

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.006

调蓄池水力自清系统放空冲洗特性

张睿¹, 何琪¹, 徐旭¹, 冯建刚¹, 徐辉¹, 张欣², 施烨锋²

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏南京 211100; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 基于计算流体动力学(CFD)方法, 对调蓄池水力自清系统放空冲洗过程开展了数值模拟研究, 分析了闸门开启时长和储水室水位高度变化对放空冲洗水流流动特性及调蓄池底部沉积物冲洗效果的影响规律, 并构建了冲刷率与储水高度的非线性回归拟合公式。结果表明: 放空冲洗的水流最大平均流速随闸门开启时长增加而减小、随储水高度增加而增大, 放空冲洗水流的速度衰减主要发生在廊道前半段, 放空冲洗后的廊道沉积物冲刷形态呈 U 形分布; 放空冲洗的冲刷率随闸门开启时长增加而减小, 在 1.5 m 储水高度下, 当闸门开启时长由 10 s 增加至 20 s 时, 冲刷率由 46.27% 减小为 35.23%; 放空冲洗的冲刷率随储水高度增加而增大, 在闸门开启时长 10 s 下, 当储水高度由 0.5 m 增加至 2 m 时, 冲刷率由 4.83% 增大到 58.67%。

关键词: 调蓄池; 水力自清系统; 放空冲洗; 冲刷率; 数值模拟

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)02-0047-07

Characteristics of venting flushing in hydraulic self-cleaning systems for storage tanks

ZHANG Rui¹, HE Qi¹, XU Xu¹, FENG Jiangang¹, XU Hui¹, ZHANG Xin², SHI Yefeng²

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A numerical simulation of the characteristics of flushing during the venting process for a hydraulic self-cleaning system in a storage tank was conducted using computational fluid dynamics (CFD) method. An analysis was conducted to analyze how the opening time of the gate and changes in water level within a storage tank influence the flow characteristics during venting flushing processes and the flush effect of sediment at the bottom of the system. The nonlinear regression fitting formula between the scour rate and the water storage height was constructed. The results show that the maximum average flow velocity of venting flushing decreases with the increase of gate opening time and increases with the increase of water storage height. The velocity attenuation of venting flushing flow mainly occurs in the front half of the corridor, and the flushing shape of the corridor sediment after venting flushing is V-shaped distribution. The scouring rate of the venting flushing decreases with the increase of the gate opening time. At 1.5 m water storage height, when the gate opening time increases from 10 s to 20 s, the scour rate decreases from 46.27% to 35.23%. The scour rate of venting flushing increases with the increase of the water storage height. With the gate open for 10 seconds, the scour rate increased from 4.83% to 58.67% as the water storage height rises from 0.5 m to 2 m.

Key words: storage tank; hydraulic self-cleaning system; venting flushing; scour rate; numerical simulation

近年来受全球气候变化、城市化进程加快等因素影响, 城市污水处理量逐年增长, 形势严峻^[1-3]。排水系统是现代化城市重要的基础设施, 是城市处理、排除污水的工程设施系统, 能够有效应对城市面临的洪涝、污水处理以及水资源利用等问题。作为城市排水系统的重要组成, 调蓄池通过对初期雨水或合流污水进行截流、调蓄并输送至污水处理厂, 从而保证城市排水系统的安全稳定运行, 同时也避免污水溢流造成河流、湖泊等受纳水体污染^[4-7]。

由于初期雨水和合流污水中携带污染物杂质, 调蓄池底部难免会滞留沉积物, 如不及时清理, 沉积物不

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809081); 江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介: 张睿(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水能开发利用研究。E-mail: gulie1984@163.com

通信作者: 冯建刚(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程水力学研究。E-mail: jgfeng@hhu.edu.cn

引用本文: 张睿, 何琪, 徐旭, 等. 调蓄池水力自清系统放空冲洗特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 47-53.

ZHANG Rui, HE Qi, XU Xu, et al. Characteristics of venting flushing in hydraulic self-cleaning systems for storage tanks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 47-53.

仅会发酵变质产生有毒、有害气体而影响生态环境、损害人体健康,还会导致调蓄池容积减小而难以充分发挥其有效功能^[8-9]。因此,越来越多学者围绕调蓄池底部沉积物去除,开展调蓄池的结构优化设计、冲洗方式等研究。王明明等^[10]基于模型试验,从水流冲洗方式角度对调蓄池进行了结构优化设计,有效提升了调蓄池底部淤泥的冲洗效果。王建龙等^[11]采用CFD方法分析了雨水调蓄池结构形式变化对沉积颗粒物冲刷率的影响。谭志程等^[12]利用FLUENT对合流制溢流调蓄池进行了三维固液两相流模拟,通过优化调蓄池结构,增强了对溢流污水的沉淀除污效果。徐乾轲等^[13]基于FLOW 3D,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和泥沙冲刷沉积模型,开展了拦蓄水力冲洗情况下调蓄池的存水高度、存水量、冲洗廊道宽度以及冲洗孔高度对调蓄池冲洗效果的影响规律研究。Ruiloba等^[14]利用二维水力分析软件IBER对门式冲洗过程进行了数值模拟,通过优化冲洗廊道结构,有效避免了回流区域的产生并提高了冲洗水流流速。叶昕等^[15]将门式冲洗与真空冲洗结构进行结合,通过提升储水高度进而提高了对沉积物的冲刷率。

