

堆石混凝土重力坝应力变形及稳定分析

郭高贵, 段 炼, 孙永波

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 海内外各类坝体建设工程已大范围使用堆石混凝土筑坝技术, 堆石混凝土坝体的受力及稳定分析关乎坝体安全运行。选取某堆石混凝土重力坝非溢流岸坡坝段, 采用材料力学法对其典型剖面抗滑稳定性进行计算复核。根据复核结果, 采用三维有限元方法对该坝段的变形场及应力场的分布规律进行了深入分析。计算结果表明, 材料力学法仅反映了坝段典型剖面的稳定情况, 有限元法可考虑空间结构变形协调及库盘变形因素影响, 建议结合三维有限元法分析坝体稳定情况。

关键词: 堆石混凝土重力坝; 有限元法; 材料力学法; 抗滑稳定

中图分类号: TV331

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0268-05

Analysis on Stress Deformation and Stability of Rock-fill Concrete Gravity Dam

GUO Gaogui, DUAN Lian, SUN Yongbo

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

Abstract: Rock-fill concrete damming technology has been widely used in various dam construction projects at home and abroad. The analysis on stress and stability of rock-fill concrete dams is crucial for the safe operation of dams. A non-overflow bank slope section of a rock-fill concrete gravity dam is selected, and the anti-sliding stability of its typical profile is calculated and rechecked by using the material mechanics method. Based on the rechecked results, an in-depth analysis on the distribution patterns of deformation and stress fields in this dam section is conducted by using the three-dimensional finite element method. The calculation results indicate that the material mechanics method only reflects the stability of the typical cross-section of the dam section, while the finite element method can consider the influence of spatial structural deformation coordination and reservoir basin deformation factors. It is recommended to combine the three-dimensional finite element method to analyze the stability of the dam body.

Keywords: rock-fill concrete gravity dam; finite element method; material mechanics method; anti-sliding stability

0 引 言

堆石混凝土是在堆积的卵石或者大粒径块石的空隙里填充自密实混凝土组成的混凝土堆石体, 具有水泥用量低、密实度高、施工速度快、造价低廉等优势^[1-2], 堆石混凝土筑坝技术已在国内外广泛使用^[3-6]。通过分析堆石混凝土坝体的内力变化和稳定等特征可对大坝安全监测及坝体安全稳定进行评估, 其中材料力学法是计算抗滑稳定的常见方法, 而有限元软件如 ANSYS 在坝体内力及稳定性分析等方面有广泛的应用^[7-9]。马鸿钰^[10]采用 ANSYS 对二维

堆石混凝土坝体内力及位移等进行了分析; 陶发林^[11]采用三维有限元法研究了横缝对堆石混凝土坝体应力应变的影响; 部分学者对堆石混凝土坝施工期温度应力特征进行了有限元分析^[12-15]; 本文通过材料力学法计算某堆石混凝土重力坝典型断面的抗滑稳定性, 并采用三维有限元对坝体应力变形复核分析。

1 工程概况及计算条件

某水库大坝总库容 707.62 万 m^3 , 水库正常蓄水位为 276.00 m, 设计洪水位为 279.58 m, 校核洪水位 280.26 m, 工程正常防洪设计标准取 50 年重现期洪水, 校核防洪标准取 500 年重现期洪水。坝体结构为堆石混凝土重力坝, 坝顶宽 5.00 m, 坝顶高程 280.30 m, 河床建基面高程 219.00 m, 最大坝高 61.30 m, 坝顶全长 255.00 m, 从左岸至右岸共设 11 个坝段, 其

收稿日期: 2026-06-10

作者简介: 郭高贵(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水运工程设计工作。

通信作者: 段炼(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水运工程设计工作。电子邮箱: duanlian@smedi.com

中 1# ~ 3#、5# ~ 6#、8#~11#坝段为挡水坝段,坝体上游面上部垂直,下部设折坡,折坡点高程为 255.00 m,坡比为 1:0.25。挡水坝段下游坡度为 1:0.90,起坡高程为 274.40 m。

