

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.021

合流制管道沉积物冲刷模拟试验研究

罗晓萍¹, 姜应和^{1,2}, 程 静¹, 车 伍³, 赵 杨³, 杨 正³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 文华学院 城市建设工程学部, 湖北 武汉 430074; 3. 北京雨人润科生态技术有限责任公司, 北京 100044)

摘 要: 为了探究合流制管道沉积物雨天的冲刷效果,以合流制管道沉积物为试验材料,将冲刷流量 Q 、管道坡度 i 和沉积厚度占管径的比例 h_s/D 作为主要参数,进行了冲刷模拟试验。单因素试验结果表明,在不同因素条件下,冲刷出水SS浓度均随冲刷时间呈现指数衰减变化趋势,冲刷主要集中在前60 s内;随着 Q 、 i 和 h_s/D 的增大,冲刷出水SS平均浓度递增;冲刷释放的SS量随 Q 的增大而增加。冲刷初期优先对表面的小颗粒进行冲刷,在较大的 Q 和 i 条件下,中值粒径峰值出现较早,粒径变化趋势不大;而当 h_s/D 较大时,中值粒径峰值出现较晚,粒径变化趋势较缓。正交试验结果表明,对于SS冲刷量,因素影响权重顺序为: $Q>h_s/D>i$ 。

关键词: 合流制管道; 沉积物; 冲刷; 颗粒粒径; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0132-07

Laboratory-scale Study on Scouring of Sediment in Combined Sewer System

LUO Xiao-ping¹, JIANG Ying-he^{1,2}, CHENG Jing¹, CHE Wu³, ZHAO Yang³,
YANG Zheng³

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Department of Urban Construction Engineering, Wenhua College, Wuhan 430074, China; 3. Beijing Yuren Rain-eco Technology Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: To explore the scouring of the sediment in the combined sewer system in rainy days, scouring experiments were carried out by using scouring flow (Q), the slope of the pipeline (i) and the ratio of sediment thickness to pipe diameter (h_s/D) as the main parameters. The single factor experiments showed that under conditions of different factors, the SS concentration in effluent showed an exponential decaying trend with scouring time, and the scouring was mainly occurred in the first 60 seconds. The average SS concentration in effluent increased with the increase of Q , i and h_s/D . The SS released by the scouring increased with the increase of Q . The small particles on the surface were scoured preferentially at the initial stage of scouring. Under large Q and i conditions, the peak value of the median particle size appeared earlier, and the variable trend of particle size was not significant. When h_s/D was larger, the peak value of the median particle size appeared later, and the variable trend of particle size was slower. The orthogonal experiments showed that the weight of factors affecting SS scouring in descending order was Q , h_s/D and i .

基金项目: 武汉市水务局科技计划项目(201802); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(185206009)

通信作者: 姜应和 E-mail: jyhe123@163.com

Key words: combined sewer system; sediment; scouring; particle size; influence factor

在我国排水管网中,沉积物淤积现象普遍存在。天津市中心城区约有65%的排水管道存在沉积物^[1],西安市城区80%的污水管道存在沉积现象,其中合流制管道更易于沉积^[2]。沉积物的存在会降低排水管道的排水能力、诱发管道腐蚀、导致排水系统的超负荷及合流制管道过早溢流^[3-4]。有研究表明,暴雨发生时溢流排放的管道沉积物对水体污染负荷的贡献率达30%~80%^[5],管道沉积物在降雨期间的迁移是重要污染源^[6]。

针对排水管道沉积物污染种类复杂、降雨具有随机性、取样及在线监测难度大等问题,国内外众多学者基于实验室开展了沉积物冲刷输移试验研究^[7-8]。其中,大部分学者选取高岭土^[9-10]、石英砂^[9,11]及碎橄榄石^[11]人工配制模拟管道沉积物进行冲刷试验。也有部分学者以真实管道沉积物作为试验材料,探讨不同水力条件下管道沉积物的冲刷特性,例如,刘翠云等^[12]探索不同水力、沉积物条件下雨水管道沉积物的冲刷特性,结果表明,在较大流量、较大坡度且较长冲刷时间下,冲刷率能够达到100%。

