

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.002

刘川顺, 陈曦濛, 鲁晓义. 游艇波浪侵蚀长港河河岸的计算分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 8-13. (LIU Chuanshun, CHEN Ximeng, LU Xiaoyi. Calculation and analysis of bank erosion of Changgang River caused by yacht-generated waves[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 8-13. (in Chinese))

游艇波浪侵蚀长港河河岸的计算分析

刘川顺, 陈曦濛, 鲁晓义

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 船行波导致的河岸侵蚀对土地资源和堤防构成威胁。游艇体量小,其危害往往被忽视,然而快速航行的游艇会对河岸产生严重损坏。目前量化评估船行波侵蚀河岸的文献很少。建立船行波引起河岸侵蚀后退的估算模型,并结合鄂州市长港河侵蚀进行实例计算。研究过程由三部分组成:一是现场勘测和调研,包括采集河岸土样,测量河道特征参数,调查长港河船舶类型、船舶技术参数及各类船舶每天航行频次;二是开展室内土工试验,测定土样颗粒级配曲线和临界剪应力,以评估河岸的抗侵蚀性;三是开展河岸侵蚀的数值计算,包括计算游艇船行波要素,采用侧向侵蚀模型计算河岸侵蚀率。计算结果表明,在游艇船行波侵蚀作用下,长港河河岸年平均侵蚀后退 54.4 cm,与现场调研结果基本相符。

关 键 词: 游艇; 船行波; 河岸侵蚀; 波浪要素; 侧向侵蚀模型

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)04-0008-06

波浪侵蚀率指单位时间内波浪造成的侵蚀发展速率,主要与波浪要素、土质、水域特征有关。在某一特定地区其土质与水域特征一定,则波浪侵蚀率主要由波浪要素决定。船行波的波浪要素主要包括波速、波长、最大波高以及波周期。

船行波的研究始于 19 世纪 60 年代,Rankine 于 1868 年最早发表了关于船行波问题的论著,英国学者 Froude 则在 1877 年对船行波的形态做了一系列研究,并绘制出了船行波形态图^[1]。船行波理论研究的主要奠基人造船学家 Kelvin 在 1887 年首次从理论上对船行波进行了分析研究^[2],他以一个在水面上作等速直线运动的压力扰动点代替船舶研究其对水体的作用,对于无限水深的情况,得出压力扰动点在水面移动将激起一系列的散波和横波;激起的散波和横波波峰线可以用以波浪传播角 θ 为参数的等相位线方程式表示;横波将在扰动点处以扰动速度的 50% 向后扩散,形成新波;散波系相对航线向外凸出,任意点波速等于压力扰动点在垂直于单个波峰线上的速度分量 $v\cos\phi$ (ϕ 为航线与波传播方向之间的夹角),散波波长等于航线上的波长乘以 $\cos^2\phi$ 。1949 年,前苏联包瑞奇在莫斯科运河实船试验和模型试验的基础上提出了计算波高的包瑞奇公式,把船速作为主要影响因素。1958 年,前苏联向金基对于包瑞奇的研究,在理论分析和数学推导的基础上,引入干扰系数 K ,进一步得到了船舶沿运河轴线行驶时,靠近岸坡的船行波波高^[3]。1977 年 Dawson 提出了 Rankine 源方法即直接对各片体物面压力积分求得三体船的兴波阻力^[4],被视为船行波波浪载荷问题计算的突破性进展。1990 年荷兰 Delft 水工试验所提出计算波高的经验公式,第 1 次使用了船型修正系数^[5]。1997 年 Sorensen 发表了不同航速区除波高外的波浪要素计算公式^[6]。我国针对船行波的研究起步较晚,且理论方面的研究不多,系统的船模试验开始于 20 世纪 60 年代。1963 年,余广明等对大运河船行波问题进行了室内模型研究,提出了紧靠船边和临近岸坡的最大波高影响因素(相对船速、断面系数、相对水

收稿日期: 2016-08-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2042016KF1070)

作者简介: 刘川顺(1963—),男,湖北鄂州人,教授,博士,主要从事河流湖泊治理相关研究。

E-mail: 860486289@qq.com

深)及各因素分别与紧靠船边的相对最大波高的相关曲线^[7]。1992年,南京水利科学研究院、江苏省交通规划设计院合作进行现场测试和室内船模试验,研究成果验证了 Delft 波高公式的合理性^[8]。

