

城市雨水管理

## 排水管道沉积物的动态模拟及方法比较

王红武<sup>1</sup>, 董敬磊<sup>1</sup>, 张一龙<sup>2</sup>, 高原<sup>3</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院 城市污染控制国家工程研究中心, 上海 200092; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 200125; 3. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125)

**摘要:** 以上海市某分流制排水系统的管道沉积物为研究对象, 利用 InfoWorks CS 模型软件建立排水系统模型, 并分别采用 Ackers-White 模型和 KUL 模型对管道内沉积物的沉积和冲刷过程进行动态模拟, 模拟周期设置为两个月。结果表明, 旱流时排水系统流通性较差, 管道内水流速度较低, 沉积物沉积明显; 降雨期间, 两种模型的模拟结果呈现出明显差异, 采用 Ackers-White 模型模拟发现管道内沉积物发生明显冲刷, 而使用 KUL 模型模拟时沉积物厚度没有明显变化。通过比较, 推荐采用 Ackers-White 模型进行管道沉积物的动态模拟。

**关键词:** 管道沉积物; 沉积; 冲刷; InfoWorks CS 软件; Ackers-White 模型; KUL 模型

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0110-05

## Dynamic Modeling and Methods Comparison for Sewer Sediments

WANG Hong-wu<sup>1</sup>, DONG Jing-lei<sup>1</sup>, ZHANG Yi-long<sup>2</sup>, GAO Yuan<sup>3</sup>

(1. National Engineering Research Center for Urban Pollution Control, College of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Baoshan Iron and Steel Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, Shanghai 200125, China)

**Abstract:** A sewer model was established using InfoWorks CS for modeling the sewer sediments in a certain separated sewer system in Shanghai. The modeling of deposition/erosion of the sewer sediments was conducted by adopting the Ackers-White model and KUL model, respectively, with a modeling period of two months. The modeling results showed that during the dry weather, the circulation of water in the sewer system was poor and the water velocity was very small, thus causing obvious deposition of sediments. While during the rainfall period, the results of modeling with the two models were distinct. Significant erosion of sewer sediments was detected by modeling with Ackers-White model, while there was no significant change in the thickness of sediments when using KUL model. After the comparison, the Ackers-White model was recommended to simulate the deposition/erosion of sewer sediments.

**Key words:** sewer sediment; deposition; erosion; InfoWorks CS software; Ackers-White model; KUL model

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07304-003)

排水系统中管道沉积物的存在,一方面会降低排水管道容量,增大水力阻力;另一方面也会增加雨天时溢流污染的风险<sup>[1,2]</sup>。在当下我国将海绵城市建设作为新的治水方向大力推进的背景下,我们同样需要关注排水管道在城市排水体系中的核心作用,不断优化和改进排水系统,疏浚管道,减少沉积物,使之服务于水量的自然循环过程。

排水系统模型作为排水系统管理的重要辅助工具,其作用日益受到重视,2014版《室外排水设计规范》提出,汇水面积超过2 km<sup>2</sup>的地区,排水系统雨水设计流量宜采用数学模型进行计算。常用的排水系统模型包括SWMM、InfoWorks CS、MIKE Urban等,国内基于这些模型进行城市雨水管理的研究不在少数<sup>[3~5]</sup>,而利用这些模型进行管道沉积物研究的报道却很少。笔者基于InfoWorks CS软件对上海市某排水系统的运行状况进行模拟,并比较了不同管道沉积模型的模拟效果,以期为排水系统中管道沉积物的管理以及模型的使用提供借鉴。

## 1 研究区概况

以上海某分流制排水系统为研究对象,其服务面积为4.43 km<sup>2</sup>,与周边排水系统基本不存在水量交换,同时此系统也面临着诸如截流能力不足、溢流污染严重等一系列上海市分流制排水系统的共性问题<sup>[6]</sup>。根据初期调查分析,确定系统内由于管道混接导致的旱流污水量为2 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。排水系统以TL雨水泵站作为排放口,站内配置6台雨水泵,总排水能力为13.8 m<sup>3</sup>/s,另外增设两台截流污水泵(一用一备),用于输送旱流污水至污水厂。

