

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.019

基于SWMM的管道淤积对排水能力影响的模拟分析

李璟冉^{1,2,3}, 周毅^{1,2,3}, 李哲^{1,2,3}, 何威良^{1,2,3}, 陈永祥⁴

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072; 3. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室<武汉大学>, 湖北 武汉 430072; 4. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 排水管道沉积物造成的淤积,不仅影响管道本身的过水能力,而且对整个管网系统的过水性能也会产生复杂的影响。在不同管道淤积程度条件下,以相对过水能力与相对超载总时间作为衡量系统排水能力衰减的指标,并利用SWMM对系统排水能力变化的后果进行模拟。根据系统排水能力减小的变化趋势,全过程分为缓慢增长、加速增长(清淤关键期)和爆发式增长(清淤补救期)3个阶段,每个阶段采取不同的管道维护清淤策略,并通过不同管径管道的模拟结果确定重点清淤对象。将本方法用于武汉市某住宅小区时,淤积程度达到46%和66%可作为3个阶段的分界线,对管径≥800 mm的管道进行重点清淤能取得更好的效果。

关键词: 管道淤积; 排水能力; 淤积程度; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0118-08

Effect of Pipeline Siltation on Drainage Capacity Based on SWMM Simulation

LI Jing-ran^{1,2,3}, ZHOU Yi^{1,2,3}, LI Zhe^{1,2,3}, HE Wei-liang^{1,2,3}, CHEN Yong-xiang⁴

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Engineering Research Center of Urban Disasters Prevention and Fire Rescue Technology of Hubei Province, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction <Wuhan University>, Wuhan 430072, China; 4. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: Siltation caused by sediments in the drainage pipeline not only affects its drainage capacity, but also has a complex effect on the drainage capacity of the whole pipe network system. Under the condition of different siltation degree of pipeline, the relative discharge capacity and the relative total overload time were selected as the indexes to measure the attenuation of drainage capacity, and the consequences of variations in drainage capacity were simulated by SWMM. According to the decreasing trend of drainage capacity, the whole process was divided into three stages: slow growth, accelerated growth (critical desilting period) and explosive growth (recovery period of desilting). Different pipeline maintenance and desilting strategies were adopted in each stage, and the key desilting objects were determined by the simulation results of pipes with different diameters. When the method was applied to a residential district in Wuhan, the siltation degree of 46% and 66% could be used as the dividing line of

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2017-33)

通信作者: 周毅 E-mail: yzhou@whu.edu.cn

the three stages, and better results could be achieved by focusing on desilting pipelines with diameter larger than 800 mm.

Key words: pipeline siltation; drainage capacity; siltation degree; SWMM

国内城市的排水管道中经常有沉积物和较严重的淤塞,主要是因为部分雨水管道多年缺乏有效维护管理和清淤。据统计,北京地区堵塞和严重淤积的管道共计23%,巢湖地区淤积和严重淤积的管道甚至达到50%^[1];广州近75%的排水管道存在不同程度的沉积物淤积现象^[2]。淤积达到一定程度时,管道的输送能力急剧下降,冲刷能力同时减弱,沉积物的沉积速度也进一步加快,最终造成管道严重堵塞^[3-5]。在我国现行的《城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程》(CJJ 68—2016)中规定:排水管道的允许积泥深度应小于管道内径或渠净高的1/5,也即当管道内淤积深度高于1/5时,就需要进行清淤。但1/5是工程经验值,还需要理论分析来确定合适的清淤深度。对重点清淤管段的判断往往也是通过经验确定。一般地,干管(包括主干管)管径较大,淤积后对全局的影响也较大,因此实际工程中,清淤工作的重点也是干管。但是在不同系统中,对干管和支管的划分并无绝对界限,往往根据经验指定一个分界管径,大于该管径的管段都作为清淤的对象。因此,分界管径的确定,对于清淤效果和工作量有很大影响。另外,尽管支管的淤积影响范围只是局部的,但是支管淤积对局部区域可能造成的严重影响也不容忽视。

针对管道淤积现象,一些学者从冲刷的物理机理进行了研究。高原等人^[6]对国内外管道沉积物的冲刷规律进行了总结,Bertrand-Krajewski等人^[7]对模拟管道沉积的模型原理进行了综述,Banasiak等人^[8]在实验室内研究了循环管渠中沉积物的初始冲刷特征。研究管道沉积机理有利于理解排水管道的沉积和冲刷过程,但是沉积物淤积和冲刷所受影响因素众多,理论研究与实际情况差别较大。

