

doi:10.11988/ckyyb.20260066

2026, 43(6): 190–195, 203

基于冲刷-结构耦合的堤防抗冲敏感性分析

姜 浩

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海 200080)

摘 要:长江三角洲前缘的典型平原感潮河网地区,河道水系密布、通航频繁,堤防工程的安全受航道运行、泥面冲刷影响较大。为研究通航感潮河道堤防结构抗冲敏感性及其变化规律,选取黄浦江上游某通航支流堤防实际运行条件计算出理论冲刷深度,并以该值为参考,通过有限元模型分析重力式堤防、桩基式堤防在不同结构尺度与冲刷深度耦合下的位移响应,得到不同堤防结构型式的抗冲敏感性及其变化趋势。研究表明:重力式堤防的抗冲敏感性主要受底板宽度和埋置深度影响,当底板宽度 <4.0 m或埋置深度 <2.0 m时,墙前冲刷 $0.5\sim 1.0$ m即出现墙顶位移速率陡增;当底板宽度 >5.0 m或埋置深度 >2.0 m后,继续增大尺度对抗冲性能的增益显著降低。桩基式堤防的抗冲敏感性主要受桩基长度控制,当桩基长度 <15.0 m时,冲刷 $1.0\sim 1.5$ m后位移增长速率明显加快;桩基长度 >15.0 m后,增加桩基长度对提高抗冲性能的效果减弱。根据研究结果提出堤防结构抗冲经济尺度,并确定不同冲刷条件下的结构适应性,为通航感潮河道堤防结构设计和运行管理提供科学依据。

关键词:堤防工程;通航感潮河道;冲刷深度;抗冲敏感性

中图分类号:TV87

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)06-0190-06

Anti-scour Sensitivity of Levees Based on Scour-Structure Coupling

JIANG Hao

(Shanghai Embankment, Pump and Gate Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: [Objective] In typical plain tidal river networks at the Yangtze River Delta front, dense waterways and frequent navigation significantly impact levee safety through channel operations and bed scour. Focusing on two typical levee structural types along the Huangpu River and its main tributaries, this study investigates the scour response under the coupling of structural dimensions and scour depth. The findings aim to provide a scientific basis for accurately identifying high-risk bank sections, optimizing bank protection structures, and enhancing the targeted management of levee engineering in tidal navigable rivers. [Methods] To examine the scour resistance sensitivity and its variation of levee structures in tidal navigable rivers, the theoretical scour depth was calculated based on the actual operating conditions of a navigable tributary in the upper Huangpu River. Using these calculated values as a reference, finite element models were developed to analyze the displacement responses of gravity-type and pile-founded levees under coupled conditions of varying structural dimensions and scour depths. This approach allowed for the determination of the scour resistance sensitivity and evolutionary trends for different levee structural types. [Results] The scour resistance sensitivity of gravity-type levees is primarily influenced by the base slab width and embedment depth. When the base slab width is <4 m or the embedment depth is <2 m, a toe scour $0.5\sim 1.0$ m triggers a sharp increase in the displacement rate at the wall top. Conversely, when the base slab width exceeds 5 m or the embedment depth exceeds 2 m, further increasing the dimensions yields significantly diminishing returns in scour resistance. The scour resistance sensitivity of pile-founded levees is mainly governed by the pile length. When the pile length is <15 m, the displacement growth rate accelerates markedly once the scour depth $1.0\sim 1.5$ m. Beyond a pile length of 15 m, the effectiveness of increasing pile length to enhance scour resistance weakens. [Conclusion] (1) The sensitivity of different structural types to toe scour must be fully considered during the selec-

收稿日期:2026-01-29;修回日期:2026-04-18;接受日期:2026-05-21

作者简介:姜 浩(1981-),男,内蒙古通辽人,高级工程师,硕士,主要从事水利工程建设与管理及城市防洪减灾研究。E-mail:80781405@qq.com

tion and sizing of levee structures in tidal navigable rivers. Under the given typical boundary conditions, the scour resistance sensitivity increases with the base slab width, embedment depth, and pile length. However, beyond certain thresholds, the marginal gain in sensitivity decreases, making it economically inefficient to further improve scour resistance solely by enlarging structural dimensions. Instead, altering the structural type or controlling the scour depth is recommended to enhance levee safety. (2) For the design of gravity-type levees, it is advisable to maintain a base slab width of ≥ 4 m and an embedment depth of ≥ 3 m. If the anticipated scour depth exceeds 1 m, gravity-type structures are not recommended. For existing gravity levees, the impact of scour should be mitigated through strengthened vessel traffic management and the installation of protective structures. (3) For the design of pile-founded levees, the pile length should be controlled at ≥ 15 m. When the anticipated scour depth reaches 1 m, measures such as enhanced vessel traffic management and protective structures should be implemented to reduce scour impacts. The proposed structural dimensions and structural adaptability under varying scour conditions provide a scientific basis for the design and management of levees in tidal navigable rivers.

