

S-175集装箱船舶波浪载荷 的船模试验与线性切片 理论计算的比较*

徐能兹 沈进威 陈瑞章

(中国船舶科学研究中心)

戴仰山 宋竞正

(哈尔滨船舶工程学院)

王兴飞

(上海交通大学)

提 要

本文就日本 S-175 集装箱船舶的波浪载荷进行了船模试验与线性切片理论计算的比较,发现线性切片理论对于波浪载荷沿船长的纵向分布以及中拱与中垂的不同分量都与试验值存在着相当大的差异,仅纵向运动较为满意;揭示了对于在高浪级下快速舰船的波浪载荷,特别是砰击载荷应致力于开展非线性理论和试验研究。

(一) 引 言

根据中国造船工程学会力学委员会所属“波浪载荷与动力响应”学组的推荐,以及第十五届国际水池会议耐波性委员会的建议,在我国就 S-175 集装箱船舶相继进行了运动和波浪载荷的比较性船模试验和理论计算研究。其中, S-175 船模的耐波性运动试验已经完成^[1]。本文波浪载荷的试验研究,目的是与我国现行的几种线性切片理论在载荷计算方面作广泛的比较,着重注意波浪弯矩的纵向分布,中拱和中垂波浪弯矩的不同分量,以及首外飘砰击引起主船体的砰击振动弯矩等。

本文的研究工作是由中国船舶科学研究中心、哈尔滨船舶工程学院以及上海交通大学协作完成的。船模的设计、加工及试验由中国船舶科学研究中心负责;切片理论计算分别由中国船舶科学研究中心基于 S. T. F 的切片理论^[2]、哈尔滨船舶工程学院根据 S.

* 本文于1983年4月13日收到。

T. F 和 K. K. J 的切片理论^[3]以及上海交通大学按 SCORES^[4]进行了计算。

(二) 船模及试验情况概述

按 D. C. Murdey 提供的 S-175 实船资料^[5], 选取缩尺比为 1/55。试验船模的主尺度:

两柱间长	(L)	3.1818(米)
型宽	(B)	0.4618(米)
型深	(D)	0.2800(米)
吃水	(T)	0.1727(米)
排水量	(Δ)	145.085(公斤)
方形系数	(C_B)	0.5716
船中剖面系数	(C_M)	0.970
重心离船中的纵向位置	(x_g)	0.01417 L
纵向环动半径	(K_t)	0.24 L
船模第一谐调自振频率		9.2(赫兹)

试验船模的设计既考虑了流体的动力相似, 又尽可能地满足主船体结构的动力特性相似。按相似理论并根据我们的经验^[6], 设计了六个分段的铝壳船模, 它们由一根纵向连续的圆截面钢梁来连接。钢梁相当于主船体的等值梁, 参加船体在波浪中的纵总弯曲, 其弯曲刚度(EI) 呈缩尺的五次方关系。

因文献[5]没有提供 S-175 的结构资料, 设计时参考了田中一雅提供的与 S-175 同类型船体弯曲刚度的资料^[7]。试验测定船模的第一谐调垂向自振频率为 9.2 赫兹, 对应于实船的第一谐调频率为 74 次/分, 比田中一雅提供的数据 60.7 次/分偏高。好在对于准静态波浪诱导弯矩的试验测量, 其结构动力相似的要求并不很高^[8]; 对于波浪砰击的瞬态船体响应完全可以就实际船模本身的结构动力特性进行理论分析。

试验船模的重量分布按文献[5]提供的资料压载。在船模的六个分段处设法密封以确保水密。分段划分的位置自首起 $4\frac{1}{4}$ 站、 $7\frac{1}{4}$ 站、重心纵向位置、 $12\frac{3}{4}$ 站以及 $15\frac{3}{4}$ 站。在分段处的钢梁上粘贴应变片, 记测波浪中的弯矩及切力, 分别以 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 及 N 来标记。

试验是在中国船舶科学研究中心的耐波性水池进行。记测内容如表 1 所列。

表 1

Froude 数	记 测 内 容			
	纵向五个垂向弯矩	船重心剖面处切力	纵摇及升沉运动	规则及不规则波高
0	*			*
0.20	*			*
0.275	*	*	*	*

船模在规则及不规则波中作升沉及纵摇(无前后移)的拖曳迎浪试验。规则波波长

共十二个 $\lambda/L = 0.55 \sim 2.8$, 试验波高 $2\xi_a = L/42$; 不规则波的有义波高 $(2\xi_a)_{1/3} = L/30$ 。

(三) 规则波浪中的试验结果及其与线性切片理论计算的比较

在 $F_n = 0$ 、0.20及0.275的拖速下, 五个剖面处的波浪弯矩、船重心剖面处切力以及升沉、纵摇运动的应答传递函数分别示于图 1~12。图中纵坐标分别以常规的无量纲量 $M_i/\rho g L^2 B \xi_a$ 、 $N/\rho g L B \xi_a$ 、 Z_a/ξ_a 及 $\Theta_a/K \xi_a$ 来表示; 横坐标以无量纲量 $\omega \sqrt{\frac{L}{g}}$

