



大型油轮系靠泊外海开敞式码头的 船舶撞击力计算

周枝荣, 邹 颀

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 船舶撞击码头所产生的撞击力, 是码头设计时的重要荷载, 合理确定它的值很重要。由于相关影响因素很多, 船舶撞击力计算公式尚存在一定差异, 特别是针对大型油轮系靠泊外海开敞式码头时的船舶撞击力。分析国内外各种计算理论中的几个代表性公式, 并进行比较分析。国内行业规范对船舶撞击力的计算值相较国外研究成果及物理试验结果均偏小, 为了合理确定大型油轮系靠泊外海开敞式码头时的船舶撞击力值, 对现行《港口工程荷载规范》采用的计算公式提出了改进建议。

关键词: 大型油轮; 开敞式码头; 撞击力

中图分类号: U 656.1⁺26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0059-05

Calculation of impact force of large oil tanker berthing at open sea terminal

ZHOU Zhi-rong, ZOU Ting

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The impact force generated by the vessel berthing terminal is an important load for the terminal design, and the rational determination of its value is a very important. Because of many factors, in international research field there are some calculation formulas for the impact force, but there exists some differences between them, especially on the impact force of large oil tankers berthing at the open sea terminal. The paper analyzes the calculation formulas of several representative theories in the domestic and international research, and makes a comparative analysis, which indicates that there are some differences between the domestic code and international research or the physical model test results for calculation of vessel impact force. In order to determine the impact force of the large oil tankers berthing at the open sea terminals, the paper puts forward suggestions for improvement of the code formula.

Key words: large oil tanker; open sea terminal; impact force

船舶撞击码头所产生的力称为撞击力, 是码头设计时的重要荷载, 有时甚至是水工建筑物的控制性荷载, 撞击力的计算值将最终反映在建筑物的形式和造价上, 因此合理确定它的计算结果是一件至关重要的工作。同时, 随着船舶的大型化, 我国正规划在开敞外海建设多座大型油船码头(30万吨级及以上), 为选取合适的码头附属靠泊设施进而合理确定码头结构形式, 本文研究

的重要性显而易见。

船舶撞击力根据发生的原因不同分别称为船舶靠岸撞击力和系泊船舶在横浪作用下的撞击力。船舶靠岸撞击力是指当船舶靠岸时, 船舶以靠岸速度触碰码头建筑物所产生的撞击力; 系泊船舶在横浪作用下的撞击力是指系泊与系、靠船建筑物上的船舶在波浪作用下发生运动而碰撞建筑物产生的撞击力。

收稿日期: 2013-09-06

作者简介: 周枝荣(1983—), 男, 硕士, 工程师, 注册土木工程师(港航), 从事港口及海岸工程设计。

对于船舶撞击力的研究，目前主要有3种计算理论：动量理论、动能理论、振动理论。3种理论基本原理不同，各自又具不同的局限性。动量理论根据刚体碰撞时动量的变化等于其冲量的原理来计算船舶撞击力，其存在的主要问题是，现实中的船舶撞击建筑物时，船舶与码头的碰撞并非理想刚体碰撞，且碰撞的时间有很大的人为性和假定性；振动理论系根据碰撞过程中船舶与码头发生弹性振动计算船舶撞击力，其计算理论比较完善，但计算烦琐，且有些参数还难以确定。鉴于动量理论与振动理论在具体使用时都受到上述条件的限制，所以未被广泛采用，只有动能理论在实践中得到了较广泛的应用。

1 船舶撞击力计算方法

1.1 船舶靠岸撞击力

对于船舶靠岸撞击力的计算，国内外的相关应用成果基本上是采用动能公式的形式，如我国的2010规范^[1]，国外英国、国际航运协会、日本等也都采用此种方法。

1) 英国标准 (BS 6349) 公式。

依据英国标准规定，船舶靠岸撞击力的计算公式为^[2]：

$$E = 0.5 C_M M_D (v_B)^2 C_E C_S C_C \quad (1)$$

式中： C_M 为水动力质量系数； M_D 为75%保证率的船舶排水量； v_B 为船舶法向靠岸速度； C_E 为偏心系数； C_S 为柔性系数（柔性护舷取1.0）； C_C 为泊位形状系数（透空式高桩码头取1.0）。