上海某污水调蓄工程地下调蓄池埋深大且空间有限、人机操作不便,在综合分析门式、水力翻斗等^[16-17]常用冲洗方式优缺点的基础上,设计了一种新型水力自清系统(图1)。水力自清系统将调蓄池进流作为冲洗水源,利用调蓄池进水与放空两个阶段实现对调蓄池底部沉积物的两次冲洗。水力自清系统结构简单、操控便捷、无需额外引水、冲洗效率高,有助于实现节能减排目标。其中,水力自清系统放空冲洗过程是在调蓄池内蓄水放空后,开启储水室的电控闸门,利用储水室内存水实现对调蓄池底部沉积物的冲洗。为研究水力自清系统放空冲洗特性,本文基于数值模拟方法对水力自清系统放空冲洗过程进行研究,分析储水室闸门开启时长(T)、储水高度(H)变化分别对放空冲洗水流的流动特性及其对调蓄池底部沉积物冲洗效果的影响规律。

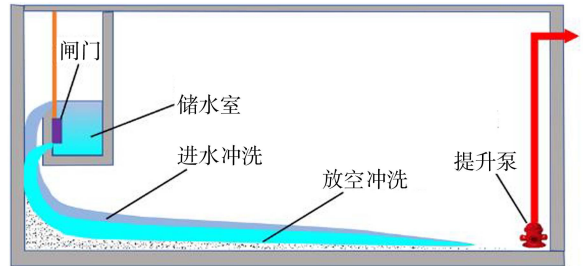


图1 调蓄池水力自清系统工作原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of working principle of hydraulic self-cleaning system for storage tank

1 数值模型

1.1 几何建模与网格划分

调蓄池水力自清系统的结构布置如图2所示,由于调蓄池放空冲洗过程是在单格廊道内运行,因此建立如图3(a)所示的三维几何模型;参考文献[11]中调蓄池计算网格划分方案,采用结构化网格对调蓄池水力自清系统计算模型网格进行划分且对廊道区域网格进行局部加密处理,其中网格块1、2、3的网格尺寸分别为0.08、0.07、0.04~0.06 m,如图3(b)所示,计算模型网格数约为400万。

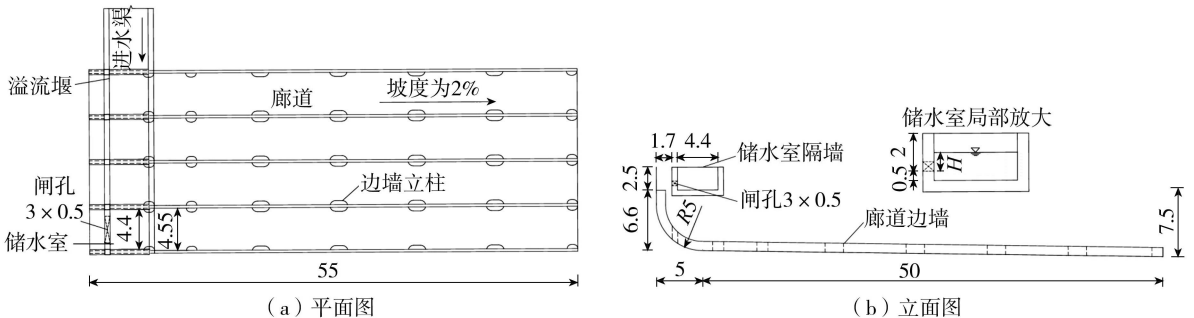


图2 调蓄池水力自清系统结构布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Structural layout diagram of self-cleaning system for regulating pond water force (unit: m)

1.2 模拟方法与计算设置

对于水力自清系统放空冲洗水流流动求解,基于不可压缩黏性流体的连续方程和动量方程,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[18],对于冲洗水流自由液面的捕捉采用VOF方法进行求解,基于GMO模型并利用FAVOR技术对储水室闸门开启过程进行模拟,采用沉积物冲刷模型计算调蓄池底部沉积物的启动、推移运动以及沉降。图3(b)中计算区域上部为压力边界且为1 atm(0.1013 MPa),计算区域两侧边界均为固壁边界,调蓄池

底部廊道出口边界为自由流出。根据原型沙采样结果,设置沉积物中值粒径为 1 mm、密度为 $2\ 650\text{ kg/m}^3$,沉积物的初始高度为 0.1 m 且均匀铺满调蓄池底部廊道。

