

大型水上立交工程防淤减淤措施探讨

孙超君¹, 孙 猛², 孙浩晖³, 韩 影¹, 任 轶¹

(1. 江苏省水利科教中心, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200;

3. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要:入海水道大运河立交工程采用“上槽下洞”型式,经工程观测及洞身探查发现地涵管理范围内出现淤积。通过分析洞身淤积形成的原因,针对入海水道立交工程特性、涵洞工程结构水力特性和上游来水偏少这3类淤积产生的主要原因,提出河道滩地迎水侧及滩面防护、河坡防护、工作闸门设置在下游出口位置等工程防淤减淤措施,以及大水头差下开闸冲淤、轮流开启地涵闸门运行、及时开展机械清淤等非工程措施,辅以数值模型对工作闸门设置位置、轮流开启地涵闸门运行等减淤措施的可行性、合理性进行探讨。通过研究水上立交工程淤积的共性规律和防淤减淤途径,为类似工程日常管理提供指导和借鉴。

关键词:工程淤积; 闸门设置; 河坡防护; 数值模型; 开闸冲淤

中图分类号:TV851 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)04-0063-0006

Discussion on preventing and reducing sedimentation measures for large scale aqueduct interchange projects

SUN Chaojun¹, SUN Meng², SUN Haohui³, HAN Ying¹, REN Yi¹

(1. *Jiangsu Water Conservancy Science and Education Center, Nanjing 210029, China;*

2. General Irrigation Canal Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223200, China;

3. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Grand Canal Interchange Project on the Inlet Waterway adopts the “upper trough and lower culvert” structure. Through engineering observation and culvert exploration, sedimentation within the culvert management area is identified. After analysis of the causes of culvert sedimentation, engineering measures for preventing and reducing sedimentation are proposed in view of the three main contributing factors: the characteristics of the inlet waterway interchange project, the hydraulic characteristics of the culvert structure, and insufficient upstream inflow. These engineering measures include water-facing side and beach surface protection of river floodplains, river slope protection, and installation of service gates at the downstream outlet. Corresponding non-engineering measures are also put forward, including gate opening for sediment flushing under large water head differences, alternate operation of culvert gates, and timely mechanical dredging. Numerical models are employed to investigate the feasibility and rationality of key sediment reduction measures such as the layout of service gates and alternate operation of culvert gates. Through research on the common characteristics of sedimentation and approaches for sediment prevention and reduction in water interchange projects, guidance and reference are provided for the daily management of similar projects.

Key words: engineering siltation; gate arrangement; river slope protection; numerical model; gate opening for sediment flushing

收稿日期: 2025-12-04

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022019)

作者简介: 孙超君(1988—),女,高级工程师,硕士,主要从事水利工程管理相关工作。E-mail:490963339@qq.com

1 概 况

入海水道大运河立交地涵位于淮安市淮安区南郊,是淮河入海水道与京杭大运河立交工程,满足淮河入海水道泄洪和京杭运河航运互不影响的双重需求。立交工程于2001年11月开工,2003年10月通过竣工验收。大运河方向为渡槽,槽宽80 m,长125.7 m;入水道方向为15孔涵洞,涵洞顺水流方向长约108.6 m。单孔涵洞宽6.8 m,高8.0 m,总宽122.48 m,工作闸门为潜孔式平面定轮钢闸门,设计泄洪流量 $2\,270\text{ m}^3/\text{s}$ ^[1]。

2 工程淤积现状

2.1 上下游河床淤积情况

工程2005—2021年引河河床累计冲淤量变化情况如图1所示。上游河床2008—2021年累计淤

积量逐年增大,总体偏向左岸,呈现从上游向下游逐渐减少的趋势;下游河床2016—2021年累计淤积量逐渐增大,下游淤积总体分布较均匀,最大淤积厚度约1.3 m,呈现从上游向下游逐渐增加的趋势。大运河立交工程上、下游均存在淤积现象,河道观测设施的上、下游引河观测范围(距闸中心线向外220 m)内上游淤积量为 3.9万 m^3 ,下游淤积量为 2.4万 m^3 。