虽然已有众多学者对管道沉积物冲刷进行了试验研究,但大多忽略了真实管道沉积物的高有机性,且未对影响冲刷效果的主次因素进行考察。笔者以真实合流制管道沉积物为试验材料,以流量、管道坡度和沉积厚度占管径的比例为主要参数,进行冲刷模拟单因素试验研究,探讨各因素对沉积物冲刷效果的影响;然后再进行正交试验研究,探讨影响沉积物冲刷效果的主次因素,以期对合流制排水管道的运行维护及溢流污染治理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

试验所用沉积物取自武汉市江岸区合流制管道,采集后带回实验室低温保存并及时处理分析,其中一部分放置于室内阴凉通风处自然风干,以用于后续冲刷模拟试验。相关研究表明^[13],管道沉积物的含水率、干密度、有机质含量和颗粒粒径等特性,直接影响沉积物的冲刷输移过程,决定着沉积物中污染物的存在形态,因此本试验对这4项指标进行了检测。

1.2 试验装置

通过对武汉市黄孝河片区管网进行调研,选取江岸区发展大道合流制管道进行研究,所选管段的长度为40 m、管径为1 000 mm,根据现有条件,模型的长度和管径比尺定为 $\lambda_l=\lambda_R=10$,依据水力学中的动力相似准则,模型的管长为4 m、管径为100 mm。

试验装置如图1所示,主要由水箱、阀门、试验管道、沉淀井等组成,为保证装置的严格密封性,试验管道采用法兰及橡胶垫圈连接。管道上方沿纵向均匀开有4个长度为0.8 m的置样口,约1/4圆周,便于在管内放置沉积物。通过调节阀门开启度来控制水流流量;调节管底支架的高度以实现不同的管道坡度;敞口沉淀井与模拟管道之间采用法兰连接,用以模拟在冲刷过程中检查并对管道沉积物的收集效应。试验管道及沉淀井材质均为透明的有机玻璃,便于在试验过程中观察沉积物的运动情况。此外,为保证其边界条件与实际污水管道相仿,管道内壁用砂纸反复打磨,使其内壁粗糙度与实际的钢筋混凝土管接近。

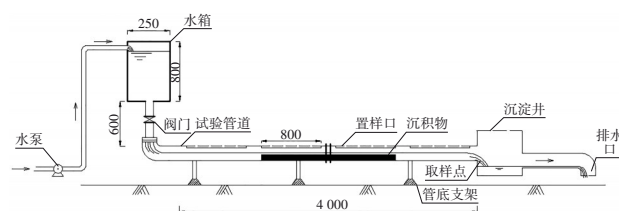


图1 冲刷试验装置

Fig.1 Schematics of the test device

1.3 试验方法

试验前根据预设的含水率将泥样用水混合均匀成泥浆,为保证初始条件相似,每次试验前均检测泥浆含水率。然后,通过置样口将泥浆均匀铺设在模拟管道内,铺设范围从距离管道始端1.5 m处起,铺设长度为1 m,并过流一定充满度的自来水,使管道沉积物成型,以模拟管道内的真实情况。

试验开始时,调节阀门开启度,以一定流量的自来水冲刷沉积物,在管道末端出口处取瞬时水样,0~60 s内每15 s取1个样、60~180 s内每30 s取1个样、180 s以后每60 s取1个样,冲刷时长为5 min。检测水样的COD、TN、TP、SS浓度及颗粒物粒径。

影响管道沉积物冲刷过程的因素很多,其中流

量 Q 、管道坡度 i 、沉积厚度占管径的比例 h_s/D 是较为重要的因素^[14],因此本研究选取这3个参数分别进行单因素与正交试验,每组进行3次重复试验,试验结果取平均值。此外,对于DN1 000、 $i=0.001$ 的真实管道而言,满流设计流量为758 L/s,依据弗劳德相似准则可知,流量比尺 $\lambda_Q=\lambda_i^{2.5}$,由此可知模型设计中管道流量应不大于2.4 L/s,否则试验过程中有可能出现压力流;再考虑到管底有一定充满度的沉积物,故试验最大流量取1.6 L/s。结合常见管道坡度及沉积物厚度调研情况,设置单因素试验参数如下: Q 分别为0.4、0.8、1.2、1.6 L/s, h_s/D 分别为5%、10%、15%、20%, i 分别为0.001、0.002、0.003。

1.4 测试项目与方法

含水率采用重量法测定,干密度采用比重瓶法测定,有机质含量采用马福炉灼烧重量法测定,颗粒粒径分布采用马尔文2000激光粒度仪测定,COD、TN、TP、SS浓度均采用国家标准方法测定。采用SPSS软件对冲刷出水水质指标相关性进行分析。