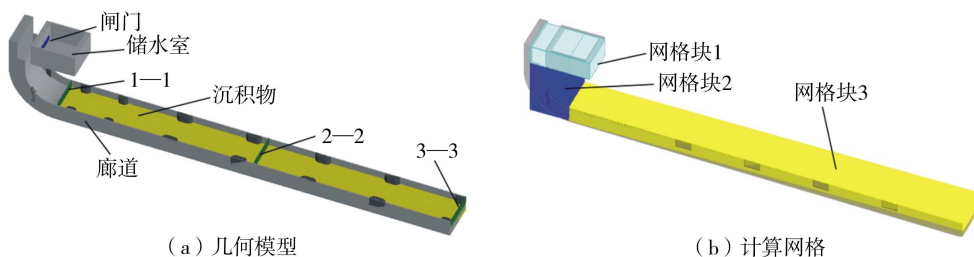


图3 调蓄池放空冲洗三维计算模型

Fig. 3 Three-dimensional calculation model of venting flushing for storage tanks

1.3 模型验证

为了验证数值模拟方法的准确性,根据重力相似准则设计了调蓄池水力自清系统的物理模型,模型线性比尺 $\lambda_L = 10$ 。在物理模型试验中,根据起动流速公式^[19],选用中值粒径 0.25 mm、密度 $1\ 250\text{ kg/m}^3$ 的塑料沙作为模型沙,起动流速比尺为 3.33。采用冲刷率(φ)分析水力自清系统对调蓄池底部廊道内沉积物的冲洗效果:

$$\varphi = (1 - m/m_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_0 、 m 分别为放空冲洗前、后调蓄池底部廊道沉积物的初始质量与剩余质量。

选取储水室闸门开启时长为 15 s、储水高度为 1.5 m,对调蓄池水力自清系统放空冲洗进行物理模型试验及数值计算。由图 4 可知,物理模型试验与数值模拟获得的放空冲洗后调蓄池底部廊道沉积物冲刷形态较为相似且均呈 U 形分布,并且两者的 φ 分别为 41.9% 和 40.02%,相对误差为 4.48%。因此,本文的数值模拟方法获得的沉积物冲刷形态和冲刷率均与物理模型试验吻合较好,具有良好的预测精度。

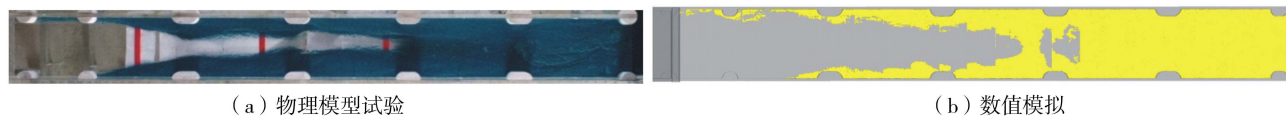


图4 调蓄池底部廊道沉积物的冲刷形态

Fig. 4 Scour patterns of sediments in the corridor at the bottom of storage tank

2 结果分析与讨论

2.1 闸门开启时长的影响

为分析闸门不同开启时长对水力自清系统放空冲洗特性的影响,在 $H = 1.5\text{ m}$,对 T 分别为 10、15、20 s 时的水力自清系统放空冲洗过程进行数值模拟。

由图 5(a)~(c)(图中 t 为放空时间)可知,随着闸门开启,储水室内的水流经闸孔射出并沿着调蓄池曲面边墙流入至底部廊道,冲洗水流在廊道起始端流速较大,流至廊道末端流速明显减小。随着储水室存水放空,如 5(d)~(f)所示,冲洗水流减少且流速也不断减小,同时冲洗水流运动过程中因受到廊道边墙上的立柱阻挡而存在局部低流速区。

为进一步了解不同闸门开启时长对冲洗水流流速的影响,选取廊道的起始端(1—1)、中部(2—2)、末端(3—3)3 个典型断面(图 3(a))进行分析。由图 6(a)可知,断面 1—1 的平均流速(u)随 t 变化曲线整体表现为先快速增长、后缓慢下降的趋势,并且随闸门开启时长增加,最大平均流速(u_{\max})减小且其出现的时间点有所滞后。由图 6(b)可知,3 个典型断面的 u_{\max} 随 T 的增大而减小,并且对于同一 T , u_{\max} 从廊道起始端至末端呈减小趋势;与断面 1—1 的 u_{\max} 相比,断面 2—2 在 T 为 10、15、20 s 时分别衰减了 60.53%、58.43%、58.1%,断面 3—3 在 T 为 10、15、20 s 时分别衰减了 66.98%、66.07%、67.24%,由此表明放空冲洗水流的流速衰减主要发生在廊道的前半段。

结合图 5、图 7 可知,随着储水室存水流入廊道对沉积物进行冲洗,因廊道起始端冲洗水流流速较大,使得廊道前端的沉积物得到冲刷并向廊道末端迁移;随着储水室存水放空,冲洗水流流量减小、流速减小,沉积物的冲刷量逐渐下降,部分沉积物会随水流向廊道末端聚集。因冲洗水流的流速分布为中间大、两侧小且受

