

文章编号: 1005-9865(2001)02-0045-05

码头系泊船舶模型试验

向 溢, 杨建民, 谭家华, 张承懿

(上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

摘 要:通过对一艘 50kDWT 码头系泊船舶的模型试验, 得出了系泊缆绳张力随外载荷变化的一般规律, 对码头系泊有一定的参考价值。

关键词:缆绳; 系泊; 模型试验

中图分类号: U662.2 **文献标识码:** A

Model experiment of ship moored at berth

XIANG Yi, YANG Jian-min, TAN Jia-hua, ZHANG Cheng-yi

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the model experiment of a 50kDWT barge, subjected to external forces (wind, current and wave), moored at berth, some regular patterns of mooring line forces changing with environmental conditions are studied. It is of some reference value for marine designers.

Key words: mooring; mooring lines; model experiment

码头系泊船舶系泊缆绳的受力是一个非常复杂的问题, 在强风大浪的作用下, 码头系泊船舶往往缆绳崩断, 造成严重的海损事故, 这在国内外屡见不鲜。随着港口建设的发展, 大型船舶日益增多, 对系泊船舶在风浪流作用下的系缆力的确定日显重要。我国南京水利科学研究院和大连理工大学海工所做过一些大型船舶系泊时船舶荷载的实验研究工作和一些现场试验, 取得了许多有价值的研究成果^[1]。

为了解某码头系泊船舶在 50 年一遇的海洋环境条件下各系泊缆绳受到的平均张力及变化规律, 在上海交通大学海洋工程国家重点实验室风浪流水池, 对一艘 50kDWT 散货船进行了满载系泊状态下的试验研究。

1 模型试验

试验在确定水深 15.5m 的情况下, 采用正交试验方法, 将系缆船模连同码头在五个风浪流方向、五个不同的规则波波高及五个不同的风流速度下进行正交试验, 这样可包括 50 年一遇海况及一般海况下的船舶系缆绳的受力情况。

以下给出的试验数据已根据流体力学相似准则换算至实体数据。

选定实体与模型之间的缩尺比 $\lambda = 35.46$, 船模及码头模型制作, 船模重量、重心位置、转动惯量的调节, 系泊缆绳力学特性, 防撞垫以及海洋环境模拟等均根据相似准则按此缩尺比进行。

1.1 相似定律

保持实体与模型之间的重力相似和惯性力相似, 即满足傅汝德数 (Froude Number) 和斯托哈数 (Strouhal Number) 相等, 因此有:

收稿日期: 2000-10-09

作者简介: 向溢 (1972-), 男, 土家族人, 博士, 主要从事海洋工程专业研究。

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$$

$$\frac{V_m T_m}{L_m} = \frac{V_s T_s}{L_s}$$

式中： V 、 L 、 T 分别为速度、特征线尺度及主要周期，下标 m 及 s 分别表示模型和实体。根据上述相似法则，模型与实体各种物理量之间的转换关系如表 1 所示，表中 λ 为模型线性缩尺比。

表 1 模型与实船各物理量之间的转换关系

Tab.1 The transformation relationship between prototype and its model

项 目	符号	缩尺比	项 目	符号	缩尺比
线尺度	L_s/L_m	λ	周期	T_s/T_m	$\lambda^{1/2}$
线速度	V_s/V_m	$\lambda^{1/2}$	面积	A_s/A_m	λ^2
线加速度	a_s/a_m	1	体积	∇_s/∇_m	λ^3
角度	φ_s/φ_m	1	惯性矩	I_s/I_m	λ^5
角速度	$\dot{\varphi}_s/\dot{\varphi}_m$	$\lambda^{-1/2}$	力	F_s/F_m	λ^3