2 结果与讨论

2.1 管道沉积物的物理特性

管道沉积物物理特性指标的检测结果显示,其

含水率为45.9%,干密度为0.91 g/cm³,VSS/TSS为8.32%,粒径 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为8.35、40.37、131.45 μm 。其粒径分布如图2所示。

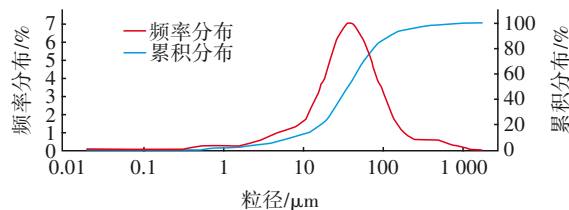


图2 管道沉积物的粒径分布

Fig.2 Distribution of particle size of sediment in pipe

2.2 单因素试验结果分析

2.2.1 冲刷出水SS浓度变化规律

在 Q 为1.2 L/s、 i 为0.002、 h_s/D 为15%的条件下,改变其中一个参数、另两个参数保持不变,考察单因素影响下冲刷出水SS浓度随冲刷时间的变化,结果如图3所示。可以看出,在不同因素的影响下,管道冲刷出水SS浓度均呈现指数衰减趋势。主要表现为:冲刷初期出水SS浓度较高,随着冲刷过程的延续,出水SS浓度基本呈递减趋势,并逐渐趋于稳定。对沉积物的冲刷主要集中在前60 s内,在此期间SS浓度变化幅度很大,之后变化趋缓。

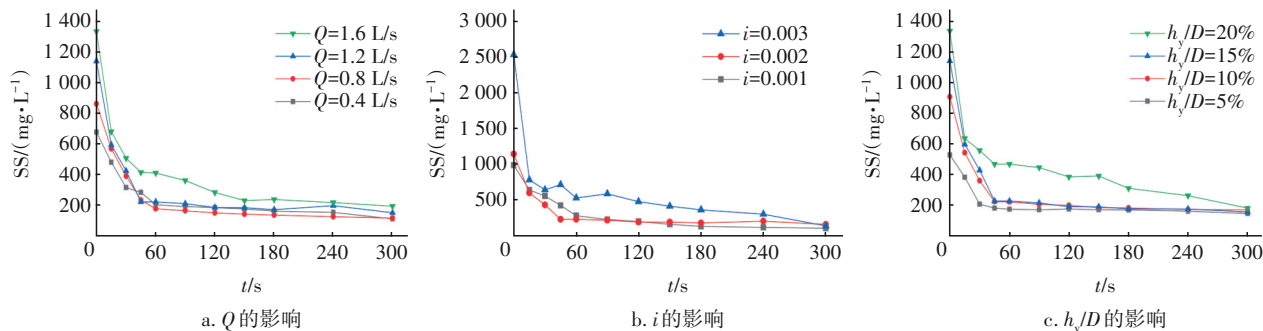


图3 不同因素对冲刷出水SS浓度的影响

Fig.3 Effect of different factors on effluent SS concentration

从图3(a)可以看出, Q 越大,初期冲刷出水SS浓度越高。此外,在冲刷初期15 s内, Q 越大则出水SS浓度衰减幅度越大。这是因为流量的变化引起水流流速的变化,流速和水流剪切力的变化是影响水流冲刷污染物释放强度的关键因素^[15]。随着管道中水流流速的增加,水流携带能力增强,即水流冲刷强度增大,水流扰动性增强^[16],对管道沉积物的冲刷效应相对显著,因此大流量时水流冲刷携带出的沉积物较多。

从图3(b)可以看出, i 越大,冲刷初期出水SS浓度越高,这就意味着 i 越大,水流冲刷及携带出的沉

积物越多。且在冲刷初期15 s内, i 越大则出水SS浓度衰减幅度越大。原因之一是管道坡度的变化会引起管内水流流速的变化,当 Q 一定时, i 越大,管内水流流速越大,过水断面面积越小,水流的剪切力越大,沉积物更容易被水流冲刷携带;原因之二是管道坡度越大,沉积物颗粒的起动流速越小。

