

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230019

钱塘江河口西江塘海塘塘脚冲淤特性研究

张芝永^{1,2}, 陈甫源^{1,2}, 曾 剑^{1,2}, 杨元平^{1,2}, 何 昆^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020;
2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要: 海塘塘脚冲刷是影响河口海塘结构稳定的主要因素之一。准确把握河口区复杂水动力下海塘塘脚冲淤规律并提出精准的海塘塘脚冲刷预测方法,对保障海塘工程安全起着重要作用。为此,以钱塘江河口西江塘海塘为例,利用2010年以来的逐月实测断面监测资料,分析了海塘塘脚冲淤的变化规律,并基于悬移质挟沙力输沙和河床变形理论,提出了基于过程的非恒定水流下塘脚冲刷预测方法,利用该方法计算了其塘脚冲刷深度。结果表明,西江塘段海塘呈现洪冲潮淤的变化规律,其塘脚冲刷的临界径流量约为 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,冲刷预测误差可降低到20%以内,预测精度得到明显提升。

关键词: 河口; 塘脚冲刷; 挟沙力; 预测方法

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0035-04

1 概况

钱塘江西江塘段标准海塘位于钱塘江闻家堰河段,该河段上游为富春江和浦阳江的汇合位置,属于典型的弯道河段。该河段平均河宽约900 m,最小河宽有600 m。西江塘标准海塘位于闻家堰河段的东岸(凹岸),受水流顶冲,塘前滩地较低,该段海塘长期以来是钱塘江防洪的一个险段。西江塘标准海塘为直立式海塘工程,其工程起点桩号为13+300,终点桩号18+200,其中桩号14+700~16+270段海塘塘前河床普遍较低,是该段海塘冲刷最为严重的区域。另外,钱塘江河口是我国潮流动力最强的河口,在复杂的洪水、潮汐动力共同影响下,河口区海塘塘脚冲淤规律要远复杂于单向径流影响河段^[1-2]。目前对堤防冲刷计算常采用《堤防工程设计规范》^[3]的经验公式^[4],但该公式源自前苏联的桥梁一般冲刷公式,在实际使用过程中存在计算结果偏小问题。除了经验公式外,物理模型试验^[5-6]也是较常用的一种海塘(堤防)塘脚冲刷预测方法,但该方法耗时费

力,且成本较高,一般仅在重大工程中使用^[7]。针对河口区海塘塘脚冲淤规律的复杂性及塘脚冲刷预测方法的缺陷,本文以钱塘江河口西江塘段海塘为例,以2010年以来的逐月实测塘前地形资料为基础,结合径流和潮汐特征,对河口区海塘塘脚冲淤特性进行系统研究,揭示了该河段海塘塘脚冲淤规律,并提出了基于过程的非恒定水流下塘脚冲刷预测方法,实现了不同洪水过程下海塘塘脚冲刷的预测。

2 塘前地形监测资料分析

本文监测工作起始时间为2010年11月,监测断面有11个,主要监测各海塘塘前130 m内的河床地形。采用资料为2010~2017年间桩号15+050~16+090共5个断面的观测资料。

2.1 断面形态特征

对桩号15+050~16+090五个监测断面2010~2017年总计84次的断面监测资料进行汇总,发现各断面均呈现近岸斜坡、距岸40~100 m位置河床较为平坦的断面形态分布。其中斜坡坡

收稿日期: 2023-01-05, **修回日期:** 2023-02-15

基金项目: 浙江省自然科学基金水利联合基金重大项目(LZJWD22E090002);浙江省水利河口研究院院长基金(ZIHE21Z007);浙江省省属科研院所扶持专项(河口A21014)

作者简介: 张芝永(1984-),男,博士、高级工程师,研究方向为涉水工程局部水动力及冲刷, E-mail: 82457114zzy@163.com

通讯作者: 曾剑(1974-),男,博士、正高级工程师,研究方向为河口海岸水沙动力学, E-mail: zengjian@zjwater.gov.cn

度在 1 : 2~1 : 4 左右。而从逐月监测情况看,斜坡处由于水流流速较小,河床地形变幅不大。而在距岸 40~100 m 位置,河床地形高程变幅较大。其中桩号 15+550~16+090 断面变幅达近 10 m 左右,而桩号 15+240 断面变化则有 6 m 左右,桩号 15+050 断面则更少,其变幅约 3 m 左右。