在船行波侵蚀河岸研究方面,荷兰 Delft 水工研究所 1981—1983 年在 Hartel 航道系统开展了护岸工程结构型式和滤层材料的模型试验研究^[8]。Osman 等^[9]提出了水流对黏性岸坡侧向侵蚀模型,同时给出了相关参数侵蚀速率经验常数 S_e 和土壤临界切应力 τ_c 的相关关系。Trimbak 等利用侧向侵蚀模型,在结合实测数据系列的前提下,对船行波作用下密西西比河流域的岸坡冲蚀进行了数值模拟^[10]。

目前我国量化评估船行波侵蚀河岸的理论研究和工程应用比较少见,本文在总结国内外相关研究的基础上,试图系统地建立船行波河岸侵蚀的计算模型,并结合鄂州市长港河侵蚀进行实例计算。

1 船行波侧向侵蚀岸坡的计算理论

河岸在船行波作用下侵蚀后退距离取决于单个船舶船行波对河岸的侵蚀速率和各船舶船行波的作用时间。船舶类型及其数量、船行波作用时间可由现场观测和调查获得,而单个船舶船行波的侵蚀速率则需要根据船舶参数(吨位、尺寸、航速)通过以下步骤计算获得。

1.1 船行波波浪要素计算

船行波由初生波和次生波组成。Hemphill 提出,当船行波相对断面系数 $k < 0.05$ 时,船舶航行时激起的波浪主要以次生波为主,初生波可忽略^[11]。

$$k = A_s / A_c \quad (1)$$

式中: A_s 为该工况下船舶吃水线以下的船体横截面积; A_c 为静水位时的河道横断面面积。

船行波理论研究、原体观测及室内模型试验结果都表明,次生波的波态与船速及水深有密切关系。1997年 Sorensen 提出用水深弗汝德数 F_d 来判断快艇航行时所处航速区^[6]:

$$F_d = V / \sqrt{gd} \quad (2)$$

式中: F_d 为水深弗汝德数,无量纲; V 为船速; g 为重力加速度; d 为水深。

当 $F_d < 0.75$ 时,航速位于亚临界流速区,对应深水次生波波态。该波态由横波和散波两种类型的波组成。横波传播方向与船行驶方向相同,散波是接近平行的一组短波,沿航向对称分布,传播方向与航向的夹角约为 55° 。

当 $F_d > 0.75$ 时,对应浅水次生波波态。其中当 $0.75 \leq F_d < 1.00$ 时,航速位于跨临界流速区,次生波散波波峰线与航线夹角随着 F_d 的增大逐渐增大接近 90° ,形成首横波和尾横波,散波与横波合一,波高达到最大值,波峰线长度随速度的增大而增大。当 $F_d \geq 1.00$ 时,航速位于超临界流速区,横波消失,只剩下散波。散波的波峰线较长,波峰线与航线夹角随航速增加而逐渐减小。

根据 1997 年 Sorensen 发表的不同航速区波浪要素(不含波高)计算公式^[6]可知,亚临界流速区波浪要素计算式如下:

$$c = V \cos \theta \quad (3)$$

$$L = 2\pi c^2 / g \quad (4)$$

$$T = L / c \quad (5)$$

式中: θ 为波浪传播角(取 $\theta = 35.3^\circ$); c 为波速; L 为波长; T 为周期。

跨临界流速区波速 c 的计算同式(3),周期 T 同式(5),其余波浪要素计算式如下:

$$\theta = 35.3(1 - e^{12(F_d - 1)}) \quad (6)$$

$$c^2 = (gL/2)\pi \tanh(2\pi d/L) \quad (7)$$

式中:波长 L 通过试算确定; $\tanh x$ 为双曲余切函数。

超临界流速区波速 c 的计算同式(3),波长 L 同式(7),周期 T 同式(5),波浪传播角计算式如下:

$$\theta = 90^\circ - \arcsin(1/F_d) \quad (8)$$

南京水利科学研究院的研究成果说明我国的内河航道最大波高在进行计算时基本符合 Delft 公式^[8],因

此本次计算采用该公式。

$$H_m = Ad(S/d)^{-0.33} F_d^{2.67} \quad (9)$$

式中: H_m 为最大波高; A 为船型修正系数, 无量纲, 根据参考文献[8], 巡逻艇、满载内河马达船取 1.0, 空载货船取 0.5, 空载马达船取 0.35, 拖牵船队取 0.42; S 为船舶与岸坡的距离。