从图3(c)可以看出,随着冲刷过程的延续, h_s/D 越大,即管道初始沉积物越多,冲刷出水SS浓度也越高,因此沉积物的量直接影响出水SS浓度。当 h_s/D 为20%时,初期冲刷出水SS浓度为1 336 mg/L,且在整个冲刷过程中出水SS浓度一直维持在较高水

平。因为管道沉积物内部的生物作用强烈,使得颗粒间的结合力较大^[17],而且在黏结絮凝的作用下沉积物颗粒容易以成团或成片的形式起动^[18], h_y/D 越大,成团或成片的现象就越明显,冲刷出水SS浓度就越高。

为更直观地了解不同因素条件下每次冲刷释放的SS量,其累积冲刷释放的污染量可用式(1)计算:

$$M = \int_0^T C_t Q_t dt \quad (1)$$

式中: M 为累积冲刷释放的污染量,mg; C_t 为 t 时刻冲刷出水的污染物浓度,mg/L; Q_t 为 t 时刻的流量,L/s; T 为冲刷总历时,s。

根据式(1)可计算出不同水力及沉积物条件下每次冲刷释放的SS量。以冲刷时长=5 min为例,保持 $i=0.002$ 、 $h_y/D=15\%$ 不变,当 Q 分别为0.4、0.8、

1.2、1.6 L/s时,冲刷释放的SS量分别为27.42、52.90、99.04、176.83 g;保持 $Q=1.2$ L/s、 $h_y/D=15\%$ 不变,当 i 分别为0.001、0.002、0.003时,冲刷释放的SS量分别为94.46、99.04、202.64 g;保持 $Q=1.2$ L/s、 $i=0.002$ 不变,当 h_y/D 分别为5%、10%、15%、20%时,冲刷释放的SS量分别为70.96、90.34、97.02、155.23 g。可知,随着 Q 、 i 及 h_y/D 的增大,冲刷释放的SS量递增;对于 i 和 h_y/D ,当其达不到一定值时,冲刷释放的SS量变化不大,然而当其超过一定值后,冲刷释放的SS量可能会跳跃式增长。

2.2.2 冲刷出水颗粒粒径变化规律

在2.2.1节的试验条件下,单因素变化对冲刷出水颗粒中值粒径的影响规律如图4所示。可以看出,在不同试验条件下,颗粒中值粒径变化趋势有一定的差异,但也存在相似之处,冲刷初期优先对表面的小颗粒进行冲刷。

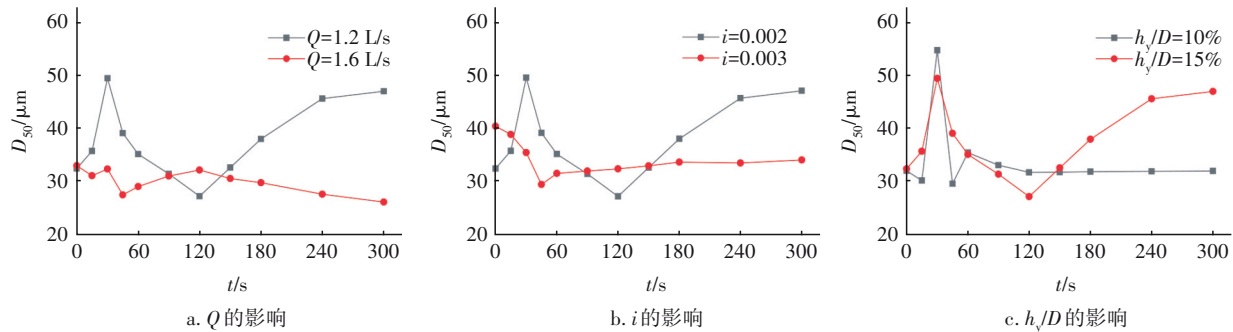


图4 不同试验条件下冲刷出水颗粒中值粒径的变化

Fig.4 Change of median diameter of particles in effluent under different test conditions