表示。其中, $F_n = 0.20$ 及0.275 在重心剖面处的波浪弯矩 M_3 、重心剖面处的切力以及升沉、纵摇运动的试验结果, 即图 5、8、10、11及12, 可以与K. Kobayashi 等人发表的试验结果 (文献〔9〕中图13.1、8.1、7.1、2.1及3.1) 作比较。图中同时绘出线性切片理论的计算结果。可以发现, 对于波浪弯矩的响应, 就船中位置的重心剖面弯矩 M_3 而言, 基于S. T. F运动方程式的切片理论要比K. K. J的切片理论以及 SCORES 的计算结果更接近于试验值; 而且与K. Kobayashi的试验及理论计算值〔9〕较一致。但是, 对于船中前、后各剖面处的波浪弯矩 M_1 、 M_2 及 M_4 、 M_5 , 理论计算与试验结果都存在较大的差异; 对 M_1 及 M_2 而言, 理论计算值比试验值小, 而 M_4 及 M_5 则理论计算值比试验值稍高。弯矩响应峰值频率时的弯矩纵向分布比较, 参见图 13 及 14。图中同时列出了英

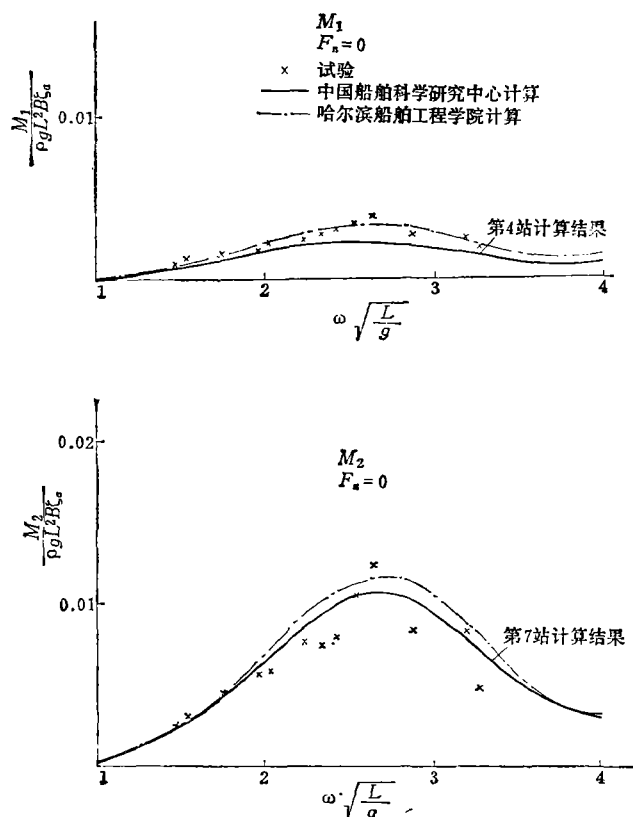


图 1

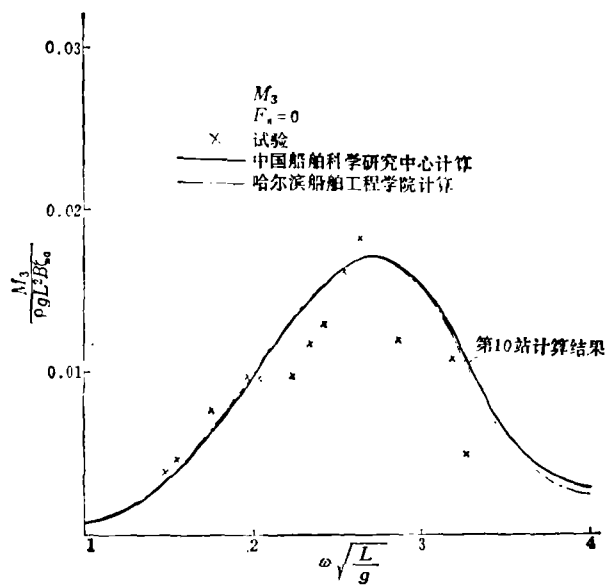


图 2

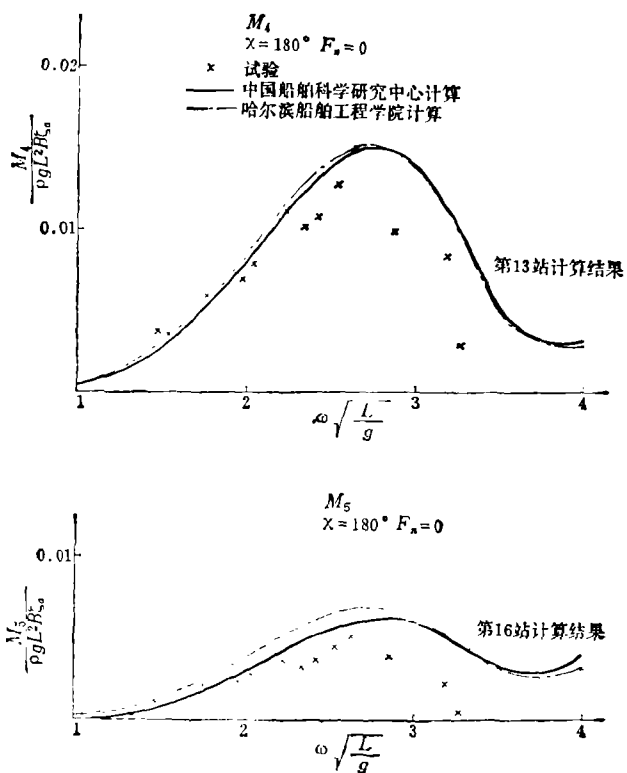


图 3

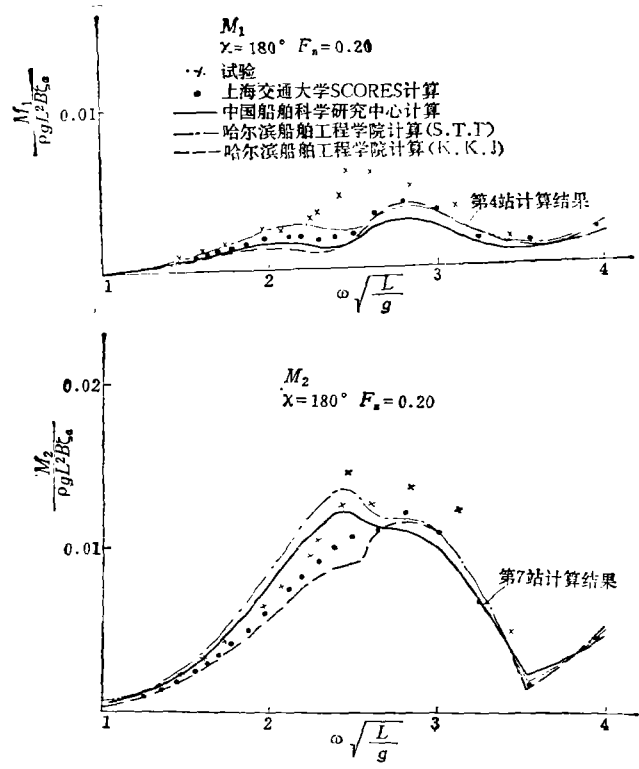


图 4

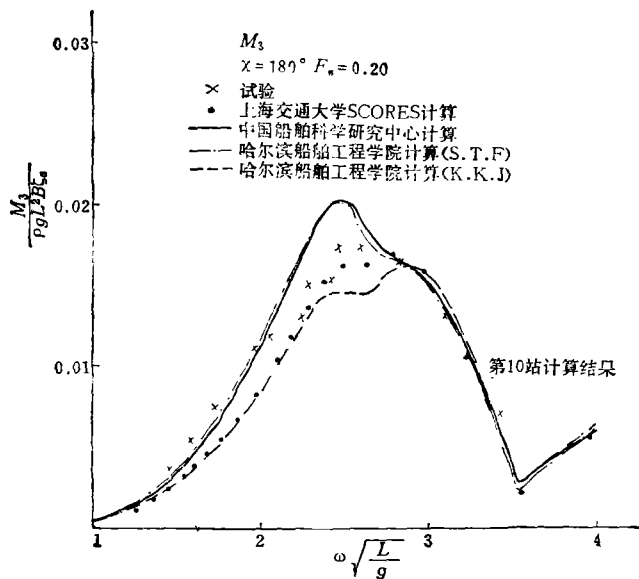


图 5

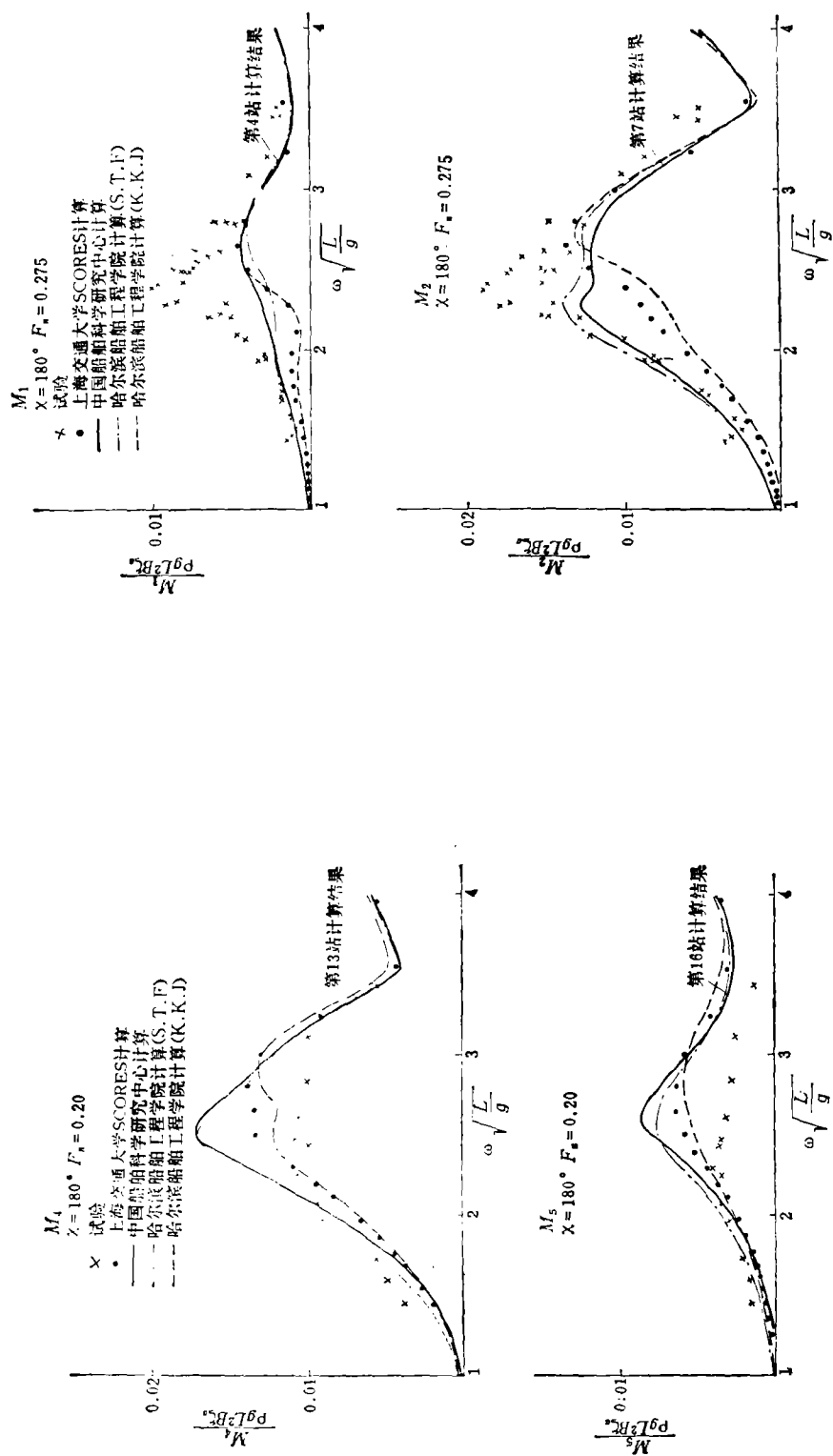


