



三角靠船钢管桩簇 在斜向船舶撞击力作用下的受力分析*

吴林键^{1,2}, 李怡², 丁英品³, 舒丹^{1,2}, 度菽葭^{1,2}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 广州港工程设计院有限公司, 广东 广州 510100)

摘要: 针对小型船舶的斜向靠泊问题, 根据英国标准 *Maritime Structures-Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems* (BS 6349-4: 1994) 得到了该情况下船舶撞击能量的计算方法。以广州珠江某码头中三角靠船钢管桩簇为例, 探讨该结构在不同角度斜向船舶撞击力作用下的桩身性状变化规律, 结果表明: 当船舶斜向靠泊时, 沿切向的撞击力不可忽略; 对于该工程实例中的钢管桩簇而言, 船舶撞击力合力、桩身最大应力以及桩顶最大位移随船舶撞击角度的变化均呈现出“先增后减”的趋势, 计算得到该工程实例中斜向靠泊的最不利船舶撞击角度参考值约在 $20^\circ \sim 22^\circ$ 。建议在类似工程设计时应充分考虑到船舶斜向靠泊问题的重要性, 保证结构的使用安全。

关键词: 钢管桩簇; 斜向船舶撞击力; 最不利船舶撞击角度; 受力计算

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0064-06

Stress analysis of steel cluster pile under oblique action of ship impact force

WU Lin-jian^{1,2}, LI Yi², DING Ying-pin³, SHU Dan^{1,2}, TUO You-jia^{1,2}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Guangzhou Port Engineering Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510100, China)

Abstract: In allusion to the question of oblique berthing in small vessels, this paper receives the calculation method of ship collision energy in this situation based on *British Standard: Maritime Structures-Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems* (BS 6349-4: 1994). Taking one inland river wharf in Guangzhou for example, this paper discusses the strength and deformation of the steel cluster pile structure under the action of ship impact force in difference angles. The results show that when the small vessel berths obliquely, its tangential impact force can not be ignored. For the steel cluster pile of this engineering project, the ship's impact force, the maximum strength and the maximal displacement of pile presents the trend of increasing at first and then reducing accompanied by the ship impact angle, and the most unfavorable impact angle of the ship is almost from $20^\circ \sim 22^\circ$. To ensure the application safety of the structure, we suggest to consider adequately the importance of oblique berthing of small ships in similar projects.

Key words: steel cluster pile; oblique impact force of ship; most unfavorable impact angle; stress analysis

靠船桩簇是通过自身的变位及橡胶护舷的变形来吸收船舶撞击的能量^[1-2], 在对该结构承受船

舶撞击力的计算分析中, JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[3]规定, 船舶靠岸时的有效撞击能

收稿日期: 2013-09-23

*基金项目: 重庆交通大学研究生教育创新基金重点项目 (20130102)

作者简介: 吴林键 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海结构工程方面的研究。

量取法向速度(即船舶撞击角度为 90°)作为校核准则,但实际上有的小型船舶(如客船、渡轮)由于自身操作问题,其靠泊方向与码头前沿线呈一定的夹角^[4-5],即船舶撞击力会斜向作用于靠船构件上。斜向撞击力对码头中的柔性靠船结构、端部排架等构件的应力及变形影响较大,在实际工程中也是不容忽略的问题。但针对于上述情况,我国规范^[3]中尚缺乏相关的计算方法和规定。因此,本文以三角靠船钢管桩簇为例,探讨该结构在斜向船舶撞击力作用下的桩身性状,为钢管簇靠船结构的设计计算、安全使用及可靠性评估提供有价值的参考。

1 斜向船舶撞击能量计算方法

针对于渡轮或客船的斜向靠泊问题,在英国标准《Maritime Structures》(BS 6349:1994)第四分册《护舷与系泊装置设计(简称英标IV)》(BS 6349-4:1994)^[6]中详细讲述了这一问题的设计计算方法。英标IV^[6]中规定,船舶斜向靠泊的计算图示见图1。图示中 L 为设计船长, v 为靠泊速度, α 为靠船角度, R 为船舶质量中心至接触点的距离, γ 为 R 与船舶速度矢量的夹角。护舷吸收船舶斜向撞击的能量包括法向能量和切向能量两部分,应分别进行计算。

