

某深水开敞式码头船舶荷载现场试验研究^{*}

丁伟农 陈中一 葛 洪

(南京水利科学研究院 南京 210029) (江苏省交通规划设计院 南京 210005)

摘 要 介绍对某港煤码头进行的深水开敞式码头船舶荷载现场试验的测试内容、方法和结果 , 以及对测试资料的概率统计分析结果 . 通过对船舶荷载的概率分布规律的研究 , 提出在可靠度设计中 , 撞击能量可采用对数正态概率分布、系统力最大值可采用极值Ⅰ型概率分布作为荷载模型 , 靠船速度可采用极值Ⅰ型概率分布作为靠船速度计算模型 . 按南京水利科学研究院建议公式计算的波浪作用下系泊船舶的撞击能量较按规范公式计算的撞击能量与现场试验结果更为接近 .

关键词 开敞式码头 , 船舶荷载 , 现场试验 , 概率统计分析

中图号 U674

对于深水开敞式码头 , 船舶荷载是主要的设计荷载之一 . 以往南京水利科学研究院、大连理工大学、河海大学等单位曾对码头船舶荷载进行了一系列室内模型试验和少量现场试验 , 但对于大型深水开敞式码头的现场试验国内做得很少 . 这一方面的研究还远远不能满足工程实际的需要 . 由于港口工程结构设计正在进入以概率论为基础的结构可靠度设计阶段 , 并以此制订新的港工设计规范 , 因此解决荷载的统计分析问题便显得十分重要和迫切 . 本项试验研究的目的是通过深水开敞式码头船舶荷载现场试验 , 研究船舶荷载的概率统计分布 , 建立荷载概率分布模型 , 以便为开敞式码头的设计及新的港工设计规范的制订提供必要的技术资料 .

1 码头及试验概况

某港是我国建成的第一座开敞式 10 万吨级煤炭出口码头 , 设计能力为年装运煤炭 1 500 万 t , 于 1985 年建成投产运行 . 码头为沉箱墩式结构 , 各墩呈一字形平面布置 , 码头两侧各有 1 个泊位 (外侧为 10 万吨级 , 内侧为 2.5 万吨级) , 可同时靠船 . 该码头伸入近海 , 由抛石结构引堤及钢引桥与岸相连接 , 是一较为典型的深水开敞式码头^[1] .

现场试验于 1991 年 9 月 4 日 ~ 10 月 31 日进行 , 先后观测了 31 艘船舶的靠泊过程及系泊状态 . 各船的有关资料见表 1 .

表 1 试验期间泊靠码头船舶有关资料

Table 1 Data of ships at anchor to the pier during field test

序号	船名	总长/m	船宽/m	型深/m	总排水吨位/t	压载吨位/t	吃水/m
1	Ranger	174	25.5		26 245	16 332	9.9
2	安平 2	195	28.4		39 000	24 489	11.0
3	浙海 118	139	21.0	10.7	11 000	8 554	6.6
4	振奋 12	164	22.0	13.0	19 059	12 820	9.5
5	海州	185	23.2	13.1	24 500	16 436	9.8
6	福州	186	23.2	14.2	24 500	16 499	9.8
7	Pachoble	183			31 901	18 349	
8	徐州	186	23.2	14.2	24 180	16 467	9.8
9	安平 6	195	28.4		39 000	24 489	11.2
10	振奋 10	164	22.0	13.0	19 059	12 820	9.5

收稿日期 :1999-04-26

第一作者简介 :丁伟农 ,男 ,高级工程师 ,结构工程专业 ,主要从事港工结构计算分析及试验研究 .

^{*} 交通部科学技术发展项目 (22—3 86—013—G) ,获 1993 年度交通部科技进步三等奖 .