从图4(a)可以看出,不同 Q 下颗粒中值粒径呈现的变化规律有所差异:当 Q 为1.2 L/s时,中值粒径在冲刷初期呈现先迅速增大至第1个峰值后逐渐减小,随后再次逐渐增大,整体变化幅度较大;当 Q 为1.6 L/s时,中值粒径出现两次先增后减的过程,第2个峰值高于第1个峰值,整体变化幅度较小。因此,在水流的冲刷作用下,不同粒径颗粒物的运动形式及起动流速各有差异,小颗粒起动流速较低,率先被冲刷,随着小颗粒逐渐被水流冲刷输移后开始暴露大颗粒;随着沉积物床剪切力不断增大,大颗粒也开始逐渐被水流冲刷携带,进而导致冲刷初期出水中的颗粒中值粒径较小,随后逐渐增大,并出现第1个峰值。而大流量下中值粒径变化幅度较小,第2个峰值出现时间点较早,这是因为流量越大,聚团现象发生越早,因此中值粒径峰值出现的时间点也越早;而且在流速较大时,所有不同

粒径的颗粒物几乎都发生了运动,因此大流量时出水颗粒中值粒径变化幅度不显著,在徐波平^[19]的研究中也出现了类似的现象。

从图4(b)可以看出,在不同 i 下出水颗粒中值粒径呈现的变化规律也有所差异:当 i 为0.002时,中值粒径在冲刷初期先增大至第1个峰值而后逐渐减小,随后再次逐渐增大;当 i 为0.003时,冲刷初期的中值粒径即为最大值,随后中值粒径先减小后增大,且增加趋势平缓。这是因为大粒径颗粒物在起动过程中,重力起着显著作用,管道坡度对颗粒起动流速有一定的影响。从位于管道斜坡上的颗粒物受力情况可知,颗粒物受重力沿斜坡向下的分力影响, i 越大,沉积物颗粒的起动流速越小,颗粒越易起动,因此大粒径颗粒物易被水流冲刷携带。由于大颗粒沉积物不断被冲刷输移,剩余沉积物以小颗粒为主,因此中值粒径逐渐减小。

图4(c)显示,随着冲刷过程的延续,不同 h_y/D 条件下的中值粒径变化规律基本一致,先增大至第1个峰值而后不断减小,随后再次逐渐增大,但是也有所差异:当 h_y/D 为10%时,第2个峰值出现的时间点较早,且第2个峰值明显低于第1个峰值,随后缓慢减小;当 h_y/D 为15%时,粒径变化幅度较大,且第2个峰值出现时间点较晚。这是因为随着沉积物厚度的增加,更多不规则形状的邻近颗粒的“支撑效应”增加,引起沉积物颗粒间的摩擦力增加,从而导致颗粒起始运动所需的临界速度也增加^[20]。因此, h_y/D 越大,中值粒径峰值出现时间点越晚,粒径变化越缓慢。

此外,由图4可知,当其他条件一致时, Q 为1.2、1.6 L/s时的冲刷出水颗粒中值粒径均值分别为37.63、30.03 μm ; i 为0.002、0.003时的冲刷出水颗粒中值粒径均值分别为37.63、34.02 μm ; h_y/D 为10%、15%时的冲刷出水颗粒中值粒径均值分别为34.09、37.63 μm 。与图2初始中值粒径对比分析发现,试验冲刷出水的颗粒中值粒径平均值均小于初始中值粒径,结合试验结束后管道沉积物特征观察,能够发现剩余沉积物颗粒发生了粗化现象。

2.3 正交试验结果分析

仅根据2.2节的单因素试验结果,无法判断各因素对沉积物冲刷效果的影响主次,并且通过2.2节的分析可以发现,不同因素之间存在或强或弱的相互作用。本研究选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验方案设计,共进行9组试验,每组进行3次重复试验,正交试验条件及试验结果如表1所示。SS平均浓度指一次冲刷试验中出水SS的平均质量浓度,可用式(2)计算。冲刷率指管道沉积物被冲刷的程度,可用式(3)计算。其中,根据沉积厚度占管径的比例和断面形状计算沉积物的淤积面积,结合铺设长度计算得到湿态沉积物体积,再结合含水率、干密度可得出 h_y/D 为10%、15%、20%时对应的沉积物初始质量 m 分别为201 256、361 946、550 403 mg。

$$C = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_i Q_i dt}{\int_0^T Q_i dt} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{M}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C 为SS平均浓度,mg/L; V 为径流量,L; φ 为冲刷率,%; m 为沉积物初始质量,mg。

