



波浪作用下 30 万吨级油轮撞击能量研究

周 雅, 陈国平, 严士常, 钟雄华, 黄 璐

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过物理模型试验, 研究不规则波作用下 30 万吨级油轮撞击能量, 分析了主要影响因素 H/T 、 L/B 、 T/T_0 、 D 对撞击速度的影响规律。结果表明: 撞击速度与 H/T 成正比; 与 L/B 成幂次关系; 与 T/T_0 也成正比, 但 $T/T_0=1$ 时船舶撞击码头与波浪产生共振, 撞击速度出现极大值; 压载时的撞击速度大于满载时的撞击速度, 撞击速度与吃水成负相关。提出了 30 万吨级油轮撞击能量的计算公式, 与青岛港原油码头三期工程和青岛益佳集团燃油码头工程的物理模型试验结果对比, 具有较好的计算精度, 可供工程设计参考。

关键词: 30 万吨级; 油轮; 不规则波; 撞击能量

中图分类号: U 661.3 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)12-0023-05

Collision energy of 300 000 t tanker under wave action

ZHOU Ya, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang, ZHONG Xiong-hua, HUANG Lu

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper investigates the impact of irregular waves under a 300 000 t tanker collision energy by physical model test and analyzes the main factors' impact on collision velocity including H/T , L/B , T/T_0 , D . The result indicates that the collision speed is proportional to H/T and T/T_0 , and is powered to L/B . When $T/T_0=1$, the collision and wave resonates, which causes the greatest velocity. The collision speed when the tanker is ballast is larger than that when it is fully loaded. In another word, the collision speed is negatively correlated with the draft. A formula for the 300 000 t tanker collision energy is proposed and compared to the result by physical model test of Qingdao port oil wharf phase III project and Qingdao Yijia Group oil terminal project, which has better accuracy and can be used for reference for design.

Keywords: 300 000 DWT; tanker; irregular wave; collision energy

撞击能量是指系泊船舶在波浪作用下运动而与建筑物产生碰撞时的能量。从 20 世纪 50 ~ 60 年代开始, 国内外专家学者对该问题进行了大量的研究工作, 研究方法主要分为理论分析法、数值计算法和经验分析法 3 种。国内研究工作多采用经验分析法, 即以能量转换和动力分析为理论基础, 从合理且便于应用的观点出发, 经过假定推导出系泊船舶对码头撞击能量的公式结构, 再由物理模型试验资料确定其中的参数, 各家建立的公式

结构基本一致:

$$E = \frac{1}{2} C_m M v^2$$

(1)

式中: E 为撞击能量(J); C_m 为船舶附加水体质量系数; M 为船舶装载度(kg); v 为撞击速度(m/s)。1973 年, 大连工学院水利系港工试验组^[1]根据 1.5 万吨级油轮码头撞击力模型试验提出:

$$v = \frac{H}{T} f \left(\frac{T_0}{T} \right)$$

(2)

式中: H 为波高(m); T 为波周期(s); T_0 为船舶

横摇自振周期(s)。1990 年,高明等^[2]通过 20 万吨级船舶模型试验,结合国内对 2 万、5 万和 10 万吨级船舶的模型试验研究结果的综合分析提出规则波作用下速度为:

$$v = \left(\frac{r_d}{G_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H}{T} \right) \quad (3)$$

式中: G_0 为综合动力效应系数。2010 年,郭士勇等^[3]通过收集国内 5 万 ~ 30 万吨级系泊船舶撞击能量物理模型试验研究成果提出:

$$v = \alpha \frac{H}{T} \left(\frac{L}{B} \right)^{1.44} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.9} \quad (4)$$

式中: α 为船型修正系数; L 为波长; B 为船宽, D_0 为船舶型深; D 为船舶吃水。2014 年周枝荣等^[4]通过 30 万吨级大型油船试验提出:

$$v = \frac{H}{3T} \left(\frac{L}{B} \right)^{1.32} \left(\frac{D}{D_h} \right) \quad (5)$$