1.2 船行波侵蚀河岸的计算

Osman 和 Thorne 研究了船行波对黏土岸坡的侧向侵蚀, 建立了计算平均侵蚀速率的侧向侵蚀计算模型^[9]:

$$E = db/dt = s_e [(\tau - \tau_c)/\tau_c] \quad (10)$$

式中: b 为岸坡侵蚀后退距离; db/dt 为岸坡侵蚀速率; τ 为土壤有效切应力; τ_c 为土壤临界切应力; s_e 为侵蚀速率经验常数, Osman 和 Thorne 通过开展黏土河岸侵蚀试验, 给出了侵蚀速率常数与土壤有效切应力之间的关系式^[9]:

$$s_e = 0.364\tau_c e^{-1.3\tau_c/(\rho g)} \quad (11)$$

式中: ρ 为水的密度。

Temple 等^[12]提出了确定各种土壤临界切应力的公式, 其中黏性土临界切应力按下式计算:

$$\tau_c = \tau_{cb} C_e^2 \quad (12)$$

式中: τ_{cb} 为土壤基本允许切应力; C_e 为孔隙比修正系数。根据参考文献[12], 黏土孔隙比修正系数和基本允许切应力由下式确定:

$$C_e = 1.48 - 0.57e \quad (13)$$

$$\tau_{cb} = (51.25 I_p^2 + 684.97 I_p + 2284.8) \times 10^{-4} \quad (14)$$

式中: e 为孔隙比; I_p 为塑性指数。

波浪对河岸土体产生的有效切应力 τ 用 Parchure 计算式进行计算^[10]:

$$\tau = f_w \rho u_b^2 / 2 \quad (15)$$

式中: f_w 为波浪摩阻系数; ρ 为水的密度, 取 1000 kg/m^3 ; u_b 为近底波浪质点水平速度。

根据微幅波理论, f_w 及 u_b 可采用以下计算式:

$$1/(4\sqrt{f_w}) + \log(1/f_w) = -0.08 + \log(A_{ab}/K_s) \quad (16)$$

$$A_{ab} = \frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)} a \quad (17)$$

$$u_b = A_{ab} 2\pi/T \quad (18)$$

$$k = 2\pi/L \quad (19)$$

式中: a 为波浪振幅, 即有效波高的一半, 有效波高取最大波高的一半; k 为波数, 即在波浪传播方向上 2π 长度内出现的全波数目; h 为波浪序列在岸坡影响区底部的水深, 即波高的一半; K_s 为相对粗糙度, 无量纲, 根据 Soulsby^[13]推荐的 K_s 与粒径间的关系为 $K_s = 2.5d_{50}$ 。

综合以上数据可求得各船型船行波对土质岸坡的侵蚀速率, 然后乘以各船型 1 年内通过次数及每次船行波的作用时间, 累计便可得到该河岸在 1 年内的侵蚀后退距离。

2 案例分析

2.1 长港河河岸侵蚀崩塌

长港河位于湖北鄂州市, 河道全长 46.5 km, 流域总面积 3265 km^2 , 是梁子湖湖水向长江排泄的唯一通道。长港河旅游通航河段为梁子湖湖口至磨刀矶节制闸间 1.5 km 长河段, 主要通航小型快艇和小型游艇。该河段为冲积平原湖区地形地貌, 河道纵坡 1/20000, 常水位 18.00 m, 常水位时平均河面宽度约 55 m, 河底深泓高程约 12.00 m, 两侧地面高程一般在 17~20 m (见图 1)。根据现场调查, 长港河通航河段一般年份河