## 2 建模方法及参数确定

### 2.1 水力建模要点

使用InfoWorks CS软件对排水系统的汇水区域进行划分,根据研究区域的地形,将产流表面分为透水面和不透水面,占比分别为80%和20%。不透水面的产流模型采用固定径流系数法,透水面的产流模型采用霍顿公式;汇流模型采用SWMM非线性水库法;管道及河道水力计算模型采用圣·维南方程组求解。确定水力参数时,采用3场实际降雨进行率定和验证,其中两场降雨用于率定,降雨量分别为6和17.2 mm,另外一场降雨用于验证,降雨量为15.7 mm。具体方法及参数见文献<sup>[6]</sup>。

### 2.2 水质建模原理

排水系统沉积物主要有两个来源:旱流污水中

本身存在的颗粒物SS;晴天时地面积累的灰尘、沙粒等颗粒物,降雨时随地表径流进入排水系统。在使用InfoWorks CS时,水体中的颗粒物可以通过污水库中的SS浓度直接进行设置,地表颗粒物主要通过模型对地面累积和冲刷进入排水管道的颗粒物进行计算。模拟的沉积物分成两层:非活性层,不会发生变化的固定沉积层,它在一次模拟过程中保持不变,可以基于闭路监控(CCTV)或者实地调查为每一管段单独设置非活性层深度,也可为整个集水区设置总的沉积深度;活性层,在一次模拟过程中可以发生侵蚀、输送和沉积,其厚度会随沉积和冲刷变化,活性层包含两个沉积物部分,这两个部分可以设置为不同的属性特征,通常设置成类似于有机和无机沉积物。InfoWorks CS软件中自带3套沉积物沉积和冲刷模型,分别是Ackers-White模型、KUL模型和Velikanov模型,本研究主要分析前两种模型。

#### 2.2.1 Ackers-White模型

Ackers-White模型最初是根据渠道中沉积物输移建立的,Ackers在1991年对其进行了改进,使模型能够适用于管道沉积物的模拟。模型中沉积物的输移率采用无量纲的输移参数 $G_{gr}$ 表示:

$$G_{gr} = \left( \frac{C_v R}{d_{50}} \right) \left( \frac{A}{W_e R} \right)^{1-n} \left( \frac{u_*}{U} \right)^n \quad (1)$$

$G_{gr}$ 的确定依赖于描述沉积物运动的水流的活动性参数 $F_{gr}$ ,见式(2)。输移参数和活动性参数可由式(3)相关联。

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \frac{U^{1-n}}{[\sqrt{32} \lg \frac{12R}{d_{50}}]^{1-n}} \quad (2)$$

$$G_{gr} = H \left( \frac{F_{gr} - A_{gr}}{A_{gr}} \right)^m \quad (3)$$

式中, $C_v$ 为沉积物的容积浓度; $R$ 为水力半径; $A$ 为过流断面面积; $u_*$ 为沉积物颗粒的剪切速度; $U$ 为过流断面平均流速; $s$ 为沉积物颗粒的特定质量; $d_{50}$ 为沉积物颗粒中值粒径; $A_{gr}$ 、 $H$ 、 $m$ 、 $n$ 为与表示粒径的无量纲量有关的系数。

Ackers-White模型在国外的应用和研究案例较多<sup>[7,8]</sup>,目前HR Wallingford公司已经对此模型进行了重新校核,并将其纳入InfoWorks CS软件的沉积物冲刷-沉积模型库中。

#### 2.2.2 KUL模型

KUL模型由Bouteligier等人提出,由剪切力计

算和沉积-冲刷速率计算模型构成。

流体的实际剪切力可由下式进行计算:

$$\tau = \frac{\lambda_c}{8} \rho V^2 \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为剪切力,  $\text{N/m}^2$ ;  $\lambda_c$  为复合摩擦系数;  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V$  为流速,  $\text{m/s}$ 。