续表 1

序号	船名	总长/m	船宽/m	型深/m	总排水吨位/t	压载吨位/t	吃水/m
11	振奋 8	164	22.0	13.4	19 509	12 827	9.5
12	振奋 6	164	22.0	11.4	19 509	12 827	9.5
13	华鹏	197	24.0	15.0	34 000	19 683	9.2
14	大鹏	176	25.4		25 906	15 356	9.6
15	宝山海	225	32.2		64 909	35 842	13.1
16	振奋 2	165	22.9	13.5	21 100	13 937	9.5
17	安平 2	195	28.4		39 000	24 489	11.0
18	振奋 12	164	22.0	13.0	19 059	12 820	9.5
19	Newton	147	22.9		19 158	10 579	9.6
20	华万	175	26.0	10.0	30 868	16 330	10.4
21	华鹏	197	24.0	15.0	34 000	19 683	9.2
22	振奋 8	164	22.0	13.4	19 509	12 827	9.5
23	Kuznetsov	216	31.8		52 420	31 661	8.0
24	华志	178	26.8	14.7	30 796	17 134	
25	华图	175	26.0	14.5	30 868	16 326	10.5
26	湖州	185	23.2	13.1	24 500	16 436	10.3
27	锦州	186	23.2	14.2	24 180	16 467	9.8
28	振奋 9	164	22.0	13.4	19 509	12 827	9.5
29	安平 1	195	28.4		39 000	23 952	11.2
30	振奋 10	164	22.0	13.0	19 059	12 820	9.5
31	华万	175	26.0	10.0	30 868	16 330	10.4

测试内容包括 船舶靠泊时的撞击力、撞击能量、靠船速度以及船舶系泊时波浪作用下的系缆力、撞击力、撞击能量等. 测试方法为 采用滑移式测速仪测试靠船速度 ;采用位移传感装置测量鼓形橡胶护舷的压缩变形 ,然后根据其力学性能曲线计算撞击力和撞击能量 ;采用应变式缆绳测力计以及多路数据采集处理系统测试系缆力 .测试中所用一次仪表均为自行研制.

2 试验结果和分析

2.1 船舶靠泊时的靠船速度、撞击能量和撞击力

现场试验中对 28 艘船舶进行了靠船速度、撞击能量和撞击力的测试 ,其结果见表 2.

表 2 实测靠船速度、撞击能量和撞击力

Table 2 Measured berthing velocity energy and impact

序号	船名	靠船速度 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	撞击能量 /kJ	撞击力 /kN	序号	船名	靠船速度 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	撞击能量 /kJ	撞击力 /kN
1	Ranger	14.1	184	1930	15	宝山海	9.0	184	1793
2	安平 2	9.7	123	1622	16	振奋 2	11.2	95	1333
3	浙海 118	11.2	63	828	17	安平 2	8.0	34	667
4	振奋 12	12.0	63	878	18	振奋 12	16.7	214	2042
5	海州	14.7	140	1846	19	Newton	15.5	173	1476
6	福州	16.0	196	1903	20	华万	12.0	120	1552
7	Pachoble	13.3	140	1794	21	华鹏	9.8	95	1333
8	徐州	13.0	140	1794	22	振奋 8	16.0	184	1923
9	安平 6	13.3	214	2042	23	Kuznetsov	10.5	238	2112
10	振奋 10	11.4	95	1333	24	华志	12.0	123	1622
11	振奋 8	13.7	123	1622	25	华图	9.6	95	1333
12	振奋 6	13.9	123	1622	26	湖州	14.1	184	1903
13	华鹏	12.0	140	1846	27	锦州	13.1	142	1806
14	大鹏	14.5	184	1903	28	振奋 9	11.0	95	1333

船舶靠泊时的靠船速度 V 、撞击能量 E 和撞击力 P 都是独立的随机变量 ,表 2 所列实测数据即为它们的样本(样本个数 $n = 28$). 根据这些样本我们可运用假设检验的方法研究随机变量 V , E , P 的概率分布规

律 选择正态分布、对数正态分布和极值Ⅰ型分布对 V 、 E 、 P 的概率分布函数用 K-S 法和 A-D 法进行分布假设检验. 检验置信度取 0.05, 检验结果列于表 3 中. 经分析得出: 靠船速度 V 以接受极值Ⅰ型分布假设较为合理, 撞击能量 E 以接受对数正态分布假设较为合理, 撞击力 P 以接受正态分布假设较为合理.

表 3 各随机变量的概率分布函数假设检验

Table 3 Hypothesis test of probability distribution functions for random variables