2.2 最低高程年内变化规律

西江塘段标准海塘所在的闻家堰河段受洪水径流和潮汐的共同影响,其冲淤变幅较大,为辨析塘前河床地形与水文动力之间的响应规律,统计了各测次塘前 100 m 内的最低高程值。图 1 为桩号 15+870、16+090 断面最低高程的时间变化过程。由图 1 可看出,各断面最深点高程均呈冲淤交替的周期性波动特征。其中图中最深点标记点为大洪水后的时间点,可发现该时间点对应的河床高程普遍较低,基本为年内河床高程最低值。这说明在汛期大洪水时,该段海塘塘脚河床遭遇了剧烈的冲刷。而在汛期后随着径流的减弱和潮汐作用的增强,下游泥沙被潮汐带入形成淤积,进而导致河床高程在潮水期则逐渐淤积抬升。尤其在 2011、2017 年这一规律特别明显。因此总体来说,西江塘段海塘塘前河床地形呈现洪冲潮淤的变化特征。

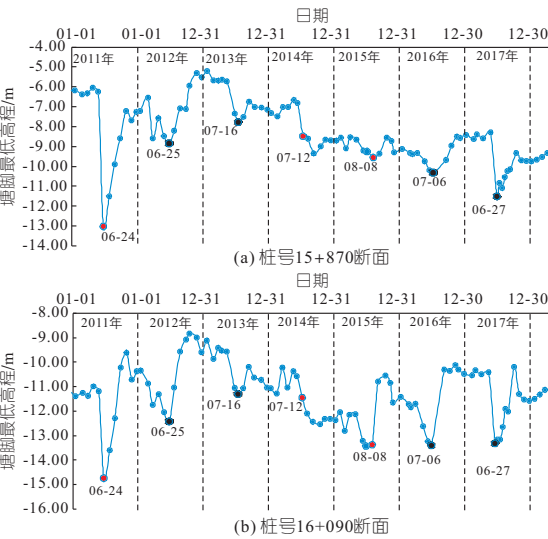


图 1 各断面最低高程时间变化过程

Fig. 1 Time variations of the lowest elevation of each section

3 结果与讨论

3.1 洪水径流对塘脚冲淤影响

由分析可知,洪水对塘脚冲刷影响最为显著,且最低高程一般发生在洪水后。选取桩号 15+050~16+090 总计 5 个断面的塘前地形资料分析逐月河床冲淤情况,并与之相应各测次之

间的日均最大流量进行相关性分析。图 2 为不同流量下对应的各断面冲淤幅度分布情况。由图 2 可看出,当流量较小时,其各断面河床有冲有淤,其原因主要在于小流量时径流并不足以引起河床的冲刷,其冲淤变化主要受潮水影响。大潮时含沙量大,携带的泥沙在此淤积,但在潮汐特别大时,较大的潮流流速同样会引起冲刷。而径流量较大时,各断面河床由冲淤交替逐渐转为单向的冲刷,且随径流量的增加,其冲刷幅度也逐渐增加。冲淤交替与单向冲刷状态的临界径流量值约为 5 000 m³/s。

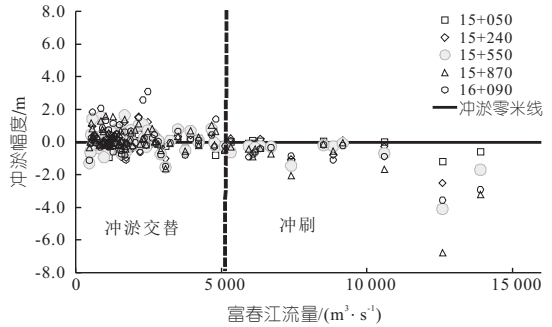


图 2 富春江不同流量下冲淤幅度变化情况

Fig. 2 The scouring and silting depth under different flood discharge of Fuchun River