另有一些学者基于SWMM数学模型进行了研究。李彦伟等人^[9]进行SWMM建模发现,增大管径比增大坡度更能有效缓解淤积状态下管道过载情况;梁风超^[10]通过建立模型,针对单根管道发现模型数据中充满度可以作为预测管道易淤积的指标;吴慧英等人^[11]基于SWMM和MATLAB提出一种在

一定条件下用于估算排水管道泥沙淤积深度的方法。SWMM模型便于修改多种不同的边界条件、对多种复杂工况进行模拟对比,但是可能有些被忽略的因素对模拟结果有较大影响,部分模型往往只关注到了单根管道,对管网的系统研究不足。Xie等人^[12]则在InfoWorks CS模型的基础上提出一种评估各变量对管道的综合影响方法,将各管道淤积可能性大小可视化以便管理人员维护,但研究的系统性同样不足,只是针对单根管道分析而得到的结论。

当管道的淤积程度不同时,选择恰当时机对不同管道清淤,可有效控制管道淤积带来的严重后果。针对管网系统性研究不充分的问题,笔者利用SWMM建模分析了不同管道淤积与排水能力的关系,以期用于指导排水系统的维护管理,可依此提前确定需要清淤时的淤积程度和重点清淤管段。

1 单根排水管道淤积的水力学分析

对于圆形排水管道,在没有淤积的情况下,满流时水力半径 $R = D/4$,其中 D 为管道直径。此时,管道的过水能力 $Q_0 = \frac{\pi}{n} D^{\frac{8}{3}} (\frac{1}{4})^{\frac{5}{3}} i^{\frac{1}{2}}$,其中, n 为管道的粗糙系数, i 为水力坡度。当管道内开始出现淤积时,过水断面面积和湿周会随之改变,从而引起水力半径改变,导致管道过水能力改变。为了将研究的问题适度简化、研究重点更突出,进行以下假设:①管道内壁粗糙度不变;②只考虑管道内淤积导致过水断面减小,不考虑管道破损等结构性破坏。

管道淤积后见图1,圆管断面面积为 A_0 ,淤积面积为 A' ,堵塞程度以 h/D 表示,其中 h 为淤积高度。

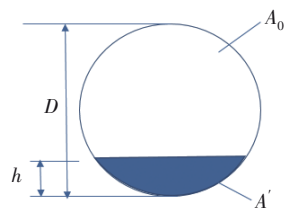


图1 管道与淤积物横截面积示意

Fig.1 Schematics of cross-sectional area of pipe and sediments

预先指定淤积面积 A' ,根据 h 与 A' 之间的关系式[见式(1)与式(2)],通过迭代计算确定 h ,再利用 h/D 进行计算与分析。

当 $h \leq D/2$ 时,有:

$$A' = (\arcsin \frac{\sqrt{r^2 - (r-h)^2}}{r}) r^2 - \sqrt{r^2 - (r-h)^2} (r-h) \quad (1)$$

当 $D/2 < h \leq D$ 时,有:

$$Q/Q_0 = \frac{2^{\frac{2}{3}} [\pi - \arcsin 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} + 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} (1 - 2 \frac{h}{D})^{\frac{5}{3}}]}{\pi (2\pi - 2\arcsin 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} + 4 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2})^{\frac{2}{3}}} \quad (3)$$

$$Q/Q_0 = \frac{2^{\frac{2}{3}} [\arcsin 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} - 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} (2 \frac{h}{D} - 1)^{\frac{5}{3}}]}{\pi (2\arcsin 2 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2} + 4 \sqrt{\frac{h}{D} - (\frac{h}{D})^2})^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