2.2 洞身段淤积情况

采用水下无人潜航器搭载水下光学摄像头、水下图像声呐、水下断面声呐等多种手段,对大运河立交地涵开展洞身段水下检查。检查结果显示,2#涵洞内部总淤积量约 $1\,088.68\text{ m}^3$,占比涵洞体积20.72%;6#涵洞内部总淤积量约 $1\,078.97\text{ m}^3$,占比涵洞体积20.53%;9#涵洞内部总淤积量约 $1\,867.57\text{ m}^3$,占比涵洞体积35.54%;13#涵洞内部总淤积量约

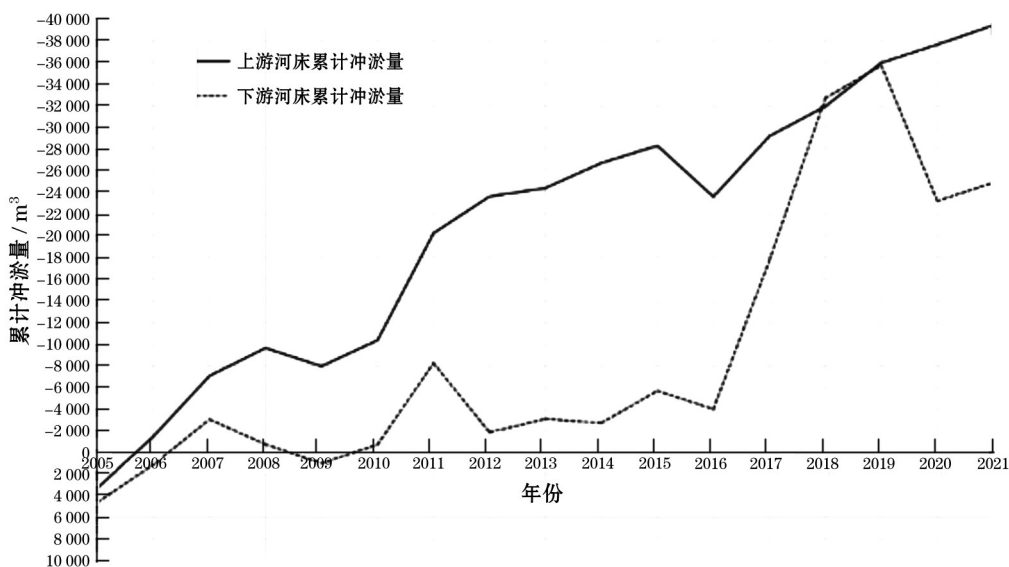


图1 大运河立交工程河床累计冲淤量变化趋势

$1\,106.82\text{ m}^3$,占比涵洞体积21.06%;15#涵洞内部总淤积量约 $1\,103.53\text{ m}^3$,占比涵洞体积21.00%。被检查的涵洞底部均存在一定厚度的淤积,以9#涵洞为例(图2),其淤积厚度介于1.76~3.90 m之间,平均淤积厚度2.83 m,从上游至下游淤积厚度呈递增趋势,在上游闸门后桩号0+003 m附近淤积厚度最小,在下游出口段桩号0+093 m处淤积厚度达到最大^[2]。

3 工程淤积原因分析

入海水道大运河立交地涵河床及洞身段淤积

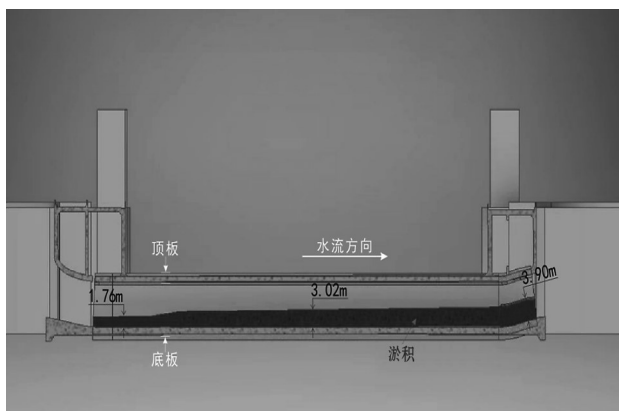


图2 大运河立交9#涵洞淤积与三维模型

成因主要包括以下几点:

3.1 受入海水道立交工程特性影响

入海水道大运河立交工程上游区域地形较复杂,非行洪期入海水道内水位4.0 m左右,其右侧苏北灌溉总渠常年维持9.5 m左右高水位,其左侧为淮安渠北地区低位涝水,涝水主要通过地方排涝泵站抽排进入海水道再东排入海。入海水道立交工程上游主泓偏右侧布置,渠北涝水进入入海水道后的泓道偏左侧布置,两泓河道中间为大片滩地,且滩地被水土开发利用进行种植。左侧排涝渠偏泓来流含沙量较高,水流裹挟泥沙,且来流量相对入海水道主泓较低,导致河流携带泥沙极易在上游河道沉积。目前入海水道上游与左岸一侧的排涝渠交汇处有一处明显洲滩,该洲滩即为工程建成运行以来渠北涝水水流携带泥沙、河道中滩地及堤坡的水土流失、立交地涵上游局部的复杂地形和水流交汇等多种因素作用下形成。另外,淮河流域的暴雨和洪水多发生在4—10月,暴雨历时短、强度大,会携带大量泥沙进入河道,泄洪后由于水流速度降低,上游河道中的大量泥沙会随着河水携带进入入海水道立交地涵上游引河及涵洞并沉积下来,从而导致上游引河及洞身淤积。

3.2 受涵洞工程结构水力特性影响

由于水上立交改变了河道原有的连续形态,下部地涵地势较低,洞身底板高程一般低于进出水两侧底板高程,进出水段底板一般采取一定比例坡度与涵洞洞身底板相连接,涵洞顺水流方向底板呈两边高中间低^[3]。由于涵洞自身的这个结构水力特点,水流携带的泥沙流经涵洞的过程中比较容易沉积在涵洞段底板从而导致涵洞淤积,尤其是洞身较长的涵洞,淤积情况更为明显。

3.3 受流域上游来水偏少影响

入海水道大运河立交工程自建成以来,除常年担负排涝运行外,仅经历了2次大流量高水位泄洪运行,分别为2003年下泄洪水43.8亿 m^3 ,最大泄流量1 870 m^3/s ;2007年下泄洪水34.2亿 m^3 ,最大泄洪流量达2 080 m^3/s 。2010年、2017年、2018年、2020年、2021年进行了短历时的150 m^3/s 左右的不漫河道中滩地的小流量泄洪,其余年份上游河道内没有较大流量来水。立交地涵受到上游来流条件的制约,多年没有大流量行洪,原本可以通过上游来水冲走的淤土长期积在上下游河道和涵洞内部。地涵工程水力坡降小,当遇到小流量及枯水季节,流速一般小于0.5~1.0 m/s ,水动力条件不足易导致水流中的

泥沙沉降、淤积和板结,从而加剧涵洞淤积,对涵洞工程正常运行产生一定影响。

4 防淤减淤措施

通过对入海水道大运河立交地涵河床断面及洞身段淤积原因分析,工程因受入海水道立交工程特性、涵洞工程结构水力特性和流域上游来水偏少等三方面因素影响,易产生淤积。涵洞淤积不仅会阻碍水流,还可能降低江河的泄洪能力,当泥沙淤积到一定程度,将会影响涵洞的正常运行和功能发挥。因此,及时清除工程上下游引河及涵洞内的淤积对于保持水流畅通、保障工程安全运行和防洪效益正常发挥至关重要。基于入海水道立交涵洞工程淤积情况调查和淤积原因分析,对防淤减淤措施进行探讨和研究。

4.1 工程措施

4.1.1 河道滩地迎水侧及滩面防护

淤泥质泥沙容易活动,遇到大风大浪时,河道内滩地泥沙极易随水流进入河道,使得河口内泥沙淤积严重。控制滩面上泥沙起动,使泥沙不出滩,由于入海水道大运河立交特殊地形,可结合河口治理与保护措施,在上游滩地迎水侧种植耐淹性植物,在滩地上划定严禁开发利用范围、保护性开发利用范围等,固定河口浅滩及滩面泥沙,减少泥沙的活动性,降低水土流失,在进行河口生态保护的同时,有效抑制后续沙源补给,达到减轻河道淤积的目的。

