

波浪作用下柔性靠船墩船舶撞击力统计分析

王建超*, 贡金鑫, 冯云芬

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 考虑船体、靠船墩弹性变形和护舷非线性变形, 给出了波浪作用下外海轻型码头结构所遭受船舶撞击力的计算公式. 根据公式中各随机变量的概率分布类型, 采用 Monte-Carlo 方法对波浪作用下柔性靠船墩结构所遭受的船舶撞击力进行了统计分析. 给出了设计基准期内撞击力的概率分布函数和不同刚度比下撞击力的均值系数和变异系数. 结果表明: 在设计基准期 50 a 内波浪作用下柔性靠船墩船舶撞击力服从极值 I 型分布; 船舶撞击力的均值系数为 0.511, 变异系数为 0.429.

关键词: 柔性靠船墩; 船舶撞击力; 概率分布

中图分类号: TU332.2 **文献标志码:** A

0 引言

随着世界经济的高速发展, 各国之间的贸易往来越来越频繁, 特别是石油、铁矿石和钢铁等货物的运输更是如此. 这些大宗货物通常都是通过海上运输, 并且运输距离比较远, 在这种情况下, 采用超大型船舶无疑会具有非常明显的经济效益. 然而大型和超大型船舶的发展, 也对码头的建设提出了新的要求, 导致码头建设开始向着自然条件相对恶劣的外海深水地区发展.

目前国内外外海大型开敞式码头的结构型式, 还是以重力墩式和桩基结构为主, 但当水深进一步增加后, 传统的重力式结构和桩基结构在技术和经济上均受到了很大制约, 需要研究新的码头结构型式, 本文所分析的柔性靠船墩就是这样一种新型轻型码头结构, 类似于钢导管架结构.

目前, 在世界范围内基于可靠性理论的概率极限状态设计方法在建筑、桥梁、水工结构和公路桥梁的设计中得到了广泛应用. 在北美, 概率极限状态设计方法获得了很好的发展并应用于几乎所有结构设计中^[1~4]. 对于外海轻型码头结构, 波浪作用下船舶撞击力是其所遭受的主要荷载之一.

由于轻而柔, 受到船舶撞击后, 靠船墩的变形不可忽略. 我国港口工程结构设计目前采用的是以概率理论为基础的极限状态设计方法, 轻型码头设计也应以可靠度方法为基础, 因此研究波浪作用下船舶撞击力的概率统计分布, 建立荷载概率分布模型, 显得十分重要. 由于这种结构型式目前还处在研究阶段, 而且结构的刚度也比较小, 在计算统计参数时应考虑靠船墩刚度的影响, 在这方面目前国内外还较少有人考虑, 本文就是以此为背景, 对波浪作用下的船舶撞击力进行统计分析.

1 船舶有效撞击能

系泊船舶在波浪作用下引起的撞击力与很多因素有关, 计算非常复杂, 《港口工程荷载规范》(JTJ 215—89)给出了船舶在横浪作用下撞击能的计算公式, 即

$$E_{w_0} = \frac{1}{2} C_m M v_b^2 \quad (1)$$

$$v_b = \alpha_1 \frac{H}{T} \frac{L}{B} \frac{d}{D} \quad (2)$$

式中: E_{w_0} 为横浪作用下系泊船舶有效撞击能 (kJ); M 为船舶质量 (t), 按与船舶计算装载度相

收稿日期: 2009-09-20; 修回日期: 2011-07-10.

基金项目: “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z130).

作者简介: 王建超* (1981-), 男, 博士生, E-mail: wangjianchao007@yahoo.cn.

应的排水量计算; C_m 为船舶附加水体质量系数; α_1 为系数(橡胶防冲设施取用 0.2); v_b 为横浪作用下系泊船舶对码头撞击的法向速度($m \cdot s^{-1}$); H 为波高(m),按船舶不离开码头的最大波高计算; B 为船宽(m); D 为船舶平均吃水(m); d 为码头前沿水深(m); L 为波长(m),计算公式为

$$L = \frac{g\bar{T}^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (3)$$

其中 \bar{T} 为平均周期(s).