2 材料力学法分析坝基抗滑稳定

对大坝进行计算分析应考虑下列荷载组合:

(1)工况 1(基本组合):正常蓄水位(276.00 m)+下游无水+坝体自重+淤沙压力+浪压力+扬压力;

(2)工况 2(基本组合):设计洪水位($P=2\%$, 279.58 m)+下游无水+淤沙压力+浪压力+扬压力+坝体自重;

(3)工况 3(特殊组合):校核洪水位($P=0.2\%$, 280.26 m)+下游无水+淤沙压力+浪压力+扬压力+坝体自重。

坝基面滑动条件采用刚体极限平衡法,抗滑稳定安全系数计算采用抗剪强度公式(1)或抗剪断强度公式(2):

$$K = \frac{f \sum W}{\sum P} \tag{1}$$

$$K' = \frac{f' \sum W + c' A}{\sum P} \tag{2}$$

式中: K' 为采用抗剪断强度公式计算的抗滑稳定安全系数,基本组合不应小于 3.0,特殊组合不应小于 2.5; K 为采用抗剪强度公式计算的抗滑稳定安全系

数,基本组合不应小于 1.05,特殊组合不应小于 1.00; f' 为坝基岩体和坝身混凝土接触界面处的抗剪断摩擦参数; f 为坝基岩体和坝身混凝土接触界面处的抗剪摩擦参数; c' 为坝体混凝土与坝基面接触面的抗剪断凝聚力,kPa; A 为坝基接触面截面积, m^2 ; $\sum W$ 为所有荷载对坝体滑动面的法向分值,kN; $\sum P$ 为所有荷载对坝体滑动面的切向分值,kN。

计算选取 10 号非溢流坝段。10 号坝段坝基高程向岸坡由 237.40 m 依次逐步过渡到 242.20、247.00、251.80、256.60 m,坝基面宽度由 41.82 m 依次逐步过渡到 36.30、30.78、25.26、20.40 m。计算选取的典型剖面图如图 1 所示。

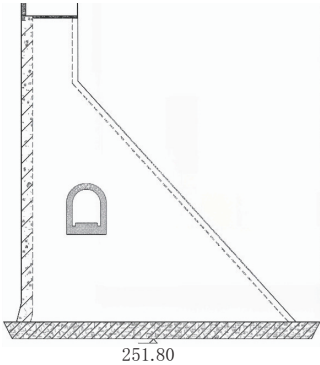


图 1 10 号非溢流坝段典型剖面图(单位:m)

计算假定坝体为均质、各向同性的弹性体,取单宽坝段对上述典型剖面进行抗滑稳定验算。法向作用力以向下为正、向上为负,水平作用力以向下游为正、向上游为负,计算结果如表 1 所示。

表 1 坝基抗滑稳定计算表

单位:kN

坝段	工况 编号	坝基面法向作用力				坝基面切向作用力			法向作用 力之和 $\sum W$	切向作用 力之和 $\sum P$	K'	K
		坝体 自重	垂直 水压力	垂直淤 沙压力	扬压力	水平 水压力	浪压力	水平淤 沙压力				
10 号	1		177.36		-1 723.53	2 872.56			7 651.74	2 931.21	2.79	1.04
	2	9 197.91	205.46	0.00	-1 978.49	3 785.33	58.64	0.00	7 424.87	3 843.97	2.09	0.77
	3		210.80		-2 026.92	3 972.91	19.71		7 381.78	3 992.62	2.01	0.74

3 有限元法

3.1 计算模型及计算条件

如图 2 所示,10 号非溢流坝段有限元数值模型主要网格划分采用六面体八节点等参单元,部分位置为适应局部形状变化采用少量四面体四节点等参单元。坝体采用 20W8F500 堆石混凝土,上下游面防渗体采用 C25 高自密实混凝土,垫层采用 C20 素混凝土垫层。计算范围内坝基岩体由上至下分别为强风化上带砂质板岩、强风化下带砂质板岩、弱风化上带砂质板岩和弱风化下带砂质板岩,如图 3 所示。