Key words: embankment engineering; navigable tidal rivers; scour depth; scour resistance sensitivity

0 引 言

黄浦江及其主要支流位于长江三角洲前缘的典型平原感潮河网地区,作为太湖流域的主要行洪防洪通道和重要内河航道,通航功能与防洪安全相互影响、制约。由于用地条件限制等原因,黄浦江沿线多采用墙式堤防,其安全性对墙前冲刷较为敏感。对黄浦江干支流沿线 10 余年堤防出险情况、原因和结构型式进行梳理统计,出险区域分布见图 1,出险情况统计和分析见表 1 和表 2。由表 1 可知,在冲刷引发的堤防险情中,重力式结构约占 65%,桩基式结构约占 35%,表明不同结构类型在冲刷作用下的安全性存在差异。由表 2 可以看出,由墙前冲刷导致的堤防失稳、开裂等险情约占全部出险数量的 53%,其中 60%是由船舶通航造成的冲刷。

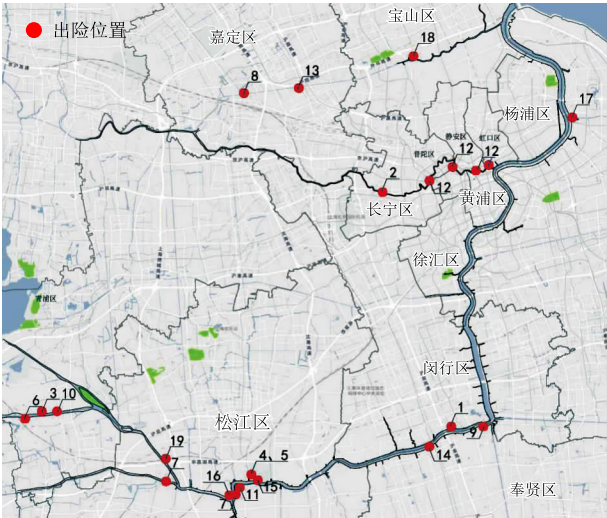


图 1 黄浦江堤防出险位置分布示意图
Fig.1 Distribution of failure points location of Huangpu River levee

表 1 黄浦江沿线工程的险情汇总
Table 1 Summary of Huangpu River levee failures

出险位置编号	年份	长度/m	险情	原因	结构型式	墙前冲刷深度/m
1	2012	140	倾斜、沉降、错位	通航船舶冲刷	桩基式	约 0.90
2	2012	220	渗水	其他(老旧)	桩基式	—
3	2012	118	倾斜、沉降、错位	冲刷、排水不畅	重力式	约 0.5
4	2012	410	坍塌	水闸冲刷	重力式	约 2.0
5	2013	88	沉降、开裂	通航船舶冲刷	重力式	约 0.7
6	2013	1 383	倾斜、错位、沉降	通航船舶冲刷	重力式、桩基式	约 0.5
7	2016	307	倾斜、断裂	通航船舶冲刷	重力式	1.0~2.0
8	2016	84	塌陷、沉降	其他(防渗失效)	重力式	—
9	2017	27	坍塌、掏空	其他(防渗失效)	桩基式	—
10	2017	84	倾斜	冲刷	桩基式	0.8~1.5
11	2018	307	管涌	其他(防渗失效)	重力式	—
12	2019	554	渗漏	其他(防渗失效)	重力式	—
13	2019	776	倾斜、塌陷	其他(堆载)	重力式	—
14	2021	3 712	渗漏	其他(防渗失效)	重力式、桩基式	—
15	2021	284	渗漏	其他(老化)	重力式	—
16	2021	92	渗漏	其他(老化)	重力式	—
17	2023	约 100	倾斜、位移	水闸冲刷	桩基式	约 2.7
18	2024	336	沉降	通航船舶冲刷	重力式	约 0.9
19	2024	128	倾斜、开裂、沉降	通航船舶冲刷	桩基式	0.5~1.5