将式(2)和(3)代入式(1),得

$$E_{w_0} = \frac{\alpha_1^2}{4\pi} C_m M g H (H/L) (L/B)^2 (d/D)^2 \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (4)$$

式(4)是系泊船舶撞击能的基本公式,但《港口工程荷载规范》(JTJ 215—98)对式(4)做了适当调整,将 d/D 的幂次改为 2.5,并将系数 α_1 提高到 0.22,为表达方便,系数 $\alpha_1^2/4\pi$ 近似取为 0.004,得到系泊船舶有效撞击能 E_{w_0} 的计算公式为

$$E_{w_0} = \alpha C_m M g \frac{H^2}{L} (L/B)^2 (d/D)^{2.5} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (5)$$

其中 α 取 0.004.

当系靠船结构物由多个靠船墩组成时,分配在每个靠船墩上的有效撞击能 E_w 按下式计算:

$$E_w = \frac{K}{n} E_{w_0} \quad (6)$$

式中: n 为靠船墩数目; K 为靠船墩之间有效撞击能分配不均匀系数.

将式(5)代入式(6),得

$$E_w = \frac{K}{n} \left[\alpha C_m M g \frac{H^2}{L} (L/B)^2 (d/D)^{2.5} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right] \quad (7)$$

2 船舶有效撞击能的统计分析

式(7)中 α 、 C_m 、 K 和 H 应当作随机变量来考虑,下面对它们分别进行统计分析.

2.1 α 、 C_m 和 K 的统计分析

文献[5]通过对已有试验数据的统计分析,给出了 α 、 C_m 和 K 的统计参数和概率分布类型,如表 1 所示.

2.2 波高 H 的统计分析

文献[6]利用渤海海域波浪要素的观测结果,

给出波高的统计资料,如表 2 所示,表中 α_H 和 u_H 分别为波高 H 极值 I 型分布函数的参数; \bar{H} 和 δ_H 为波高的均值和变异系数.

表 1 α 、 C_m 和 K 的统计参数和概率分布类型
Tab. 1 Statistical parameters and probability distribution of α , C_m and K

随机变量	统计参数		分布类型	
	均值系数	变异系数		
α	0.001 6	0.432	对数正态	
K	1.25	0.165	极值 I 型	
C_m	满载	1.43	0.163	
	半载	1.11	0.085	正态分布
	空载	1.02	0.100	

表 2 波高的统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of wave height

海区	时间段	分布参数		统计参数		
		α_H	u_H	\bar{H}/m	δ_H	H_{50a}/m
1	1 a	1.657	3.577	3.93	0.197	5.94
	50 a	1.657	5.938	6.29	0.123	5.94
2	1 a	2.434	4.303	4.54	0.116	5.91
	50 a	2.434	5.910	6.15	0.086	5.91

注: H_{50a} 为重现期 50 a 的波高 H

2.3 有效撞击能的统计参数

如果已知上面各随机变量的统计参数,则可计算有效撞击能的统计参数.由式(7)得

$$k'_{E_w} = \frac{\bar{E}_w}{E_{wk}} = \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_k} \cdot \frac{\bar{K}}{K_k} \cdot \frac{\bar{C}_m}{C_{mk}} \cdot \left(\frac{\bar{H}}{H_k} \right)^2 \quad (8)$$

$$\delta'_{E_w} = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_K^2 + \delta_{C_m}^2 + 4\delta_H^2} \quad (9)$$

按《港口工程荷载规范》(JTJ 215—89),取 $\alpha_k = 0.004$, $K_k = 1.8$,满载时 $C_{mk} = 1.45$,半载时 $C_{mk} = 1.25$,空载时 $C_{mk} = 1.05$.将以上数据代入式(8)和(9),就可以得到在不考虑模型不定性时有效撞击能的统计参数,如表 3 所示.

由表 3 可以看出,有效撞击能的均值系数比较小,原因是参数 α 的标准值比较大,文献[7]通过试验得到 α_1 的均值为 0.14,荷载规范 JTJ 215—89 取为 0.2,而荷载规范 JTJ 215—98 取为 0.22,本文为了计算方便把 $\alpha_1^2/4\pi$ 近似取为 0.004,这相当于间接把 α_1 的标准值取为 0.224,所以有效撞击能的均值系数偏小.