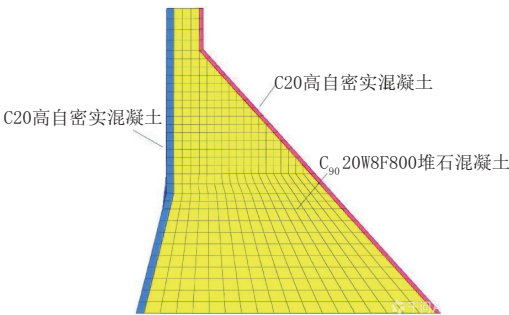


图 2 10 号非溢流坝段材料分区图

材料参数如表 2 所示。

计算考虑上游水压力、基地扬压力及坝体及基

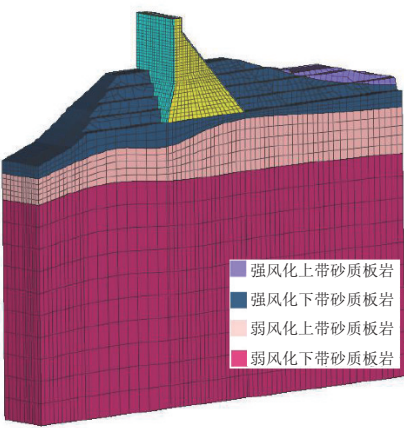


图3 10号坝段有限元模型

表2 有限元计算参数

材料类别	容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
C20素混凝土垫层	2.30×10^3	2.00×10^{10}	0.17
C20高自密实混凝土	2.30×10^3	2.50×10^{10}	0.21
C25高自密实混凝土	2.40×10^3	3.00×10^{10}	0.21
C9020W8F500堆石混凝土	2.50×10^3	1.50×10^{10}	0.23
强风化上带砂质板岩	2.35×10^3	4.00×10^8	0.38
强风化下带砂质板岩	2.40×10^3	8.00×10^8	0.34
弱风化上带砂质板岩	2.55×10^3	2.50×10^9	0.29
弱风化下带砂质板岩	2.60×10^3	4.50×10^9	0.27

岩自重荷载作用,假定各材料均处于线弹性状态,模型底部采用固端约束,坝段两侧施加法向位移约束。数值计算选取正常蓄水位、设计洪水位以及校核洪水位3种工况。

3.2 计算成果

3.2.1 最大主应力分布情况

10号非溢流坝段自河床至岸坡方向呈阶梯状布置,有多个坝基高程不同、坝顶高程和坝面坡比相同的典型剖面,其最大最小主应力分布情况如图4所示。从图中可以看出,3种工况下坝体第一主应力的分布规律相似,扣除最大剖面所在分段坝踵折角处的局部应力集中区域,坝体第一主应力随着水位的增加而增加,随着高程的增加而减小。正常蓄水位工况下,只有坝基高程最低的两个分段坝踵处局部范围内第一主应力为正值,坝体大部分区域第一主应力为负值。设计洪水位和校核洪水位工况下,正值区域有所扩大,各分段的坝踵处第一主应力均为正值。从数值上看,第一主应力的较大值主要分布在最大剖面所在分段的坝踵至坝体中部区域,扣除受应力集中影响的区域,其他区域第一主应力的数值均小于0.5 MPa。