1.2 船及码头上系泊缆布置

实船上的 8 个系缆柱以双根尼龙缆与靠泊码头系牢，单根尼龙缆的直径为 $\Phi = 80\text{ mm}$ ，共 16 根缆绳，每根缆绳设定的预张力为 5 t。模型试验中采用 8 根缆绳，按截面积相等的原则，相应的实船尼龙缆直径为 $\Phi = 113\text{ mm}$ ，设定的预张力为 10 t，图 1 给出了船与码头系缆的布置及有关尺寸。

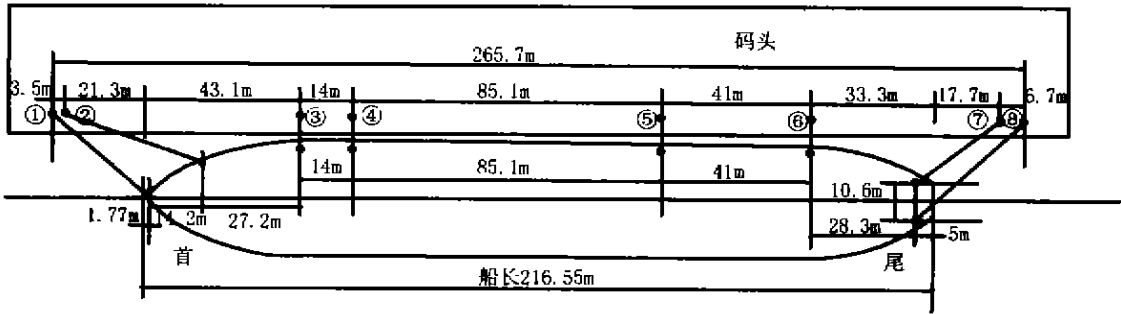


图 1 船舶与码头系泊缆的布置

Fig.1 Mooring arrangement of the model experiment

图 1 中，编号①、②是船首系泊缆绳，⑦、⑧是船尾系泊缆绳，③、④、⑤、⑥是船舶中部相应位置的横向系泊缆绳。

1.3 船模、缆绳、防撞垫的模拟

1.3.1 船模主要参数

50kDWT 散货船模型根据给定线型由木质制作加工而成，船模的排水量、重心位置及纵横向惯性半径等，在试验室的校验架上依靠调节模型内的压铁重量及位置达到所规定的数值。表 2 列出了实船和船模的主尺度及有关参数。

1.3.2 缆绳

缆绳模型最重要的是弹性系数的模拟。图 2 给出了实船尼龙缆绳系泊的力学性能曲线和模拟结果点。从图 2 可以看出，系泊缆绳模型的弹性模拟与实物缆绳基本一致。

1.3.3 防撞垫的模拟

实际码头平台下方安装了一系列的 H1600 鼓形橡胶护舷，并在外侧覆盖了矩形的铁板及合成树脂材料作为防撞垫。鼓形橡胶护舷的高度为 1 600 mm，外径为 2 400 mm，覆盖的铁板及树脂材料的高度(厚度)为 239 mm，单个防撞垫的模型除尺寸按照缩尺比模拟外，最重要的是橡胶护舷性能(反力与变形关系)的模拟。H1600 鼓

表 2 实船和船模的主尺度及有关参数(满载状态)

Tab.2 Some parameters of the prototype and its model

项目名称/单位	实船	模型
总长 $L_{\text{总}}/\text{m}$	216.55	6.107
垂线间长 $L_{\text{垂}}/\text{m}$	206.25	5.816
型宽 B/m	32.20	0.908
型深 D/m	16.20	0.457
吃水(平浮) T/m	12.0	0.339
排水体积 V/m^3	67,238	1.508
重心纵向位置(中横剖面) L_{CG}/m	3.44	0.097
重心高度(基线之上) K_{G}/m	9.01	0.254
纵向惯性半径 K_{yy}/m	51.56	1.454
横向惯性半径 K_{xx}/m	8.87	0.25
横摇自然周期 T_{R}/s	11.31	1.90