表3 有效撞击能统计参数(不考虑模型不确定性)

Tab.3 Statistical parameters of efficient impact energy (without considering the uncertainty of model)

工况	有效撞击能(海区1)				有效撞击能(海区2)			
	均值系数		变异系数		均值系数		变异系数	
	1 a	50 a	1 a	50 a	1 a	50 a	1 a	50 a
满载	0.120	0.307	0.629	0.549	0.162	0.297	0.542	0.520
半载	0.108	0.277	0.613	0.531	0.146	0.267	0.524	0.501
空载	0.118	0.303	0.616	0.533	0.159	0.292	0.527	0.503
平均值	0.115	0.295	0.619	0.537	0.155	0.285	0.531	0.508

当考虑计算模型的不定性时,用 K_p 来表示有效撞击能计算模型的不定性,则

$$K_p = E_w / E_{wk} \quad (10)$$

式中: E_w 为有效撞击能试验值; E_{wk} 为按照规范公式计算得到的有效撞击能. 根据文献[7]的实测数据得到,满载时, K_p 的均值 $\bar{K}_p = 0.74$, 变异系数 $\delta_{K_p} = 0.48$; 半载时, K_p 的均值为 0.58, 变异系

数为 0.43; 空载时, K_p 的均值为 0.47, 变异系数为 0.64. 考虑计算模型不确定性后,有效撞击能的统计参数可以表示为

$$k_{E_w} = \bar{K}_p k'_{E_w} \quad (11)$$

$$\delta_{E_w} = \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \delta'^2_{E_w}} \quad (12)$$

表4为考虑模型不确定性后有效撞击能的统计参数.

表4 有效撞击能统计参数(考虑模型不确定性)

Tab.4 Statistical parameters of efficient impact energy (considering the uncertainty of model)

工况	有效撞击能(海区1)				有效撞击能(海区2)			
	均值系数		变异系数		均值系数		变异系数	
	1 a	50 a	1 a	50 a	1 a	50 a	1 a	50 a
满载	0.089	0.227	0.793	0.731	0.120	0.219	0.726	0.710
半载	0.062	0.159	0.751	0.686	0.084	0.154	0.681	0.663
空载	0.055	0.141	0.891	0.836	0.074	0.136	0.832	0.817
平均值	0.069	0.176	0.812	0.751	0.093	0.170	0.746	0.730

由表4可以发现,由两个不同海区计算得到的有效撞击能的均值系数和变异系数差别不大,所以本文为方便计算,取两个海区均值系数和变异系数的平均值作为有效撞击能的统计参数. 经计算,1 a内: $k_{E_w} = 0.081, \delta_{E_w} = 0.779$; 50 a内: $k_{E_w} = 0.173, \delta_{E_w} = 0.741$.

2.4 有效撞击能的概率分布

采用 Monte-Carlo 随机抽样的方法,对有效撞击能的概率分布进行统计分析[8]. 计算时,首先根据 α, C_m, K 和 H 的概率分布函数进行随机数抽样,再将产生的 α, C_m, K, H 的样本值代入式(8)中得到 k'_{E_w} 的样本值,对样本值进行统计分析和 K-S 检验,就可以得到波浪作用下船舶撞击能的概率分布模型.

本文模拟产生了 10 000 个随机样本值,对其

进行拟合优度检验,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,经 K-S 检验,有效撞击能不拒绝服从对数正态分布[9]. 图1为3种概率密度函数的比较图,通过以上分析可以认为有效撞击能的概率分布模型为对数正态分布.

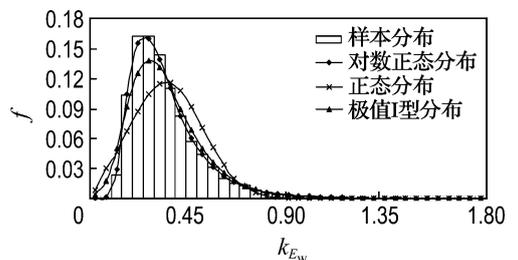


图1 有效撞击能的概率分布

Fig.1 Probability distribution of efficient impact energy

3 船舶撞击力的统计分析

由于码头的靠船墩用钢管焊接而成,属于柔性结构,靠船墩在受到船舶撞击后需考虑其变形.