相对过水能力随淤积程度的变化见图2。

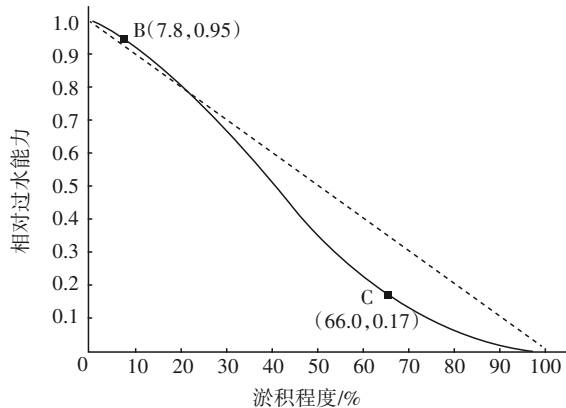


图2 相对过水能力与淤积程度的关系曲线

Fig.2 Relation curve between relative discharge capacity and siltation degree

图2中实线为 h/D 与 Q/Q_0 的关系曲线,虚线为基准线,表征相对过水能力随淤积程度增加而匀速下降的情况,B、C两点为实线斜率与虚线斜率相同的点。当淤积程度在0~7.8%之间时,曲线斜率小于基准线斜率,相对过水能力随淤积程度衰退的变化较慢;之后随着淤积程度的增加,曲线斜率大于基准线斜率,曲线呈现光滑、均匀、近似直线下降的趋势;当淤积程度超过66.0%之后,曲线斜率再次小于基准线斜率,过水能力曲线下速率趋于缓慢而平稳。

$$A' = (\pi - \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - (h-r)^2}}{r}) r^2 + \sqrt{r^2 - (h-r)^2} (h-r) \quad (2)$$

式中: r 为管道半径。

已知湿周与水力半径,利用曼宁公式计算出堵塞时的过水能力 Q 。 Q 与管道原始过水能力 Q_0 之比 Q/Q_0 即为相对过水能力,由于单根管道的粗糙系数 n 固定,则当 $h \leq D/2$ 及 $D/2 < h \leq D$ 时分别有:

2 基于SWMM的管道系统淤积模拟

2.1 研究方法与步骤

尽管单一管道的淤积对排水能力的影响可以进行理论上的分析,但是管网系统沉积物对排水能力的影响分析更复杂,目前没有一般性的理论分析方法。本研究以管网系统为分析对象,利用SWMM对管道淤积的后果进行模拟,通过改变系统中管道的淤积程度,用系统的相对过水能力和节点相对超载总时间这两项指标反映管道淤积对系统造成的影响。

① 排水系统的相对过水能力。在淤积情况下系统最下游管道的最大过水量与无淤积情况下的最大过水量之比,称为系统的相对过水能力。以所有管道无淤积的理想状态为基准,作为相同边界条件进行计算,相对过水能力才有可比性。相对过水能力可以直观地体现出管道淤积对系统排水的影响,同时也可以通过变化趋势判断排水能力变化的快慢。

② 节点相对超载总时间。规定:节点相对超载总时间=节点超载总时间之和/(节点数×各节点模拟时间),那么就可以用节点相对超载总时间表示排水系统运行的危险性,其与淤积程度的关系曲线可以反映管道淤积的影响,同时曲线斜率可以反映危险性的变化速率。

无论排水系统中哪些管道出现何种程度的淤积,都会对系统最下游管道的过水能力产生直接或间接、或大或小的影响,因此最下游管道的相对过水能力和节点相对超载总时间是这些影响的综合体现之一。

为了更好地说明该方法,需要结合具体案例进行模拟分析与计算,对特定情况下的过水能力变化过程和规律做出总结。主要研究步骤如下:

① 针对研究区域的基本资料,基于SWMM建立模型。对每个节点设置积水面积,保证积水能重新流入管道中,而不会永久离开系统。

② 针对不同管径的管道设定工况,改变淤积程度进行模拟水力计算。实际案例中,排水系统一般不会仅有单根管道淤积,而是区域性的淤积;当研究区域不大时,由于区域地理条件、基础建设和维护管理水平一致,因此本研究中假定每种工况下的管道同时同程度淤积,以便比较不同淤积工况下过水能力和节点超载的差异性。在后续研究中,若有条件,可结合实际情况,利用检测技术确定各管道的具体淤积程度代入模拟,使得结论更具有推广性和工程实践参考性。对于各淤积程度下的模拟结果,提取系统出水管道的最大流量,并与无淤积时的情况对比,计算出相对过水能力;同时对节点相对超载总时间进行统计。