沉积物沉积临界剪切力可由下式计算:

$$\tau_{cr,d} = \gamma_d g (S - 1) \rho d_{50} / 1\,000 \quad (5)$$

式中,  $\tau_{cr,d}$  为沉积临界剪切力,  $\text{N/m}^2$ ;  $\gamma_d$  为沉积参数;  $S$  为沉积物与水的密度比。

沉积物冲刷临界剪切力可由下式计算:

$$\tau_{cr,e} = \gamma_e g (S - 1) \rho d_{50} / 1\,000 \quad (6)$$

式中,  $\tau_{cr,e}$  为冲刷临界剪切力,  $\text{N/m}^2$ ;  $\gamma_e$  为冲刷参数。

当  $\tau < \tau_{cr,d}$  时, 水体中颗粒发生沉积, 沉积速率可由下式计算:

$$q_d = \alpha_d \left( \frac{\tau_{cr,d} - \tau}{\tau_{cr,d}} \right)^{\beta_d} \quad (7)$$

式中,  $q_d$  为沉积速率,  $\text{kg/s}$ ;  $\alpha_d$  为沉积参数,  $\text{kg/s}$ ;  $\beta_d$  为沉积参数,  $\beta_d \geq 1$ 。

当  $\tau > \tau_{cr,e}$  时, 沉积物发生冲刷, 冲刷速率可由下式计算:

$$q_e = \alpha_e \left( \frac{\tau - \tau_{cr,e}}{\tau_{cr,e}} \right)^{\beta_e} \quad (8)$$

式中,  $q_e$  为冲刷速率,  $\text{kg/s}$ ;  $\alpha_e$  为冲刷参数,  $\text{kg/s}$ ;  $\beta_e$  为冲刷参数,  $\beta_e \geq 1$ 。

### 2.3 水质模型设置

根据 2008 年此雨水系统的污染物调查数据, 将早流污水事件中 SS 浓度设置为  $89 \text{ mg/L}$ 。地表沉积物的累积和冲刷模型均选用 InfoWorks CS 默认参数, 并根据实际早流天数对地表沉积物累积时间进行设置。

管道沉积物模型分别选取 Ackers-White 模型和 KUL 模型, 水质参数中与模型无关的模拟参数均选用默认参数值, 管道沉积物沉积-冲刷模型的选择和模型参数的选取, 需手动进行设置。其中, Ackers-White 模型中需要设置的参数包括沉积物颗粒中值粒径  $d_{50}$ 、沉积物密度、沉积物沉降速度, KUL 模型中需要设置的参数包括沉积物的沉积参数 ( $\alpha_d$ 、 $\beta_d$ 、 $\gamma_d$ ) 和冲刷参数 ( $\alpha_e$ 、 $\beta_e$ 、 $\gamma_e$ )。

沉积物中非活性层不参与管道沉积物沉积-冲刷的模拟, 但非活性层的存在可以在一定程度上反

映排水管道沉积物的实际沉积状况, 同时, 非活性层可以对总的沉积物厚度和活性层厚度进行限制。根据郑瑞东对上海市排水管道的检测调查, 对管道中沉积物非活性层的设置如下: 当管径  $\leq 1\,000 \text{ mm}$  时, 非活性层的厚度设置为  $100 \text{ mm}$ ; 当  $1\,000 \text{ mm} < \text{管径} \leq 2\,000 \text{ mm}$  时, 非活性层的厚度设置为  $150 \text{ mm}$ ; 当管径  $> 2\,000 \text{ mm}$  时, 非活性层的厚度设置为  $240 \text{ mm}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 Ackers-White 模型