3.1 波浪作用下船舶撞击力的计算

根据虚功原理,船舶有效撞击能应等于船体、平台和护舷3个部分变形吸收的能量之和,即

$$E_w = \frac{1}{2}k_s\delta_s^2 + E_f + \frac{1}{2}k_d\delta_d^2 \quad (13)$$

式中: E_f 为护舷吸收的能量; k_s 、 k_d 分别为船体和平台的弹性刚度系数; δ_s 、 δ_d 分别为船体和平台的变形.

根据弹性变形理论,船舶撞击力的计算公式为

$$F_x = F_f = k_s\delta_s = k_d\delta_d \quad (14)$$

式中: F_f 为护舷反力(kN); F_x 为船舶靠岸撞击力(kN).

将式(14)代入式(13),可得

$$E_w = \frac{F_f^2}{2k_s} + E_f + \frac{F_f^2}{2k_d} \quad (15)$$

即

$$(k_s + k_d)F_f^2 + 2k_s k_d E_f - 2k_s k_d E_w = 0 \quad (16)$$

由式(16)可以看出,当已知船舶有效撞击能时,护舷的反力 F_f 随着护舷吸收能 E_f 的变化而变化,所以计算护舷反力时需要确定其与吸收能量之间的关系.

对于外海开敞式码头结构,常用的护舷型式是鼓型护舷,图2为YGCH3000型护舷的变形性能曲线^[10].从图2可以看出,橡胶护舷反力和吸收能量都与护舷变形呈非线性关系.由图2就可以确定护舷反力与吸收能之间的关系.图3中的实际曲线为YGCH3000(RL)型护舷的吸收能-反力曲线.

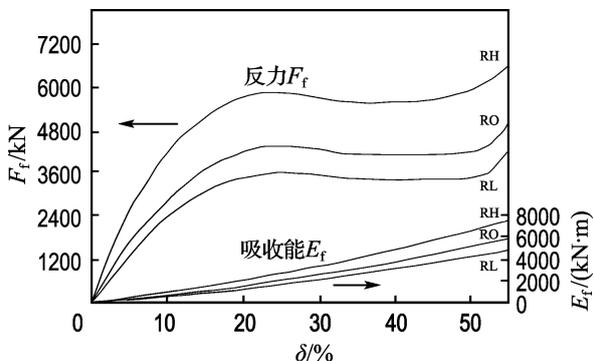


图2 YGCH3000型护舷性能曲线

Fig. 2 Performance curve of YGCH3000 fender

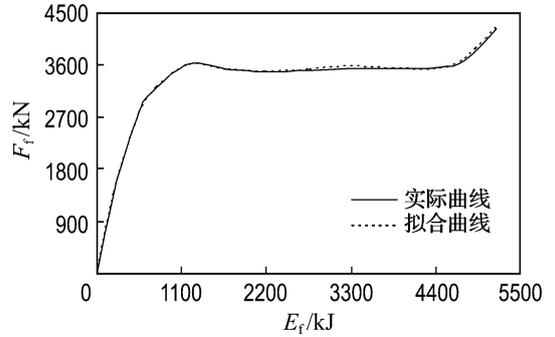


图3 实际曲线与拟合曲线比较

Fig. 3 Comparison of active curve and fitted curve

从图3可以看出,护舷吸收能-反力呈非线性,本文采用分段拟合的方法,根据曲线的形状,将曲线分成3段,应用最小二乘原理^[11]对每一段分别进行三次多项式拟合,为了保证曲线通过原点并且在分段点处连续,分别选取下面的3个分段函数:

$$F_f = \begin{cases} a_1 E_f + a_2 E_f^2 + a_3 E_f^3; & 0 \leq E_f \leq E_1 \\ b_1 (E_f - E_1) + b_2 (E_f - E_1)^2 + b_3 (E_f - E_1)^3 + F_1; & E_1 < E_f \leq E_2 \\ c_1 (E_f - E_2) + c_2 (E_f - E_2)^2 + c_3 (E_f - E_2)^3 + F_2; & E_2 < E_f \leq E_u \end{cases} \quad (17)$$