4.1.2 河坡防护

河道两侧堤坡防护不到位产生的水土流失是河道泥沙的主要来源之一,为此地涵工程上下游河道一定范围内一般都会采取工程措施对迎水面堤坡进行防护,尤其是水位频繁变化区域。建议采用混凝土、浆砌石、预制块、格宾石笼等防护形式进行迎水侧坡面防护,设计洪水位以上的其他区域可采用草皮等生态护坡进行防护。如受工程经费投入等因素影响无法实施坡面硬质防护,也可考虑在迎水面河坡种植耐淹类植物进行防护。另外,为降低局部强降雨形成的集中水流对河坡的冲刷,减少水土流失,也可以在堤坡防护的基础上,结合现场情况在堤坡合理设置纵横向硬质排水沟。

4.1.3 科学设置工作闸门位置

工作闸门布置于上游或下游可能对地涵进口和出口处水流流态产生影响,进而影响泥沙淤积情况,为比较其差异,建立三维水沙两相流数值模型

开展研究。以某次实测行洪过流量 28.2 m³/s 为例,在开启 2 孔闸门条件下,将工作闸门分别设置在中间孔的上游和下游,通过对比水动力和泥沙淤积结果,分析工作闸门位置变化对泥沙淤积的影响。

4.1.3.1 数值模型建立

(1)控制方程

工程平面尺度较大,依据相似性原理对建模范围实施科学概化,建立计算区域离散为 100 万个网格量级、缩窄为 3 孔的概化模型,控制方程包括连续性方程和动量方程^[3]。连续性方程和动量方程计算式分别为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \tag{2}$$

式中: ρ 为流体的密度; p 为包含湍动能的静压力; u_i 和 u_j 为流体的速度在 i 和 j 方向的分量; x_i 和 x_j 为 i 和 j 方向的空间坐标; t 为时间; μ_{eff} 为流体运动的有效黏度系数; g_i 为重力加速度在 i 方向的分量。

采用 Mixture 多相流模型通过滑移速度对固体颗粒进行描述,其控制方程计算式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] +$$

$$\rho_m \vec{g} + \vec{F} - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \tag{3}$$

式中: ρ_m 为混合物的密度; ρ_k 为第 k 相的密度; $\vec{v}_m$ 为质量平均速度; α_k 为第 k 相的体积分数; n 为相数; μ_m 为混合物的黏度系数; μ_k 为第 k 相的黏度系数; $\vec{F}$ 为体积力; $\vec{v}_{dr,k}$ 为第 k 相的漂移速度; $\vec{g}$ 为重力加速度。

(2)边界条件及模拟工况

工程平面尺度较大,若全尺度建模将显著增加计算资源需求和模型调试难度,研究主要目的是探索工程运行时的泥沙淤积规律,依据相似性原理对建模范围实施科学概化,建立缩窄为 3 孔的概化模型。采用标准壁面函数法进行壁面边界的处理,设置为无滑移壁面,粗糙高度取 0.05 m,粗糙常数为 0.6。模拟工况均为稳态恒定流模型,闸门状态设置全开和全关两种状态,计算工程边界条件设置如表 1 所示。

(3)数值模型验证

采用各计算工况下地涵中间位置的断面平均流速和理论平均流速进行比较,验证模型可靠性,涵洞中心断面面积加权平均流速与理论值比较结果见表 2。模型计算结果与理论断面平均流速总体符合较好,工况偏差百分比均未超过 5%,且能够反映不同工况的变化趋势,可用于研究和分析不同工况下的泥沙淤积情况。

表 1 计算工况及边界条件设置

序号	工况表	工况 编号	过流流量/ (m³/s)	入口边界		出口边界	壁面边界	水面边界
				流速/(m/s)	泥沙体积分数			
1	设计排涝	PL-1	31.8	0.0528	7.55×10 ⁻⁵	自由出流	无滑移壁面， 粗糙高度0.05 m 粗糙常数0.6	对称边界
2		PL-2						
3	实测行洪	SCXH-1	28.2	0.0492	7.55×10 ⁻⁵			
4		SCXH-2						
5	低流量	DL-1	5.0	0.0154	7.55×10 ⁻⁵			
6		DL-2						

表 2 各工况涵洞中心断面面积加权平均流速与理论值比较

工况表	工况编号	涵洞中心断面加权平均流速/(m/s)	理论值/(m/s)	绝对偏差	偏差百分比/%
设计排涝	PL-1	0.295	0.295	0.000	0.0
	PL-2	0.590	0.590	0.000	0.0
实测行洪	SCXH-1	0.272	0.262	0.010	3.8
	SCXH-2	0.262	0.262	0.000	0.0

