

极端降雨条件下城市排水管网水力特性模拟及内涝防控策略

辜庭楚

江西省新建润泉供水有限公司，江西省南昌市，330000；

摘要：全球气候变化使极端降雨事件更频繁，导致城市内涝问题越来越严峻。本文通过模拟分析城市排水管网在极端降雨时的水力特性来深入探讨内涝形成机制并提出有针对性的防控策略，运用先进模型工具并结合实际案例，模拟不同情景下排水管网的水流状态、压力分布等以揭示管网运行规律，根据模拟结果从工程、管理、智慧化等多方面提出综合防控策略，从而提高城市应对极端降雨能力、减少内涝灾害损失并给城市规划与管理提供科学依据。

关键词：极端降雨；城市排水管网；水力特性模拟；内涝防控

DOI: 10.69979/3060-8767.25.08.021

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来，全球气候变化使极端降雨事件明显增多，城市内涝灾害频繁发生，城市正常运转、居民生活以及经济发展都受到严重影响，而城市排水系统的核心是排水管网，城市防洪排涝能力直接取决于其在极端降雨下的运行状态，极端降雨一来管网就容易超负荷运行从而使雨水滞留进而产生内涝，内涝会阻断交通、造成财产损失、威胁居民生命安全、阻碍城市可持续发展，模拟研究城市排水管网的水力特性可深入分析极端降雨时管网水流运动规律，精准找出管网薄弱环节，为城市排水系统优化设计和内涝防控策略制定提供科学依据，有效的内涝防控策略对提升城市应对极端降雨能力、保障城市安全运行非常重要，能让城市在极端天气下平稳发展。

1.2 国内外研究现状

城市排水管网水力模拟及内涝防控研究国外起步早，美国早期开发的 SWMM 模型能全面模拟城市降雨径流与管网水流，为排水系统规划设计给予支持且技术发展使其模型精度与功能不断优化，防控实践方面，德国推广“雨水利用”，通过绿色屋顶、透水路面来增强雨水渗透调蓄，日本建成“首都圈外围排水系统”，提升了极端降雨应对能力。

城市化在国内推进，内涝研究也日益被重视起来，国外先进模型被学者引进后，学者结合我国国情加以改进完善，对内涝成因深入探究，我国大力建设海绵城市，借“渗、滞、蓄、净、用、排”实现雨水管理，让防洪排涝能力得以提升，有些城市利用物联网、大数据技术

进行管网信息化监测，排水系统运行效率得以提高。

2 城市排水管网水力特性模拟方法

2.1 排水管网模型概述

模拟管网水力特性时城市排水管网模型是个关键工具，其通过数学模型和方程求解管网水流运动状态，常用模型有一维、二维和一维-二维耦合模型这几种。一维模型把管道当作一维通道以圣维南方程组为基础，计算效率挺高，适合用来模拟大规模管网主流方向的水流但无法模拟局部水流变化和地表径流。二维模型用浅水方程描述二维地表径流能如实反映地表积水状况有利于内涝模拟，不过计算量需求大。一维-二维耦合模型将两者的优势合起来，依靠耦合算法使管网和地表径流数据交互，全面模拟城市排水系统，能更精准地呈现极端降雨时管网和地表径流的相互作用，从而给内涝防控强有力的支撑。

2.2 模型构建与参数设置

2.2.1 模型构建流程

城市排水管网模型的构建主要有四步，其一要收集管网拓扑结构、管道尺寸、坡度等管网数据以及地形、土地利用类型、降雨等基础数据，模型精度跟数据准确性有关；其二借助 GIS 技术处理和分析数据来构建管网几何模型，从而实现管网空间分布可视化；其三将几何模型导入 SWMM 之类的专业软件并设置好进出口流量、水位等边界条件和初始水流状态等初始条件；其四靠人工试错或者自动优化算法进行参数率定，使模拟结果与实际观测数据相贴合，再用另一组数据验证模型以确保其可靠性。

2.2.2 参数设置原则与方法

排水管网模型构建时模拟结果准确性直接受参数设置影响,曼宁糙率系数能表征管道内壁粗糙情况且不同材质管道(像混凝土管、金属管)各有推荐取值范围,实际应用得结合管道磨损、结垢等实际状况灵活调整,它数值一变水流阻力就改;地表产汇流参数里的径流系数和土地利用类型关系密切,道路、屋顶这些不透水区域径流系数0.8-0.9,绿地、林地等透水区域才0.1-0.2,确定这数值可参考文献或者实测数据;参数设置得遵循合理性和准确性原则,能测量的物理参数以实测值或者规范标准优先采用,难直接获取的参数靠参数率定优化,各参数间的关联和影响也得综合考虑且要避免不合理组合,这样模型才能精准反映管网水力特性。