形橡胶的力学性能是:在反力 1 115 kN(113.7 t)时高度的变形为 47.5%,相应的模型防撞垫的力学性能应在反力 2.55 kg 时高度的变形为 47.5%,所制作模型达到了这一要求。将 16 个防撞垫模型按照几何相似原则在码头平台下方沿长度进行安装,使防撞垫在系泊船模沿码头长度范围内都能起到护舷作用。

1.4 海洋环境条件模拟

海洋环境条件模拟按照正交试验方法要求进行,其中各项模拟分别简略说明如下:

(a)水深的模拟是靠升降水池中大面积的假底来实现的。调节假底的高度并用标尺测量水深,调节至相应的模拟水深 0.437 m,对应实际水深为 15.5 m;

(b)风速的模拟是靠调节造风系统鼓风机的转速来实现的,并以叶轮风速仪测量平均风速。对鼓风机的转速进行调节,由叶轮风速仪量得相应的模型风速为 1.175 m/s、2.35 m/s、3.53 m/s 及 4.70 m/s,对应实际风速为 7 m/s、14 m/s、21 m/s 及 28 m/s;

(c)流速的模拟是靠调节造流系统高压水泵的转速来实现的,并以叶轮流速仪测量平均流速。对造流系统高压水泵的转速进行调节,由叶轮流速仪量得相应的模型流速为 0.084 m/s、0.168 m/s、0.252 m/s 及 0.336 m/s,对应实际流速为 0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s 及 2 m/s;

(d)规则波的模拟是靠调节造波机摇板的振幅及周期来实现的,并以电阻式浪高仪测量波高及周期并进行实时记录(变化参数仅考虑波高,没有考虑频率变化);

(e)风浪流方向的模拟,是靠变动模型在水池中的布置和移动局部造流系统的位置来实现的。

1.5 模型在水池中的布置及风浪流方向的规定

按照实际码头 50kDWT 散货船泊位处风浪流的变化情况以及正交试验方法所要求覆盖的风浪流作用方向,本试验中通过变更五个风浪的方向(风浪保持同向,为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180°)和五个水流方向(0° 、 $\pm 45^\circ$ 及 $\pm 90^\circ$)来实现。试验规定:船首针对风浪流定义为 0° ,船尾针对风浪流定义为 180° 。图 3 给出了五种不同流向组合情况下船模连同码头在水池中的布置示意图。

1.6 试验数据采集

在本试验中,六自由度运动仪布置在船模重心纵向位置甲板上的中线处,用于测量船舶在风浪流联合作用下的六自由度运动。八个拉力传感器分别安装在八根系泊缆绳系统缆桩端,用于测量靠泊船舶在风浪流联合作用下各系泊缆绳所受的张力。

当试验模型正确布置在水池中规定的位置,所有测量仪器安装于正确的位置并接至采集系统的相应记录通道后,对数据采集,然后对各系泊缆绳调节至所规定的预张力。试验的步骤依次是造流,达到稳定流速后测量有关数据;其次是造风,达到稳定风速后测量有关数据;最后是由造波机制造所要求的规则波,当规则波作用于模型时开始测量所需要的各种数据。

所有的测量数据以采样速度每秒 20 次记录在计算机中,模-数信号转换由 16bits 的 A/D 转换器处理。每个试验的测量时间不少于 4 分钟,以便获得足够的数据进行分析。