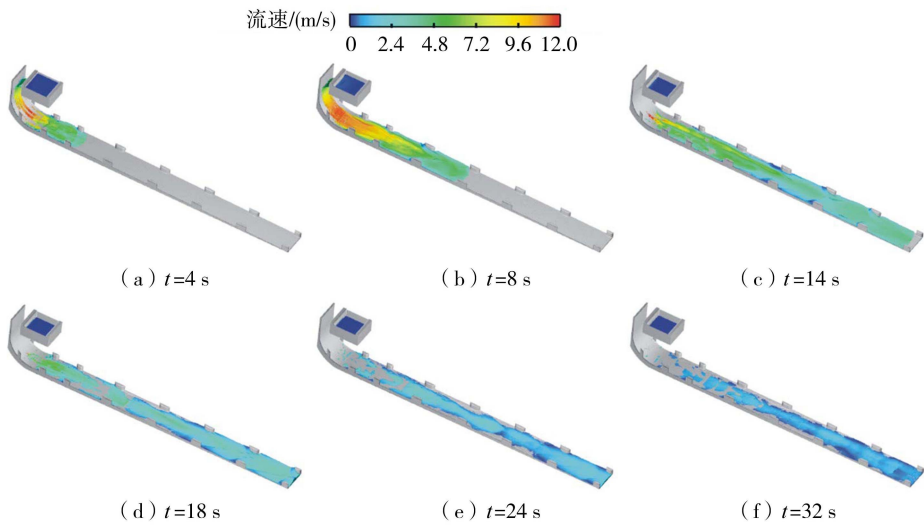


图 5 放空冲洗过程水流流速分布云图 ($T=10\text{ s}$)

Fig. 5 Water flow velocity distribution diagram in the venting flushing process ($T=10\text{ s}$)

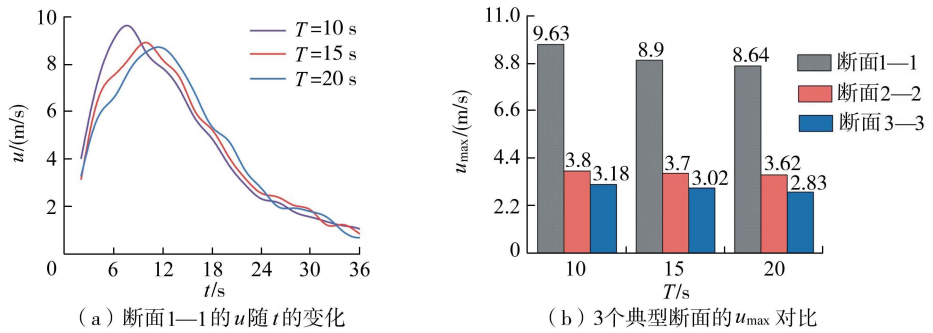


图 6 不同 T 下典型断面的流速对比

Fig. 6 Comparison of flow velocity of typical sections under different opening time of gate

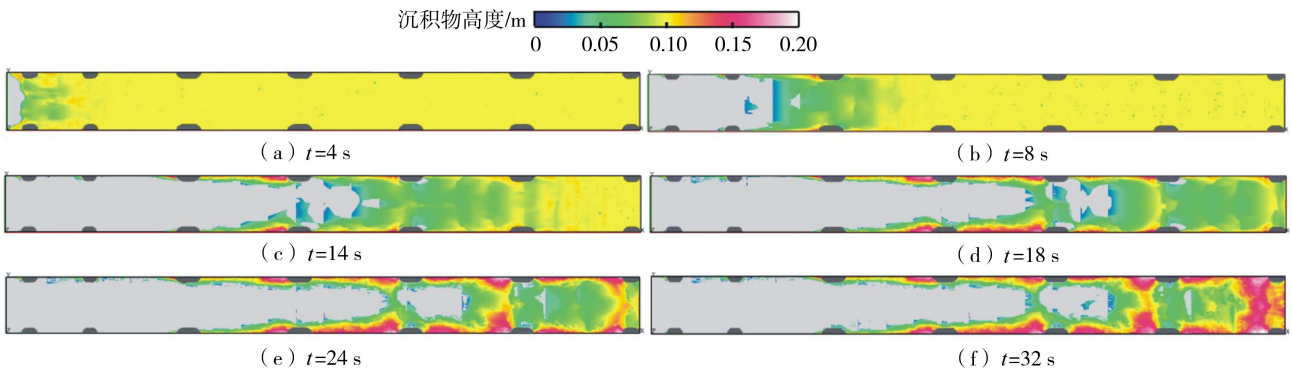


图 7 放空冲洗过程廊道沉积物分布 ($T=10\text{ s}$)

Fig. 7 Sediment distribution in corridor in the venting flushing process ($T=10\text{ s}$)

廊道边墙立柱阻挡影响,冲洗水流中以悬移质形式存在的沉积物重新沉积导致廊道两侧的沉积现象明显,放空冲洗后的廊道沉积物冲刷形态呈现 U 形分布。

为深入分析水力自清系统放空冲洗过程 T 对调蓄池廊道沉积物冲刷特性的影响规律,绘制了不同 T 时,放空冲洗过程中调蓄池廊道沉积物相对质量 m^* ($m^* = m_t/m_0$,其中 m_t 为 t 时刻廊道沉积物(不含悬移质)的质量)随 t 的变化曲线(图 8)。

由图 8 可知,不同 T 的 m^* 随 t 的变化曲线变化规律较为相似,均表现为先显著降低、后有所上升直至稳定的规律,相同时刻 t 下的 m^* 随着 T 的增大而增大,并且 m^* 出现转折的时间点随着 T 的增大而略有滞后。以 $T=10\text{ s}$ 工况为例,对水力自清系统放空冲洗过程中廊道沉积物质量变化规律进行分析, $t=0\sim 18\text{ s}$ 为 m^*