岸侵蚀后退 0.5 m 以上,局部甚至每年崩塌后退 1.0~1.5 m,威胁着两岸房屋建筑及农田安全。

2.2 河岸侵蚀崩塌原因分析

(1)河岸抗侵蚀能力较弱。河岸土层分布从上至下依次为:第四系人工堆积物(Q_{4ml}),主要为黏土或粉质黏土夹少量碎石、砂砾,厚 3~8 m;第四系全新统湖积物(Q_{4l}),属湖积成因的黏土,夹极薄粉细砂层,厚 3~6 m;第四系上更新统残积物(Q_{3el}),黄色,以黏土为主,夹少量砂粒,厚 0.3~2.0 m;侏罗系下统武昌群(Jlwc)。岸坡表层主要是黏土,从试验获得:土壤粒度累积分布曲线见图 2,河道边坡粉质黏土层重度 18.7 kN/m^3 ,孔隙比 0.904,液限 36.7%,塑限 18.8%,塑性指数 17.8,液性指数 0.82,内摩擦角 10° ,凝聚力 24 kPa,抗冲性能较弱。长港河常水位 18 m,汛期平均水位 20 m,水位变幅区除了零散生长的柳树、杨树,基本无其他植被,河岸抗波浪侵蚀的能力较差,在船行波的频繁淘刷作用下,树根间的土壤被淘空,河岸边的树最终倾倒,缺乏植被保护的土质河岸被船行波侵蚀成陡坎,逐渐崩塌后退。

(2)旅游快艇的频繁波浪冲刷。水流、风浪、船行波浪都可能侵蚀河岸,但是对长港河而言,前两者可以忽略不计:其一,崩塌河段的河道坡降仅 1/20 000,河道内水流流速很小,而且一年之中绝大部分时间磨刀矶节制闸是关闭的,即河水不流动;其二,长港河水面狭窄,风浪很小。此外,长港河侵蚀崩塌只发生在通航河段的事实更是佐证了该河段的河岸侵蚀崩塌是船行波导致的。

21 世纪初,梁子湖生态旅游蓬勃兴起,从长港河的磨刀矶码头乘坐游艇去湖心的梁子岛是梁子湖旅游的主要路线之一,主要通航船舶是 590 型敞开式快艇和 1180 型全棚式游艇。快艇虽然船体小,但航速快,在岸边激起的波浪高达 1 m 以上,对河岸造成强烈冲刷。尤其旅游旺季游艇往来频繁,对河岸侵蚀更为严重。表 1 和表 2 分别为长港河游艇参数及其正常年份通航情况调查及实测数据。

表 1 长港河常见船舶参数

Tab. 1 Ship types on Changgang River and their parameters				
船型	船长/m	船宽/m	满载吃水深度/m	平均航速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
590 敞开式快艇	5.90	2.00	0.45	31.5
1180 全棚式游艇	11.80	2.65	0.60	18.5

表 2 主要船舶在不同时期每日往返航行频次

Tab. 2 Daily navigation frequencies of predominant ships on different dates							
特征季节	特征日 (累计天数/d)	每日往返航行频次/次		特征季节	特征日 (累计天数/d)	每日往返航行频次/次	
		590 敞开式快艇	1180 全棚式游艇			590 敞开式快艇	1180 全棚式游艇
旅游旺季 (9—10 月)	工作日 (39)	3	31	旅游淡季 (11 月至次年 8 月)	工作日 (215)	2	0
	周末 (12)	5	57		周末 (67)	4	1
	节假日 (10)	8	82		节假日 (22)	10	2

此外,不同船型产生的船行波对岸坡的影响时间不同。据现场采用秒表观测,590 型敞开式快艇、1180 型全棚式游艇单次通过时,其船型波对河岸固定点的持续时间作用分别为 10.3 和 16.1 s。

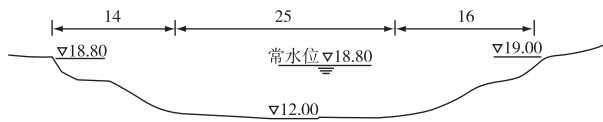


图 1 长港河典型河道断面(单位:m)

Fig. 1 Typical cross-section of Changgang River (unit: m)