图 7

图 6

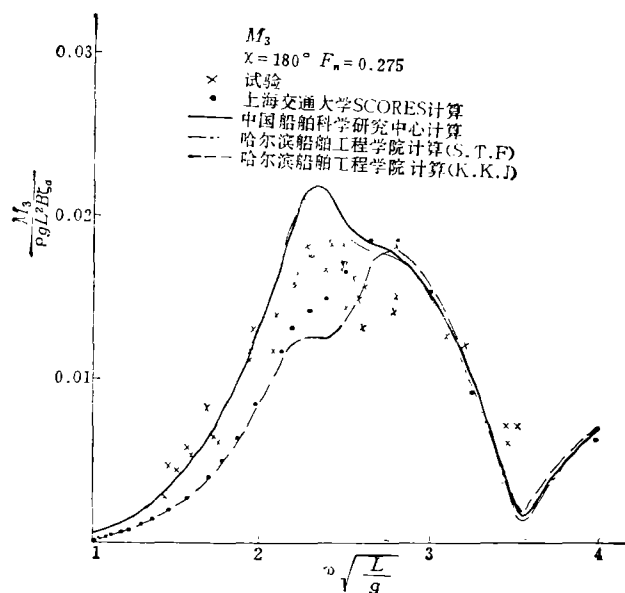


图 8

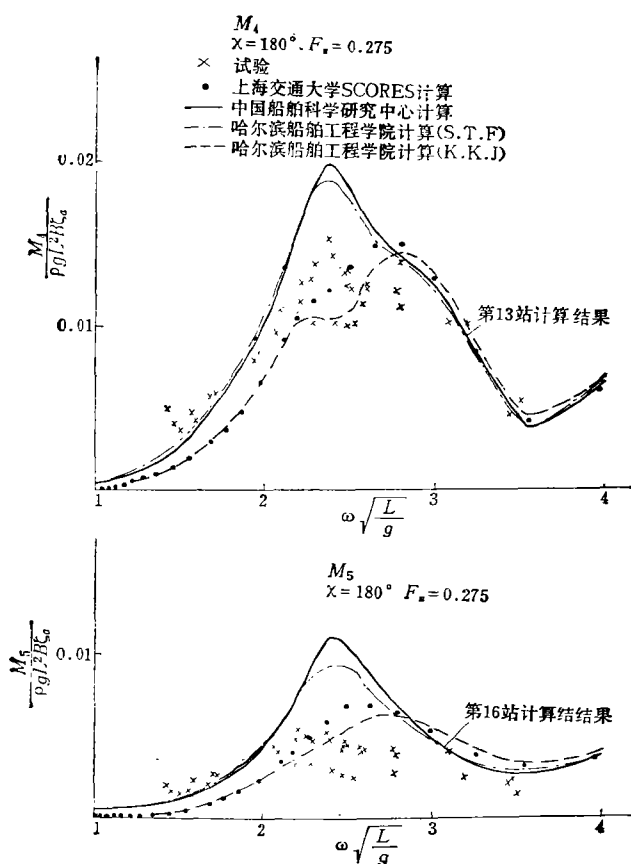


图 9

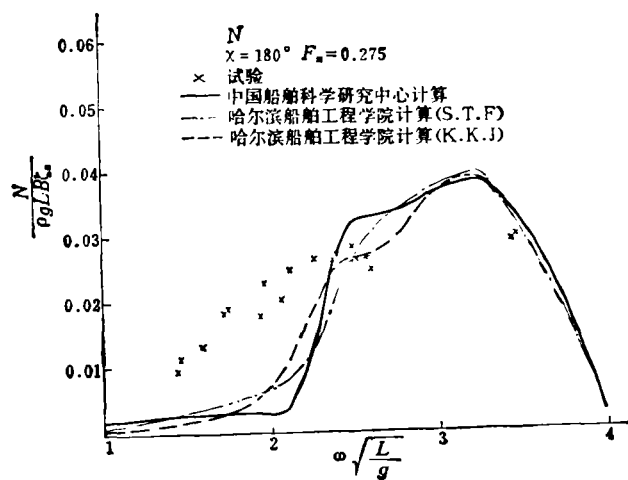


图 10

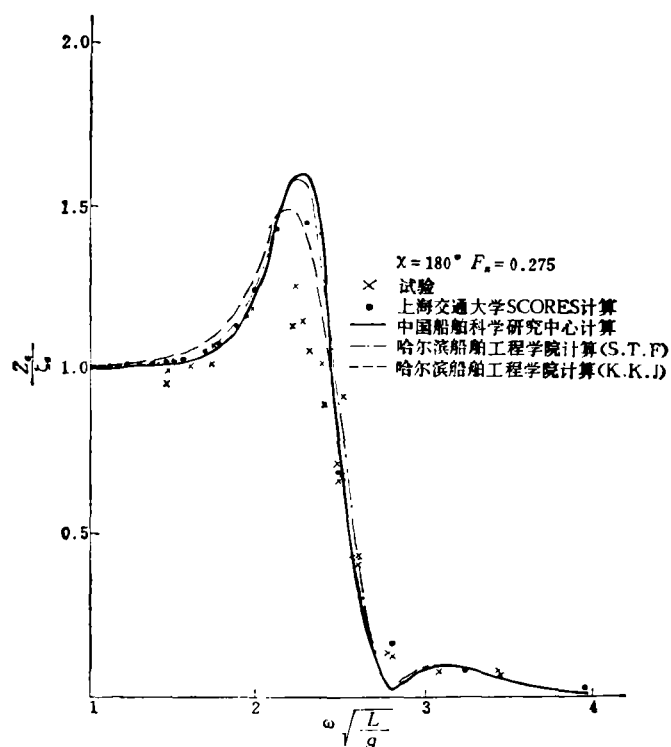


图 11

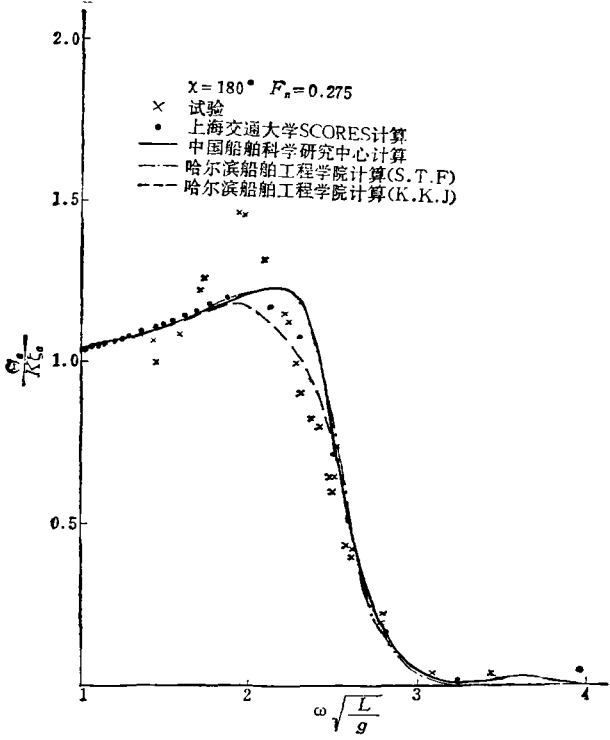


图 12

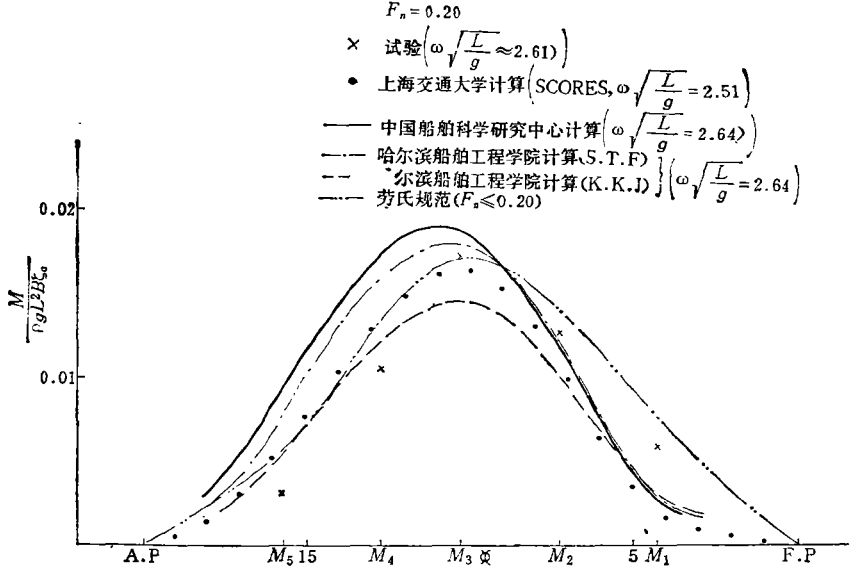


图 13

国劳氏船级社规范规定的弯矩纵向分布^[10]。

