, P=3\text{ a}$	190.92	53.25
8	$r=0.8, P=2\text{ a}$	171.68	47.89
9	$r=0.8, P=1\text{ a}$	138.80	38.72

3.3.2 下游边界条件

古运河两端建有水闸,水位变化相对平稳,故以恒定的古运河水位来描述模型的下游边界条件。选

表 2 合成降雨情境数据

时间 / min	雨强 / mm/ min	时间 / min	雨强 / mm/ min	时间 / min	雨强 / mm/ min	时间 / min	雨强 / mm/ min
1	0.13	31	0.18	61	0.32	91	1.41
2	0.13	32	0.18	62	0.33	92	1.57
3	0.13	33	0.18	63	0.34	93	1.76
4	0.13	34	0.19	64	0.35	94	1.99
5	0.13	35	0.19	65	0.36	95	2.29
6	0.13	36	0.19	66	0.37	96	2.67
7	0.13	37	0.20	67	0.38	97	3.18
8	0.14	38	0.20	68	0.39	98	1.66
9	0.14	39	0.20	69	0.41	99	1.09
10	0.14	40	0.21	70	0.42	100	0.80
11	0.14	41	0.21	71	0.43	101	0.62
12	0.14	42	0.21	72	0.45	102	0.51
13	0.14	43	0.22	73	0.47	103	0.43
14	0.14	44	0.22	74	0.49	104	0.38
15	0.15	45	0.22	75	0.51	105	0.33
16	0.15	46	0.23	76	0.53	106	0.30
17	0.15	47	0.23	77	0.55	107	0.27
18	0.15	48	0.24	78	0.58	108	0.25
19	0.15	49	0.24	79	0.61	109	0.23
20	0.15	50	0.25	80	0.64	110	0.21
21	0.16	51	0.25	81	0.68	111	0.20
22	0.16	52	0.26	82	0.72	112	0.19
23	0.16	53	0.26	83	0.76	113	0.17
24	0.16	54	0.27	84	0.81	114	0.16
25	0.16	55	0.28	85	0.86	115	0.16
26	0.17	56	0.28	86	0.92	116	0.15
27	0.17	57	0.29	87	0.99	117	0.14
28	0.17	58	0.30	88	1.08	118	0.14
29	0.17	59	0.30	89	1.17	119	0.13
30	0.18	60	0.31	90	1.28	120	0.13

择了 3 个特征水位,分别是汛期最高水位(7.47 m)、最低水位(2.85 m)和水位中间值(4.02 m),此时排放口分别处于完全淹没出流、自由出流和半淹没出流状态。

3.4 情境分析

对于排水管网系统分析,需要考虑不同的外部环境条件和内部因素对分析结果的影响,从而针对不同的系统分析目的,选择适宜的模拟情境。

3.4.1 降雨情境的影响分析

降雨过程是地表径流量和排水管道流量的直接决定因素。实例研究中,汇水子区域径流过程线与

降雨雨强过程线的相关系数(不考虑时滞)一般可达到 0.8 以上,降雨-径流过程关系如图 2 所示。

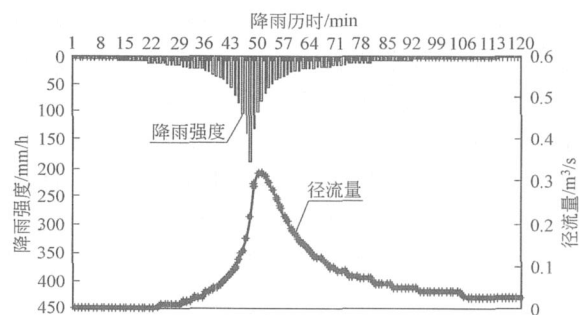


图 2 降雨-径流过程关系

实例研究采用合成的 9 种不同型式的降雨情境进行系统分析。以解放南路雨水排水子系统的排放口处流量为例来比较不同降雨情境对排水管道流量的影响。由图 3 可以看到,后峰降雨情境比前峰和中峰降雨情境产生的流量峰值和径流总量大;降雨情境重现期对径流过程的峰值流量影响不大,但对径流总量影响较大,特别是对于退水过程的影响较大。因此,系统分析时采用重现期为 3 a 的后峰降雨情境 Rain7 作为典型降雨情境。

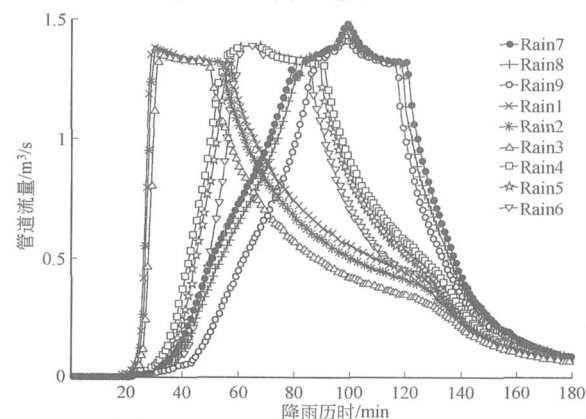


图 3 9 种降雨情境对管道流量的影响对比

3.4.2 古运河水位的影响分析

管网演算选用可考虑系统内外水流交互作用的动力波法。比较降雨情境为 Rain7 时,古运河水位对系统出水管段流量和水位的影响。模拟结果分别见图 4 和图 5。图 4 反映了降雨情境 Rain7 条件下,古运河水位对出水管段流量的影响。在完全淹没状态下,由于外界水体的顶托作用,使得排水管网系统的排水受到很大的阻挡,导致排水能力急剧下降;在