随机变量	样本个数	均值	标准差	变异系数	分布函数	K-S 法		A-D 法		检验结果
						D_n	$D_{n,0.05}$	A_n^2	$A_{n,0.05}^2$	
靠船速度	28	12.6	2.3	0.180	正 态	0.133	< 0.166	0.326	< 0.708	接 受
					对数正态	0.086	< 0.166	0.316	< 0.708	接 受
					极值Ⅰ型	0.115	< 0.197	0.676	< 0.730	接 受
靠泊撞击能量	28	140	50	0.357	正 态	0.122	< 0.166	0.817	> 0.708	K-S 法接受 A-D 法拒绝
					对数正态	0.115	< 0.166	0.689	< 0.708	接 受
					极值Ⅰ型	0.129	< 0.197	0.959	> 0.730	K-S 法接受 A-D 法拒绝
靠泊撞击力	28	1 614.	374	0.229	正 态	0.089	< 0.166	0.555	< 0.708	接 受
					对数正态	0.139	< 0.166	1.750	> 0.708	K-S 法接受 A-D 法拒绝
					极值Ⅰ型	0.142	< 0.197	2.980	> 0.730	K-S 法接受 A-D 法拒绝
首缆力	13	150	81	0.540	正 态	0.154	< 0.227	0.469	< 0.679	接 受
					对数正态	0.099	< 0.227	0.324	< 0.679	接 受
					极值Ⅰ型	0.162	< 0.279	0.469	< 0.719	接 受
首倒缆力	13	73	39	0.530	正 态	0.161	< 0.234	0.747	> 0.679	K-S 法接受 A-D 法拒绝
					对数正态	0.110	< 0.234	0.582	< 0.679	接 受
					极值Ⅰ型	0.189	< 0.288	0.213	< 0.713	接 受
尾倒缆力	13	51	25	0.490	正 态	0.087	< 0.234	0.248	< 0.679	接 受
					对数正态	0.137	< 0.234	0.575	< 0.679	接 受
					极值Ⅰ型	0.169	< 0.288	0.248	< 0.713	接 受
尾横缆力	16	89	81	0.910	正 态	0.166	< 0.213	0.569	< 0.683	接 受
					对数正态	0.147	< 0.213	0.632	< 0.683	接 受
					极值Ⅰ型	0.172	< 0.262	0.569	< 0.721	接 受
尾缆力	16	111	82	0.740	正 态	0.238	> 0.202	0.707	> 0.685	拒 绝
					对数正态	0.173	< 0.202	1.083	> 0.685	K-S 法接受 A-D 法拒绝
					极值Ⅰ型	0.210	< 0.254	0.707	< 0.722	接 受
系泊撞击能量	8	160	39	0.240	正 态			0.194	< 0.710	接 受
					对数正态			0.203	< 0.710	接 受
					极值Ⅰ型			1.424	> 0.707	拒 绝

现场试验期内船舶靠泊时的靠船速度、撞击能量和撞击力出现的最大值(97.7%分位值)可取为

$$V_{\max} = m_V + 2\sigma_V = 17.2(\text{cm/s})$$
$$E_{\max} = m_E + 2\sigma_E = 240(\text{kJ})$$
$$P_{\max} = m_P + 2\sigma_P = 212(\text{kN})$$

值得注意的是, $V_{\max}$ 已大于规范推荐的上限值 15 cm/s(1 万吨 < W < 3 万吨)或 10 cm/s(W > 3 万吨),而 $E_{\max}$ 则远远小于本码头设计计算值(标准船型 12.5 万吨, 靠泊角度 15°, 靠泊速度 20 cm/s 时撞击能量可达 2 000 kJ 以上).

2.2 船舶系泊时的系缆力

现场试验中对 23 艘系泊船舶的系缆力(包括首缆力、首横缆力、首倒缆力、尾倒缆力、尾横缆力、尾缆力)进行了测试, 测得的最大系缆力及风浪资料列于表 4.