持续下降阶段且下降速率随 T 的减小而增大,其原因是 T 越小则冲洗水流的流速越大、冲刷强度越大; $t = 18 \sim 32$ s 时 m^* 逐渐增加,其主要原因是此阶段冲洗水流的流速逐渐减小,导致以悬移质形式存在于水流中的沉积物出现再沉积;当 $t \geq 32$ s,冲洗水流显著减少, m^* 逐渐趋于稳定。放空冲洗结束后, T 为 10、15、20 s 的 φ 分别为 46.27%、40.02%、35.23%,由此可见 φ 随 T 的增大而呈减小规律。

图 9 为不同闸门开启时长时水力自清系统放空冲洗后调蓄池廊道中纵剖面沉积物高度分布,图中的横坐标 $L^* = L/L_0$ 为沿廊道长度方向的相对位置,纵坐标 $h^* = h/h_0$ 为沉积物的相对高度,其中 L 和 L_0 分别为沉积物沿廊道方向的分布位置和廊道长度, h 与 h_0 分别为沉积物高度和沉积物初始高度, $h_0 = 0.1$ m。由图 9 可知,不同 T 下的 h^* 沿廊道的分布规律较为相近,并且可以发现 T 越大沉积物向下游推移距离越短,其中 T 为 10、15、20 s 时的相对冲刷距离 L^* 分别为 0.600、0.582、0.568,其原因是 T 越小冲洗水流流速越大,进而使得沉积物越易被冲刷。

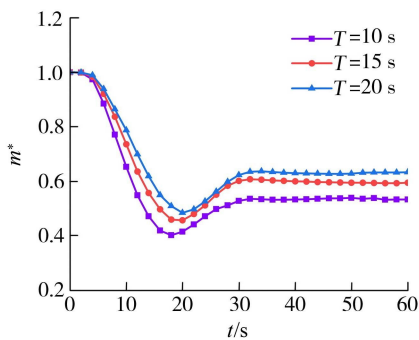


图 8 不同 T 时 m^* 随 t 的变化

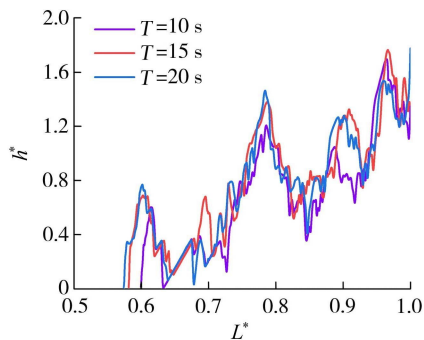


图 9 不同 T 时廊道中部纵剖面 h^* 分布

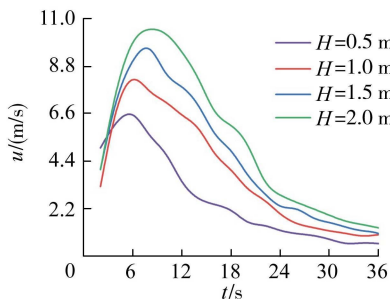
Fig. 8 Change of m^* with t at different T

Fig. 9 h^* distribution in the middle section of gallery at different T

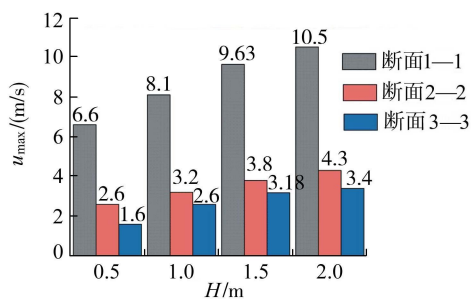
2.2 储水高度的影响

为研究不同储水高度对水力自清系统放空冲洗特性的影响,在 $T = 10$ s、 $H = 1.5$ m 的基础上,进一步对储水高度 H 分别为 0.5、1.0、2.0 m 时的水力自清系统放空冲洗过程进行数值模拟。

由图 10(a)可知,断面 1—1 的 u 随 t 先增大后减小,随着 H 的增加,断面 1—1 的 u_{\max} 呈增大趋势且出现的时间节点向后推移、放空冲洗过程的持续时间也更长。由图 10(b)可知,3 个典型断面的 u_{\max} 随 H 的增加而增大,并且在同一储水高度下的 u_{\max} 从廊道起始端至末端呈减小趋势;与断面 1—1 相比,断面 2—2 的 u_{\max} 在 H 为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 下分别衰减 60.61%、60.49%、60.53%、59.05%,断面 3—3 的 u_{\max} 在储水高度 H 为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 下分别衰减了 75.76%、67.9%、66.98%、67.62%,因此对于不同储水高度情况下的水力自清系统,放空冲洗水流的速度衰减主要发生在廊道前半段。