根据前期现场调研以及实验室的物理模型试验结果, 将模型中沉积物中值粒径设置为  $38.98 \mu\text{m}$ , 密度为  $1\,450 \text{ kg/m}^3$ , 并设置沉积物沉降速度为  $0.15 \text{ mm/s}$ 。根据该排水系统早流污水水质调查资料, 将早流污水中 SS 浓度设置为  $89 \text{ mg/L}$ , 并设定模拟周期为 2 个月。

模拟结果显示, 早流时, 该排水系统仅通过 1 台截流泵将泵站运行水位维持在  $2.2 \sim 2.3 \text{ m}$ , 这与实际早流运行情况相符。泵站实际运行情况是: 现有的截流污水泵流量规模小, 早流污水水位高, 采用截流泵旱天截流只能维持管道水位, 不能实现雨前管道预抽空, 管道预抽空主要通过雨水泵来完成。因此, 在整个模拟期间, 系统内早流污水始终维持在较高充满度, 管道内水流流通性较差, 多数管道流速甚至达不到  $0.1 \text{ m/s}$ 。根据该排水系统早流污水水质调查资料, 污水中 SS 的起始浓度设置为  $89 \text{ mg/L}$ , 而泵站前池收集到的污水 SS 浓度仅为  $4 \text{ mg/L}$ , 95% 的 SS 都发生了沉降。

以管段 TL5.1 为例, 在早流运行期间, 管段中流速多数时间都维持在  $0.03 \text{ m/s}$ 。同时在模拟中发现, 管段上游的沉积物沉积量明显高于下游的沉积量, 经过两个月的早流运行, TL5.1 管段上游沉积物深度由  $240 \text{ mm}$  增加到  $248 \text{ mm}$ , 下游沉积物深度由  $240 \text{ mm}$  增加到  $242 \text{ mm}$ , 沉积物厚度呈线性增加。

以沉积模拟结果作为起始状态, 并参照实际在 2 月 26 日设置  $6 \text{ mm}$  降雨事件, 进行沉积物冲刷的模拟。同样选取 TL5.1 管段作为研究对象, 当管道内流速  $> 0.15 \text{ m/s}$  后, 管道沉积物的厚度开始减少, 水体中 SS 浓度急剧增大, 沉积物发生冲刷; 当管道内流速降至  $0.12 \text{ m/s}$  左右时, 沉积物又以沉积为主, 见图 1。

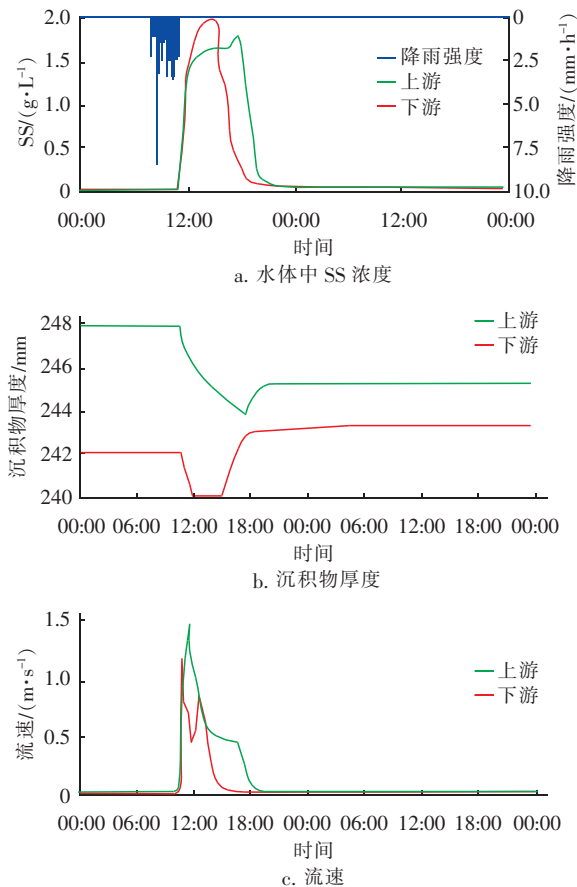


图 1 TL5.1 管段中沉积物的冲刷效果模拟  
(Ackers - White 模型)