③ 分析模拟结果。分别绘制出“相对过水能力-淤积程度”变化曲线图和“节点相对超载总时间-淤积程度”统计图,分析淤积程度对排水能力的影响及其变化规律,以此确定该系统管道需要清淤时的淤积程度,并根据不同管径范围的管道淤积模拟结果,确定对何种管径管道重点清淤能更有效地提升系统的排水能力。

2.2 模型建立

以武汉市武昌区某住宅小区的雨水管网系统为研究案例。该小区于2001年建成,总用地面积为12.06 hm²,汇水面积适中。本研究根据小区管网方案,在管道沉积物淤积深度预测的基础上,采用SWMM进行排水能力变化的分析。SWMM中的小区管网模型如图3所示,共有160个节点和159条管道。小区内的雨水管道总长度为3 609 m,其中管径为200、300、400、500、600、800、900、1 000、1 200、1 800 mm的管道长度分别为379、1 143、812、194、147、187、80、259、207、201 m。

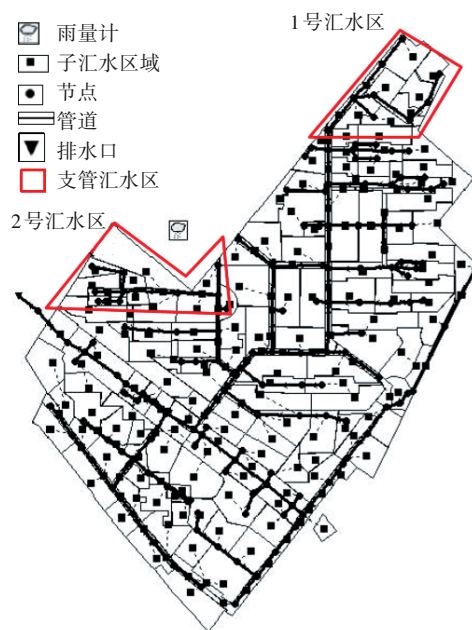


图3 小区管网模型

Fig.3 Drainage pipe network model of the community

2.2.1 设计降雨

武汉市短历时暴雨强度公式:

$$q = \frac{885[1 + 1.58 \lg(P + 0.66)]}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (5)$$

式中: q 为设计暴雨强度, L/(s·hm²); P 为设计重现期,取0.5~10 a; t 为降雨历时,min。

雨水管网设计重现期为3 a,因此,只选择 $P=3$ a的情况进行排水能力模拟分析。采用芝加哥雨型,降雨过程曲线见图4。降雨历时取2 h,对应的降雨总量为65.22 mm。因为产汇流过程长于降雨历时,所以模拟时间取4 h。

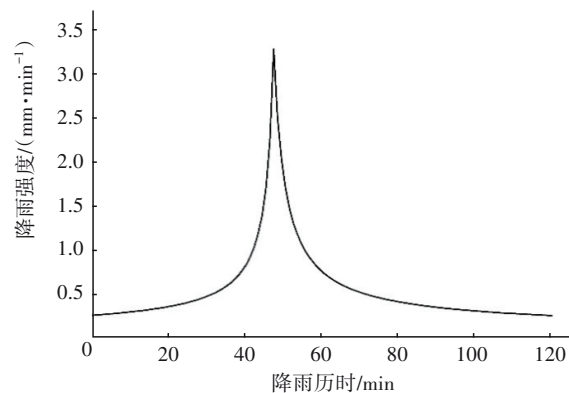


图4 $P=3$ a时的降雨曲线

Fig.4 Rainfall curve at $P=3$ a

2.2.2 水文参数的选取

选择霍顿公式作为下渗公式,最大渗透速率取

61.0 mm/h,最小渗透速率(饱和导水率)取3.3 mm/h;渗透衰减常数取 4 h^{-1} ,渗透衰减时间取7 d。

其他水文参数的取值如下:不透水区洼地蓄水深度为2.20 mm,透水区(草坪)洼地蓄水深度为5.00 mm,不透水地表的粗糙度为0.015,透水地表(草坪)的粗糙度为0.15,不透水无洼地蓄水所占比例为25%。

2.2.3 淤积程度计算

本案例中假设管道相对淤积面积为 A'/A_0 ,从0开始,每隔5%逐渐增加,直到管道完全堵塞,于是共有20个不同的淤积程度 h/D 与之对应。

2.3 管道淤积模拟及结果分析

结合该小区管网分布与管径统计,干管与支管的分界管径从600 mm开始逐渐增加,针对不同分界管径设定5种工况。另外选择小区内两个上游汇水区的管道代表支管,设定2种工况,汇水区所处位置见图3。这两个汇水区内的管道数目分别为9根和10根,各有一根管道的管径为600 mm,其余管径均小于600 mm,即多为支管。