3.2.2 坝基面竖直向正应力分布情况

10号非溢流坝段的坝基面竖直向正应力分布情

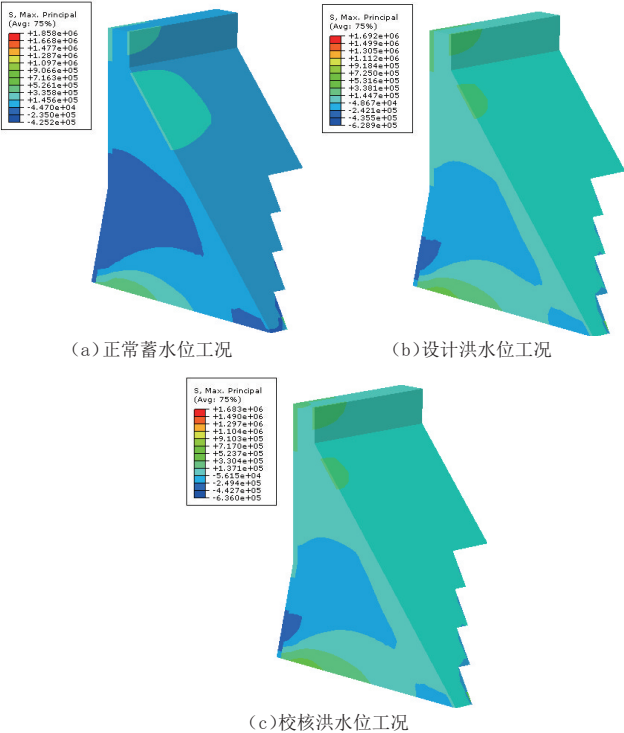


图4 10号坝段最大主应力分布图

况如图5所示。从图中可以看出,3种工况下10号非溢流坝段坝基面大部分处于受压状态,所受压应力数值随高程的增加而减小,整体上随水位的增大而增大。10号非溢流坝段其河床侧的坝体剖面远大于岸坡侧,竖直向正应力的最小值和受拉区均处于岸坡侧的最小剖面所在分段。正常蓄水位工况下,各分段坝趾处的竖向压应力要略小于坝踵处,此时受拉区位于最小剖面所在分段的坝趾处;设计洪水位和校核洪水位工况下,扣除应力集中区域,坝趾处的竖向压应力略大于坝踵处,此时受拉区位于最小剖面所在分段的坝踵处。这一现象的成因与水推力和10号非溢流坝段河床与岸坡侧不对等的基底竖直向应力的共同作用有关。

3.2.3 坝体位移分布情况

10号非溢流坝段的坝体顺河向水平位移及垂直位移分布情况分别如图6、图7所示。从图6和图7可以看出,10号非溢流坝段坝体顺河向水平位移在数值上随着水位的增加而增加,正常蓄水位、设计洪水位以及校核洪水位工况的最大水平位移分别为3.59、5.92 mm和6.10 mm,最大位移发生在靠近河床的方向的下游坝趾处;垂直位移随着水位的增加而略有增加,3种工况下的最大垂直位移分别为10.96、11.29 mm和11.17 mm,最大位移发生在坝顶处。