2.3 模拟情景设置

要深入探究城市排水管网在极端降雨时的水力特性,就得设置降雨与管网工况这两类模拟情景,降雨情景根据当地降雨的历史数据以及设计暴雨标准,设定像5年一遇、10年一遇等不同重现期的降雨过程,也可参考历史特大暴雨案例,且降雨分布模式要考虑均匀、单峰、双峰等,以剖析降雨因素给管网带来的影响,管网工况情景重点关注管网运行状态,要涵盖正常工况、部分管道堵塞、泵站故障等情形以及分流制、合流制等不同排水体制,从而分析极端降雨下管网水力特性的变化,构建多种模拟情景能全面呈现管网运行状况,为内涝防控策略的制定提供详实依据。

3 极端降雨条件下城市排水管网水力特性模拟结果分析

3.1 管网水流状态分析

正常降雨时,管网里多数管道流速平稳且在设计流速范围之内,但极端降雨一到,部分管道流速就急剧上升,管径小且坡度大的管段尤其明显甚至会有紊流产生,就像在模拟50年一遇降雨的时候,某城市低洼区一条管径600mm的管道,正常流速是1.2m/s,极端降雨时一下子飙到3.5m/s,流速过高会导致管道被冲刷且使用寿命缩短,流速不均还会让管道连接处容易漏水,降雨强度增大时管网管道的水深也有明显变化,极端降雨刚开始时水深慢慢上升,一旦降雨超出管网排水能力,水深就迅速增加,部分管道会满管流,模拟10年一遇降雨时,多数管道水深在0.5-0.8倍管径范围内波动,100年一遇降雨时,大概30%的管道水深超过管径,出现溢流、检查井冒水,地表积水更严重且内涝也跟着恶化。

3.2 管网压力分布情况

管网节点压力被极端降雨显著改变,靠近排水源头的节点由于上游来水猛增压力上升,管网末端或者地势低的节点排水受阻压力急剧升高,部分节点压力超管道设计压力1.5倍,这容易引发管道破裂、渗漏,影响水流分配,降低区域排水能力,让内涝风险增大。节点压力和管道内压力紧密相连并随水流动态变化,上坡段水流克服重力压力降低,下坡段压力升高。管道堵塞时堵塞点上游压力骤升,像存在沉积物堵塞的管道,其上游50米范围内压力比正常高0.2MPa,下游压力大幅降低,扰乱水流且排水效率被降低。

3.3 管网排水能力评估

模拟分析能精准算出不同降雨情形下城市排水管网的实际排水能力,拿某个城市排水区域来说,2年一遇降雨时管网排水能力达 $5.6\text{m}^3/\text{s}$ 符合设计要求,而10年一遇降雨时排水能力一下子降到 $3.8\text{m}^3/\text{s}$ 就会产生区域积水,50年一遇及更极端降雨时排水能力进一步下降内涝更严重,一对比就知道我国城市排水管网设计标准在一般地区大多是1-3年一遇,重要地区是3-5年一遇很难抵御极端降雨,模拟数据表明50年一遇降雨时城市管网大概70%的实际排水能力只有设计值的50%-70%,排水能力不足是设计标准低、管网老化堵塞等这是内涝经常发生的重要原因。

3.4 内涝风险区域识别

一维-二维耦合模型被用来模拟极端降雨的时候能直观展现城市地表内涝状况,模拟100年一遇降雨时某城市中心商业区积水最深能到1.2米且影响范围大概2.5平方公里,低洼地段积水在0.5到0.8米之间且分布比较零散,沿河区域由于河水倒灌积水严重且沿着河岸扩散,积水深度、持续时间以及受影响的人口资产等因素可把内涝风险分成高、中、低三级,高风险区积水超过0.8米且持续超过3小时,人口资产密集且损失严重,中风险区比高风险区情况稍好,低风险区受影响小,划分风险等级能精准定位防治重点并优先对高风险区进行工程改造和应急管理以减少内涝损失。

4 城市内涝形成机制分析

4.1 极端降雨特征与内涝的关系

城市内涝的关键诱因在于极端降雨的特性,高强度、短历时的降雨会产生大量径流,远超排水管网设计承载能力,从而出现管网溢流、地表积水的情况。而且降雨历时也不容忽视,强降雨长时间持续时管网会持续高负荷运转,3小时强降雨也许短时间就引发溢流,6小时