Fig. 1 Simulation of sediments erosion in sewer TL5.1 by  
Ackers-White model

同时,模拟结果显示,在降雨开始后,随着管道内沉积物发生冲刷,雨水泵溢流排江的 SS 浓度急剧升高,最大可以达到 2 000 mg/L,远大于旱流污水中的 SS 浓度。因此,管道中沉积物旱流时沉积,造成了大量污染物质累积,当雨天沉积物发生冲刷时,大量污染物短时间内释放,进一步加剧了初期雨水污染,极大地增加了自然水体的污染负荷。

### 3.2 KUL 模型

根据实验室物理模型的试验结果,对 KUL 模型进行简化,并对模型中各参数值进行设定, $\alpha_d = \alpha_e = 0.000\ 5\ \text{kg/s}$ , $\beta_d = \beta_e = 1$ , $\gamma_d = \gamma_e = 32$ 。模拟结果显示,KUL 模型的沉积物沉积模拟结果与 Ackers - White 模型接近,以 TL5.1 管段为例,上游沉积物沉积量约为 7 mm,下游沉积物沉积量约为 2 mm,得到了与 Ackers - White 模型相似的结果和规律。

但同样的情况下,KUL 模型对管道沉积物冲刷

的模拟结果却与 Ackers - White 模型截然不同,见图 2。当降雨发生后,随着雨水泵的开启,管道中流速急剧升高,沉积物发生冲刷导致水体中 SS 浓度升高。但 SS 浓度最大仅为 0.7 g/L,远低于 Ackers - White 模型模拟结果中 2 g/L 的 SS 浓度,而沉积物冲刷总量对其厚度也并未产生明显的影响。同时,沉积物冲刷量的减少,直接导致溢流排江 SS 浓度的降低,最大 SS 浓度仅为 0.044 g/L。

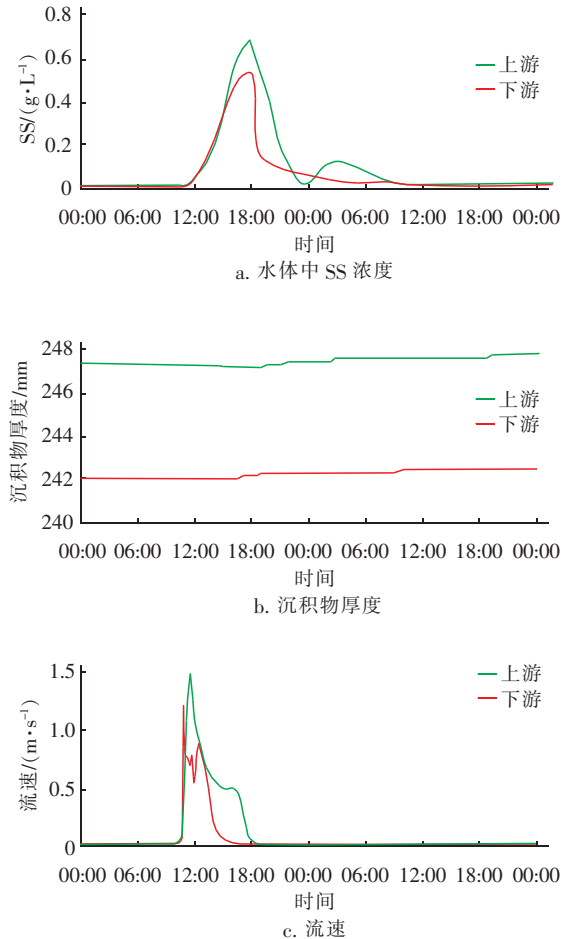


图 2 TL5.1 管段中沉积物的冲刷效果模拟(KUL 模型)