从图6中可以看出,10号非溢流坝段坝体顺河向水平位移随着坝体高程的增加而减小,主要由于

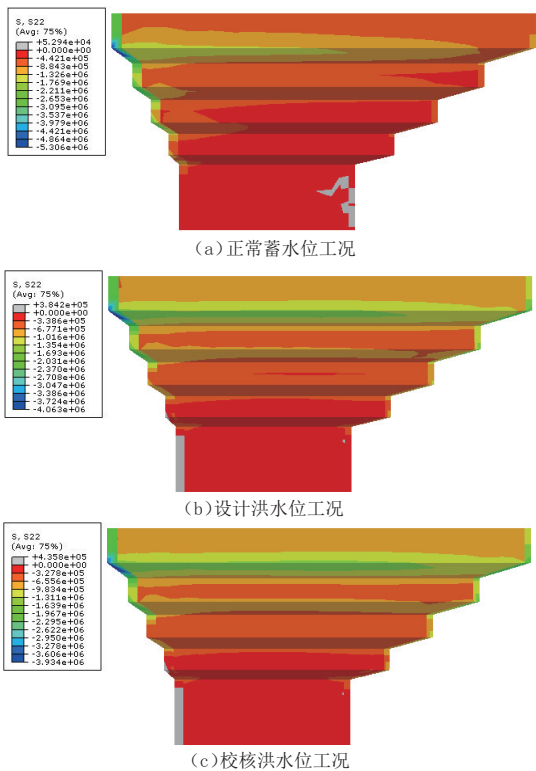


图5 10号非溢流坝段基底法向正应力分布图

基岩较“软”,这一点从较大的坝体垂直位移中可以体现,即在水压和坝体自重的作用下库盘变形较为明显,使得坝基面会在一定程度上游旋转,坝体产生向上游的水平位移,而抵消掉一部分由水压产生的向下游方向的水平位移。从图7可以看出,坝踵处的垂直位移大于坝趾处的垂直位移,坝踵处由于基岩变形导致的向上游水平位移大于坝趾处向上游的水平位移,坝顶处由坝基面旋转产生的向上游水平位移较大,抵消作用较明显,而坝基处受之影响较小,因而出现虽然坝段整体出现向下游的水平位移,但坝踵处小于坝趾处,坝顶处小于坝基处的“反常”现象。

10号非溢流坝段的坝基面垂直位移如图8所示。最大位移发生在靠近河床方向的坝踵处,最小垂直位移发生在靠近岸坡的坝趾处,整体上呈现随着水位的增加而增加的现象。正常蓄水位、设计洪水位以及校核洪水位工况的坝基面最大垂直位移分别为10.81,11.22 mm和11.12 mm,最小垂直位移分别为3.77,5.31 mm和5.44 mm。