式中: $a_1 \sim a_3$ 、 $b_1 \sim b_3$ 和 $c_1 \sim c_3$ 分别为3个分段方程的系数; E_1 、 F_1 为第一段拟合方程在第一个分段点处的函数值; E_2 、 F_2 为第二段拟合方程在第二个分段点处的函数值; E_u 为护舷的最大吸收能.

本文根据YGCH3000(RL、RO、RH)3种鼓型护舷的变形性能曲线,通过计算得到其吸收能-反力拟合公式为

$$F_f = \begin{cases} 7.7E_f - 0.00576E_f^2 + 1.54 \times 10^{-6}E_f^3; & 0 \leq E_f \leq 1197.2 \\ -0.31(E_f - 1197.2) + 2.2 \times 10^{-4}(E_f - 1197.2)^2 - 4 \times 10^{-8}(E_f - 1197.2)^3 + 3620.9; & 1197.2 < E_f \leq 3290.2 \\ 0.245(E_f - 3290.2) - 6.2 \times 10^{-4}(E_f - 3290.2)^2 + 3.6 \times 10^{-7}(E_f - 3290.2)^3 + 3536.3; & 3290.2 < E_f \leq 5193 \end{cases} \quad (18)$$

图 3 示出了拟合曲线与 YGCH3000(RL) 型护舷的实际吸收能-反力曲线的比较, 由图可见拟合曲线与实际曲线非常接近。

将式(18)代入式(16), 得到关于护舷吸收能 E_f 的六次方程, 求解该非线性方程即可求出护舷吸收能, 再根据式(18)可计算船舶的撞击力。本文采用对分法求解非线性方程。

3.2 波浪作用下船舶撞击力的统计分析

在计算船舶撞击力的概率分布时, 首先根据规范计算出有效撞击能的标准值, 用标准值去乘有效撞击能的均值系数, 就可以得到有效撞击能的平均值; 其次根据有效撞击能的平均值、变异系数和概率分布函数, 采用 Monte-Carlo 模拟产生有效撞击能的样本值; 最后根据 3.1 节的方法计算撞击力的样本值, 对样本进行统计分析, 即可得到撞击力的统计参数和概率分布模型。

对 100 000 DWT 油轮满载状况下进行分析。

船舶尺度与参数的标准值^[12,13] 分别取为 $M=125\ 000\ \text{t}$, $H=2.0\ \text{m}$, $L=2.0\ \text{m}$, $B=40.8\ \text{m}$, $d=21.5\ \text{m}$, $D=15.5\ \text{m}$, $\alpha=0.004$, $C_m=0.004$, $K=1.8$, $n=2.0$ 。

根据文献[14], 船体的弹性刚度系数 k_s 近似取为 $9.0 \times 10^4\ \text{kN/m}$, 由于轻型码头为柔性结构, 当刚度比不同时, 撞击力的统计参数也不同。在确定撞击力的统计参数时, 以 YGCH3000(RO) 型护舷的初始刚度为基准刚度, 取靠船墩的刚度为 5、10、20、30、40、50、60 和 70 倍的基准刚度。

表 5~7 给出了在 1 a 和 50 a 内, YGCH3000(RL、RO、RH) 3 种型式护舷在不同刚度比情况下船舶撞击力的统计参数。

对 YGCH3000(RL、RO、RH) 3 种护舷在不同刚度比下的统计参数进行平均, 得到 1 a 和 50 a 内波浪作用下船舶撞击力的统计参数, 结果如表 8 所示, 其分布类型为极值 I 型。

表 5 船舶撞击力的统计参数(YGCH3000(RL))

Tab. 5 Statistical parameters of ship impact force (YGCH3000 (RL))