7种工况设置如下:工况1,管径为1 800 mm的管道同时同程度淤积;工况2,管径 $\geq 1\ 200\text{ mm}$ 的管道同时同程度淤积;工况3,管径 $\geq 1\ 000\text{ mm}$ 的管道同时同程度淤积;工况4,管径 $\geq 800\text{ mm}$ 的管道同时同程度淤积;工况5,管径 $\geq 600\text{ mm}$ 的管道同时同程度淤积;工况6,1号汇水区内的管道同时同程度淤积;工况7,2号汇水区内的管道同时同程度淤积。以初始投入使用时(管道没有堵塞)的排水能力为基准,对各工况的管道在20种不同淤积程度条件下分别进行模拟。

2.3.1 相对过水能力

各工况下的相对过水能力见图5。图5(a)中对各种工况的相对过水能力变化用二次曲线拟合,相关系数 R^2 均大于0.97,拟合度较高。与图2对比发现,管网相对过水能力在淤积初始阶段(淤积程度在0~44%之间,拟合曲线的斜率均在淤积程度为44%左右时与基准线相同)变化平稳;之后,随着淤积程度的增加,相对过水能力快速下降,下降速度较单根管道更快。随着淤积程度的增加,相对过水能力前慢后快地下降可理解为,在淤积程度不严重时,管网系统中有一定量的管道调蓄容积,而且适当的超载增加了水头,也抵消了过水断面面积减小带来的影响;淤积达到一定程度后,管网几乎失去

了全部调蓄容积,而且超载达到极限后水头也无法继续增加,因此过水能力急剧下降。

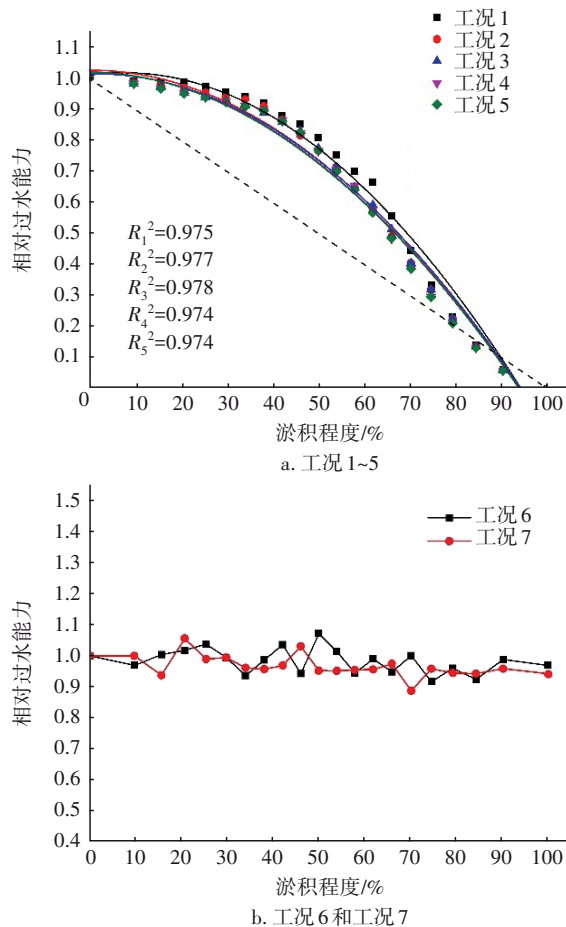


图5 相对过水能力与淤积程度的关系曲线

Fig.5 Relation curve between relative discharge capacity and siltation degree

图5(b)为工况6和工况7的模拟结果。可以看出,部分支管不同程度的淤积对整个系统排水能力的影响较小,出水管道的相对过水能力均大于0.9,与淤积前基本持平。如果分别对1号和2号汇区内最下游的一根管道的最大流量进行分析,其变化趋势与图5(a)相似。因此,支管淤积对系统整体排水能力的影响较小,仅对局部管道的过水能力有明显影响。