3 结 论

本文基于材料力学法对某大坝典型剖面的抗滑稳定性进行了复核,并采用三维有限元方法对其强度及变形场、应力场的分布规律进行了深入分析,得

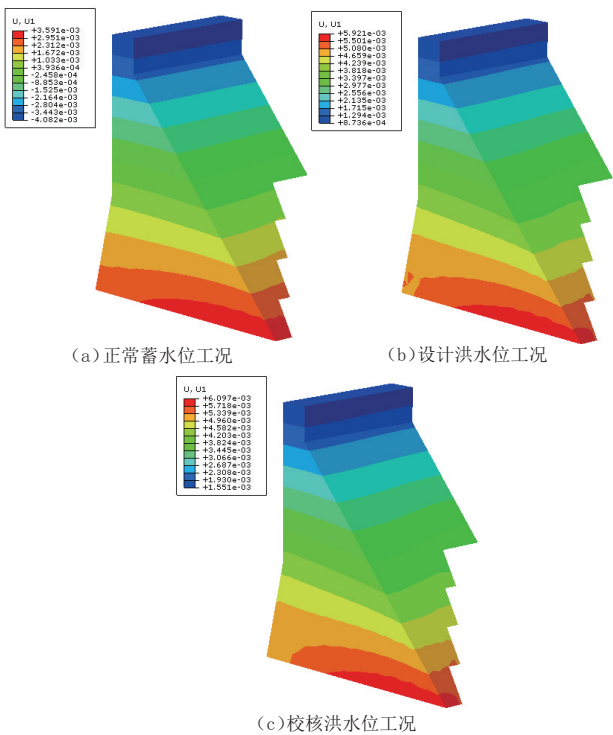


图6 10号非溢流坝段顺河向位移分布图

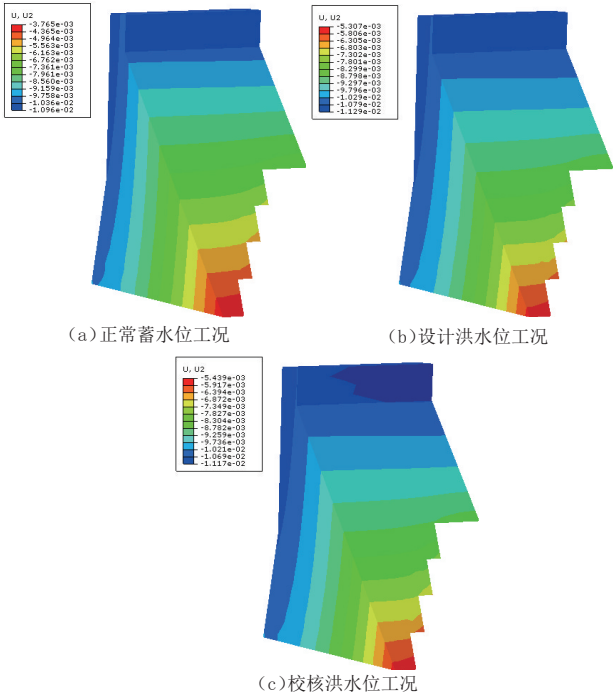


图7 10号非溢流坝段垂直位移分布图

出以下结论:

- (1)根据三维有限元法计算结果,本文工程基岩较“软”,水压和坝体自重的作用下的库盘变形导致坝基面向上游旋转,坝体产生向上游的水平位移,抵消部分由水压产生的向下游方向的水平位移,顺河向水平位移随着坝体高程的增加而减小;
- (2)对于自河床至岸坡方向呈阶梯状布置的坝段,三维有限元法可考虑河床岸坡范围不均匀的基

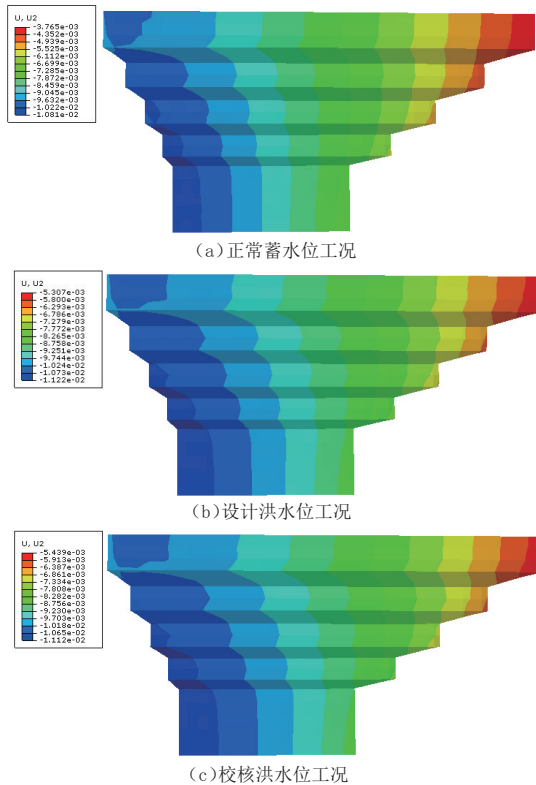


图8 10号非溢流坝段坝面垂直位移分布图

地应力分布,坝基面受拉区的分布与水推力和其河床与岸坡侧不对等的基底竖直向应力的共同作用有关,应注意在剖面最小位置的应力情况;

(3)对于岸坡坝段,坝体剖面变化较大,材料力学法仅选取典型剖面分析,缺乏空间结构变形协调及库盘变形因素的综合分析,建议结合三维有限元法分析坝体稳定情况。

参考文献:

- [1] 安雪晖,金峰,石建军.自密实混凝土充填堆石体试验研究[J].混凝土,2005(1):3-6;42.
- [2] 金峰.水利水电工程中堆石混凝土筑坝关键技术研究[J].水电与抽水蓄能,2025,11(1):4.
- [3] 徐小蓉,金峰,周虎,等.堆石混凝土筑坝技术创新综述[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):1-11.
- [4] 赵应武,李迪光,吴鸿.堆石混凝土筑坝技术在赵家坝水库中的应用[J].海河水利,2025(11):107-112.
- [5] 鲜光伟,蔡鸿昆,张胜勇,等.石粉自密实混凝土在松林水库堆石混凝土大坝工程中的应用研究[J].混凝土,2021(5):141-144;149.
- [6] 胡滨,李小冰.自密实堆石混凝土在清油河水库枢纽工程中的应用[J].地下水,2017,39(5):191-193.
- [7] 王新伟,刘毅乐,贾小强.新发水库重力坝三维有限元仿真分析[J].水科学与工程,2015(1):42-45.
- [8] 李守华.基于ANSYS的重力坝分析[J].城市道桥与防洪,2012(11):158-160.
- [9] 朱一飞,郝哲,杨增涛.ANSYS在大坝数值模拟中的应用[J].岩土力学,2006(6):965-968;972.
- [10] 马鸿钰.基于ANSYS的堆石混凝土重力坝强度及抗滑稳定分析[J].甘肃水利水电技术,2018,54(7):43-47;52.
- [11] 陶发林.打鼓台水库堆石混凝土筑坝技术研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [12] 吴弦谦.堆石混凝土高拱坝的应力应变三维有限元分析[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [13] 刘强,赵厚然,姬广祥,等.高海拔高寒地区堆石混凝土坝温度应力仿真分析与温度监测[J].混凝土,2023(6):26-32;39.
- [14] 程恒,周秋景,娄诗建,等.石坝水库堆石混凝土重力坝施工期工作性态仿真[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(9):1408-1416.
- [15] 徐小蓉,余舜尧,金峰,等.整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度监测与等效均质仿真研究[J].水利学报,2023,54(12):1404-1414.

(上接第267页)

参考文献:

- [1] 樊森.上海市防汛泵站放江污染管控策略[J].城市道桥与防洪,2025(10):162-165.
- [2] 王磊,朱五星,张莹.上海市泵站放江污染控制策略与建议[J].城市道桥与防洪,2025(12):145-150.
- [3] 刘磊.分流制系统泵站放江污染特征研究[J].城市道桥与防洪,2023(2):126-129.
- [4] 宋召凤,钱晓雍,李云辉,等.泵站雨天放江对受纳河道水质的影响分析[J].净水技术,2025,44(增刊1):318-323.
- [5] 戴勇华.市政泵站与河道泵闸稳定河道水质的联合优化调度[J].净水技术,2024,43(7):167-176.
- [6] 谭琼.合流制泵站水安全与水环境“两水平衡”运行对策探讨[J].给水排水,2022,48(1):39-44.
- [7] 上海市水务局.上海市水利控制片水资源调度方案:沪水务[2020]74号[Z].上海:上海市水务局,2020.
- [8] 张庆民,张力元,赵庚润,等.管底沉积物冲刷模型在雨水泵站放江分析中的构建及应用[J].环境科学学报,2026,46(2):304-314.
- [9] 康丽娟,曹勇.连续降雨条件下典型泵站放江污染特征分析[J].水生态学杂志,2019,40(2):20-26.
- [10] 王波.关于雨水泵站排放口污染物削减净化区的探讨[J].水利技术监督,2023(10):115-119.
- [11] 张庆民,赵庚润,刘晨宇.典型系统泵站放江对城市河道水质弹性的影响分析[J].四川环境,2025,44(1):16-23.
- [12] 高丽莎,韩超,陈奕.基于水闸调度的上海市苏州河泵站放江污染消除方案[J].净水技术,2025,44(7):130-138.
- [13] 钱真,高丽莎,丁国川.平原地区城市河湖水质提升技术路径探索[J].水利规划与设计,2026(1):17-22.
- [14] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. Water Research, 1998, 32(8): 2341-2356.
- [15] 车伍,张伟,李俊奇.城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J].中国给水排水,2011,27(14):9-14.
- [16] 唐建国,张悦,梅晓洁.城镇排水系统提质增效的方法与措施[J].给水排水,2019,45(4):30-38.