式中: D_h 为与船舶装载度相对应的平均吃水。

综合研究成果可以看出,30 万吨级船舶撞击能量研究还较少,而随着船舶大型化和港口深水化,我国正规化建设多做大型油码头(30 万吨级及以上)。为了满足大型油轮吃水要求,码头需建立在外海深水区。由于外海水深浪大且掩护条件较差,系泊船舶的运动量增加,因此系泊船舶的撞击能量成了船舶对码头作用的控制因素。同时撞击能量的大小对码头结构布置和护舷选取也很关键。本文基于前人结论通过模型试验对 30 万吨级油轮做了进一步研究。

1 设备仪器与试验方法

试验采用正态模型,按重力相似设计,模型比尺为 1:58,船模试验平面布置见图 1。

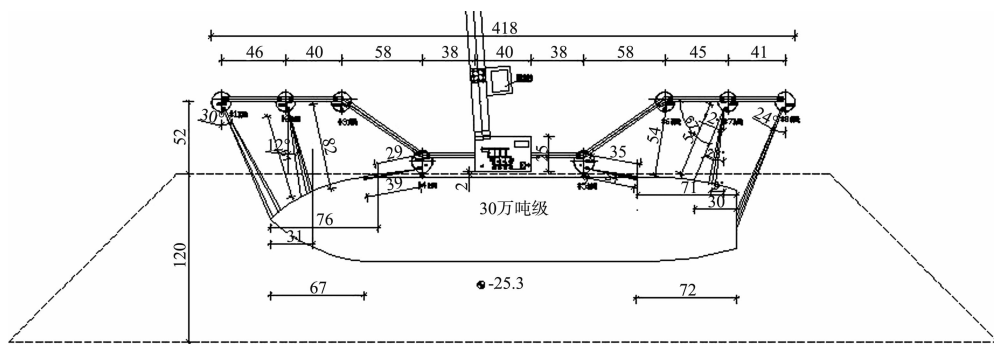


图 1 船模试验平面布置 (单位: cm)

试验在河海大学波浪港池中进行,港池长 40 m、宽 30 m、高 1.2 m。港池的一端设置消浪缓坡,以消除波浪二次反射影响,另一端配有不规则波造波机。试验采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱,撞击能量数据采用天津港湾院的护舷传感器量测,量测信号均通过计算机采集、记录和分析。

2 30 万吨级油轮撞击速度

本文依托日照港岚山港区 30 万吨级原油码头二期工程项目,进行了系泊油轮撞击能量系列试验。试验参数与组合:波高 $H_{4\%}$ 为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m,平均波周期 T 为 7、8、9、10、11、12、14 s,码头前沿水深 d 为 30.50、25.93 m,

船舶装载度 M 分为满载、压载两种工况。试验船型长 334 m、宽 59 m、型深 31.5 m、设计吃水 22.2 m。

撞击能量是波浪动力条件和船型尺度综合作用的反映,本文主要通过动能定理 $E = \frac{1}{2} C_m M v^2$ 来计算,因此对撞击能量的计算就转化为对船舶撞击速度的计算。

多年来,国内外专家学者对系泊船舶撞击能量问题进行了大量的研究工作。综合各家研究成果,结合试验数据分析,本文试图引入 H/T 、 L/B 和 T/T_0 作为描述撞击速度的参数,其中 L 为波长, B 为船宽, T_0 为船舶横摇周期。

2.1 H/T 对撞击速度的影响

由于系泊船舶的撞击速度由水质点速度传递

而来, 由微幅波理论, 水质点速度为

$$u = \pi \cdot \frac{H}{T} \cdot \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos\left(kx - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (6)$$

式中: k 为波数, 因此本文取 H/T 为影响因子。图 2 为 H/T 对撞击速度 v 的影响规律, 从图 2 可以看出, 撞击速度与 H/T 成正比, 撞击速度随水质点速度的增大而增大。曲线反映了不同水位不同载度情况下的撞击速度规律。