当管径相同时,同属主干管的上游管道和下游管道淤积造成的影响不会完全相同。例如:在工况2中,两根管径同为1 800 mm的管道(模型中的管段P91和P130为上下游串联关系的管道,中途有流量汇入)相对过水能力的变化情况如图6(a)所示。对比发现,二者的相对过水能力变化过程十分相近,

因此可以认为,串联关系的上下游管道,如果管径相同,那么淤积造成的系统排水能力变化相差不大。

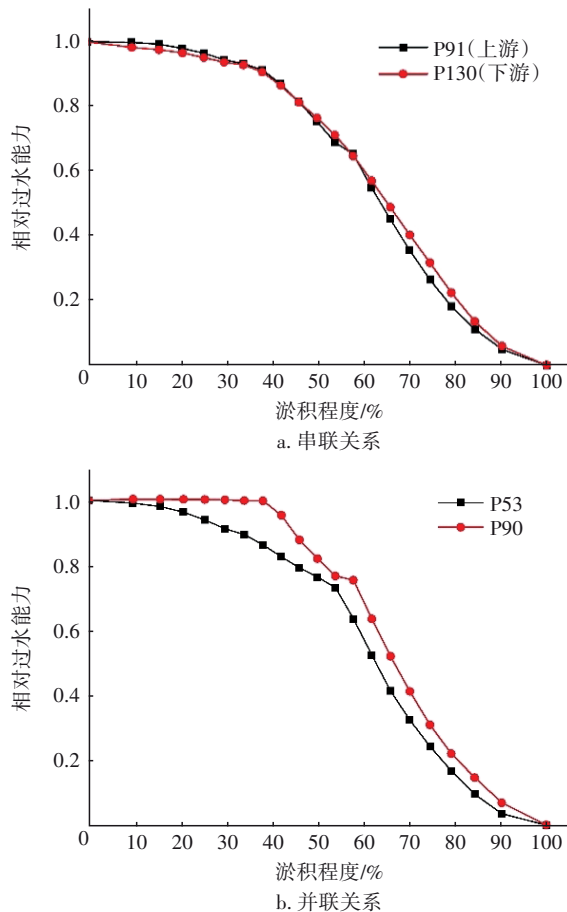


图6 相同管径、不同位置管道的相对过水能力比较

Fig.6 Comparison of relative drainage capacity of pipes with the same diameter and different positions

当管径相同时,分属于不同汇水区的两个并联干管淤积造成的影响也不会完全相同。例如:在工况2中,两根1 200 mm的干管(模型中的管段P53和P90)在同一节点汇入主干管,二者在系统中的地位相似,它们的相对过水能力变化情况见图6(b)。对比发现:同管径的并联干管,相对过水能力变化过程有明显差别,其中P53下降得更快、更多。这是因为P53在本系统中正常工作时(无淤积)的设计过水能力大于P90,富余过水能力较少,因此淤积后过水能力下降得更多、更快。