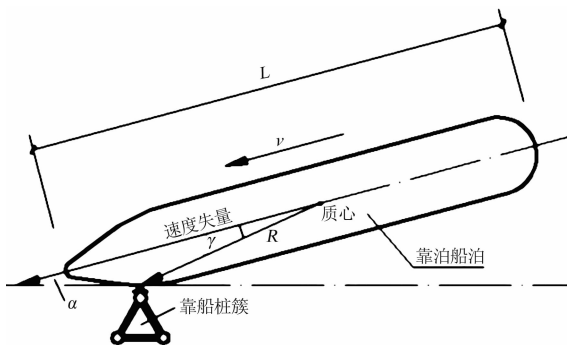


图1 船舶斜向靠泊示意

1.1 法向船舶撞击能量

英标IV中规定,法向船舶撞击能量 E_v 按下式计算:

$$E_v = \frac{1}{2} M_D C_M C_s C_c C_E (v \sin \alpha)^2 \quad (1)$$

式中: M_D 为船舶排水量(t); C_M 为水动力质量系数,按英标IV中规定计算; C_s 为柔性系数,柔性护舷取1.0,硬性护舷取0.9~1.0; C_c 为泊位形状系数,透空式结构取1.0,实体岸壁式结构取0.8~1.0; C_E 为偏心系数,按英标IV中规定计算; v 为船舶沿靠泊方向的速度,根据英标IV中规定取值; α 为靠船角度(图1),建议最小值为 15° 。

1.2 切向船舶撞击能量

英标IV中规定,切向船舶撞击能量 E_h 可按下式计算:

$$E_h = \frac{1}{2} M (v \cos \alpha)^2 \quad (2)$$

式中: M 为船体质量(t);其余各参数同式(1)。

从式(1)和式(2)中可看出,与我国规范相比,英标IV对船舶斜向撞击问题有着更为具体的描述,其中的各个计算参数也需充分考虑实际情况来进行取值。本文以广州珠江某内河码头工程项目为依托,应用上述公式来计算在不同角度下船舶斜向靠泊时的撞击能量,再根据某一型号橡胶护舷的吸能曲线和反力曲线来确定不同情况下作用于靠船钢管桩簇结构上的撞击力,进而对该结构进行计算分析。

2 实例分析

2.1 工程概况

广州珠江某旅游客运码头工程靠船结构采用三角钢管桩簇(图2,3)为桩簇三视图。桩簇的靠泊主桩直径800mm,其后布置2根直径700mm的辅桩,三者均为壁厚22mm的钢管桩。在平面上按等边三角形布置,桩间距3m。为增加桩簇结构的整体刚度以及平均荷载分配,在桩间加设一系列直径254mm,壁厚16mm的钢管横撑。本文计算分析中,考虑船舶撞击能量全部由护舷吸收。