(a) 断面 1—1 的 u 随 t 的变化



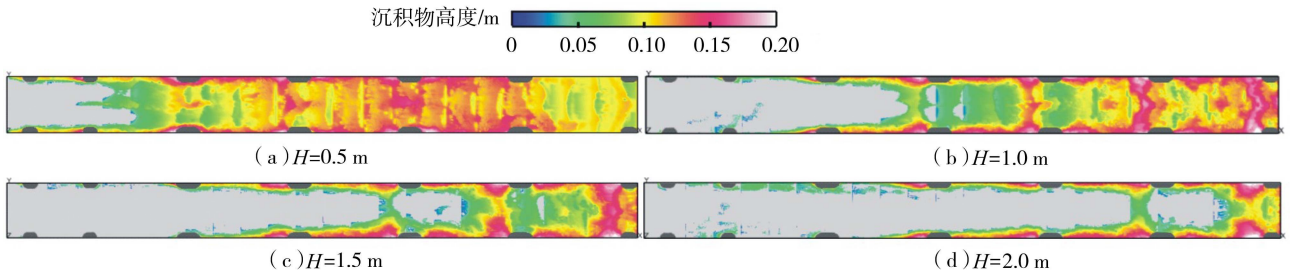
(b) 3 个典型断面的 u_{\max} 对比

图 10 不同 H 下典型断面的流速对比

Fig. 10 Comparison of average velocity of typical sections at different water storage heights

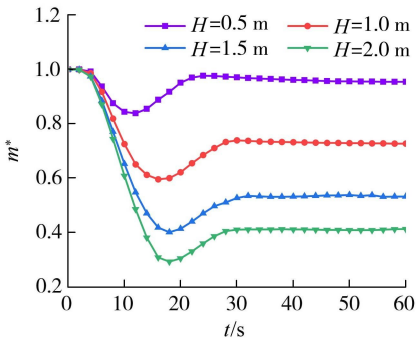
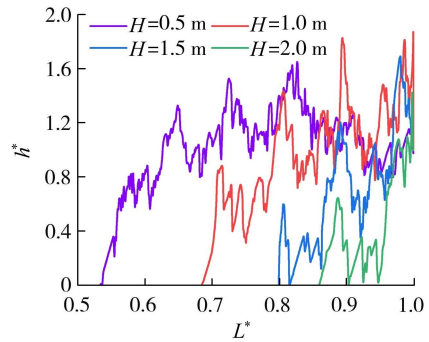
由图 11(a)可知,当 $H = 0.5$ m 时,廊道起始端区域的沉积物得到冲刷,但廊道中部沉积物分布较多,廊道末端也有所增多;随着 H 增大,廊道沉积物的冲刷范围逐渐增大(图 11(b)~(d))。

由图 12 可知,对于不同 H ,沉积物 m^* 随 t 的变化均呈现先减小后增大直至稳定的变化规律,在相同 t 时, m^* 随着 H 的增大而减小,并且 m^* 出现转折的时间点随着 H 的减小而有所提前,说明在储水高度较低的情况下,以悬移质形式存在于水流中的沉积物更易再次沉积。另外, H 为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 时的 m^* 趋于

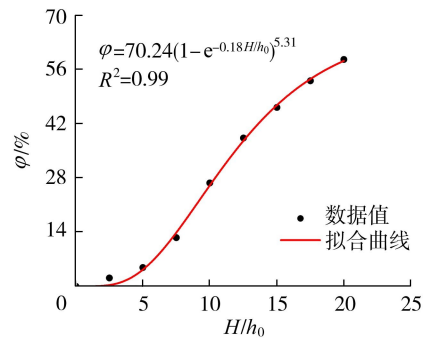
图 11 不同 H 时放空冲洗后廊道沉积物分布Fig. 11 Sediment distribution of corridor after venting flushing at different storage height H

稳定的时间节点分别为 25、28、30、31 s, 主要是因为 H 越大, 冲洗水量越多, 冲刷过程越持久。水力自清系统放空冲洗结束后, H 为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 的 φ 分别为 4.83%、26.71%、46.27%、58.67%, 可见水力自清系统的 φ 随着 H 的增大而增大。

由图 13 可知, 不同 H 时的放空冲洗后的沉积物分布差异明显, 沉积物随 H 的增大而向廊道下游推移, 其中 H 为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 时的相对冲刷距离 L^* 分别为 0.084、0.364、0.600、0.720。

图 12 不同 H 时 m^* 随 t 的变化Fig. 12 Change of m^* with t at different H 图 13 不同 H 时廊道中部纵剖面 h^* 分布Fig. 13 h^* distribution in the middle section of gallery at different H

为更好地预测调蓄池水力自清系统放空冲洗效果, 进一步厘清 φ 与 H 之间的关系, 通过增加其他储水高度的数值模拟工况, 得到 φ 与 H 的散点关系(图 14), 并用 h_0 对 H 进行无量纲处理。由图 14 可知, φ 随 H/h_0 呈非线性增大趋势, 在 H/h_0 取值较小时, φ 随 H/h_0 增大呈指数增大; 随着 H/h_0 持续增大, φ 随 H/h_0 的增大表现为线性增大的规律, 最后 φ 随 H/h_0 增大而又表现为缓慢增长。因此, 采用非线性曲线拟合方法对数据进行回归拟合。由图 14 可知, 回归曲线的拟合程度良好, 相关系数 $R^2=0.99$, 说明拟合曲线具有较高的预测精度。