3.2 不同洪水下冲刷幅度

在洪水影响下,海塘塘前河床的冲刷幅度除了与洪水大小相关外,也与初始河床高程,即初始水深有关。2011、2017 年的洪峰流量均在 15 000 m³/s 左右,因此利用这两次洪水前后的地形资料进行了对比。图 3 为 2011、2017 年洪水前后桩号 15+870 断面形态对比。由图 3 可看出,在大洪水后,塘前斜坡地形上并未明显冲刷,而离岸 40 m 以外位置则为整体冲刷,其中 2011 年的冲刷幅度远大于 2017 年的冲刷幅度。同时发现在洪水前 2011 年的河床高程普遍在 -5 m 左右,远高于 2017 年的洪水前河床高程 -8 m,这说明在洪峰流量接近情况下,河床初始高程越低,其冲刷幅度也越小。进一步统计了 5 个断面在 2011、2017 年两次洪水的平均冲刷幅度(图 4),冲刷幅度从断面分布来看均呈现从桩号 15+050 断面向下游冲刷幅度逐渐增大,在桩号 15+870 断面冲刷幅

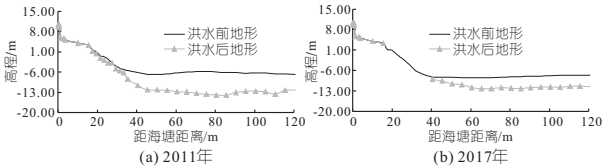


图 3 2011、2017 年洪水前后河床断面形态对比

Fig. 3 Comparisons of the riverbed change before and after flood in 2011 and 2017

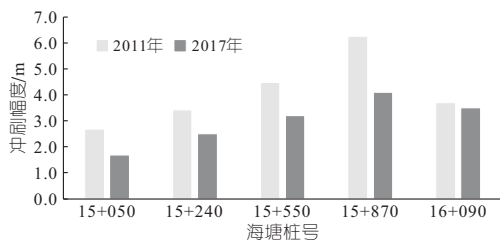


图 4 各断面洪水后冲刷幅度

Fig. 4 The scour depth of each section during flood

度最大,其后冲刷幅度在桩号 16+090 断面又有所减小,2011、2017 年的冲刷幅度分布均呈现这种规律,而年际对比来看,2011 年各断面的冲刷幅度均大于 2017 年冲刷幅度,偏大幅度约 2 m。

3.3 不同洪水下水动力特征

图 5 为 2011 年洪水相应的水位与流速(桩号 15+550 断面)过程。由图 5 可知,数值模拟结果与实测水位过程基本接近。且受较大的洪水径流影响,在洪水过程中向上的涨潮流时段基本很少。根据数值模拟结果,桩号 15+550 断面在 2011 年 6 月时的最大流速可达 2.29 m/s,进一步根据数值模拟结果统计了各监测断面塘前最大流速(图 6)。由图 6 可知,2011 年洪水期间流速普遍大于 2017 年洪水期间最大流速,这也是导致 2011 年洪水冲刷幅度远大于 2017 年的主要原因之一。