同强度降雨会加剧管网负担、延长内涝时间、扩大积水范围。降雨分布不均还会进一步加剧内涝风险,受城市热岛效应影响,城区中心降雨强度往往比郊区高,降雨量集中区域的管网瞬间承压过大,导致管网水流分布失衡,部分管道超载、部分闲置,严重降低排水系统运行效率。

4.2 城市排水管网自身因素对形成内涝的影响

我国城市排水管网多重困境重重是内涝频发的重要原因,其设计标准长时间处于低水平,一般地区雨水管渠设计重现期为 1-3 年,重要地区为 3-5 年,难以抵御极端降雨 50 年一遇甚至 100 年一遇,管径、坡度等参数满足不了排水需求,容易出现堵塞、溢流,管网老化破损相当严重,腐蚀、裂缝导致渗漏,接口问题带来堵塞,而且材料和技术落后,承载与耐久性不够,承受不住极端降雨冲击,维护管理方面存在缺失,日常巡检清理不到位,故障修复缓慢,城市施工还对管网造成破坏,从而进一步加重内涝风险。

4.3 城市下垫面变化与内涝的关联

城市化进程里,不透水的建筑、道路替代了大量绿地、农田,其径流系数在 0.8-0.9 之间,比绿地的 0.1-0.2 高多了,降雨后地表径流猛增,大大超过管网设计排水量,于是内涝就产生了;地形地貌被城市建设改造,自然排水格局被扰乱,原有水系平衡被低洼地区填平、河道改道等破坏,不合理填方工程把周边地势抬高,雨水往低洼区汇聚,排水压力加重,内涝发生几率也增加了。

5 城市内涝防控策略

5.1 工程措施

排水管网设计标准低,需结合城市发展和降雨趋势提升标准,重要区域雨水管渠重现期应提到 5-10 年、一般区域提到 3-5 年且优化管径和坡度,以使新城区和旧改项目管网按高标准建设,对于老化破损的管网,采用内衬修复这种非开挖技术改造并扩建管网增加管道数量和管径,从而解决局部排水不足的问题。

雨水调蓄设施要进行建设,像大型调蓄池、地下蓄水池就可以建起来,并且要利用公园等空间实现多功能用途,小区也要建设小型调蓄设施对雨水进行回用,从而减轻管网压力。海绵城市建设得推进,需要推广透水路面、绿色屋顶,打造湿地公园,借助“渗、滞、蓄、净、用、排”来实现雨水自然管理,进而缓解内涝、改善生态。

5.2 管理措施

管网维护制度要健全起来,通过定期巡检清淤,使用先进设备清除杂物,并且建立维护档案,人员要接受培训提升技能。排水管理体制需完善,统一协调部门职责,整合规划、建设等工作,建立考核体系以保障管理落实到位。强化建设项目的排水管理,严格审查设计方案,施工时监督对管网的保护,竣工时要求移交且确保设施正常运行,对违规项目进行处罚。完善应急预案,储备应急物资,培训应急队伍,建立多渠道的预警机制,从而减少内涝带来的损失。

5.3 智慧化手段

物联网等技术被运用来建设智慧排水系统,在管网关键节点装上传感器就能对参数进行实时监测,实现运行监控与预警,还可借助大数据预测内涝风险。监测数据是建立动态调度模型的依据,按照降雨、管网状态和风险评估的情况调控泵站、闸门,优化水流分配,从而提升排水效率。开发公众参与平台,在平台发布预警与维护信息以鼓励市民上报隐患,达成互动共享。开展科普活动,增强市民防洪意识和自救能力,进而形成全民防控内涝的良好局面。

6 结论与展望

本研究在极端降雨情境下模拟城市排水管网水力特性,剖析内涝成因并提出防控策略。研究发现城市内涝是极端降雨强度、历时、分布不均,排水管网设计标准低、老化破损、维护差,城市下垫面不透水面积增大、地形地貌改变等多种因素共同作用的结果。随着科技发展和城市建设推进,以后将借助多学科融合,运用新理论、新技术,持续深入管网水力特性模拟和内涝防控研究,从而使城市内涝防治方案更科学有效,守护城市安全与可持续发展。

参考文献

- [1]刘成林.城市排水防涝系统设计降雨时空分布特性研究[D].北京工业大学,2015.
- [2]施南征.城市排水管网动态水力学建模技术研究[D].杭州电子科技大学,2015.
- [3]张宽地,王光谦,吕宏兴,等.模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J].水科学进展,2012,23(2):7. DOI:CNKI:32.1309.P.20120224.2002.002.
- [4]何杨.城市排水管网水力学模型新方法 & 泵站节能技术研究[D].杭州电子科技大学,2011. DOI:10.7666/d.y1909096.