图 14 φ 与 H/h_0 的关系Fig. 14 Relationship between φ and H/h_0

3 结论

a. 水力自清系统放空冲洗水流的最大平均流速随闸门开启时长增加而减小、随储水高度增加而增大, 放空冲洗水流流速的衰减主要发生在廊道前半段; 放空冲洗水流流速中间大、两侧小; 冲洗水流因受到廊道两侧边墙立柱影响, 使得沉积物冲刷形态呈 U 形分布。

b. 水力自清系统放空冲洗的冲刷率随闸门开启时长的增加而呈减小规律, 当闸门开启时长由 10 s 增加至 20 s 时, 放空冲洗冲刷率由 46.27% 减小为 35.23%; 水力自清系统放空冲洗的冲刷率随储水高度增加而增大, 当储水高度由 0.5 m 增加至 2 m 时, 冲刷率由 4.83% 增大到 58.67%; 构建了冲刷率与储水高度的非线性回归拟合公式且具有较高的精度, 能有助于对水力自清系统放空冲洗效果进行预测。

c. 因受调蓄池廊道边墙结构支撑立柱影响, 廊道两侧边墙尤其是立柱附近会存在沉积物滞留。

参考文献:

- [1] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9. (REN Hongchang,ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):1-9. (in Chinese))
- [2] 刘明潇,朱勇杰,胡昊,等. 城市新区极端雨洪汇流淹没特性与致灾机理调查研究:以郑州“7.20”特大暴雨(郑东新区)为例[J]. 水利学报,2024,55(3):288-300. (LIU Mingxiao,ZHU Yongjie,HU Hao,et al. Survey research on characteristics of extreme rainstorm flood and disaster-causing mechanism in urban new district:taking Zhengdong New District in Zhengzhou’s “7·20” heavy rainstorm as an example[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(3):288-300. (in Chinese))
- [3] 潘鑫鑫,侯精明,陈光照,等. 基于数值模拟与BP神经网络的城市调蓄池调度快速预报方法[J]. 水动力学研究与进展,2023,38(3):409-420. (PAN Xinxin,HOU Jingming,CHEN Guangzhao,et al. Rapid forecasting method for urban storage pond scheduling based on numerical simulation and BP neural network[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2023,38(3):409-420. (in Chinese))
- [4] FAN Gongduan,LIN Ruisheng,WEI Zhongqing,et al. Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control[J]. Science of the Total Environment,2022,805:150404.
- [5] 曾木海,谢小龙. 初雨调蓄池在武汉市某湖泊综合整治工程中的应用[J]. 中国给水排水,2021,37(12):93-97. (ZENG Muhai,XIE Xiaolong. Application of initial rainwater storage tank in a lake comprehensive treatment project in Wuhan[J]. China Water & Wastewater,2021,37(12):93-97. (in Chinese))
- [6] 刘鹏飞,杜强强,戴明华. 截流调蓄在水环境治理中的应用实践与思考[J]. 环境工程,2023,41(增刊2):1141-1146. (LIU Pengfei,DU Qiangqiang,DAI Minghua. Application practice and thinking of interception and storage technology in water environment treatment[J]. Environmental Engineering,2023,41(Sup2):1141-1146. (in Chinese))
- [7] 于磊,黄瑞晶,李容,等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-48. (YU Lei,HUANG Ruijing,LI Rong,et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):41-48. (in Chinese))
- [8] 刘钊,程江琳,朱玉田. 自治理雨水调蓄系统及其实施方案[J]. 中国工程机械学报,2018,16(6):535-539. (LIU Zhao,CHENG Jianglin,ZHU Yutian. Implement scheme of self-management rainwater storage system[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2018,16(6):535-539. (in Chinese))
- [9] 马小琴. 河道大型调蓄池泥沙冲洗方案比选研究[J]. 陕西水利,2024(2):153-156. (MA Xiaoqin. Comparison and selection of sediment flushing schemes for large river regulation and storage tanks[J]. Shaanxi Water Resources,2024(2):153-156. (in Chinese))
- [10] 王明明,史志立,王东. 海绵城市下一种便于冲洗淤泥的调蓄池设计[J]. 中国资源综合利用,2019,37(10):164-166. (WANG Mingming,SHI Zhili,WANG Dong. Design of a storage tank for flushing silt in sponge city[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2019,37(10):164-166. (in Chinese))
- [11] 王建龙,秦美娜,黄涛,等. 基于CFD的雨水调蓄池颗粒物沉淀特性研究[J]. 环境工程,2021,39(12):44-50. (WANG Jianlong,QIN Meina,HUANG Tao,et al. Sedimentation characteristics of particulate matters in runoff detention tank via CFD method[J]. Environmental Engineering,2021,39(12):44-50. (in Chinese))
- [12] 谭志程,余健. 基于数值模拟的新型合流制溢流调蓄池优化研究[J]. 中国给水排水,2021,37(23):114-121. (TAN Zhicheng,YU Jian. Optimization of a novel combined sewer overflow storage tank based on numerical simulation[J]. China Water & Wastewater,2021,37(23):114-121. (in Chinese))
- [13] 徐乾轲,张力方,张建民. 雨水调蓄池体型优化数值模拟研究[J]. 水利规划与设计,2023(3):69-74. (XU Qianke,ZHANG Lifang,ZHANG Jianmin. Numerical simulation study on shape optimization of rainwater storage tank[J]. Water Resources Planning and Design,2023(3):69-74. (in Chinese))
- [14] RUILOBA L C,GÓMEZ M,RUSSO B,et al. Toward sustainable management:2D modelling of a self-cleaning system to improve geometry in front of the flushing gate[J]. Sustainability,2018,10(3):745.
- [15] 叶昕,李善庭,王春兰,等. 基于大中型雨水调蓄池冲洗系统的优化研究[J]. 工业安全与环保,2021,47(8):79-82. (YE Xin,LI Shanting,WANG Chunlan,et al. Optimum research of flushing system for large and medium stormwater storage tank[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2021,47(8):79-82. (in Chinese))