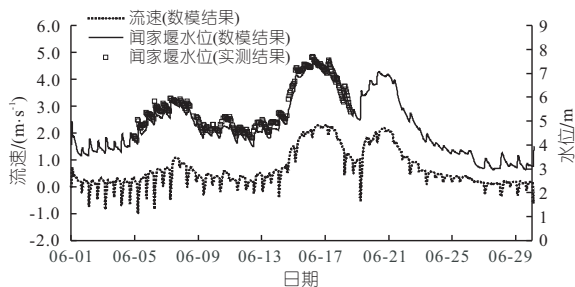


图 5 2011 年洪水过程水位与流速数值模拟结果

Fig. 5 The modelling water elevation and flow velocity during 2011 flood

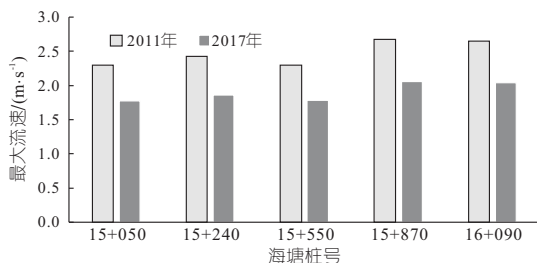


图 6 各断面最大流速计算结果

Fig. 6 The maximum flow velocity of each section

3.4 基于非恒定洪水过程的塘脚冲刷预测方法

对实际情况来说,洪水过程是非恒定的,单纯采用最大流速来计算塘脚冲刷略有不妥^[8]。针对非恒定洪水过程中的河道冲刷计算,本文基于悬移质泥沙输运模型,构建了一种基于过程的塘脚

冲刷发展计算方法。

对河床冲刷变形,其变形方程可为:

$$\partial z / \partial t = (D - E) / [\rho_s (1 - n)] \quad (1)$$

其中

$$D = \omega C_a \quad (2)$$

$$E = \omega C_{*a} \quad (3)$$

$$C_{*a} = k [u^3 / (gh\omega)]^m \quad (4)$$

式中, z 为河床深度; t 为时间; D 、 E 分别为泥沙的沉积率、侵蚀率; ρ_s 为泥沙密度; n 为泥沙孔隙率; ω 为泥沙沉降速度; C_a 为含沙量; C_{*a} 为挟沙力; k 为系数; u 为流速; g 为重力加速度; h 为水深。

在实际情况中因本底含沙量变化较大,但其含沙量可能与挟沙力有一定关系,因此假设本底含沙量为 $k_1 C_{*a}^{[9]}$,则式(1)可变为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{-1}{\rho_s (1 - n)} (k_1 - 1) k \left(\frac{u^3}{gh} \right)^m \omega^{1-m} \quad (5)$$

根据钱塘江以往的挟沙力及沉降速度相关研究成果^[10],式(4)中的 k 为 1.66, m 为 0.55。据此式(5)可转化为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{-1.66}{\rho_s (1 - n)} (k_1 - 1) \left(\frac{u^3}{gh} \right)^{0.55} \omega^{0.45} \quad (6)$$

这样非恒定水流情况下,任意时间段内的冲刷幅度 Δz 可采用下列积分形式求解出:

$$\Delta z = \int_0^t \frac{(1 - k_1)}{\rho_s (1 - n)} 1.66 \left[\frac{u(t)^3}{gh(t)} \right]^{0.55} \omega^{0.45} dt \quad (7)$$

考虑到实际工程中水流流速均是采用定床二维数值模型计算得到,而在实际冲刷过程流速可能会有一定的变化,为此综合考虑冲刷过程中流速的折减及式(7)中 $1 - k_1$ 项系数,将式(7)中各类系数合并为一项系数即 K ,这样式(7)可转化为:

$$\Delta z = K \int_0^t \frac{-1}{\rho_s (1 - n)} \left[\frac{u(t)^3}{gh(t)} \right]^{0.55} \omega^{0.45} dt \quad (8)$$

对于式(8)来说,平面二维数学模型方法可得到相应的流速、水深过程,而根据闻家堰段底质泥沙试验发现其泥沙沉降速度约 0.002 25 m/s,这样依据 2011、2017 年 5 个断面在洪水过程中的冲刷深度数据对系数 K 进行了率定,最终经拟合得到 $K = 0.66$ 时可保证本方法计算结果与实测值结果相对误差在 20% 以内(图 7),与规范公式^[3]相比精度明显提升。

4 结论

a. 以强潮河口—钱塘江河口西江塘海塘典型断面实测资料为基础分析了塘脚冲淤规律,发现该段海塘总体呈现洪冲潮淤的变化规律,其冲刷发生的富春江临界径流量约为 5 000 m³/s。