2.3.2 节点相对超载总时间

无淤积物状态下,节点相对超载总时间为0.002,不同工况下其随淤积程度增长的变化曲线见图7。

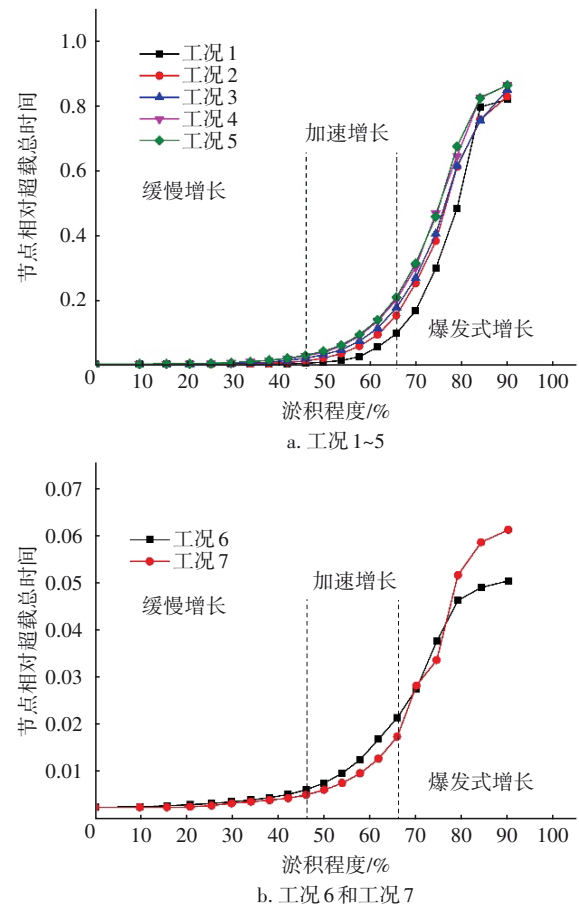


图7 节点相对超载总时间与淤积程度的关系

Fig.7 Relationship between relative total overload time and siltation degree

由图7可知,不同工况下,随着淤积程度的增加,系统节点相对超载总时间曲线的变化趋势相似,利用最大最小法对各段折线的斜率构造模糊相似矩阵,进行模糊聚类分析,可以将曲线分为3个阶段:

① 超载缓慢增长阶段。当淤积程度<46%时,相对超载总时间较小,不仅曲线斜率变化较小,而且增速较慢,此时管道清淤的紧迫性相对较轻,应以检查、监控为主。

② 超载加速增长阶段。当淤积程度超过46%之后,相对超载总时间不仅有了明显的增加,而且呈现加速增长趋势,同一时期管道的相对过水能力也出现快速下降。此阶段如果能对管段及时清淤,有助于保证过水能力并减轻超载的危险,因此也是管网清通和维护管理的关键时期。

③ 超载爆发式增长阶段。淤积程度超过66%之后,相对超载总时间不仅随淤积程度快速增

长,而且管道的相对过水能力继续保持加速下降。如果此时不再进行补救式的清淤,不仅管网的过水能力会急剧降低,而且会面临完全淤积后彻底失去过水能力的严重后果。此阶段也是管网疏通和维护管理的补救期。

图7(a)和(b)尽管曲线变化趋势相同,但工况6和工况7的相对超载总时间在后两个阶段远小于工况1~5,说明支管淤积对系统排水能力的影响较小,干管淤积对系统排水能力的影响占主导。

为确定重点清淤管道管径,需对不同管径管道淤积后果的相对差异性变化情况做进一步研究,以相对差异性变化不大的两种相邻工况对应的管径作为是否重点清淤的分界线。例如:工况2与工况1对比,同等淤积程度下,工况2的相对超载总时间高于工况1,如果对不同淤积程度下的相对超载总时间分别进行对比,可以得到一条折线。类似地,可以得到其他几种工况的对比结果,见图8。

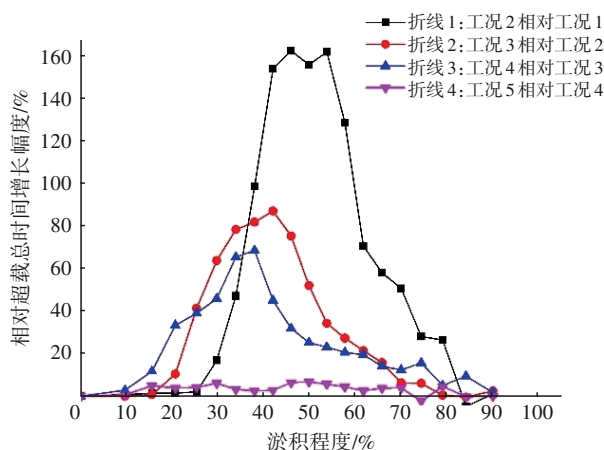


图8 相对超载总时间对比

Fig.8 Comparison of relative total overload time

图8中,折线1、2、3波动趋势明显,折线4平缓波动。其中,折线1峰值最高,为162%,说明在管径为1 800 mm的管道发生淤积的同时,如果管径为1 200 mm的管道发生同程度的淤积,则相对超载总时间大幅增加。类似地,折线2和3的峰值也较高,说明对比的不同尺寸的管道淤积时,对相对超载总时间的影响显著。折线4的峰值仅为7%,说明在管径 ≥ 800 mm的管道发生淤积的同时,如果管径为600 mm的管道也发生同程度的淤积,那么系统节点相对超载总时间增长幅度整体较小,最多为7%,说明在更大管径的管道已淤积时,管径为600 mm的管道进一步发生淤积,对系统的影响较小。若以相同