2 试验结果及分析

表 3 列出了风浪流联合作用下 25 次实验所测各缆绳的平均张力。

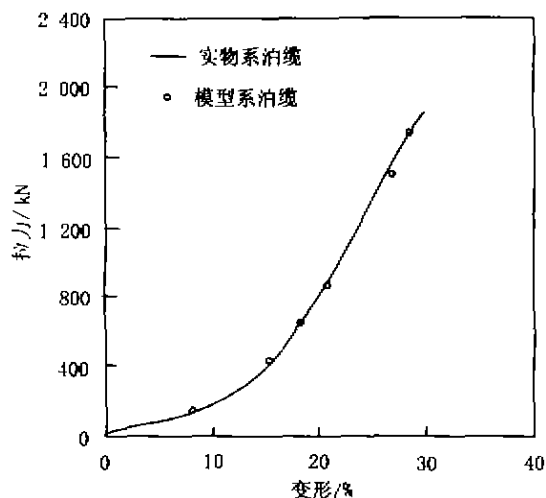


图2 系泊缆绳的力学性能曲线

Fig.2 Force elongation characteristics for mooring line

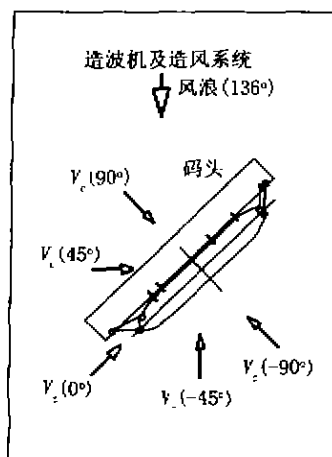


图3 风浪作用方向 135°时的试验布置

Fig.3 Experiment arrangement when wind and wave directions are 135 degree

表 3 试验结果表
Tab.3 Experiment results

试验 编号	风浪 方向/ $^{\circ}$	波高/m	风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流向/ $^{\circ}$	流速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	缆绳张力/t							
						①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
301		0.0	0.0	-90	0.0	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
302		1.0	13.0	90	1.5	11.15	8.06	71.20	53.68	60.43	56.94	13.13	10.25
303	0	2.0	28.0	45	0.5	13.27	23.40	22.66	17.26	17.30	18.43	3.44	5.84
304		3.0	7.0	0	2.0	18.03	18.01	45.85	38.18	41.77	37.88	1.51	3.38
305		4.0	21.0	-45	1.0	14.39	13.98	8.28	10.85	18.59	22.81	6.65	8.06
306		1.0	7.0	-45	0.5	12.55	14.90	12.13	15.87	14.04	14.48	5.81	10.72
307		2.0	21.0	-90	2.0	8.58	10.24	10.55	9.41	2.49	5.33	9.83	5.55
308	45	3.0	0.0	90	1.0	10.62	10.53	60.38	51.83	32.17	19.97	10.65	7.98
309		4.0	14.0	45	0.0	10.00	10.46	51.39	44.29	36.59	29.18	10.47	7.17
310		0.0	28.0	0	1.5	13.08	15.54	9.90	15.00	15.05	16.31	4.78	8.38
311		2.0	14.0	0	1.0	12.64	15.47	39.27	45.31	51.77	46.97	8.82	10.73
312		3.0	28.0	-45	0.0	14.32	15.98	38.09	48.20	66.83	66.95	13.68	17.49
313	90	4.0	7.0	-90	1.5	13.54	15.22	26.14	32.79	41.32	39.39	12.18	16.61
314		0.0	21.0	90	0.5	8.81	12.10	10.87	13.05	15.83	17.15	11.02	8.34
315		1.0	0.0	45	2.0	12.15	13.05	87.57	82.00	40.43	11.94	10.21	9.56
316		3.0	21.0	45	1.5	9.30	7.83	66.75	68.00	71.50	59.67	15.37	13.51
317		4.0	0.0	0	0.5	8.30	7.93	23.67	26.50	38.15	37.86	13.17	13.24
318	135	0.0	14.0	-45	2.0	7.17	7.81	0.81	0.53	7.39	15.11	12.06	9.15
319		1.0	28.0	-90	1.0	4.82	5.18	6.70	8.06	17.12	19.68	16.19	12.99
320		2.0	7.0	90	0.0	8.30	7.96	9.28	12.04	20.23	18.41	11.98	10.62
321		4.0	28.0	90	2.0	11.91	9.37	56.19	60.57	64.92	59.77	9.92	17.44
322		0.0	7.0	45	1.0	14.04	11.18	18.77	19.21	12.32	8.74	3.52	10.74
323	180	1.0	21.0	0	0.0	11.72	9.64	8.92	6.91	10.20	10.62	6.28	8.45
324		2.0	0.0	-45	1.5	9.91	9.11	1.90	1.77	15.39	28.77	6.00	8.70
325		3.0	14.0	-90	0.5	9.97	8.09	13.16	9.84	8.54	6.83	8.14	9.99