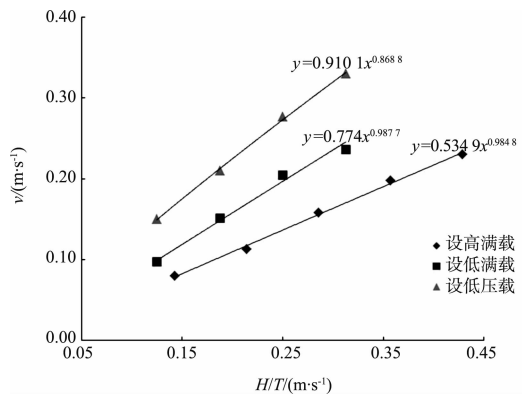


图 2 撞击速度 v 随 H/T 变化趋势

2.2 L/B 对撞击速度的影响

图 3 为满载情况下, $H = 1\text{ m}$, $T = 7, 8, 9, 10, 12\text{ s}$ 和 $H = 2\text{ m}$, $T = 7, 9, 14\text{ s}$ 时, 本文实测的撞击速度 v 与 L/B 的关系曲线。从图 3 可以看出, 撞击速度随 L/B 的增大而增大, 图示数据点与 $(L/B)^{0.5}$ 具有较好的相关性。我国 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[5] 中撞击速度的计算公式(J.0.1)、《海港工程设计手册》^[6] 中计算公式(1-8-19)、谢世楞^[7] 及杨进先^[8] 的半理论半经验公式中都引进了波长与船宽之比的影响因子。根据试验数据和以往研究, 本文认为撞击速度与 L/B 成 0.5 次方幂次关系, 即 $v = f[(L/B)^{0.5}]$ 。

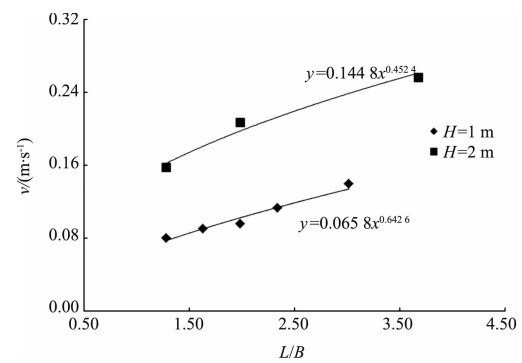


图 3 撞击速度 v 随 L/B 变化趋势

2.3 T/T_0 对撞击速度的影响

大连理工大学港工专业科研组^[9] 提出: 当弹簧体的加载频率与其自振频率相近时, 就将出现共振。令缆绳-船体弹簧系的周期为 T_{01} , 护舷-船体弹簧系的自振周期为 T_{02} , 则出现船舶撞击码头与波浪共振的可能条件有 3 个: 1) 船舶横摇周期 $T_0 \approx T$ (波周期) 时; 2) 缆绳-船体弹簧系自振周期 $T_{01} \approx T$ 时; 3) 护舷-船体弹簧系自振周期 $T_{02} \approx T$ 时。同时装载条件不同, 船舶的运动情况也不同, 因而也影响共振的出现。由于大型油轮 T_{01} 和 T_{02} 较大, 运营中一般不会遇到, 因此本文只考虑 $T_0 \approx T$ 的情况。

图 4 为满载 $H = 1\text{ m}$, $T = 7, 8, 9, 10, 12\text{ s}$ 及压载 $H = 1\text{ m}$, $T = 7, 8, 9, 10, 12, 14\text{ s}$ 时, 本文实测的撞击速度 v 与 T/T_0 的关系曲线。从图 4 可以看出, 由于满载油轮的横摇周期远大于试验周期, 因此在试验周期范围内撞击速度与 T/T_0 成正比; 压载油轮横摇周期为 9.67 s , 试验周期在其附近时, 船舶与波浪发生共振, 撞击速度出现极大值。根据试验数据和以往研究, 本文认为撞击速度与 T/T_0 成线性关系, 即 $v = f(T/T_0)$ 。