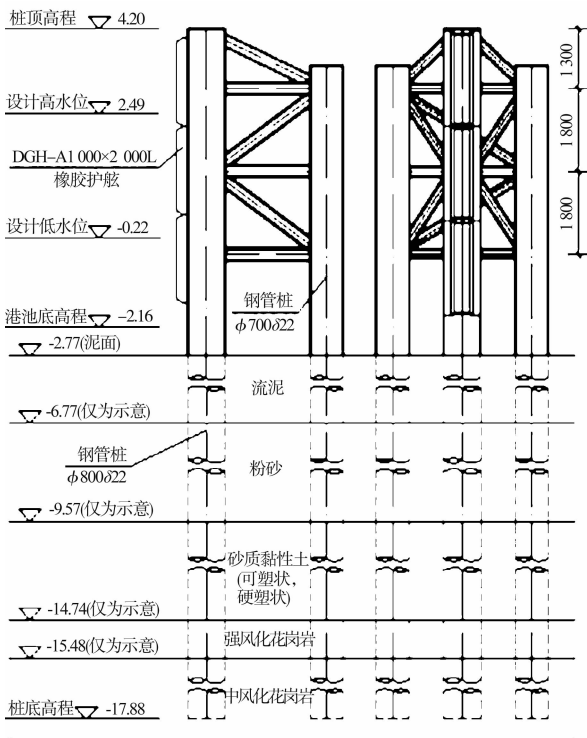


图2 桩簇断、立面图

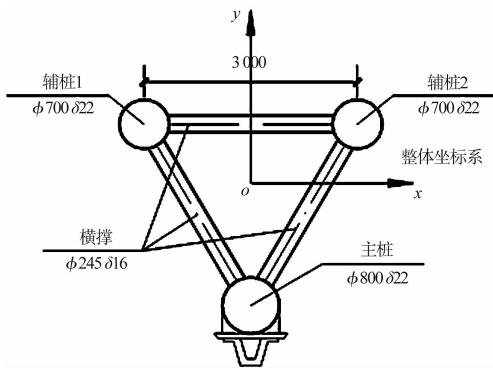


图3 桩簇平面图

2.2 不同角度斜向船舶撞击力计算

根据英标 IV 中规定并结合在码头现场的观测结果,可取船舶斜向撞击角度范围为 $15^\circ \sim 30^\circ$, 增量为 5° 。由式(1)和(2)可分别计算得到不同角度的船舶斜向撞击能量,并根据选用 DGH-A 1 000 \times 2 000 L 低反力型 (RL) 橡胶护舷,根据其吸能曲线和反力曲线之间的关系,可得到不同角度船舶撞击能量所对应的撞击力大小。计算结果见表 1。

从表 1 中的计算结果可以看出,当船舶撞击力斜向作用于靠船结构上时,沿切向 (x 方向)

的船舶撞击力大小不可忽略,在设计过程中应充分考虑到这一问题的重要性。

表 1 斜向船舶撞击能量及撞击力计算结果

船舶撞击角度 $\alpha/(\circ)$	法向 y		切向 x		合力/kN
	E_v/kJ	F_v/kN	E_v/kJ	F_v/kN	
15	51.87	529	62.98	574	780.59
20	90.70	593	59.60	569	821.83
25	138.65	589	55.44	561	813.41
30	194.18	571	50.63	552	794.19

注:法向、切向分别对应图 3 中的 y 和 x 方向。

同时,应用 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[3] 规定的方法计算得到了相同条件下船舶正向靠泊时的撞击能量为 31.5 kJ,根据护舷的反力曲线可知撞击力大小为 488.2 kN,我国规范的计算结果相比于表 1 中的数据要偏小,表明如果只考虑船舶正向撞击而忽略斜向靠泊对码头结构的影响将更偏危险。

2.3 有限元模型建立

2.3.1 三角靠船钢管桩簇三维模型基本构件定义

根据钢管桩簇的结构形式及力学特点,可将其受力分析简化为三维空间刚架进行有限元分析计算。应用结构通用有限元分析软件 SAP2000 建立桩簇结构三维模型辅助计算。图 4 为该结构的三维模型。建模过程中,将主桩、辅桩及横撑全部定义为空间等截面弹性梁单元,通过输入各个构件的材料及截面参数使其与结构原型尺度一致。

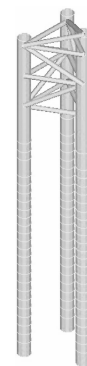


图 4 钢管桩簇三维有限元模型

2.3.2 桩-土相互作用边界条件

根据地质勘察报告,该地区的主要地层分布为:

①流泥, 厚度 3.70 ~ 4.10 m; ②粉砂, 厚度 2.20 ~ 3.10 m; ③砂质黏性土 (硬塑为主、局部可塑), 厚度 4.53 ~ 5.80 m; ④强风化花岗岩, 厚度 0.56 ~ 1.12 m; ⑤中风化花岗岩, 厚度 4.2 ~ 38.6 m。钢簇桩底部嵌入中风化花岗岩中, 根据文献[7-10]的研究成果表明: 对于嵌岩钢管桩的施工方式在现阶段已相当成熟, 施工可行性能得以保障。在基岩顶层至泥面间存在约 13 m 的覆盖层, 表明该处为一“厚覆盖层-基岩”地基, 其覆盖层对桩身的土抗力不可忽略。因此, 在定义桩-土相互作用的边界条件时, 按照 JTJ 285—2000 《港口工程嵌岩桩设计与施工规程》^[11] 的规定限制桩底自由度; 同时, 根据文献[12], 采用竖向弹性地基梁法 (m 法) 在桩身施加一定刚度的弹簧, 共同来模拟桩土相互作用的边界条件。其计算模型见图 5。