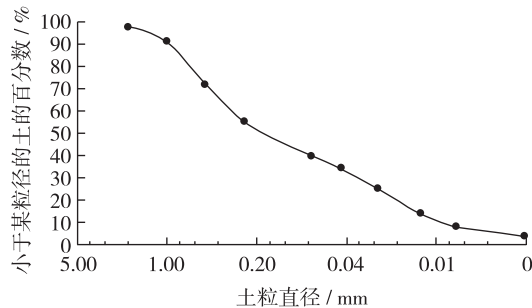


图 2 长港河岸坡土壤颗粒级配曲线

Fig. 2 Soil particle size distribution curve of Changgang River bank

2.3 船行波作用下的河岸侵蚀计算

选取图 1 所示长港河典型河道断面和表 1、表 2 列出的船舶航行参数,分别计算 590 敞开式快艇和 1180 全棚式游艇的单船波浪侵蚀速率,并最终计算河岸年侵蚀后退距离。

将表 1、图 1 中相关数据代入式(1)和(2)求得 590 敞开式快艇 $k=0.003\ 8<0.05$, $F_d=1.14>1.00$,故其船行波计算仅考虑次深波影响且航速位于超临界航速区;1180 全棚式游艇 $k=0.006\ 6<0.05$, $F_d=0.673<0.75$,故船行波计算仅考虑次深波影响且航速位于亚临界航速区。按以下步骤计算船行波对河岸的侵蚀速率:

(1)将 590 敞开式快艇相关参数依次代入式(3),(5),(7),(8),得到波浪传播角 $\theta=28.69^\circ$,波速 $c=7.676\text{ m/s}$,波长 $L=482\text{ m}$,波周期 $T=62.79\text{ s}$ 。

(2)船型修正系数按巡逻艇取为 $A=1.0$,由水深、船速及船舶至岸边距离,按式(9)求得最大波高 $H_m=5.316\text{ m}$ 。

(3)河岸土质为粉质黏土,由土壤孔隙比 $e=0.904$ 和塑性指数 $I_p=17.8$ 按式(13),(14)求得孔隙比修正系数 $C_e=0.965$,土壤基本允许切应力 $\tau_{cb}=3.072\text{ N/m}^2$,再由式(12)得河岸土临界切应力 $\tau_c=2.86\text{ N/m}^2$,代入式(11)求得侵蚀速率经验常数 $S_e=2.58\times 10^{-7}\text{ m/s}$ 。

(4)从图 3 读取小于某粒径含量 50%时所对应的粒径 $d_{50}=0.15\text{ mm}$;船行波波高取为有效波高,即 $H_s=0.5H_m=2.658\text{ m}$;波浪序列对岸坡影响区底部的水深 $h=H_m/2=2.658\text{ m}$;按式(16)~(19)计算得到 $f_w=0.007\ 8$, $u_b=3.834\text{ m/s}$,代入式(16)求得船行波在河岸产生的有效切应力 $\tau=57.33\text{ N/m}^2$ 。

(5)将有效切应力、临界切应力和侵蚀速率经验常数代入式(10)得到 590 敞开式快艇波浪对河岸的侵蚀率 $E=4.914\times 10^{-6}\text{ m/s}$ 。

(6)重复上述步骤(1)~(5),根据条件选择对应公式计算出 1180 全棚式游艇波浪对河岸的侵蚀率 $E=4.677\times 10^{-6}\text{ m/s}$ 。

结合表 2 中两种游艇在 1 年中航行的次数、每次航行波浪对河岸某点的作用时间以及上面计算得到的两种船型波对河岸的侵蚀率,最终可计算出每年船行波导致长港河河岸侵蚀后退 54.4 cm 。

3 结 语

在总结国内外相关研究成果的基础上,建立了适用于黏性土质岸坡在船行波作用下的侵蚀计算模型,结合鄂州市长港河实际情况,演示了船行波侵蚀河岸计算的全过程,计算出船行波作用下长港河河岸年平均侵蚀 54.4 cm ,与现场调查结果比较符合。

分析结果表明,旅游快艇体量虽小,但由于航速较快,对土质河岸的侵蚀不容忽视。因此,在进行河流游艇旅游开发规划时,务必进行船行波河岸侵蚀评估,根据评估结果决定是否采取护岸措施,避免因游艇旅游开发而造成河岸及沿岸建筑物等设施的破坏。

参 考 文 献:

- [1] 王水田. 关于船行波问题的研究(一)[J]. 水道港口, 1980(4): 21-22. (WANG Shuitian. Studies on ship waves issues (I) [J]. Journal of Waterway and Harbour, 1980(4): 21-22. (in Chinese))
- [2] 高凯. 船舶兴波对船舶影响研究及其在受限水域中的应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2004. (GAO Kai. The research of vessel generated waves and it's application in restricted waters[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2004. (in Chinese))
- [3] 徐星璐, 吴志易, 张贺城, 等. 内河航道船行波及其研究现状[J]. 中国水运, 2013, 13(11): 9-10, 45. (XU Xinglu, WU Zhiyi, ZHANG Hecheng, et al. Inland waterway ship waves and it's research status[J]. China Water Transport, 2013, 13(11): 9-10, 45. (in Chinese))
- [4] 刘嵘睿. 内河深水航道船行波计算简析及研究现状[J]. 信息系统工程, 2014(4): 131, 134. (LIU Rongrui. Calculation and analysis of ship waves in deepwater channel of inland river[J]. China CIO News, 2014(4): 131, 134. (in Chinese))

- [5] 潘宝雄,王清泉. 船行波的研究和研究趋势[C]//海洋工程学会. 第九届全国海岸工程学术讨论会论文集. 北京:海洋出版社,1999:159-166. (PAN Baoxiong, WANG Qingquan. Research and research trend of ship waves [C]//Marine Engineering Society. Ninth National Symposium on Coastal Engineering. Beijing: China Ocean Press, 1999: 159-166. (in Chinese))
- [6] SORENSEN R M. Prediction of vessel-generated waves with reference to vessels common to the Upper Mississippi River System [J]. ENV Report, 1997, 4: 9-20.
- [7] 王水田. 关于船行波问题的研究(续完)[J]. 水道港口, 1981(增刊1): 21-33. (WANG Shuitian. Studies on ship waves issues (last part continued)[J]. Waterway Harbor, 1981(Suppl1): 21-33. (in Chinese))
- [8] 周家宝,陈文辽. 船行波与河岸护坡工程的综述[J]. 江苏交通工程, 1996, 64(1): 28-33. (ZHOU Jiabao, CHEN Wenliao. Summary of ship waves and slope protection engineering[J]. Jiangsu Transportation Engineering, 1996, 64(1): 28-33. (in Chinese))
- [9] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis. I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 134-150.
- [10] PARCHURE T M, MCANALLY W H, TEETER A M. Desktop method for estimating vessel-induced sediment suspension[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(7): 577-587.
- [11] 亨普希尔 R W, 布拉姆利 M E. 河渠护岸工程[M]. 蔡雯, 江焘, 译. 北京: 中国农村水利水电出版社, 2000: 14-17. (HEMPHILL R W, BRAMLEY M E. Protection of river and canal banks[M]. Translated by CAI Wen, JIANG Tao. Beijing: China Rural Water and Hydropower, 2000: 14-17. (in Chinese))
- [12] TEMPLE D M, ROBINSON K M, AHRING R M, et al. Stability design of grass-lined channels[M]. Washington D C: U S Department of Agriculture, 1987: 46-48.
- [13] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications[M]. London: Thomas Telford, 1997: 47-48.

Calculation and analysis of bank erosion of Changgang River caused by yacht-generated waves

LIU Chuanshun, CHEN Ximeng, LU Xiaoyi

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: River bank erosion induced by ship waves can be a serious threat to the land resources and the dykes. Dangers given by the yacht-generated waves usually are neglected because of yacht's small sizes, however, the high speeds of yachts can result in significant damages to the river banks. As there is generally little quantitative information available to assess the magnitude of erosion, the objective of this paper is to establish an available model for estimating the recession of the river bank caused by ship-generated waves and provide an application example of the model. The study includes three main components: field measurement and investigation, laboratory experiment, and numerical modeling. The field measurement consists of soil sampling from banks of the Changgang River in Ezhou city and measurement of the river characteristics; site investigation includes learning about the types of recreational yachts sailing on the Changgang River and their parameters, as well as daily navigation frequencies. The laboratory experiments of the soil samples were carried out to determinate the soil particle size distribution curves and the critical shear stresses, so as to estimate the riverbank erodibility. Finally, the yacht-generated wave factors were calculated, and the numerical modeling of the bank erosion rates of the Changgang River was conducted by using a lateral erosion model, from which, an annual bank recession of the Changgang River was obtained as 54.4 cm, approximately consistent with the field survey result.

Key words: yacht; ship waves; bank erosion; wave factors; lateral erosion model