刚度比	平均值/kN	标准差/kN	标准值/kN	统计参数(1 a)		统计参数(50 a)	
				均值系数	变异系数	均值系数	变异系数
5	1 340.54	681.00	3 540.08	0.378 7	0.508 0	0.618 7	0.363 0
10	1 374.64	700.10	3 544.9 1	0.387 8	0.509 3	0.632 1	0.357 4
20	1 392.74	710.10	3 547.34	0.392 6	0.509 9	0.639 2	0.354 3
30	1 398.94	713.50	3 548.16	0.394 3	0.510 0	0.641 6	0.353 3
40	1 402.08	715.21	3 548.56	0.395 1	0.510 1	0.642 8	0.352 7
50	1 403.96	716.24	3 548.81	0.395 6	0.510 2	0.643 5	0.352 4
60	1 405.23	716.93	3 548.97	0.396 0	0.510 2	0.644 0	0.352 2
70	1 406.14	717.43	3 549.08	0.396 2	0.510 2	0.644 3	0.352 0

表 6 船舶撞击力的统计参数(YGCH3000(RO))

Tab. 6 Statistical parameters of ship impact force (YGCH3000 (RO))

刚度比	平均值/kN	标准差/kN	标准值/kN	统计参数(1 a)		统计参数(50 a)	
				均值系数	变异系数	均值系数	变异系数
5	1 145.09	668.79	4 355.33	0.262 9	0.584 1	0.468 1	0.459 4
10	1 170.48	690.39	4 330.93	0.270 3	0.589 8	0.482 7	0.458 7
20	1 183.97	701.90	4 319.23	0.274 1	0.592 8	0.490 4	0.458 2
30	1 188.59	705.83	4 315.42	0.275 4	0.593 8	0.493 0	0.457 9
40	1 190.92	707.83	4 313.52	0.276 1	0.594 4	0.494 3	0.457 8
50	1 192.33	709.04	4 312.41	0.276 5	0.594 7	0.495 1	0.457 7
60	1 193.28	709.85	4 311.65	0.276 8	0.594 9	0.495 6	0.457 7
70	1 193.95	710.43	4 311.12	0.276 9	0.595 0	0.496 0	0.457 7

表7 船舶撞击力的统计参数(YGCH3000(RH))

Tab.7 Statistical parameters of ship impact force (YGCH3000 (RH))

刚度比	平均值/kN	标准差/kN	标准值/kN	统计参数(1 a)		统计参数(50 a)	
				均值系数	变异系数	均值系数	变异系数
5	1 278.46	745.13	5 920.07	0.216 0	0.582 8	0.386 1	0.474 1
10	1 314.12	776.42	5 915.92	0.222 1	0.590 8	0.399 4	0.475 3
20	1 333.39	793.52	5 910.03	0.225 6	0.595 1	0.406 8	0.475 7
30	1 340.05	799.46	5 907.55	0.226 8	0.596 6	0.409 4	0.475 8
40	1 343.42	802.47	5 906.23	0.227 5	0.597 3	0.410 7	0.475 8
50	1 345.46	804.29	5 905.40	0.227 8	0.597 8	0.411 5	0.475 9
60	1 346.83	805.52	5 904.84	0.228 1	0.598 1	0.412 0	0.475 9
70	1 347.81	806.39	5 904.44	0.228 3	0.598 3	0.412 4	0.475 9

表8 船舶撞击力统计参数

Tab.8 Statistical parameters of ship impact force

船型	撞击力(1 a)		撞击力(50 a)	
	均值系数	变异系数	均值系数	变异系数
YGCH3000(RL)	0.392	0.510	0.638	0.355
YGCH3000(RO)	0.274	0.592	0.489	0.458
YGCH3000(RH)	0.225	0.595	0.406	0.476
平均值	0.297	0.566	0.511	0.429

采用上面相同的计算方法对 YGCH2500 (RL、RO、RH)3 种护舷在不同刚度比下船舶撞击力的统计参数进行了计算,计算结果与表 8 相差不大,所以可以将表 8 的计算结果作为船舶系泊撞击力的统计参数。