表2 堤防险情原因占比

Table 2 Proportional distribution of the causes of levee failure

堤防险情原因	通航船舶冲刷	水闸、拍门等冲刷	其他
占比/%	32	21	47

针对通航感潮河道墙前冲刷问题,相关文献^[1-3]研究了近岸船行波波要素和护岸基础防护深度等计算方法,并对其进行了试验验证,同时探讨了堤防边坡在船行波作用下的破坏过程和范围,提出了相应的防护措施和相对经济、稳定的设计断面。但是,现有研究仍存在短板,如文献[4]—文献[7]探讨了船行波波要素及护岸基础防护深度,研究手段仅停留在经验公式推导验证和防护研究层面,缺乏对堤防整体尺度(基础类型、尺寸)与冲刷深度之间的耦合关系开展量化建模和验证的系统性研究,且相关研究成果也缺少长期实测工程实践数据作为支撑。

本文针对黄浦江及其主要支流2种典型堤防结构型式,开展堤防结构尺度与冲刷深度耦合下的冲刷响应研究,为准确识别风险岸段、优化护岸结构、提高通航感潮河道堤防工程建设与管理的针对性与科学性提供依据。

1 研究方法

本文通过有限元数值计算开展堤防结构尺度与冲刷深度耦合下抗冲敏感性分析。首先通过理论计算得到黄浦江上游典型航道条件下的墙前冲刷深度,并以此为基础,分别针对重力式堤防与桩基式堤防,通过调整堤防结构尺度和冲刷深度,进行堤防结构位移计算,从而判断不同结构形式下的冲刷敏感点及其变化规律。

1.1 理论冲刷深度确定

在既有感潮河网地区冲刷研究成果^[8-11]的基础上,综合考虑了通航船型(300~500 t级为主)、船速范围(2.5~4.0 m/s)、航道水深、河道宽度、底床粒径及船舶外形参数等因素,根据《堤防设计规范》(GB 50286—2013)^[12]、《内河航道工程设计标准》(DG/TJ08-2116—2020)^[13]和相关研究,进行墙前冲刷深度计算,主要计算式如下:

(1) 近岸处船行波波峰值计算式为

$$H_c^1 = \beta_1 H \left(\frac{S}{H} \right)^{-0.33} \left(\frac{V}{\sqrt{gH}} \right)^{2.67} \quad (1)$$

式中: H_c^1 为护岸近岸处的船行波波峰值(m); β_1 为计算波峰值时与船型有关的系数; S 为护岸坡脚与

船舷的距离(m); H 为航道水深(m); V 为船舶航速(m/s); g 为重力加速度(m/s²)。

(2) 设计船行波在岸坡上的爬高计算式为

$$R_u = R_0 K_\Delta K_\theta \quad (2)$$

其中,

$$R_0 = 0.4T\sqrt{gH_c}\tan\beta \quad (3)$$

式中: R_u 为船行波爬高(m); R_0 为当船行波传播角 $\theta \leq 65^\circ$ 的爬高(m); K_Δ 为岸坡糙率修正系数; K_θ 为船行波传播角修正系数,当 $\theta \leq 65^\circ$,可按 $K_\theta = \cos(\theta - 10^\circ)$ 取值; T 为船行波周期(s); H_c 为岸坡坡脚处的船行波波高(m); β 为岸坡坡脚($^\circ$)。

(3) 船行波对护岸冲刷深度计算式为

$$h_s = H_0 [(U_{cp}/U_c)^n - 1] \quad (4)$$

其中,

$$U_{cp} = U \cdot 2\eta/(1 + \eta) \quad (5)$$

式中: h_s 为局部冲刷深度(m); H_0 为冲刷处的水深(m); U_{cp} 为近岸垂线平均流速(m/s); U_c 为泥沙的启动流速(m/s),黏性与沙质河床采用张瑞瑾公式计算,泥沙代表粒径选取中值粒径 d_{50} ; U 为行近流速(m/s); n 为与防护岸坡在平面上形状有关的系数,一般取1/6~1/4; η 为水流流速分配不均匀系数,根据水流流向与岸坡交角查表采用。

根据文献[1],开敞感潮河道近岸底部流速和近岸垂线平均流速之比为0.8~0.9,近岸底部流速与近岸波峰值存在一定的相关关系,主要体现如下:

斜坡式护岸基础前底流速(y)与波峰值(x)之间的回归方程关系为

$$y = 1.8595x^2 - 0.5593x + 0.1069 \quad (6)$$

经计算,以黄浦江上游某典型通航支河边界为例,按河底高程-2.0 m,墙前泥面2.0 m,通航水位1.30~4.58 m,河道宽度40 m计算,墙前冲刷深度可能达到0.5~3.0 m。因此,后续有限元计算时,冲刷深度在保证结构不破坏、计算结果能反映真实变形的前提下,以达到冲刷3.0 m为宜。计算结果见表3。

表3 河道冲刷理论计算结果

Table 3 Theoretical calculation results of river scouring

工况	H_c^1/m	底部流速 $U_{\text{bottom}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$U_{cp}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$U_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h_s/m
正常	0.76	7.58	0.94	0.64	0.51
近岸	1.29	2.50	3.12	0.64	2.43

1.2 有限元模拟分析

1.2.1 模型选取

数值模拟采用岩土工程专业有限元软件Plaxis 2D,具体采用二维平面应变模型^[14],地基土采用小应

变硬化土 (Hardening Soil with Small Strain stiffness, HSS) 模型, 该本构模型在上海软土地区基坑工程、挡土墙工程等以水平荷载变形为主的结构模拟计算中取得了较好的应用效果^[15]。桩基型式采用前排密排板桩和后排方桩结构, 堤防工程材料采用线弹性本构方程, 桩土作用采用接触单元模拟, 更准确反映桩身的弯曲响应与土体侧向提供的反力。

在 HSS 模型中需确定小应变特性参数, 该参数对变形计算结果影响较大, 即初始剪切模量 G_0 和阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$ 。其余 11 个 HSS 模型参数, 分别表述如下: ①3 个 Mohr-Coulomb 强度参数, 即有效黏聚力 c 、有效内摩擦角 φ 、剪胀角 ψ 。②3 个基本刚度参数, 即三轴排水试验的参考割线刚度 E_{50}^{ref} 、固结试验的参考切线刚度 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、刚度应力水平相关幂指数 m 。③5 个高级参数, 即卸荷再加荷模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、卸载再加载泊松比 ν_{ur} 、参考应力 p^{ref} 、破坏比 R_f 、正常固结条件下的侧压力系数 K_0 。

重力式堤防结构与桩基式堤防结构有限元网格见图 2。模型边界条件设置见表 4, 土体参数采用黄浦江上游某支河处地勘参数, 详见表 5。

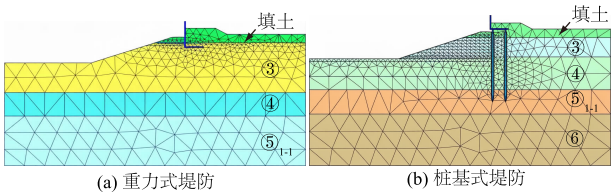


图 2 重力式堤防和桩基式堤防有限元网格

Fig.2 Finite element meshes of gravity-type levee and pile-founded levee

表 4 有限元模型的计算边界条件

Table 4 Computational boundary conditions of the finite element model

结构型式	墙顶高程/m	墙前泥面高程/m	墙后地坪高程/m	墙前泥面坡度	墙前水位/m	墙后水位/m
重力式堤防	5.24	2.50	4.00	1 : 3	2.00	地面以下 0.5
桩基式堤防	5.24	2.50	4.00	1 : 3	2.00	地面以下 0.5

1.2.2 敏感性分析因素设计

本文主动变量为冲刷深度, 被动变量为墙顶位

移, 抗冲敏感点为墙顶位移增加速率变化最大的冲刷深度, 即位移变化曲线的拐点。

重力式堤防结构抗冲敏感性分析主要考虑不同底板宽度和底板埋置深度的桩基在不同冲刷深度条件下的墙顶位移响应特征。根据实际工程中常用尺寸, 分别选取底板宽度 $B=3、4、5、6\text{ m}$ (底板埋置深度选为常见 2 m), 底板埋置深度为 $1、2、3、4\text{ m}$ (底板宽度选为常见 3.0 m) 的重力式堤防结构进行抗冲敏感性分析。桩基式堤防结构抗冲敏感性分析主要考虑不同桩基长度情况下, 在不同冲刷深度条件下的墙顶位移响应特征。

考虑上海市实际堤防工程中采用的桩基长度基本为 $9.0\sim 18.0\text{ m}$, 故分别选取桩基长度 $L=9.0、12.0、15.0、18.0\text{ m}$ 的桩基式堤防结构进行抗冲敏感性分析。