(in Chinese))

- [9] 卢毓昀. 锚桩反力法静载试验在桩基检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(3): 13-17. (LU Chengyun. Application of anchor pile reaction force method static load test in pile foundation inspection[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(3): 13-17. (in Chinese))
- [10] HE Chunlin, GONG Chengzhong. Comparison and analysis on self-balanced method and anchored pile method in qingdao gulf bridge[J]. Advanced Materials Research, 2013, 838-841: 1024-1027.
- [11] 赵明华, 邹新军, 刘齐建. 洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 63-67. (ZHAO Minghua, ZOU Xinjun, LIU Qijian. Loading test on the vertical bearing capacity of super-long and large-diameter bored piles in the soft soil area of Dongting Lake[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 63-67. (in Chinese))
- [12] 刘捷, 顾章川, 俞先江. 锚桩法静载桩基检测在港口工程试桩中的应用[J]. 铁道建筑, 2014(6): 63-65. (LIU Jie, GU Zhangchuan, YU Xianjiang. Application of anchor pile method to static load pile foundation testing in port engineering[J]. Railway Engineering, 2014(6): 63-65. (in Chinese))
- [13] 鲍金虎, 苏静波, 吴锋, 等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 $p-y$ 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 127-134. (BAO Jinhui, SU Jingbo, WU Feng, et al. Field horizontal loading test and $p-y$ curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay ground sill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 127-134. (in Chinese))
- [14] 周洪波, 黄胜生. 锚桩法单桩静载试验中群桩相互作用及误差分析[J]. 岩土力学, 2004(10): 1613-1616. (ZHOU Hongbo, HUANG Shengsheng. Interaction and error analysis of pile groups in anchor-pile loading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(10): 1613-1616. (in Chinese))
- [15] 张燃, 陈伏军, 蔡惠军. 锚桩压重联合反力装置在静载试验中的应用[J]. 施工技术, 2005(增刊1): 125-126. (ZHANG Ran, CHEN Fujun, CAI Huijun. Application of anchor pile loading combination counterforce device in static loading tests[J]. Construction Technology, 2005(Sup1): 125-126. (in Chinese))
- [16] 曾英杰, 朱文久, 吕景权, 等. 锚桩压重复合反力装置: CN201420288304. 8[P]. 2014-11-05.
- [17] 倪金华, 王文渊, 罗浩, 等. 新型反力横梁加载装置在锚桩法中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(21): 106-110. (NI Jinhua, WANG Wenyuan, LUO Hao, et al. Application of new reaction force beam loading device in anchor pile method[J]. Construction Technology, 2017, 46(21): 106-110. (in Chinese))
- [18] 许涛. 新型管桩静载反力系统在试桩工程中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(增刊1): 424-427. (XU Tao. Application of new pipe pile plate loading opposite force system to pile test work[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(Sup1): 424-427. (in Chinese))
- [19] 陈雪峰, 王京杭, 孙立山, 等. 不考虑桩端承力的锚桩法新工艺试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(11): 85-89. (CHEN Xuefeng, WANG Jinghang, SUN Lishan, et al. Experimental research on new technology of anchor pile method without considering pile end bearing capacity[J]. Railway Engineering, 2022, 62(11): 85-89. (in Chinese))
- [20] ZHOU Zhiguo, YANG Jun, SUN Xiaoli, et al. Development and application of static load test system for pile foundation based on steel screw anchor piles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(10): 4309-4320.

(收稿日期: 2024-10-21 编辑: 熊水斌)

(上接第53页)

- [16] 肖莹莹. 雨水调蓄池各系统的论述及应用要点[J]. 科学技术创新, 2019(20): 93-94. (XIAO Yingying. Discussion and application points of each system of rainwater storage tank[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(20): 93-94. (in Chinese))
- [17] 孙斌, 王月萍, 吴天福, 等. 雨水调蓄池中双曲面搅拌机数值计算和工作特性研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(4): 7-10. (SUN Bin, WANG Yueping, WU Tianfu, et al. Study on numerical calculation and flow characteristics of hyperboloid stirrer in rainwater storage tank[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(4): 7-10. (in Chinese))
- [18] 丁哲, 张睿, 陈毓陵, 等. 城市排水泵站水力特性及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 7-14. (DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, et al. Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 7-14. (in Chinese))
- [19] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

(收稿日期: 2024-08-15 编辑: 刘晓艳)