半淹没状态下,起始会由于外界水体的作用,排水过程会有震荡,但后期排水管网系统的排水能力与自由出流时变化不大。因此,对于排涝泵的规划应注意考虑完全淹没状态。此外,随着淹没水深的增大,外界水体对排水管网系统的影响就会越大,但发生频率会降低。图5给出了模拟期间出水管段水深在不同条件下的变化情况,这实际反映了管道内排水与外界入侵水体之间博弈平衡的结果。

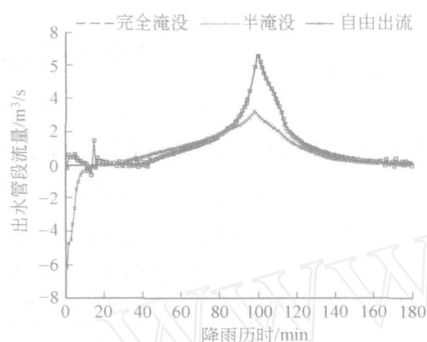


图4 古运河水位对出水管段出流量的影响

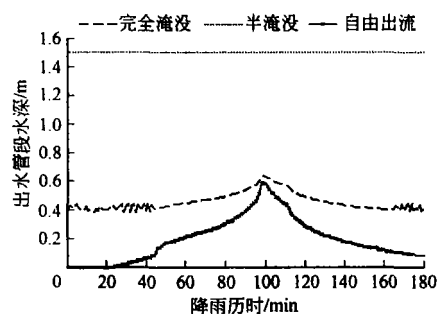


图5 古运河水位对出水管段水深的影响

3.5 分析结果

一般来说,后峰降雨情境对排水管网系统功能发挥较为不利。这是因为,在降雨后期降雨损失基本稳定或没有损失,且排水管道中已有水流,而此时出现雨峰,汇水子区域上的径流基本排向排水管网,更容易导致排水管道峰值流量的出现,对于排水管网系统排涝更为不利。故选择 Rain7 作为系统分析的典型降雨情境,该非恒定降雨情境的重现期约为 3 a。下游边界条件选择古运河保持恒定水位 4.06 m,即排放口处于半淹没状态。

通过模拟仿真的状态报告发现,在该子系统 79 个节点中,40 个检查井节点处曾出现不同程度的积水,占检查井节点总数的 50 %。其中,有 6 个检查

井节点积水时间在 20 min 以上,3 个检查井节点积水时间将近 50 min,占降雨历时的 42 %。据此,选择这 3 个积水点作为整个子系统排涝的“疑似瓶颈点”。同时,多数管道曾出现过管道满流情况,多数管道满流出现时间很短。管道满流时间在 100 min 以上的有 6 个管段。表 3、表 4 分别给出了模拟情境下部分节点、管段的水力状况。

表3 模拟情境下部分节点水力状况

节点编号	平均水深 / m	最大水深 / m	最大水力坡度 / m/m	积水量 / hm ² ·mm	积水时间 / min
J136	1.29	2.27	9.12	1.25	31
J137	1.35	2.23	8.93	37.07	47
J138	1.28	2.15	8.75	2.36	47
J139	1.32	2.19	8.59	48.51	46

表4 模拟情境下部分管段水力状况

管段编号	最大流速 / m/s	最大流量 / m ³ /s	满流时间 / min
C133	1.26	2.93	102
C134	1.82	4.49	108
C135	1.82	25.49	167
C118	1.51	28.15	131
C120	2.3	8.41	101
C123	1.9	4.45	108

对于系统的“疑似瓶颈”,应该分析其积水原因。首先,应该核查其上游的排水分区是否合理、地势是否低洼等,然后核查积水点下游管段管径是否过小、坡度是否过缓。在确定无误后,根据排水管网系统分析结果,考虑采取必要的改扩建措施,实现系统运行性能的最优化。

参考文献

- 1 Rossman L A. Storm water management model user's manual (Version 5.0). 2004
- 2 James W. Best modeling practices for urban water system (Monograph 10). Guelph, Ontario, Canada: CHI, 2002
- 3 周玉文,赵洪宾. 排水管网理论与计算. 北京:中国建筑工业出版社,2000

□通讯处: 200135 上海市浦东大道 1550 号 上海海事大学海洋环境与安全工程学院

E-mail: stormmodel@163.com

电话: 13482297351

收稿日期: 2006-11-30

修回日期: 2007-01-23