2 研究结果及分析

2.1 重力式堤防

2.1.1 不同底板宽度抗冲敏感性

不同底板宽度的重力式堤防在不同冲刷深度条件下的墙顶位移计算结果见图 3, 对应的墙顶位移变化速率见表 6。

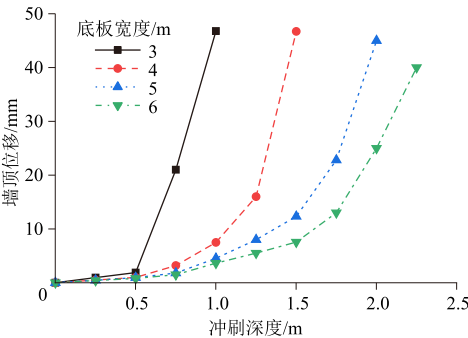


图 3 底板宽度-冲刷深度耦合敏感性分析结果

Fig.3 Coupled sensitivity analysis results of base slab width and scour depth

数值模拟结果表明, 随着墙前冲刷深度增加, 重力式堤防结构墙顶位移呈明显增长趋势, 但不同底板宽度结构的位移增长速率明显不同。根据表 6 可知, 底板宽度 $B=3\text{ m}$ 的重力式堤防结构在墙前冲刷

表 5 HSS 模型参数一览

Table 5 Model parameters of hardening soil with small strain stiffness

土层号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\psi/(\text{^\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	G_0/kPa	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	ν_{ur}
填土	18.4	18	26.5	0	6 026	5 022	40 176	2	160 704	100	0.2
③	17.7	12	16.5	0	3 121	2 601	20 808	2	83 232	100	0.2
④	17.2	13	11.5	0	2 624	2 187	17 496	2	69 984	100	0.2
⑤ ₁₋₁	17.5	16	13.0	0	2 916	2 430	14 580	2	58 320	100	0.2
⑥	19.8	44	17.5	0	6 588	5 490	32 940	2	131 760	100	0.2

表6 不同底板宽度下墙顶位移变化速率计算结果

Table 6 Calculation results of wall top displacement change rate under different base slab widths

冲刷深度/m	墙顶位移变化速率 $v/(mm \cdot m^{-1})$			
	3 m	4 m	5 m	6 m
[0.0,0.5)	3.78	1.98	1.90	1.60
[0.5,1.0)	89.76	12.98	7.16	5.66
[1.0,1.5)	—	78.44	15.60	7.84
[1.5,2.0)	—	—	65.34	34.90
[2.0,2.5]	—	—	—	60.00

注:加粗数值表示变化速率的拐点,下同。

达到0.5 m后,位移变化速率明显增加,说明其整体稳定安全储备有限;底板宽度 $B=4$ m的重力式堤防结构在墙前冲刷达到1.0 m后,位移增长速率明显增加;底板宽度 $B=5$ m和6 m的重力式堤防结构在墙前冲刷达到1.50 m后,位移增长速率出现明显增加。上述结果表明当底板宽度 <4 m时,堤防结构抗冲敏感点增幅明显;当底板宽度 >5 m时,增加底板宽度,抗冲敏感点增幅减小。

2.1.2 不同底板埋置深度抗冲敏感性

不同底板埋置深度的重力式堤防在不同冲刷深度条件下的变形响应计算结果见图4,墙顶位移变化速率见表7。

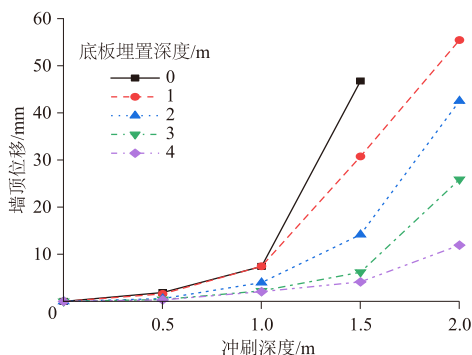


图4 底板埋置深度-冲刷深度耦合敏感性分析结果

Fig.4 Coupled sensitivity analysis results of slab burial depth and scour depth

表7 不同底板埋置深度下墙顶位移变化速率计算结果

Table 7 Calculation results of wall top displacement change rate under different slab burial depths

冲刷深度/m	墙顶位移变化速率 $v/(mm \cdot m^{-1})$			
	1 m	2 m	3 m	4 m
[0.0,0.5)	1.96	1.18	0.80	0.64
[0.5,1.0)	12.96	6.80	3.68	3.50
[1.0,1.5)	—	20.38	7.90	4.16
[1.5,2.0)	—	53.60	39.40	15.56
[2.0,2.5]	—	—	—	55.40