表 4 船舶系泊时实测最大系缆力及风浪资料

Table 4 Measured maximum mooring forces and data of wind and waves

序号	船名	最大系缆力/kN						风浪资料				
		首缆力	首横 缆力	首倒 缆力	尾倒 缆力	尾横 缆力	尾缆力	风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风向	波高 /m	周期 /s	波向
1	Ranger	240		98	51	8	213	2	E	0.6	3.8	E
3	浙海 118			20				2	SSE	0.6	4.6	S
5	海州	117		27	20		20	5	ES	0.6	2.7	ES
6	福州	142		77				5	WWE	0.9	3.2	WWE
8	徐州	63	14	63		138	30	7	ES	1.0	4.4	ESE
10	振奋 10	294		141	90	15	216	2	NWE	0.6	3.6	E
11	振奋 8	83	31	32				7	SSW	1.0	3.2	SSW
13	华鹏				19	296	55	5	NNE	0.9	3.2	NNE
14	大鹏	210	35	58	75	45	46	8	N	0.5	2.8	E
15	宝山海					9	24	6	SW	0.7	8.1	SW
16	振奋 2	47			10			6	SW	0.76	8.1	SW
17	安平 2	225		92	86	8	210	2	E	0.7	8.1	SW
18	振奋 12			15				2	SSW	0.6	4.6	SSW
19	Newton	76	135	123				5	SW	0.8	3.6	SE
20	华万	258				23		4	E	0.6	4.0	E
21	华鹏	162		95		96	24	2	S	0.8	5.8	E
22	振奋 8	138		105	67	15	66	2	NW	0.6	3.6	NE
23	Kuznetsov				42	180	45	7	SSW	1.0	3.2	SSW
24	华志				40	105	191	5	ES	0.9	3.1	SW
25	华图				75	110	152	5	E	0.8	3.6	SE
26	湖州				52	137	183	6	SE	1.0	4.1	E
27	锦州				43	55	196	7	E	0.8	3.8	E
31	华万					186	203	5	SW	0.8	3.6	SE

对测试结果所作的统计分析说明如下：

a. 根据试验期内各艘船舶在码头的平均系泊时间 ,取基本时段 $\tau = 2 \text{ d}$. 若试验期内测到了 k 艘船的某一系缆力 ,则该系缆力统计基准期 $T = k\tau$.

b. 试验中某一艘船系泊时测得的某一系缆力数据经处理后 ,可以得到在 τ 时段内该系缆力的最大值. 在试验基准期内各系缆力的最大值 Q_i 都是独立的随机变量 ,表 2 所列各组实测数据即为它们的样本(样本个数 k_i). 船舶系泊时的系缆力变化实际上是一个随机过程 ,我们可以将复杂的随机过程分析简化为一般离散随机变量 Q_i 的统计计算 ,选择正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布对 Q_i 的概率分布函数用 K-S 法和 A-D 法进行假设检验. 检验置信度取 0.05 ,检验结果见表 3(首横缆力最大值的样本个数 $k = 4$,未进行分布假设检验). 从表中可以看出 ,各系缆力的最大值 Q_i 以接受极值 I 型分布假设较为合理. 其分布函数为

$$F(Q_i) = \exp\{- \exp[- \alpha(Q_i - u)]\}$$

式中

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma_{Q_i}}$$
$$u = m_{Q_i} - \frac{0.5772}{\alpha}$$

m_{Q_i} 和 σ_{Q_i} 分别为随机变量 Q_i 的均值和标准差.

c. 在基准期 $T = n\tau$ ($n > k$)内各系缆力的最大值 $Q_{i\max}^T$ (97.7% 分位值)可由下式推算：

$$Q_{i\max}^T = m_{Q_i}^T + 2\sigma_{Q_i}^T$$

其中统计参数

$$m_{Q_i}^T = m_{Q_i} + \frac{\ln n}{\alpha}$$

$$\sigma_{Q_i}^T = \sigma_{Q_i}$$

$Q_{i\max}^T$ 推算结果及参数 $m_{Q_i}^T, \sigma_{Q_i}^T$ 值列于表 5. 基准期 T 取试验期(2 个月, $n = 30$)或 1 年使用期(按设计作业天数计, $n = 147$). 由表 5 可见, 在试验期内推算的系缆力最大值为 527 kN(首缆), 在 1 年使用期内推算的系缆力最大值为 628 kN(首缆), 均远远小于设计计算值. 这说明, 船舶系泊时的系缆力有足够的安全度.

表 5 船舶系泊时基准期 $T = n\tau$ 内最大系缆力 $Q_{i\max}^T$ 及有关参数

Table 5 Maximum mooring forces $Q_{i\max}^T$ during datum period $T = n\tau$ and related parameters									
系缆力	m_{Q_i}	σ_{Q_i}	α	2 个月试验期($n = 30$)			1 年使用期($n = 147$)		
				$m_{Q_i}^T$	$\sigma_{Q_i}^T$	$Q_{i\max}^T/\text{kN}$	$m_{Q_i}^T$	$\sigma_{Q_i}^T$	$Q_{i\max}^T/\text{kN}$
首缆力	150	81	0.015 8	365	81	527	466	81	628
首倒缆力	73	39	0.032 9	176	39	254	225	39	303
尾倒缆力	51	25	0.051 3	117	25	167	148	25	198
尾横缆力	89	81	0.015 8	304	81	466	405	81	567
尾缆力	111	82	0.015 6	329	82	439	431	82	595