的方法分析管径为500 mm的管道发生淤积造成的影响,其趋势和峰值与折线4相近。这种模拟计算结果也证明了在工程经验中根据管径大小决定清淤对象有一定的合理性。因此,在本案例中,将管径 ≥ 800 mm的管道作为重点清淤对象,可以使清淤效率最高,节省人力物力。

3 结论

① 可以采用SWMM模拟管网系统因沉积物的增加而导致的功能性衰退,相同程度的管网系统淤积与单独管道淤积,过水能力变化的基本趋势不同,主要是因为系统中的管道受上下游管道流量和系统边界条件的影响。

② 以相对过水能力和节点相对超载总时间作为管网功能衰退的指标,可以对这一过程进行数值模拟,并将整个过程分为缓慢增长、加速增长(清淤关键期)和爆发式增长(清淤补救期)3个阶段,每个阶段采取不同的管道维护清淤策略。将本方法用于武汉市某住宅小区时,淤积程度达到46%和66%时可作为3个阶段的分界线。

③ 为了确定重点清淤对象,对不同管径的管段分别进行不同淤积程度下的过水能力和节点超载模拟,结果发现,在本案例中,对管径 ≥ 800 mm的管道重点清淤能取得明显的效果。串联的同管径管道在同时发生同程度淤积时,过水能力的变化差别不大;并联的同管径管道在同时发生同程度淤积时,管道位置对过水能力的变化有明显影响。

参考文献:

- [1] 汤霞,陈卫兵,李怀正. 城市排水系统沉积物特性及清淤方式研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3): 106-110.
TANG Xia, CHEN Weibing, LI Huaizheng. Research progress on sediment characteristics and desilting methods of urban drainage system [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013 (3): 106-110 (in Chinese).
- [2] 刘志长. 合流制排水管道沉积物的沉积状况及控制技术[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
LIU Zhizhang. The Study on Sediment Deposition and Sewer-sediment Control in Combined Sewers [D]. Changsha: Hunan University, 2011 (in Chinese).
- [3] 朱永明. 合流制排水管道沉积物调查研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

- ZHU Yongming. Research on Sediment in Combined Sewer [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [4] 周英,徐瑾,侯齐敏. 天津市排水系统沉积物的沉积状况及影响因素[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 116-118.
- ZHOU Ying, XU Jin, HOU Qimin. Sedimentary condition and influence factors of sediments in drainage system of Tianjin City [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 116-118 (in Chinese).
- [5] 付博文,金鹏康,石山,等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 119-122, 127.
- FU Bowen, JIN Pengkang, SHI Shan, *et al.* Sediment characteristics of sewer network in Xi'an City [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 119-122, 127 (in Chinese).
- [6] 高原,王红武,张善发,等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 15-18, 27.
- GAO Yuan, WANG Hongwu, ZHANG Shanfa, *et al.* Current research progress in combined sewer sediments and their models [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 15-18, 27 (in Chinese).
- [7] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, BRIAT P, SCRIVENER O. Sewer sediment production and transport modelling: a literature review [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(4): 435-460.
- [8] BANASIAK R, VERHOEVEN R, DE SUTTER R, *et al.* The erosion behaviour of biologically active sewer sediment deposits: observations from a laboratory study [J]. Water Research, 2005, 39(20): 5221-5231.
- [9] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于SWMM模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 40-43.
- LI Yanwei, YOU Xueyi, JI Min, *et al.* Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 40-43 (in Chinese).
- [10] 梁风超. 城市排水管网建模及其应用技术研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- LIANG Fengchao. Research on Modeling and Application Technology of Urban Drainage Pipe Network [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] 吴慧英,江凯兵,李天兵,等. 排水管道泥沙淤积深度估算方法研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 117-122.
- WU Huiying, JIANG Kaibing, LI Tianbing, *et al.* Estimating method of sediment deposition depth in drainage pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 117-122 (in Chinese).
- [12] XIE Q, BHARAT C, KHAN R N, *et al.* Cox proportional hazards modelling of blockage risk in vitrified clay wastewater pipes [J]. Urban Water Journal, 2017, 14(7): 669-675.

作者简介:李璟冉(1997-),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为给水排水管网系统。

E-mail:731453040@qq.com

收稿日期:2020-06-21

修回日期:2020-07-29

(编辑:刘贵春)

节约每一滴水,回收每一滴水,
让每一滴水多循环一次