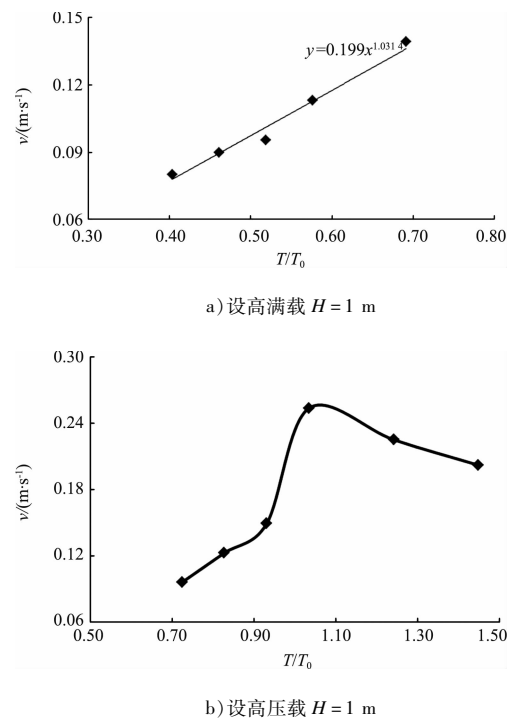


图 4 撞击速度 v 随 T/T_0 变化趋势

2.4 D_0/D 对撞击速度的影响

船舶装载度对其撞击速度也有很大影响。根据牛顿第二定律，在相同波浪作用下，满载船舶质量大，加速度小，撞击速度就小，压载反之；同时，满载船舶吃水大，所受的水的阻力就大，也会导致船舶撞击速度变小。

本文只对 30 万吨级油轮压载和满载两种载度进行了试验，试验结果见表 1。从表 1 可以看出，压载情况下的撞击速度明显大于满载情况。故本文采用影响因子 D_0/D (D_0 为船舶型深)。

表 1 压载和满载对撞击速度的影响

H/m	T/s	v 试验值/($m \cdot s^{-1}$)	
		压载	满载
1.0	8	0.15	0.10
1.0	9	0.23	0.13
1.5	8	0.21	0.15
1.5	9	0.28	0.18
2.0	8	0.28	0.20
2.0	9	0.33	0.22

3 30 万吨级油轮撞击能量计算方法

3.1 撞击速度计算公式

由于波浪水质点速度转化为船舶撞击速度的过程非常复杂，对于撞击速度的估算，从理论上进行数学公式的推导时需要建立在很多假定的基础上，得出的计算结果往往与实际值相差很大且对适用范围有很大限制，因此，对这类问题常采用因次分析方法。由上述各无因次变量讨论可知，影响撞击速度的因素很多且相互影响，因此，根据以往研究成果和本文试验资料，运用线性回归拟合，得到 30 万吨级油轮的撞击速度计算公式：

$$v = 1.05 \frac{H}{T} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.5} \frac{T}{T_0} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.2} \tag{7}$$

3.2 船舶附加质量系数 C_m 的选取

《碰垫系统设计》^[10] 和黄根芳等^[11] 都指出：附加质量系数与龙骨下富裕水深 $d-D$ 有关。《碰垫系统设计》中总结的前人公式中基本都认为附加质

量系数与船舶吃水 D 成正比。本文综合考虑以上两点，又 C_m 值总是大于 1.0 的，得到 C_m 公式为如下形式：

$$C_m = 1 + 0.1 \times \left(\frac{D}{d - D} \right) \tag{8}$$

3.3 本文计算值与试验值的比较

由上述分析，本文提出 30 万吨级油轮撞击能量计算公式：

$$E = \frac{1}{2} C_m M v^2 \tag{9}$$

$$v = 1.05 \frac{H}{T} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.5} \frac{T}{T_0} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.2} \tag{10}$$