2.3 波浪作用下系泊船舶的撞击能量

现场试验中对 8 艘船舶系泊时的撞击能量进行了测试, 并分别按照港工技术规范^[2]和文献[3]建议公式进行了计算, 测试及计算结果列于表 6. 从表中可以看出, 按规范公式计算的撞击能量大于实测结果, 而按建议公式计算的撞击能量则与实测结果较为接近. 从实测结果反算的建议公式中的 $\gamma_d = 3.07$, 与建议公式对 2 万吨级船舶(半载、满载)取 $\gamma_d = 3.0$ 基本一致. 这也说明了建议公式中的 γ_d 取值是合理的.

表 6 波浪作用下系泊船舶的实测与计算撞击能量

Table 6 Measured and calculated berthing energies of moored ships under waves					
序号	船名	计算值 E_c/kJ		实测值 E_t/kJ	从 E_t 反算建议公式中 γ_d 值
		按规范公式	按建议公式		
6	福州	160	198	180	2.28
8	徐州	370	246	151	1.53
13	华鹏	251	125	105	2.10
15	宝山海	341	255	223	2.19
17	安平 2	141	106	155	3.64
19	Newton	146	93	120	3.22
22	振奋 8	239	185	150	2.03
23	Kuznetsov	282	302	195	1.61
	均值 m_E	241	189	160	2.33
	标准差 σ_E	88	76	39	0.74

对于系泊船舶撞击能量的实测结果, 采用适用于小子样假设检验的 A-D 法进行了概率分布假设检验. 检验结果(表 3)表明, 系泊船舶撞击能量也接受对数正态分布假设, 这和靠泊船舶的情况相一致.

3 结 语

通过某港煤码头船舶荷载现场试验研究分析, 现提出如下几点意见和建议:

- a. 试验结果表明, 该码头所受实际作用的船舶荷载远小于设计荷载. 这主要是由于现场试验期间泊靠船舶一般在 1~5 万吨级而且风浪较小, 未观测到更大吨位船舶和出现较大风浪. 因而本次现场试验虽在 10 万吨级码头上进行, 其试验研究成果应更符合 1~5 万吨级码头的使用情况.
- b. 船舶靠泊时的撞击能量可采用对数正态概率分布为可靠度设计中的荷载模型; 靠船速度可采用极值 I 型概率分布为可靠度设计中的靠船速度计算模型.
- c. 船舶系泊时各系缆力最大值可采用极值 I 型概率分布为可靠度设计中的荷载模型; 波浪作用下系泊船舶的撞击能量可采用对数正态概率分布为可靠度设计中的荷载模型.
- d. 按港工技术规范^[2]计算的波浪作用下系泊船舶的撞击能量一般大于本次现场试验结果, 而按文献

[3] 建议公式计算的撞击能量则与现场试验结果较为接近. 这一建议公式可供设计及修改港工技术规范中有关条文时参考.

e. 今后有条件时应对应深水开敞式码头开展进一步的船舶荷载现场试验研究,以便为这一型式码头的设计及新规范的制订积累和提供更充分的技术资料.

参 考 文 献

1 严恺.海港工程.北京:海洋出版社,1996.305~311
2 中华人民共和国交通部.港口工程技术规范(1987).北京:人民交通出版社,1988.482~488
3 高明,赵颖,黄根芳.规则波作用下系泊船舶撞击能量综合分析与建议的计算式.水利水运科学研究,1990,(14) 367~379

Field Test Study on Ship's Berthing and Mooring Loads
on a Deepwater Open Sea Pier

Ding Weinong Chen Zhongyi

(Nanjing Hydraulic Research Institute ,Nanjing 210029)

Ge Hong

(Jiangsu Provincial Transportation Planning and Design Institute ,Nanjing 210005)

Abstract The contents ,methods and results of field test for ship's berthing and mooring loads on a deepwater open sea pier of a port and the probabilistic analysis of test results are described. According to the research on the probability distribution patterns of ship's berthing and mooring loads ,it is advanced that in reliability design the lognormal probability distribution may be adopted as a calculating model for the berthing energy and the extremum-I probability distribution for the maximum mooring forces and the berthing velocity. The berthing energy of the moored ships under waves calculated by the proposed formula by NHRI is closer to the results of field test than that by the formula stipulated in the Technical Code for Port Engineering.

Key words open sea pier ;ship's berthing and mooring loads ;field test ;probabilistic analysis