4.1.3.2 数值模拟

数值模拟实测行洪时涵洞内淤积情况见表3。对比SCXH-1和SCXH-2工况结果可知,同样都是开启2孔过流,关闸地涵的闸门在上游和下游关闭对泥沙淤积量产生显著影响,闸门在上游关闭时产生的泥沙淤积量更多,约是闸门在下游关闭工况的2倍。

分析可知,实测行洪过流量 $28.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下,同样都是开启2孔过流,中间孔闸门在上游关闭与闸门在下游关闭相比产生的泥沙淤积量更多,约是闸门在下游关闭工况的2倍。从减少泥沙淤积的角度,地涵工作闸门设置在下游出口位置更优。

4.2 非工程措施

关于非工程减少淤积措施,相关学者提出了不

表3 实测行洪时泥沙淤积结果

单位: m^3

工况编号	闸门开启情况	全部计算区域 净泥沙体积	涵洞内净泥沙 体积(1#)	涵洞内净泥沙 体积(2#)	涵洞内净泥沙 体积(3#)	除涵洞外计算区 域净泥沙体积
SCXH-1	1#和3#地涵闸门开启过水, 2#地涵闸门在下游出口处关闭	35.868	0.958	6.377	0.852	27.681
SCXH-2	1#和3#地涵闸门开启过水, 2#地涵闸门在上游出口处关闭	66.863	3.392	23.807	3.315	36.352

同的整治思路^[4-7],其中应用最广的是水力冲淤。通过科学的闸门运行管理,可以利用有限的水源达到较为理想的冲淤效果。

4.2.1 大水头差下开闸冲淤

河流中泥沙以悬移质为主,泥沙随水流移动主要依靠水流的能量转换,泥沙启动流速^[8]计算式为

$$U_c = \left(\frac{h}{z} \right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 0.000000605 \frac{10 + h}{d^{0.72}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

泥沙扬动流速计算式为

$$U_s = \frac{15.1}{z} \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \omega \quad (5)$$

式中: ρ 为水体密度, kg/m^3 ; ρ_s 为粒子密度, kg/m^3 ; d 为粒子直径,m; h 为水深,m; ω 为泥沙颗粒沉速, m/s ; z 为悬浮指标,泥沙粒径对其影响较大。

由此可知,在确保立交地涵工程安全的前提下,管理单位可利用闸上下游允许的最大水位差,按照操作规程要求启闭工作闸门,通过势能增加水力动能冲淤,加大泥沙启动流速,以提高泥沙扬动流速,从而改善冲淤效果。实践证明此方法行之有效,如1996年方塘河闸进行了带水位差开闸的冲淤试验,冲淤结果为:8月23—25日冲淤3次,冲淤历时9 h,排水216.54万 m^3 ,冲淤量4.851万 m^3 ;11月19—20日冲淤2次,冲淤历时6 h,排水228.25万 m^3 ,冲淤量4.72万 m^3 ^[8]。

4.2.2 轮流开启地涵闸门

在工程实际运行时,通常采用单孔或多孔对称开启,以避免非对称开启导致进口前水流发生回

流、旋涡等不良流态^[9]。为降低入海水道立交地涵河床断面及洞身段泥沙淤积速度,减少泥沙淤积量,通过科学的闸门运行管理和调度对涵洞内泥沙淤积进行冲刷,确保淤积土不板结。

运用上述文中建立的三维水沙两相流数值模型,针对设计排涝、低流量工况下不同孔数调度对泥沙淤积的影响展开研究,统计全部计算区域内和地涵内的净泥沙淤积量,其统计方程为

$$V_n = \sum \alpha_i v_i \quad (6)$$

式中: V_n 为净泥沙淤积量, m^3 ; α_i 为计算单元的泥沙体积分数; v_i 为计算单元的体积, m^3 。

数值模拟设计排涝、低流量时涵洞内淤积情况见表4。对比低流量DL-1和设计排涝PL-1工况结果可知,低流量DL-1工况入流流量约为设计排涝PL-1工况的1/6,但泥沙淤积量为设计排涝PL-1工况的37倍。