在富余水深不少于0.1D及船舶法向靠岸速度不小于0.08 m/s时，水动力质量系数可由下式计算：

$$C_M = 1 + 2D/B \quad (2)$$

式中： D 为船舶吃水； B 为船宽。

偏心系数可由下式计算：

$$C_E = (K^2 + R^2 \cos^2 \gamma) / (K^2 + R^2) \quad (3)$$

$$K = (0.19 C_b + 0.11) L \quad (4)$$

式中： K 为船舶回转半径； L 为船长； C_b 为船舶方形系数（油船取0.825）； R 为从质量中心至接

触点的距离； γ 为接触点至质量中心的连线与船舶速度矢量的夹角。

2) 国际航运协会 (PIANC) 公式^[3]。

$$E_d = \frac{1}{2} M v^2 C_E C_m C_S C_C \quad (5)$$

式中： M 为95%保证率的船舶排水量； v 为船舶法向靠岸速度（50%保证率）； C_m 为有效质量系数； C_E 为偏心系数； C_S 为柔性系数（柔性护舷取1.0）； C_C 为泊位形状系数（透空式高桩码头取1.0）。

偏心系数 C_E ，对于大型油轮靠泊的墩式码头，取值为0.7。

有效质量系数 C_m 取值：富余水深0.5D时取1.5，0.1D时取1.8，富余水深介于0.1D~0.5D时采用插值取值。

3) 日本国际临海开发研究中心 (OCDI) 公式^[4]。

$$E_f = (M_s v^2 / 2) C_m C_e C_S C_C \quad (6)$$

式中： M_s 为75%保证率的船舶排水量； v 为船舶法向靠岸速度； C_m 为有效质量系数； C_e 为偏心系数； C_S 为柔性系数（取1.0）； C_C 为泊位形状系数（取1.0）。

有效质量系数可由下式计算：

$$C_m = 1 + \frac{\pi}{2 C_b} \cdot \frac{D}{B} \quad (7)$$

偏心系数可由下式计算：

$$C_e = 1 / [1 + (\ell/K)^2] \quad (8)$$

式中： ℓ 为从质量中心至接触点的距离。

4) JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[1] 公式。

《港口工程荷载规范》^[1]规定船舶靠岸时的有效撞击能量按下式计算：

$$E_0 = \frac{\rho}{2} m v_n^2 \quad (9)$$

式中： ρ 为有效动能系数（取0.8）； m 为75%保证率的船舶排水量； v_n 为船舶靠岸法向速度。

1.2 系泊船舶在横浪作用下的撞击力

船舶在波浪中运动是一个非常复杂的问题，涉及到流体和固体之间的相互作用。对于系泊船

船在波浪作用下的运动情况就更加复杂, 不单是流固之间的相互作用, 系泊系统又给船舶增加了人为约束, 形成了波浪-船舶-码头的一套响应系统, 对于此类问题的研究, 理论推导是相当困难的, 所以一般采用物理模型试验或数学模型分析的方法进行研究。我国的相关研究单位, 均采用物理模型方法进行研究, 产生了多项研究成果, 为具体工程设计提供设计依据和行业规范的编制提供参考。

对于系泊船舶在横浪作用下的撞击力计算, JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》在相关研究成果的基础上提出了近似计算方法。

横浪周期不大于 6 s 的墩式码头, 系泊船舶在横浪作用下分配在每个墩上的有效撞击能量 E_w 按下式计算:

$$E_w = 0.5 \frac{k}{2} C_H m_H v_H^2 \quad (10)$$

式中: k 为偏心撞击能量折减系数; C_H 为船舶附加水体影响系数; m_H 为船舶计算装载度相应的排水量; v_H 为系泊船舶在横浪作用下的法向撞击速度。

船舶附加水体影响系数 C_H 可由下式计算:

$$C_H = 1.04 + 0.9D^2/(Bd) \quad (11)$$

式中: d 为码头前水深。

系泊船舶在横浪作用下的法向撞击速度 v_H 可由下式计算:

$$v_H = 0.3 \frac{H}{T} \left(\frac{L_H}{B} \right)^{1.32} \left(\frac{D}{D_h} \right) \quad (12)$$

式中: H 为计算波高; T 为波浪平均周期; L_H 为波长; D_h 为与船舶装载度相对应的平均吃水。

偏心撞击能量折减系数 k 可按表 1 选用。

表 1 偏心撞击能量折减系数 k

载况	设计高水位	设计低水位
满载	0.94	0.90
半载	0.92	0.96
压载	0.90	0.98

2 船舶撞击力计算方法比较

2.1 船舶靠岸撞击力计算方法比较

从不同标准对船舶靠岸撞击力的计算公式看,

可以将式(1), (5)和(6)分别简化为如下公式:

$$E = 0.5 \rho_1 M_D v_B^2 \quad (13)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \rho_2 M v^2 \quad (14)$$

$$E_f = \rho_3 (M_s v^2 / 2) \quad (15)$$

因此, ρ_1 , ρ_2 和 ρ_3 分别为:

$$\rho_1 = C_M C_E C_S C_C \quad (16)$$

$$\rho_2 = C_E C_m C_S C_C \quad (17)$$

$$\rho_3 = C_m C_e C_S C_C \quad (18)$$

针对同一水深 25 m 的某 30 万吨级外海开敞式油轮码头, ρ_1, ρ_2, ρ_3 和 ρ 的值分别为 1.49, 1.25, 1.36 和 0.8。

2.1.1 国内外关于船舶法向靠岸设计速度的研究

船舶法向靠泊设计速度的选取直接影响船舶靠岸撞击力计算的准确性, 针对国内外不同的船舶靠岸撞击力计算公式中的设计值和相关船舶操作规定中的建议值进行分析。

1) 英国标准^[5]规定, 有掩护的码头船舶法向靠岸速度 v_B 在船舶排水量大于 12.5 万 t 时建议取 0.14 m/s。困难情况下的靠泊速度可以依 Broolsma 等^[6]的研究成果选取。

由图 1 可知, 载质量 30 万 t 的船舶适度靠泊外海开敞式泊位 (对应图 1 中的靠泊条件 d: 暴露条件下的适度靠泊) 时, 船舶法向靠泊速度可取 0.11 m/s。

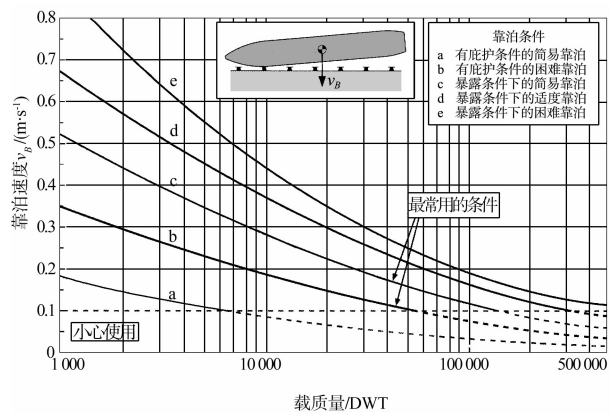


图 1 船舶法向靠泊速度与船舶载质量关系

2) PIANC 的船舶法向靠岸速度 v , 在排水量大于 10 万 t 的船舶靠泊开敞式码头时取 0.2 m/s, 然而对于大型油轮码头, 由于装备有码头靠泊监

测系统，依靠这一有效系统可以使船舶的靠泊速度控制在安全范围内，因此为设计合适的靠岸速度，也可以依 Brolsma 的研究成果选取。

3) OCIDI 认为，大型油船码头由于靠码头时有拖轮辅助，依过去的设计经验，船舶法向靠岸速度一般在 0.1 ~ 0.15 m/s；同时，依据 Shigeru Ueda 等^[7]对于大型油船实际靠泊码头时的法向靠泊速度的观测统计研究成果，20 万吨级油船靠泊外海泊位时的法向靠泊速度最大为 0.13 m/s，均值为 0.041 m/s。若假定统计数据符合韦伯分布，则经计算法向靠泊速度超过 0.11 m/s 的累积概率仅为 4.5%。

4) 《船舶操纵》^[8]规定，船舶靠墩式（栈式）泊位时，万吨级船的靠泊速度应低于 0.1 m/s，10 万吨级左右的船为 0.02 ~ 0.08 m/s，20 万 ~ 30 万吨级为 0.01 ~ 0.05 m/s。

5) JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[1]对无掩护海港靠泊排水量大于 10 万吨级的船舶法向靠岸速度建议为 0.08 ~ 0.15 m/s，其中较大值适用于靠船条件较为恶劣的情况。

2.1.2 船舶法向靠岸设计速度的选取

综合 2.1.1 的分析，国外标准及研究中关于船舶法向靠岸速度的设计值，均大于国内船舶操作标准及码头泊位建设主管部门的行业标准，因此，在考虑计算方法与国际接轨，并兼顾大型油船泊位装配有靠泊监测系统及选取护舷留有一定安全富裕的前提下，载质量 30 万吨级的大型油船在适度靠泊外海开敞式泊位时，法向靠岸设计速度取 0.11 m/s 是合适的。

载质量 30 万 t 的大型油船依据不同的公式计算的船舶靠岸撞击力结果见表 2。

表 2 各种公式计算载质量 30 万 t 船舶靠岸撞击力结果

理论或试验	计算排水量/t	法向靠泊速度/(m·s ⁻¹)	靠岸撞击力能量/kJ
BS 6349	368 000		3 317
PIANC	418 000		3 161
OCIDI	368 000	0.11	3 027
JTS 144-1	368 000		1 781
试验 1 ^[9]	350 464.8	0.10	2 574

从对比结果可以看出，我国规范计算出的船舶靠岸撞击力结果明显小于国外标准和物理模型试验结果。

2.2 系泊船舶在横浪作用下的撞击力计算成果对比

系泊船舶在横浪作用下的撞击力的确定，除了大型开敞式码头系泊船舶在波浪作用下对靠船建筑物产生的撞击能量是通过物理模型试验验证外，一般均采用 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[1]推荐的公式进行计算。