对于船中重心处的切力, 试验结果与 K. Kobayashi 的大致相符, 但是双方的试验值与计算值之间都是存在着较大的差异。

规则波中试验还明显发现波浪弯矩中拱与中垂分量的不对称, 就是在 $F_n = 0$ 时, 中垂波浪弯矩稍大于中拱波浪弯矩, 而在高速的 $F_n = 0.20$ 及 0.275 时, 由于兴波中垂弯矩, 特别是非线性流体动力及浮力等原因, 使中垂波浪弯矩比中拱波浪弯矩量值更大。这个问题有待高波高非线性试验作深入研究。

参见图 11 和 12 可以发现, 不同线性切片理论对于升沉和纵摇响应的差别是不十分明显的。

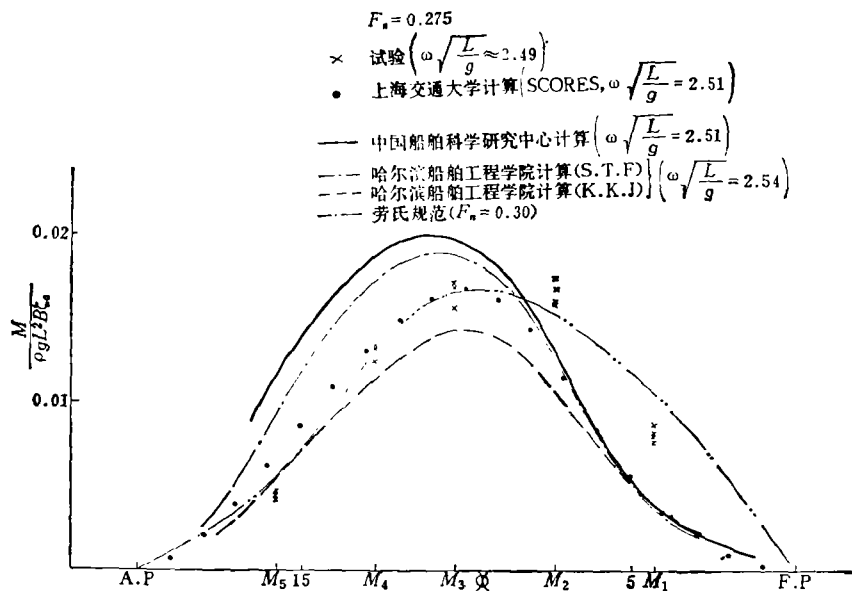


图 14

(四) 不规则波浪中的波浪弯矩及砰击振动弯矩

不规则波高的有义值约为 $L/30$, 相当于六级海况的上限。五个剖面处的波浪弯矩全幅值、波浪弯矩的中垂分量、中拱分量以及偶尔出现的砰击振动弯矩值分别作了整理分析。可以发现波高及波浪弯矩的全幅值, 与通常海上实船试验一样, 符合 Rayleigh 分布律; 中垂波浪弯矩分量明显随航速增大, 中拱分量则相反。根据 D. E. Cartwright 和 M. S. Longuet Higgins 的理论分析^[11]及实际统计整理, 可以认为中垂及中拱分量遵循正态分布律。参见图 15。

根据上述不同的统计分布规律, 我们将弯矩全幅值以无量纲的平均值 \bar{m} 、Rayleigh 分布的特征值——均方根值 \sqrt{E} 及最大值列出; 而中垂弯矩分量及中拱弯矩分量以平均值 m_s 及 m_H 、方差值 σ 及最大值列出。参见表 2 及表 3。