$$C_m = 1 + 0.1 \times \left(\frac{D}{d - D} \right) \tag{11}$$

图 5 为本文撞击速度 v 、撞击能量 E 计算值与日照岚山港区 30 万吨级原油码头二期工程模型试验结果的对比，斜线为 45° 理想线。

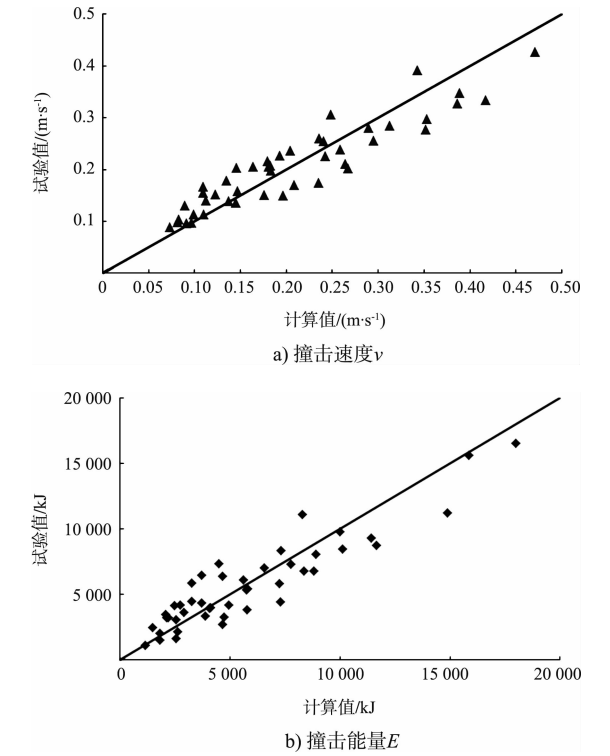


图 5 计算值与日照岚山港区 30 万吨级原油码头二期工程模型试验结果的对比

图 5 的比较结果表明，对于撞击速度和撞击能量，本文计算值与试验值都有较好的相关性，相关系数 r 均大于 0.90。

3.4 与其他工程试验值的比较

为了验证本文撞击能量计算公式对 30 万吨级油轮的普遍适用性,从青岛港原油码头三期工程^[12]和青岛益佳集团燃油码头工程^[13]的物理模型试验结果中选取 30 万吨级油轮撞击能量数据与本文计算值进行比较(表 2)。

表 2 其他工程试验值与本文计算值比较					
工程	载荷	H/m	T/s	E/kJ	
				计算值	试验值
青岛港原油 码头三期工程	满载	1.5	10	4 945.327	4 427
	压载	1.5	10	8 017.108	5 501
青岛益佳 集团燃油 码头工程	满载	1.5	8	3 643.028	3 400
		1.5	9	4 407.308	4 700
		2.0	8	6 476.494	7 600
		2.0	9	7 835.214	7 800
	压载	1.5	8	4 703.735	3 900
		1.5	9	5 690.544	4 050
		2.0	8	8 362.196	7 650
		2.0	9	10 116.520	8 350

从表 2 可以看出,与其他两个实际工程的试验值对比,本文公式均吻合较好,从而验证了本文方法的有效性。

4 结论

本文对撞击速度与各个影响因素之间的关系进行分析,再通过动能定理得到 30 万吨级油轮撞击能量的半理论半经验公式,主要结论如下:

1) 对 30 万吨级油轮撞击速度影响最大的因素为波浪水质点速度 H/T ,撞击速度 v 随着 H/T 的增大而增大,呈线性增长。 L/B 、 T/T_0 、 D_0/D 也是重要的影响因子,撞击速度 v 随 L/B 呈幂次增长,随 T/T_0 呈线性增长,但当 $T/T_0 = 1$ 时船舶撞击码头与波浪会产生共振,撞击速度出现极大值,压载时的撞击速度明显大于满载时的撞击速度,撞击速度与吃水成负相关。

2) 根据整理和分析后的试验资料,运用线性

回归拟合得到撞击能量计算公式。通过与本文试验数据和收集的国内 30 万吨级油轮撞击能量物理模型试验数据进行比较,计算值和试验值相关性均较好,因此本文的计算公式可信度较高,具有实际的参考价值和意义。

参考文献:

[1] 水利系港工试验组. 在波浪作用下大型油轮码头防冲设施的设计探讨[J]. 大连工学院学报, 1973(2): 65-78.

[2] 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和建议的计算式[J]. 水利水运科学研究, 1990(4): 367-379.

[3] 郭士勇, 滕斌, 刘昌凤. 横浪作用下系泊船舶撞击能量的分析和研究[J]. 水运工程, 2010(12): 88-92.

[4] 周枝荣, 邹颀. 大型油轮系靠泊海外开敞式码头的船舶撞击力计算[J]. 水运工程, 2014(5): 59-63.

[5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

[6] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册(中)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

[7] 谢世楞. 波浪作用下船舶对码头的撞击力 [R]. 天津: 交通部一航局设计研究院, 1971.

[8] 杨进先. 波浪作用下系泊船舶撞击能量的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[9] 大连工学院港工专业科研组. 波浪作用下油轮系泊码头动力状态的若干问题[J]. 大连工学院学报, 1976(4): 99-110.

[10] 水规院技术情报室. 国际航运会议常设协会专题国际委员会报告《碰垫系统设计》[R]. 北京: 交通部水运规划设计院, 1988.

[11] 黄根芳, 赵颖. 20 万吨级油轮码头船舶荷载模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1986.

[12] 周益人, 潘军宁. 青岛港原油码头三期工程波浪物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.

[13] 周益人, 李鹏. 青岛益佳集团燃料油码头工程船舶靠泊模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.

(本文编辑 武亚庆)