数值模拟结果表明,随着墙前冲刷深度增加,不同底板埋置深度的结构墙顶位移增长速率明显不同。

由表7可知,底板埋置深度为1 m的重力式堤防结构在墙前冲刷达到0.5 m后,位移增长速率显著增加;底板埋置深度2 m的重力式堤防结构在墙前冲刷达到1 m后,位移增长速率显著增加;底板埋置深度3~4 m的重力式堤防结构在墙前冲刷达到1.5 m后,位移增长速率显著增加。这说明底板埋置深度在2 m以内时,抗冲敏感点增幅明显;当底板埋置深度 >2 m时,增加底板埋置深度,抗冲敏感点增幅减小。

2.2 桩基式堤防

不同桩基长度的桩基式堤防在不同冲刷深度条件下的墙顶位移计算结果见图5,墙顶位移变化速率见表8。

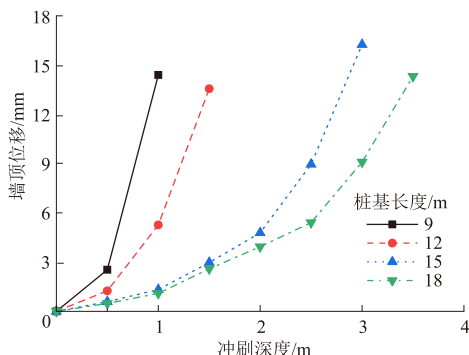


图5 桩基长度-冲刷深度耦合敏感性分析结果

Fig.5 Coupled sensitivity analysis results of pile foundation length and scour depth

表8 不同桩基长度下墙顶位移变化速率计算结果

Table 8 Calculation results of wall top displacement change rate under different pile foundation lengths

冲刷深度/m	墙顶位移变化速率 $v/(mm \cdot m^{-1})$			
	9 m	12 m	15 m	18 m
[0.0,0.5)	5.08	2.50	1.18	0.96
[0.5,1.0)	23.80	3.22	1.48	1.24
[1.0,1.5)	—	16.64	3.30	3.00
[1.5,2.0)	—	—	3.64	2.70
[2.0,2.5)	—	—	8.36	2.94
[2.5,3.0)	—	—	14.64	7.40
[3.0,3.5]	—	—	—	10.48

由计算结果可知,与重力式堤防结构相比,桩基式堤防结构在冲刷条件下表现出位移控制更强的特征:墙顶位移随冲刷加剧而逐步增大,但其增长速率受到桩基嵌固深度的显著影响。当桩基长度 $L \leq 15$ m时,桩基式堤防结构的墙顶位移增长拐点随桩基长度增幅明显,当桩基长度 $L > 15$ m时,增加桩基长度,抗冲敏感点增幅减小。

2.3 对策分析

基于前述有限元分析所得到的抗冲敏感性规律,对不同堤防结构型式提出相应的结构选型与通

航管理控制措施,以提高通航感潮河道堤防的整体安全性和适应性。

对于重力式堤防结构,墙前抗冲敏感点主要受底板宽度和底板埋置深度影响。在结构设计时,宜控制底板宽度 ≥ 4.0 m、埋置深度 ≥ 2.0 m,以保证在冲刷敏感区仍具备足够的安全裕度;当底板宽度 > 4.0 m、埋置深度 > 2.0 m时,通过增大底板宽度、埋置深度提高结构抗冲性能。当预计冲刷深度 > 1.0 m时,不建议采用重力式结构,或通过加强船舶通航管理、设置防护结构、开展航道整治工程^[16]等减少冲刷对重力式堤防的影响。

对于桩基式堤防结构,墙前抗冲敏感点主要受桩基长度影响。在结构设计时,宜控制桩基长度 ≥ 15.0 m,以保证在冲刷敏感区仍具备足够安全裕度;当桩基长度 > 15.0 m时,通过增加桩基长度提高结构抗冲性效果不明显。当预计冲刷深度达到2.5 m时,应通过加强船舶通航管理、设置防护结构等减少冲刷对桩基式堤防的影响。

3 结 论

根据10余年黄浦江上游及主要支流堤防工程出险情况调查可知,通航感潮河道堤防主要风险因素是墙前冲刷。通过整合堤防墙前冲刷深度计算的相关规范和研究成果,选取黄浦江上游实际运行条件计算得到堤防墙前理论冲刷深度,并进行不同堤防结构型式、尺度与冲刷深度耦合下的抗冲敏感性研究分析,主要结论如下:

(1)在通航感潮河道堤防结构选型和尺寸确定时应充分考虑不同类型结构对墙前冲刷的敏感性特性。在给定的典型边界条件下,堤防结构的抗冲敏感点会随着底板宽度、埋置深度、桩基长度等因素增大而增大,但当超过一定范围时,抗冲敏感点增大幅度降低,继续通过加大结构尺寸提高抗冲性能的经济性显著降低,可通过改变结构型式、控制冲刷深度提高堤防结构安全性。

(2)在重力式堤防结构设计时,宜控制底板宽度 ≥ 4.0 m、埋置深度 ≥ 3.0 m。当预计冲刷深度 > 1.0 m时,不建议采用重力式结构,对于既有堤防结构应通过加强船舶通航管理、设置防护结构等减少冲刷对既有重力式堤防的影响。

(3)在桩基式堤防结构设计时,应控制桩基长度 ≥ 15.0 m。当预计冲刷深度达到1.0 m时,应通过加强船舶通航管理、设置防护结构等减少冲刷对桩基式堤防的影响。

参考文献(References):

- [1] 陈虹,吴少霖.上海内河船行波研究[J].水运工程,2017(11):124-128.(Chen Hong, Wu Shao-lin. Study on Ship Wave in the Inland Waterway of Shanghai[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(11):124-128. (in Chinese))
- [2] 黄木根,吴丽婷,刘士漂,等.堤防工程基础冲刷深度计算评价[J].人民珠江,2024,45(增刊1):125-130.(Huang Mu-gen, Wu Li-ting, Liu Shi-li, et al. Evaluation of Foundation Scour Depth Calculations for Embankment Projects[J]. Pearl River, 2024, 45(Suppl.1):125-130. (in Chinese))
- [3] 刘磊,苗润泽,钟德钰.细沙河床丁坝局部冲刷深度计算公式的验证[J].水力发电学报,2014,33(2):122-130.(Liu Lei, Miao Run-ze, Zhong De-yu. Verification of Calculation Formulas for Local Scour Depth of Fine Sediment Riverbed around Spur Dikes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2):122-130. (in Chinese))
- [4] 广东省航道勘测设计科学研究所.珠江三角洲快速客船内河航道边坡冲刷及保护研究[R].广州:广东省航道勘测设计科学研究所,2002.(Guangdong Provincial Waterway Survey and Design Science Research Institute. Research on Slope Scour and Protection for Inland Waterways of High-Speed Passenger Ships in the Pearl River Delta[R]. Guangzhou: Guangdong Waterway Survey, Design and Research Institute, 2002. (in Chinese))
- [5] 黄成国,胡士兵.某航道岸坡防冲刷分析及护岸对策[J].科技信息,2012(18):424-425.(Huang Cheng-guo, Hu Shi-bing. Anti-scour Analysis and Revetment Countermeasures of a Channel Bank Slope[J]. Science & Technology Information, 2012(18):424-425. (in Chinese))
- [6] 赵丽.上海市内河开敞航道冲淤情况及成因分析[J].港工技术,2023,60(3):1-4.(Zhao Li. Situation and Causes of Scouring and Silting in Open Waterways of Inland Rivers of Shanghai[J]. Port Engineering Technology, 2023, 60(3):1-4. (in Chinese))
- [7] 王伟正,徐鑫.内河航道直立式护岸前趾防冲刷研究[J].现代交通技术,2011,8(增刊1):94-99.(Wang Wei-zheng, Xu Xin. Study on Against Erosion for Toe of Waterway Vertical Revetment[J]. Modern Transportation Technology, 2011, 8(S1):94-99. (in Chinese))
- [8] 陶桂兰,谭彬政,束梁.基于坡面冲刷的荆江典型岸坡稳定性分析[J].长江科学院院报,2017,34(8):30-35.(Tao Gui-lan, Tan Bin-zheng, Shu Liang. Stability Analysis of Typical Bank Slope Based on Slope Erosion in Jingjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8):30-35. (in Chinese))