表 2、表 3 同时列出了波浪砰击时出现的主船体振动弯矩量值。因船模与实船的结构动力特性相似稍有差异, 试验记测的砰击振动弯矩量一般不能按缩尺推算到 S-175 的实船。但是它的量值, 就实际船模本身来分析波浪砰击的瞬态响应计算方法, 仍然会有价值的。

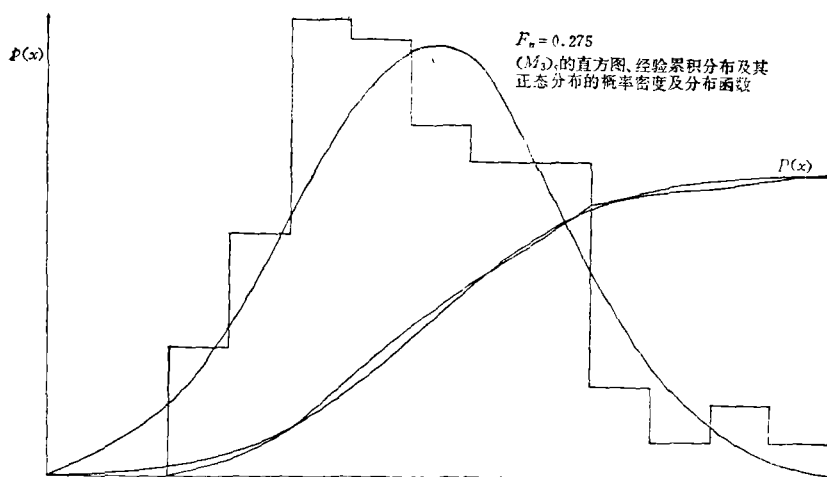


图 15

表 2 S-175船模不规则波试验结果

$F_n = 0.20$		$M_1 \times 10^3$	$M_2 \times 10^3$	$M_3 \times 10^3$	$M_4 \times 10^3$	$M_5 \times 10^3$
波浪弯矩 全幅值	平均值 $\bar{M}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	2.05	5.49	7.35	5.33	1.93
	均方根值 $\sqrt{E}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	2.09	6.13	8.15	5.87	2.18
	最大值 $M_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	6.62	14.52	18.79	13.48	7.19
中垂波浪 弯矩值	平均值 $\bar{M}_S/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	1.76	4.96	6.17	4.92	1.98
	方差 $\sigma_S/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.98	1.87	2.10	1.62	0.62
	最大值 $(M_S)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	5.98	10.32	11.93	10.51	3.69
中拱波浪 弯矩值	平均值 $\bar{M}_H/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.12	0.95	1.60	0.90	0.14
	方差 $\sigma_H/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.21	0.97	1.59	1.00	0.28
	最大值 $(M_H)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.85	4.20	7.11	4.57	1.29
砰击振 动弯矩 全幅值	子样数 n	16	16	16	16	16
	平均值 $\bar{M}^*/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	2.98	5.36	5.16	2.91	0.66
	最大值 $(M^*)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	5.13	9.55	10.16	5.03	1.29

表 3 S-175船模不规则波试验结果

$F_n = 0.275$		$M_1 \times 10^3$	$M_2 \times 10^3$	$M_3 \times 10^3$	$M_4 \times 10^3$	$M_5 \times 10^3$
波浪弯矩 全幅值	平均值 $\bar{M}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	2.91	6.56	8.06	5.63	1.84
	均方根值 $\sqrt{E}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	3.39	7.40	8.99	6.17	2.04
	最大值 $M_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	9.59	16.44	19.47	12.39	4.48
中垂波浪 弯矩值	平均值 $\bar{M}_S/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	3.28	6.34	7.45	5.50	2.14
	方差 $\sigma_S/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	1.64	2.42	2.69	1.74	0.55
	最大值 $(M_S)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	9.19	13.94	14.25	10.26	3.45
中拱波浪 弯矩值	平均值 $\bar{M}_H/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.05	0.66	1.16	0.75	0.08
	方差 $\sigma_H/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	0.14	0.75	1.21	0.80	0.22
	最大值 $(M_H)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	1.00	3.04	4.99	3.42	1.72
砰击振 动弯矩 全幅值	子样数 n	25	25	25	25	25
	平均值 $\bar{M}^*/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	4.06	7.12	6.97	4.34	0.94
	最大值 $(M^*)_{\max}/\rho g L^2 B(2\xi_a)_{1/3}$	11.39	14.29	17.57	11.54	2.74

(五) 结 论

1. S-175船模的波浪载荷试验, 揭示了线性切片理论与实际载荷之间的差异。严重的差异是波浪弯矩沿船长的纵向分布, 在船首部分理论计算值偏小, 而船尾部分情况又恰相反。另外, 线性切片理论无法解决实际波浪弯矩中垂和中拱分量的明显不对称性。总之, 对于快速船舶纵强度的波浪载荷问题, 应该致力于高浪级非线性的切片理论和试验研究。