表1 正交试验因素及结果

Tab.1 Factors and results of orthogonal test

试验号	因素			试验结果		
	$Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	i	$h_y/D/\%$	SS平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS冲刷量/mg	冲刷率/%
1	0.8	0.001	10	165.60	39 744±450	19.75
2	0.8	0.002	15	220.40	52 896±500	14.61
3	0.8	0.003	20	533.15	127 956±1 000	23.25
4	1.2	0.001	15	262.40	94 464±800	26.10
5	1.2	0.002	20	431.20	155 232±1 200	28.20
6	1.2	0.003	10	229.90	82 764±600	41.12
7	1.6	0.001	20	430.50	206 640±1 800	37.54
8	1.6	0.002	10	215.40	103 392±900	51.37
9	1.6	0.003	15	486.00	233 280±2 000	64.45

对冲刷出水SS平均浓度、SS冲刷量及冲刷率进行极差分析,结果如表2所示。

表2 正交试验极差分析

Tab.2 Range analysis of orthogonal experiment

项目	极差分析	Q	i	h_y/D
SS平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	K_1	919.15	858.50	610.90
	K_2	923.50	867.00	968.80
	K_3	1 131.90	1 249.05	1 394.85
	R_1	212.75	390.55	783.95
SS冲刷量/ mg	K_1	220 596	340 848	225 900
	K_2	332 460	311 520	380 640
	K_3	543 312	444 000	489 828
	R_2	322 716	132 480	263 928
冲刷率/%	K_1	57.61	83.39	112.24
	K_2	95.42	94.18	105.16
	K_3	153.36	128.82	88.99
	R_3	95.75	45.43	23.25

由表2可知,对于冲刷出水SS平均浓度,因素影响权重顺序为: $h_y/D > i > Q$;对于SS冲刷量,因素影响权重顺序为: $Q > h_y/D > i$;对于冲刷率,因素影响权重顺序为: $Q > i > h_y/D$ 。可见,管道流量对SS冲刷量及冲刷率的影响较大,因此在对管道进行水力清淤

时,可以考虑尽量增大冲刷流量,从而增大沉积物冲刷量,提高沉积物冲刷率,最大程度清洗管道。

2.4 出水水质指标相关性分析

如果各污染物指标之间有良好的线性相关性,将会大幅度减少污染物指标检测的工作量。对单因素试验下冲刷出水 COD、TP、SS 进行 Pearson 相关性分析,结果如表 3 所示。可知,COD、TP、SS 之间具有显著的正相关性,相关系数均在 0.9 以上,因此以 SS 指标研究得到的冲刷规律对 COD 和 TP 也适用。

表 3 冲刷出水水质指标相关性分析
Tab.3 Correlation analysis of water quality of effluent

项 目		COD	TP	SS
$Q(n=44)$	COD	1	0.951**	0.925**
	TP	0.951**	1	0.924**
	SS	0.925**	0.924**	1
$i(n=33)$	COD	1	0.952**	0.949**
	TP	0.952**	1	0.985**
	SS	0.949**	0.985**	1
$h_y/D(n=44)$	COD	1	0.906**	0.908**
	TP	0.906**	1	0.957**
	SS	0.908**	0.957**	1

注：“**”表示在 0.01 水平(双侧)相关性显著; n 为样本数量。

3 结论

① 单因素试验结果表明,在不同因素条件下,冲刷出水 SS 浓度均随冲刷时间呈现指数衰减变化趋势,冲刷主要集中在前 60 s 内;随着 Q 、 i 及 h_y/D 的增大,冲刷出水 SS 平均浓度递增;冲刷释放的 SS 量随 Q 的增大而增加;当 i 和 h_y/D 较小时,两者在一定范围内变化时冲刷释放的 SS 量变化不大,但当 i 和 h_y/D 大于一定数值时,冲刷释放的 SS 量可能会跳跃式增长。冲刷初期优先对表面的小颗粒进行冲刷;试验冲刷出水颗粒中值粒径平均值均小于初始中值粒径;较大 Q 和 i 条件下中值粒径峰值出现较早,粒径变化趋势不大;当 h_y/D 较大时,中值粒径峰值出现较晚,粒径变化趋势较缓。

② 正交试验结果表明,对于出水 SS 平均浓度,因素影响权重顺序为: $h_y/D>i>Q$;对于 SS 冲刷量,因素影响权重顺序为: $Q>h_y/D>i$;而对于冲刷率,因素影响权重顺序为: $Q>i>h_y/D$ 。

③ 管道沉积物冲刷出水水质指标相关性分析结果表明,以 SS 指标研究得到的冲刷规律对 COD

和 TP 也适用。

参考文献:

[1] 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).
[2] 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).
[3] VAN BIJNEN M, KORVING H, CLEMENS F. Impact of sewer condition on urban flooding: an uncertainty analysis based on field observations and Monte Carlo simulations on full hydrodynamic models [J]. Water Science & Technology, 2012, 65(12): 2219-2227.
[4] 李田,戴梅红,张伟,等.水泵强制排水系统合流制溢流的污染源解析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(10):1513-1518.
LI Tian, DAI Meihong, ZHANG Wei, *et al.* Pollutant source apportionment of combined sewer overflows for a pump lifting drainage system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(10): 1513-1518 (in Chinese).
[5] ASHLEY R, CRABTREE B, FRASER A, *et al.* Recent European research into the behavior of sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 129(4): 267-275.
[6] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等.合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J].环境科学学报,2008,28(8):1561-1570.
ZHAO Lei, YANG Fenglei, WANG Junsong, *et al.* Characterization of storm-water pollutant sources in a combined sewer network [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8): 1561-1570 (in Chinese).
[7] 崔爽.合流制管道沉积物中氮和有机物污染特性研究[D].北京:北京建筑大学,2014.
CUI Shuang. Research on Transformation and Pollution

- Characteristics of Nitrogen and Organics in Combined Sewer Sediments [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014 (in Chinese).
- [8] 马妍. 排水系统管内沉积物的冲蚀输移特性与规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- MA Yan. Study on Erosion Characteristics and Transport Principles of Sewer Sediment in Sewerage System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).
- [9] 徐尚玲. 城市排水管道沉积物径流冲刷污染效应的研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- XU Shangling. Researching on Pollution Load of Overflow in Combined Drainage Channels in Runoff Scouring [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).
- [10] 黄世彪. 双层排水管道下层管道沉积物的变化特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- HUANG Shibiao. Experimental Study on Sediments Variation Characteristics of the Lower Channel of Double-layer Sewer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [11] RUSHFORTH P J, TAIT S J, SAUL A J. Modelling the erosion of mixtures of organic and granular in sewer sediments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(4): 308-315.
- [12] 刘翠云, 张效华, 杨钰婷, 等. 雨水管道沉积物冲刷特性[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 635-642.
- LIU Cuiyun, ZHANG Xiaohua, YANG Yuting, *et al.* Analysis of scouring features of sedimental left-over elements in rainwater pipes [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 635-642 (in Chinese).
- [13] EBTEHAJ I, BONAKDARI H, SHAMSHIRBAND S, *et al.* A combined support vector machine-wavelet transform model for prediction of sediment transport in sewer [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 47: 19-27.
- [14] 谈帅, 刘翠云, 杨钰婷, 等. 变流量及初期效应下水管道内悬浮颗粒物的沉积规律[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(6): 94-100, 113.
- TAN Shuai, LIU Cuiyun, YANG Yuting, *et al.* Deposition characteristics of suspended particulate matters in rainwater pipeline under the variable flow and the first flush effect [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(6): 94-100, 113 (in Chinese).
- [15] 张怡蕾, 操家顺, 薛朝霞, 等. 城市排水管道内污染物迁移转化规律研究进展[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1): 111-121.
- ZHANG Yilei, CAO Jiashun, XUE Zhaoxia, *et al.* Research progress on the pollutants migration and transformation in municipal sewer [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(1): 111-121 (in Chinese).
- [16] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1965-1971.
- SANG Langtao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1965-1971 (in Chinese).
- [17] 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.
- [18] 邵卫云, 马妍, 周永潮, 等. 生物作用下排水管道沉积物的冲蚀特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1075-1079.
- SHAO Weiyun, MA Yan, ZHOU Yongchao, *et al.* Erosion characteristics of sewer sediment with biological actions [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(6): 1075-1079 (in Chinese).
- [19] 徐波平. 城市雨水管道沉积物污染负荷及其冲刷规律研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.
- XU Boping. Study on Pollution Load from Sewer Sediment Erosion and Drainage Design [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2011 (in Chinese).
- [20] BONG C H J, LAU T L, AB GHANI A, *et al.* Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion [J]. Water Science & Technology, 2016, 74(8): 1876-1884.
- 作者简介:** 罗晓萍(1996-), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制。
E-mail: 1015765560@qq.com
收稿日期: 2021-04-12
修回日期: 2021-05-18

(编辑: 刘贵春)