在研究波浪作用下船舶撞击力的概率分布时,取靠船墩刚度为 15 倍的基准刚度.采用 Monte-Carlo 方法进行随机抽样,模拟产生了 10 000 个随机样本值,对其进行拟合优度检验,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,经 K-S 检验,船舶撞击力不拒绝服从极值 I 型分布.图 4 为 YGCH3000 (RL)型护舷所对应的撞击力概率分布的比较图,

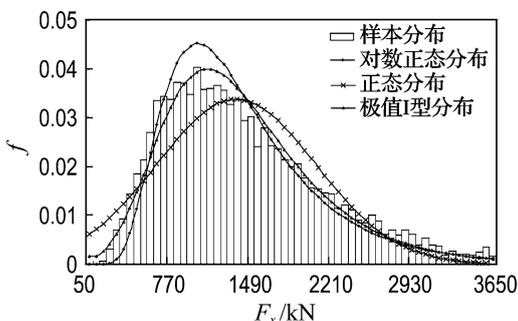


图4 船舶撞击力概率分布

Fig.4 Probability distribution of ship impact force

本文选极值 I 型分布作为波浪作用下船舶撞击力的概率分布。

4 结 论

(1)在设计基准期 1 a 和 50 a 内,波浪作用下船舶撞击能和撞击力的概率分布函数可以分别用对数正态分布和极值 I 型分布来描述。

(2)设计基准期 1 a 内,船舶撞击力的均值系数为 0.297,变异系数为 0.566;设计基准期 50 a 内,船舶撞击力的均值系数为 0.511,变异系数为 0.429。

参考文献:

- [1] BYFIELD M, NETHERCOT D. Safety variations in steel designed using Eurocode 3 [C] // **JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration**. Swiss:Swiss Federal Institute of Technology Press, 2002
- [2] GULVANESEAN H, HOLICKY M. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member [C] // **JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration**. Swiss:Swiss Federal Institute of Technology Press, 2002
- [3] TREZOS C G, THOMOS G C. Reliability based calibration of the Greek seismic code [C] // **JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration**. Swiss:Swiss Federal Institute of Technology Press, 2002

- [4] SADOVSKY Z. Probability based design codes in Slovakia-historical development and new challenges [C] // **JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration**. Swiss Federal Institute of Technology Press, 2002
- [5] 贡金鑫,王建超. 海外轻型码头荷载统计分析[R]. 大连:大连理工大学, 2009
- [6] 王欣平. 海洋环境随机荷载与平台结构可靠度分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 2000
- [7] 王欣平. 关于波浪作用下码头船舶荷载问题的探讨[J]. 水利水运学报, 1976, 1(1):1-39
- [8] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2003
- [9] 滕素珍,冯敬海. 数理统计学[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005
- [10] 顾民全. 海港工程设计手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2001
- [11] 魏毅强,张建国,张洪斌. 数值计算方法[M]. 北京:科学出版社, 2005
- [12] 交通部第一航务工程勘察设计院,交通部第二航务工程勘察设计院. JTJ 215—98 港口工程荷载规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1998
- [13] 陈际丰,刘 强,牛恩宗. 波浪作用下船舶撞击力计算参数的选择[J]. 水运工程, 2007, 11:6-9
- [14] 陆文发,李林普,高道明. 近海导管架平台[M]. 北京:海洋出版社, 1992

Statistical analysis of ship impact force under wave action for flexible dolphin

WANG Jian-chao^{*}, GONG Jin-xin, FENG Yun-fen

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The formula for calculating the ship impact force under wave action of open sea light wharf is given by considering the elastic deformation of hull and dolphin and the nonlinear behavior of fender. The ship impact force under wave action for flexible dolphin is statistically analyzed by Monte-Carlo method based on the known probability distribution type of random variables in this formula. The probability distribution function and statistical parameters (means coefficient and variation coefficient) under different stiffness ratio of ship impact force are put forward in design reference period. The results show that extreme Type I can be used as probability distribution model of ship impact force under wave action for flexible dolphin in design reference period 50 a. The means coefficient and variation coefficient of ship impact force are 0.511 and 0.429, respectively.

Key words: flexible dolphin; ship impact force; probability distribution