Fig. 2 Simulation of sediments erosion in sewer TL5.1  
by KUL model

从总体上来看,模型的选择对于系统沉积物沉积 - 冲刷的预测和评估有很大的影响。Ackers - White 模型和 KUL 模型对管道沉积物沉积阶段的模拟结果基本一致,但在 Ackers - White 模型的模拟中,流速的变化会对沉积物的冲刷产生较为明显的影响,而在 KUL 模型中,沉积物冲刷却对流速的变化并不十分敏感。但以实际的运行经验来看,KUL 模型显然过低估计了沉积物的冲刷效果,与实际情



况存在一定的差异。另外,KUL模型中参数较多,需要通过大量的试验研究确定,增加了模拟结果的不确定性,也为模型的应用带来了极大的不便。此前,张伟<sup>[9]</sup>采用 InfoWorks CS 对我国南方某市的排水体系中管道沉积物进行了沉积-冲刷模拟,其也采用 Ackers-White 模型对管道沉积物进行模拟,取得了较好的效果。因此,在 InfoWorks CS 的排水管道沉积物模拟模块中,使用 Ackers-White 模型模拟管道沉积物的沉积和冲刷过程更能取得比较理想的效果。

#### 4 结论

基于 InfoWorks CS 模型软件,对上海市某分流制排水系统的雨水管网进行管道沉积物的沉积及冲刷过程模拟,分别采用了 Ackers-White 模型和 KUL 模型,主要得到如下结论:

① 模拟显示,在旱流条件下,排水系统内水流通性较差,流速较低。采用 Ackers-White 模型和 KUL 模型模拟时均出现较为明显的沉积,水体中95%的颗粒物发生沉积;从单独管段沉积物厚度的模拟结果来看,管道上游沉积物的沉积量远高于下游。

② Ackers-White 模型和 KUL 模型在模拟冲刷过程时,表现出较为明显的差异。在管道的洪峰时段,瞬时流速可以超过 1 m/s, Ackers-White 模型中出现了明显的冲刷现象,沉积物厚度减少了40%,水体中 SS 浓度显著增加;但在 KUL 模型中,沉积物厚度并未在冲刷中发生明显的变化,产生的初期效应也远小于 Ackers-White 模型。

③ 从模型使用的方便性和模拟结果来看, Ackers-White 模型所需要确定的参数更少,模拟结果也更符合实际情况,因此更适用于排水系统中沉积物的模拟和评估。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨云安,管运涛,许光明,等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. 给水排水,2011,37(9):159-162.
- [3] 陈小龙,陆露,盛政,等. 城市排水防涝地表二维模拟评估方法研究[J]. 中国给水排水,2015,31(23):116-119.
- [4] 吴娟,吕谋,陶贵清. 排水管网模型参数率定及分析[J]. 中国给水排水,2016,32(7):86-88.
- [5] 吴雪军,杨就意. 南昌市青山湖排水区排涝规划技术介绍[J]. 中国给水排水,2015,31(23):125-129.
- [6] 毛云峰,王红武,高原,等. 基于 InfoWorks CS 软件的上海市某排水系统运行现状评估[J]. 给水排水,2013,39(12):111-114.
- [7] Schellart A N, Buijs F A, Tait S J, et al. Estimation of uncertainty in long term combined sewer sediment behaviour predictions, a UK case study[J]. Water Sci Technol, 2008, 57(9):1405-1411.
- [8] Tait S J, Rushforth P J, Saul A J. A laboratory study of the erosion and transport of cohesive-like sediment mixtures in sewers[J]. Water Sci Technol, 1998, 37(1):163-170.
- [9] 张伟. 基于 InfoWorks CS 模型的排水管道沉积规律研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.



作者简介:王红武(1970-),女,福建龙岩人,博士,副教授,研究方向为城市雨水管理、水污染控制、污水生物处理理论、技术与过程控制等。

E-mail:wanghongwu@tongji.edu.cn

收稿日期:2016-06-06