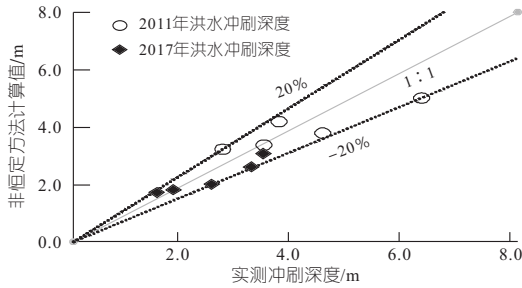


图 7 非恒定方法计算结果与实测值对比

Fig. 7 Comparison of calculated scour depth by unsteady flood method and field measured data

b. 现有堤防规范公式过低地估计了塘脚冲刷深度,其与实测值误差在 40%左右。基于河床变形理论提出了基于非恒定洪水过程的塘脚冲刷预测方法,利用该方法其冲刷预测误差可降低至 20%,这为类似海塘工程的塘脚冲刷计算提供了一种技术借鉴。

参考文献:

[1] 张伯虎,潘存鸿,胡成飞,等. 钱塘江河口古海塘塘前滩地冲刷研究[J]. 上海国土资源,2020, 41(2): 78-82.

[2] 王忠权,魏小旺,陈文江. 钱塘江海宁临江古海塘堤前河床冲刷机理及冲刷高程研究[J]. 水利规划与设计,2022(6): 63-68.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范:GB50286-2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

[4] 张元明. 堤防设计中堤身及冲刷计算探讨[J]. 甘肃水利水电技术,2013, 49(7): 41-44.

[5] 魏炳乾,孙小军,宁利中,等. 缓变弯道河道冲刷试验研究[J]. 水力发电学报,2007, 26(2): 99-103, 98.

[6] 吴文霞,魏凯,刘加龙,等. 游荡型河道堤防堤脚水平柔性护垫结构研究[J]. 中国农村水利水电,2021(5): 68-73,79.

[7] 张芝永,曾剑,史英标,等. 浙江省河口海岸地区海塘塘脚冲刷问题探讨[J]. 浙江水利科技,2022, 50(1):1-4,9.

[8] 王兆印,徐永年,苏晓波. 挟沙水流的冲刷率及河床惯性的研究[J]. 泥沙研究,1998, 23(2):1-9.

[9] 舒安平. 水流挟沙能力公式的转化与统一[J]. 水利学报,2009, 40(1):19-26,32.

[10] 潘存鸿,曾剑,唐子文,等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究[J]. 水利水运工程学报,2013, 41(1): 1-7.

Scour Characteristics at the Toe of Xijiangtang Seawall in Qiantang Estuary

ZHANG Zhi-yong^{1,2}, CHEN Fu-yuan^{1,2}, ZENG Jian^{1,2}, YANG Yuan-ping^{1,2}, HE Kun^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Estuary and Coast of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The scour of seawall toe is the one of the main factors for influencing structural stability of seawall estuary. The study of the scour characteristics at seawall toe under complex hydrodynamics and prediction method is of great significance for the seawall stability. Based on the field monthly measured topographic data since 2010, the time evolution of toe scour at Xijiangtang Seawall in Qiantang Estuary was discussed and the influence of flood was identified. The research results show that the seawall toe is eroded during flood, while there is silting during tide, and the critical flood discharge for scouring is about 5 000 m³/s. Based on the theory of sediment carrying capacity and riverbed deformation, a new scour prediction method is developed and the relative error is significantly improved within 20%.

Key words: estuary; seawall toe scour; sediment carrying capacity; prediction method

(上接第 194 页)

Improvement of Flow Pattern in Tailrace Conduit of Deneng Xiangjiang Hydropower Station

TANG Ren-hu¹, ZHENG Ji-si²

(1. Hunan Deneng Xiangjiang Hydropower Co., LTD., Yongzhou 425917, China;

2. Shenzhen Energy Science and Technology Co., LTD., Shenzhen 518133, China)

Abstract: In response to the evident phenomena of flow separation and backflow, low efficiency, and increased cavitation in the tailrace conduit of the Deneng Xiangjiang Hydropower Station after expansion, computational fluid dynamics (CFD) analysis was employed. Two methods, namely, modifying the shape of the tailrace conduit or replacing the runner, were proposed to improve the flow pattern within the tailrace conduit. Research has demonstrated the effectiveness of both methods, which can provide reference for similar projects.

Key words: draft tube; water flow pattern; CFD; blade setting angle