由表 3 可看出,外力主要由③、④、⑤和⑥号缆绳承担,这是由于它们较其它缆绳短。船舶小的位移,短的缆绳上将产生大的应力,在系泊码头条件许可的情况下,系泊时应尽量避免部分缆绳过短的情况。

图 4 给出了风浪向、风速、流速、流向和波高对③号缆绳张力的极差分析图。

从图 4 可以看出,对如图 1 所示系泊方式,在试验各因子变化范围内,对③号缆绳张力影响各因素大小次序为:流向、波高、流速、风浪向与风速,对其它的缆绳也有同样的规律。

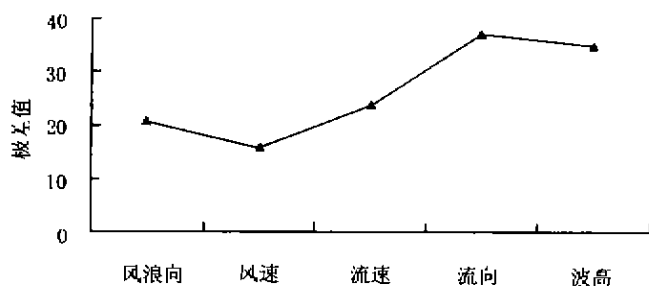


图 4 极差分析图

Fig.4 Range chart

缆绳张力大小与水流大小、方向、波浪大小、方向以及风速风向都有着重要的关系,相比之下,水流影响最大,波浪次之,风的作用最小。水流及波浪的方向对缆绳张力影响很大,如水流和波浪同时从码头侧流向系泊船舶($0^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$),此时船舶部分或全部离开码头,水流及波浪力完全作用在缆绳上,由于缆绳受力的不均衡性,部分缆绳可能产生很大的张力,如 302、308、315 和 321 试验中,水流从 45° 或 90° 方向作

用于船体,缆绳上产生了很大的张力,平均张力最大值达到 87.57t(315,缆绳③)。而如果波浪和水流或水流从码头另一侧作用于船舶($-180^\circ < \theta < 0^\circ$),缆绳张力不会很大。如 318 试验,尽管流速达到 2m/s,但由于水流方向为 -45° ,此时船舶紧靠码头,缆绳张力不大(最大为 15.11t,缆绳⑥)。

本试验覆盖了 50 年一遇严重海况及一般海况下系泊缆绳的受力情况,试验得到最大平均张力为 87.57t(315,缆绳③),而由于实际码头系缆中此最大张力对应两根缆绳,所以,如果码头采用同样的系泊形式,缆绳张力最大平均值不会大于 50t。

3 结 语

通过本试验,获得了 50kDWT 散货船码头系缆时在各种风浪流环境条件下系泊缆的受力情况。

码头系泊船舶缆绳的受力是个非常复杂的现象,系泊缆绳张力的大小与水流及波浪大小、方向都有着密切的关系,而风的作用一般要比水流和波浪小。当波浪水流从码头侧在近似垂直于船中线方向作用于船舶时($\theta \approx 90^\circ$),缆绳张力可能会很大。由于缆绳受力的不均衡性,很可能会发生缆绳崩断的恶性事件,一定要引起相关人员的注意。

本文根据实际码头具体情况,仅考虑规则波作用,且只对满载状态进行了试验。若为轻载(压载)状态,由于受风面积增加,风的作用所占比例会更大一些,同时由于湿面积减小,水流力会变小,缆绳张力情况要根据试验而定。

参考文献:

- [1] 陈中一,陈基成,赵颖.在潮汐流作用下 25 万吨级油轮系缆力模型试验研究[J].海洋工程,1998,16(3):45-53.