对于 30 万吨级的大型油船在横浪作用下的撞击力通过式 (10) 计算和物理试验验证的结果见表 3。

表 3 30 万吨级的大型油船理论与试验验证船舶横摇撞击力结果

理论或试验	计算或试验波高/m	波浪平均周期/s	横摇撞击力能量/kJ
JTS 144-1	2.0	6	2 268
	1.5		1 273
试验 1 ^[9]	2.0		3 729
试验 2 ^[10]	1.5		2 184

从对比结果可以看出，我国规范计算出的系泊船舶在横浪作用下的撞击力结果明显小于模型试验成果。

3 船舶撞击力规范计算公式改进建议

3.1 船舶靠岸撞击力改进公式

经过 2.1 中对 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 和 ρ 值的分析比较，最主要区别体现在 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[1]计算船舶靠岸撞击力公式中未考虑水动力质量系数，因为船舶在水体中运动时，船舶表面会附带一部分水体随着船舶一起运动，这部分水体的质量附加在船舶质量上，这将根本影响着船舶靠岸撞击力的大小。经修正的船舶靠岸撞击力计算公式为：

$$E_0 = \frac{\rho}{2} m C_m v_n^2 \tag{19}$$

式中： C_m 为有效质量系数。

考虑到有效质量系数主要影响因素是船体本身

以及船体以下水体对船本体的影响, 建议有效质量系数 C_m 的取值参考 PIANC 的要求, 即: 在富余水深不少于 $0.1D$ 及船舶法向靠岸速度不小于 0.08 m/s 时, 有效质量系数 C_m 取值为: 富余水深 $0.5D$ 时取 1.5 , 富余水深 $0.1D$ 时取 1.8 , 富余水深介于 $0.1D \sim 0.5D$ 时采用插值取值。载质量 30 万 t 油船靠岸撞击力修正公式结果为: 计算排水量 36.8 万 t , 法向靠泊速度 0.11 m/s , 靠岸撞击力 $3\ 188 \text{ kJ}$ 。

3.2 系泊船舶在横浪作用下的撞击力改进公式

经过 2.2 和 3.1 的分析, 考虑到船舶在横浪作用下其表面亦会附带部分水体随船舶运动, 故式(10)中的船舶附加水体影响系数 C_H 与式(19)中的有效质量系数 C_m 的含义一致。为与国内外的研究概念协调、统一, 因此在计算大型油轮系泊外海开敞式码头时船舶在横浪作用下的撞击力, 将《港口工程荷载规范》中的公式修正为如下形式:

$$E_w = 0.25kC_m m_H v_H^2 \quad (20)$$

式中: C_m 为有效质量系数, 取值同式(19)。结果见表 4。

表 4 30 万吨级油船横摇撞击力修正公式计算结果

计算或试验波高/m	波浪平均周期/s	横摇撞击力/kJ
2.0	6	3 721
1.5		2 105

此外, 经过对修正公式计算值与试验数据值比较分析, 规范计算公式中的系泊船舶在横浪作用下的法向撞击速度 v_H 偏小, 经与试验结论拟合, v_H 的计算公式修正为:

$$v_H = \frac{H}{3T} \left(\frac{L_H}{B} \right)^{1.32} \left(\frac{D}{D_h} \right) \quad (21)$$

4 结语

本文通过收集整理国内外的研究成果, 总结了国内外对船舶撞击力(能量)的理论和试

验研究成果。对于靠岸撞击力和系泊船舶波浪作用下撞击力计算, 本文给出了针对 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[1] 中计算公式的改进建议。当然, 改进建议是初步的, 该项工作有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] BS6349-4:1994, Maritime structures-Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems[S].
- [3] International Navigation Association. Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002[R]. Belgium: International Navigation Association, 2002.
- [4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[M]. Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.
- [5] BS6349: Part 1:1984, Maritime structures-Part 1: General criteria[S].
- [6] Broolsma J, Hirs V. On the Fender Design and Berthing Velocities[C]. 24th International Navigation Congress, 1977.
- [7] Shigeru Ueda, Satoru Shiraiishi. On the design of fenders based on the ship oscillations moored to quaywalls[R]. Japan: Structures Division Offshore Structures Laboratory, 1992.
- [8] 孙琦. 船舶操纵[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [9] 河海大学. 宁波-舟山港老塘山港区外钓岛光汇万吨级油品码头工程 10# 泊位船舶系靠泊物理模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2013.
- [10] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 广厦(舟山)能源集团有限公司黄泽山油品中转储运项目船舶系靠泊物理模型试验[R]. 天津: 中交天津港湾工程研究院有限公司, 2012.

(本文编辑 武亚庆)