- Geotechnical Site Investigation Standards in Europe and America [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))
- [9] 李小超, 刘顺, 熊聪. 中欧(英)岩土工程标准体系对比研究[C]//2018年江西省电机工程学会年会论文集.南昌:江西省电机工程学会, 2019: 245-249. (Li Xiao-chao, Liu Shun, Xiong Cong. Comparative Study on the System of Chinese and European (British) Geotechnical Engineering Standards [C]//Proceedings of the 2018 Annual Conference of Jiangxi Province Electrical Engineering Society. Nanchang: Jiangxi Province Electrical Engineering Society, 2019: 245-249. (in Chinese))
- [10] 高大钊.土力学与岩土工程师:岩土工程疑难问题答疑笔记整理之一[M].北京:人民交通出版社, 2008. (Gao Da-zhao. Soil Mechanics and Geotechnical Engineer [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [11] 高大钊. 对修订国标《岩土工程勘察规范》若干问题的思考[J]. 工程勘察, 2011, 39(8): 1-6, 54. (Gao Da-zhao. Pondering on Issues for Revising National Standard "Code for Investigation of Geotechnical Engineering" [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(8): 1-6, 54. (in Chinese))
- [12] 杨立. 平板载荷试验数值分析及承载力判定标准研究[J]. 岩土力学, 45(增刊1): 723-730. (Yang Li. Numerical Analysis and Bearing Capacity Determination Criteria of Field Plate Loading Tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 723-730. (in Chinese))
- [13] Chapman T, Skinner H D, Brown M, *et al.* ICE Manual of Geotechnical Engineering Volume 1: Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation [M]. London: Thomas Telford Ltd, 2012.
- [14] Rowe P W. The Relevance of Soil Fabric to Site Investigation Practice [J]. Géotechnique, 1972, 22(2): 195-300.
- [15] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB 50007—2011, Code for Design of Building Foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [16] Frank R, Bauduin C, Driscoll R, *et al.* Designers' Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design-General Rules [M]. London: Emerald Publishing Limited, 2005.
- [17] BSI. BS EN 1997-2: 2007, Eurocode 7: Geotechnical Design—Part 2: Ground investigation and testing [S]. London: British Standards Institution, 2007.
- [18] Bergdahl U, Ottosson E, Malmberg B S. Plattgrundläggning (Spread foundations) [M]. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst, 1993.

(编辑:王 慰)

(上接第195页)

- [9] 史斌, 陆芳春, 包中进. 感潮河口闸下软基冲刷模拟与实践[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(4): 19-21. (Shi Bin, Lu Fang-chun, Bao Zhong-jin. Simulation & Practice on Erosion of Soft Foundation at Sluice Downstream in Tidal Estuary [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(4): 19-21. (in Chinese))
- [10] McGovern D J, Ilic S, Folkard A M, *et al.* Evolution of Local Scour around a Collared Monopile through Tidal Cycles [J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012(33): 113.
- [11] 栗铭阳, 张宝森, 方国华, 等. 基于 Flow-3D 的东安工程桩坝冲刷数值模拟研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 122-127. (Li Ming-yang, Zhang Bao-sen, Fang Guo-hua, *et al.* Numerical Simulation of Scouring of Dong'an Permeable Pile Dam Based on Flow-3D [J]. Yellow River, 2022, 44(4): 122-127. (in Chinese))
- [12] GB 50286—2013, 堤防工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (GB 50286—2013, Code for Design of Levee Project [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [13] DG/TJ 08-2116—2020, 内河航道工程设计标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2021. (DG/TJ 08-2116—2020, Design Code for Inland Waterway Engineering [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2021. (in Chinese))
- [14] 寇海磊, 周超, 闫正余, 等. 基于小应变硬化土模型的黏性土本构参数研究及其工程应用[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(4): 16-22. (Kou Hai-lei, Zhou Chao, Yan Zheng-yu, *et al.* Research and Engineering Application of Constitutive Parameters of Cohesive Soil Based on Small Strain Hardening Soil Model [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(4): 16-22. (in Chinese))
- [15] 于文华, 司鹏飞, 田利勇, 等. 软土地区高桩承台结构桩基内力及变形分析[J]. 水道港口, 2021, 42(6): 770-774, 782. (Yu Wen-hua, Si Peng-fei, Tian Li-yong, *et al.* Analysis of Internal Force and Deformation of Pile Foundation for High-pile Cap Structure in Soft Soil Area [J]. Waterway and Port, 2021, 42(6): 770-774, 782. (in Chinese))
- [16] 李昶, 姚仕明, 朱玲玲, 等. 长江-鄱阳湖汇流河段近期河道演变特征[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(11): 199-206, 216. (Li Chang, Yao Shi-ming, Zhu Ling-ling, *et al.* Recent River Channel Evolution Characteristics of Confluence Reach of Yangtze River-Poyang Lake [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(11): 199-206, 216. (in Chinese))

(编辑:黄 玲)