2. S-175船模波浪载荷的规则及不规则波水池试验结果, 可以由谱分析技术预报 S-175实船实际所受波浪载荷的量值, 也为预报 S-175实船在相应试验海况下的波浪载荷提供了经验数据。

3. S-175船模在不规则波试验中测得的砰击振动弯矩量值, 为主船体因砰击载荷结构响应的理论计算方法作进一步探讨提供了船模试验的资料。

4. 任一种线性切片理论几乎都可用来预报快速船舶的纵向运动 (升沉和纵摇), 一般来说它还是比较满意的。

参 考 文 献

- [1] 舒家骥、胡启甯: “高速集装箱船 (S-175) 运动性能研究”, 中国船舶科学研究中心研究报告, 1981年。
- [2] 刘楚学等: “波浪中舰船纵向运动计算程序”, 陈瑞章等: “波浪中舰船垂向剪切力和弯矩的计算程序”, 中国船舶科学研究中心研究报告, 1972年及1978年。
- [3] 顾懋祥等: “船舶适航性计算方法 (迎浪纵向运动)”, 《船工科技》, 哈尔滨船舶工程学院, 1976年。
- [4] Alfred I. Raff, “Program SCORES—Ship Structural Response in Waves”, SSC-230, (1972).
- [5] D. C. Murdey, “Specification for a Comparative Study of Computed Ship Motions in Six Degrees of Freedom”, Canada, Report LTR-SH-228, Aug. (1978).
- [6] 沈进威等: “船体波浪弯矩及切力的模型试验技术”, 中国船舶科学研究中心研究报告, 1976年。
- [7] 田中一雅、川山益男: “船首底衝撃による超高速船の過渡振動の統計予測について”, 西部造船会報, 第56号, 昭和53年8月, 第167页。
- [8] O. Belik, R. E. D. Bishop, W. G. Price and J. C. Brown, “A Comparison of Theoretical and Measured Symmetric Responses of a Segmented Model in Regular Waves”, Numerical Analysis of the Dynamics of Ship Structures, p. 83~93. Proceedings of Euromech Colloquium 122, (1979).
- [9] K. Kobayashi, S. Takezawa and J. Obokata, “The Comparison between Calculations and Model Tests on Ship Motions and Wave Loads of the S-175 Container Ship”, Reported for the 16th ITTC Seakeeping Committee, (1981).
- [10] 1978年英国劳氏船级社规范。
- [11] D. E. Cartwright and M. S. Longuet Higgins, “The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function”, Proc. Roy. Soc., 237, 1209, Oct. (1956).

MODEL TESTS OF S-175 CONTAINER SHIP ON WAVE LOADS AND COMPARISONS BETWEEN EXPERIMENTS AND CALCULATIONS OF LINEAR STRIP THEORY

Shen Jinwei, Xu Nengzi, Chen Ruizhang

(China Ship Scientific Research Center)

Dai Yangshan, Song Jingzheng

(Harbin Shipbuilding Engineering Institute)

Wang Xingfei

(Shanghai Jiao Tong University)

Abstract

According to the recommendations made by the Seakeeping Committee of the 15th ITTC that comparative study should be conducted on ship motions and wave loads of S-175 container ship, and in order to investigate the distribution of wave-induced moments along the hull of fast ship, an aluminum model of 1:55 scale was designed by employing the principle of similarity in hydrodynamics and structural dynamics. The hull was separated into six divisions and they were joined by a longitudinal circular steel beam through the whole length of the hull. At the seakeeping basin of CSSRC, measurements were made on moments, shearing forces and motions in regular and irregular waves. In head waves at Froude number equal to 0, 0.20 and 0.275 wave-induced bending moments at five separate sections (namely at stations $4\frac{1}{4}$, $7\frac{1}{4}$, $12\frac{3}{4}$, $15\frac{3}{4}$ and at the location of the centre of gravity), shearing forces at the middle section, heaving, pitching and wave heights were measured. In these experiments, the model was towed by a carriage and surge motion was restricted. Wave height measurement was made with an ultrasonic gage fixed to the carriage, and the height of regular wave and

significant height of irregular wave were about $L/42$ and $L/30$ respectively.

Experimental results were compared with those of theoretical calculations in which the computer programs of CSSRC and HSEI based on strip theory of S. T. F and K. K. J and SCORES were also used. From the results of comparison, it can be seen that at the section of the centre of gravity, bending moments calculated by using the programs of CSSRC and HSEI agree well with the experimental results both in amplitudes and trend. But, when SCORES was used, slight differences both in amplitudes and location of peak can be found. As to the other sections, the comparisons are satisfactory for the sections of afterbody, but for the sections of forebody, the calculated bending moments are obviously different from the experiments. However, for heaving and pitching, the results are fairly well for calculations made by using any strip theory.

From the results of irregular wave experiment, it can be found that the components of the sagging moment are always larger than that of the hogging moment.

The irregular wave experimental results were respectively shown in statistics of wave-induced moment ranges, sagging moment components, hogging moment components and magnitudes of slamming vibration double amplitudes. These results have provided useful data for comparative study of non-linear strip theory and for the theoretical research of slamming vibration moments.

Key Words—S-175 container ship model tests, wave load, linear strip theory, structural dynamics.