由此可知,地涵发生泥沙淤积后进行行洪和排涝运行,可将淤积的泥沙有效冲向下游。入海水道大运河立交地涵为多孔闸,上游径流量常年较小,正常全部开启闸门运行,上游水位迅速回落,上下游的大水位差持续时间短。结合工程实际情况,在安全允许的范围内,定期轮流开启1~2扇地涵闸门,利用水流冲刷涵洞内部淤积的泥沙,节约冲淤水源,延长高速冲淤时间,提高冲淤效果。

4.2.3 机械清淤

在日常管理过程中,根据工程管理安全监测的要求,定期加强立交地涵工程上下游引河河道断面

表4 设计排涝、低流量时泥沙淤积结果

单位:m³

序号	工况编号	闸门开启情况	全部计算区域 净泥沙体积	涵洞内净泥沙 体积(1#)	涵洞内净泥沙 体积(2#)	涵洞内净泥沙 体积(3#)	除涵洞外计算区 域净泥沙体积
1	PL-1	地涵两孔对称开启,1#、 3#孔正常过流,2#孔关闭	29.733	0.759	5.587	0.763	22.624
2	PL-2	地涵仅中间孔开启,1#、 3#孔关闭,2#孔正常过流	62.813	13.876	1.787	12.882	34.268
3	DL-1	地涵两孔对称开启,1#、 3#孔正常过流,2#孔关闭	1 113.513	285.816	285.180	288.120	254.397
4	DL-2	地涵仅中间孔开启,1#、 3#孔关闭,2#孔正常过流	936.715	235.527	272.608	238.527	190.053

观测,必要时可增加河道断面观测频次,地涵洞身段利用无人船加强淤积状况探查。当发现上下游引河河道断面累计泥沙淤积量较大,达到设计泄水断面的30%及以上,或者探查发现洞身泥沙淤积严重可能影响工程安全泄流时,可采用挖泥船结合机械清淤、泥浆泵搅动泥沙抽排等方式对上下游引河进行清淤。洞身段可采取分别放置工作闸门和检修闸门,抽排洞内水后进行人工清淤或结合机械清淤。上下游引河及洞身段如果泥沙淤积非常严重,具备条件后可考虑在地涵上下游合适区域设置施工围堰,排水后对引河和洞身段区域进行全面清淤。

5 结 语

本文通过总结入海水道大运河立交地涵近年来的泥沙淤积观测及洞身泥沙淤积探查工作情况,分析洞身泥沙淤积形成的原因,针对入海水道立交工程特性、涵洞工程结构水力特性和上游来水偏少这3类泥沙淤积产生的主要原因,提出河道滩地迎水侧及滩面防护、河坡防护、机械清淤等措施。同时,基于流体力学原理、三维水沙两相流数值模型等方法,深入研究了工作闸门设置在下游出口位置等工程措施及大水头差下开闸冲淤、轮流开启地涵闸门运行等非工程措施的可行性和合理性,为

水上立交工程防淤减淤工作提供新的方法路径,为工程安全运行提供保障。

参考文献:

[1] 宋乃聪. 入海水道立交地涵的断面设计[J]. 江苏水利, 2001(3):27-28.

[2] 孙超君,孙猛,董兆华,等. 涵洞工程洞身段安全诊断技术研究[J]. 江苏水利,2023(10):67-72.

[3] 傅朝康,邬旭东,戴秋华. 废黄河立交工程防冲减淤模型试验及数值模拟[J]. 人民长江,2020,51(7):174-180.

[4] 李大鸣,范玉,陈海舟. 河口闸下水动力与泥沙清淤问题的研究[J]. 天津大学学报,2005,38(9):817-823.

[5] 郑华美,王均明. 苏北沿海挡潮闸闸下水道淤积的因素和影响机制分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2005(3):73-76.

[6] 张娟,王科亮,夏辉,等. 灌溉总渠河口段挡沙闸选址及优化数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报,2025(6):66-74.

[7] 王予匀,顾青. 六垛南闸下游引河减淤措施探讨与研究[J]. 水利建设与管理,2021,41(3):9-14.

[8] 庄杨,杨超,张兴,等. 基于泥沙动力学分析水利工程调度对改善河道淤积的影响[J]. 江苏水利,2021(10):56-58.

[9] 孙洪滨,黄敏,曹恒军,等. 沿海挡潮闸冲淤调度运用关键技术研究[J]. 水利水电技术,2015(3):97-100.