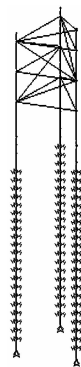


图5 桩-土相互作用边界条件

2.3.3 船舶撞击力作用方式

从理论分析可知, 当水平荷载作用位置距离桩底越大时, 对桩顶变形是最不利的。因此本文只考虑在设计高水位时船舶撞击力作用于钢簇桩上。根据表 1 的计算结果, 通过在有限元模型中设计高水位对应节点处施加法向和切向的集中力来模拟船舶撞击力。

2.4 计算结果分析

分别对不同撞击角度下靠船桩簇中的主桩、辅桩 1 和辅桩 2 (图 3) 的桩身应力及桩身位移计算结果进行分析。

2.4.1 桩身应力分析

将钢桩簇作为拉弯 (压弯) 构件来计算其桩身应力, 根据 JTS 152—2012 《水运工程钢结构设

计规范》^[13] 中的规定, 拉弯 (压弯) 构件的应力计算公式为:

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (3)$$

式中: N 为轴向拉力 (或压力) 设计值 (N); A_n 为净截面面积 (mm^2); M_x (M_y) 为绕强 (弱) 轴作用的最大弯矩设计值 ($\text{N}\cdot\text{mm}$); γ_x 和 γ_y 为与截面模量对应的界面塑性发展系数; W_{nx} 和 W_{ny} 为对 x 轴和 y 轴的净截面模量 (N/mm^3); f 为钢材的抗拉 (或抗压) 强度设计值 (N/mm^2)。根据式(3)可分别计算得到桩簇中各桩在承载能力极限状态时的桩身应力 (图 6)。

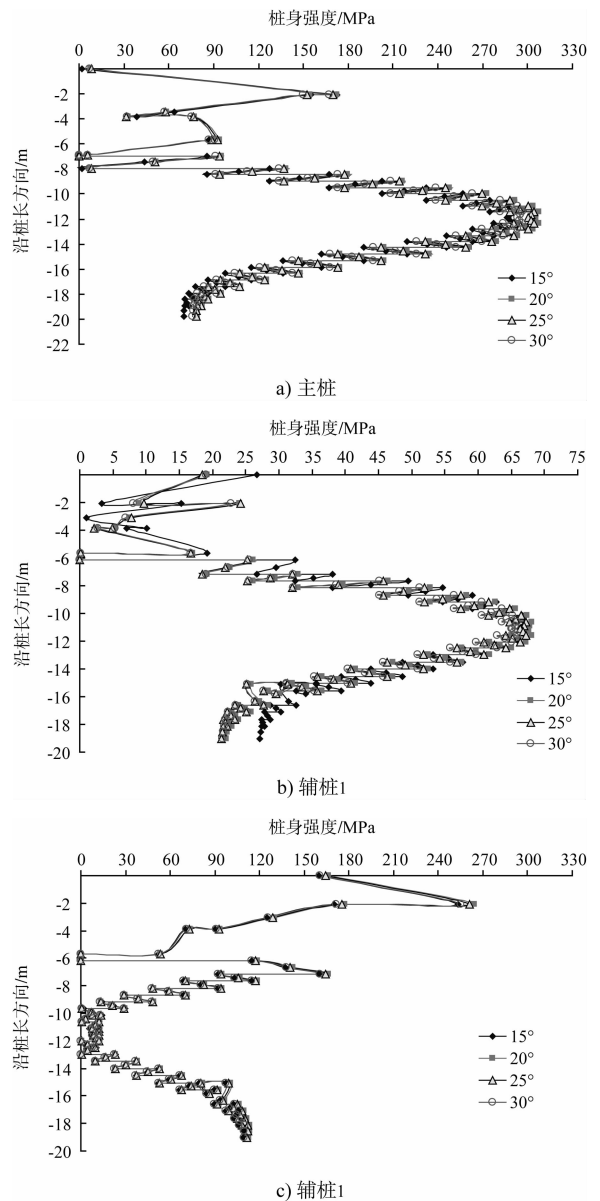


图6 桩身应力

从图6可以看出, 钢桩簇结构的主桩桩身应力最大值相比于其余两根辅桩而言最大, 其次是辅桩2, 最小为辅桩1。而主桩最大桩身应力设计值并未超过 310 MPa, 桩身应力满足要求。同时, 从以上图示中均可以看出, 造成最大桩身应力的船舶撞击角度为 20°。

2.4.2 桩身位移分析

根据有限元计算结果可分别得到靠船桩簇中的各桩在正常使用极限状态下的桩身位移 (图7)。

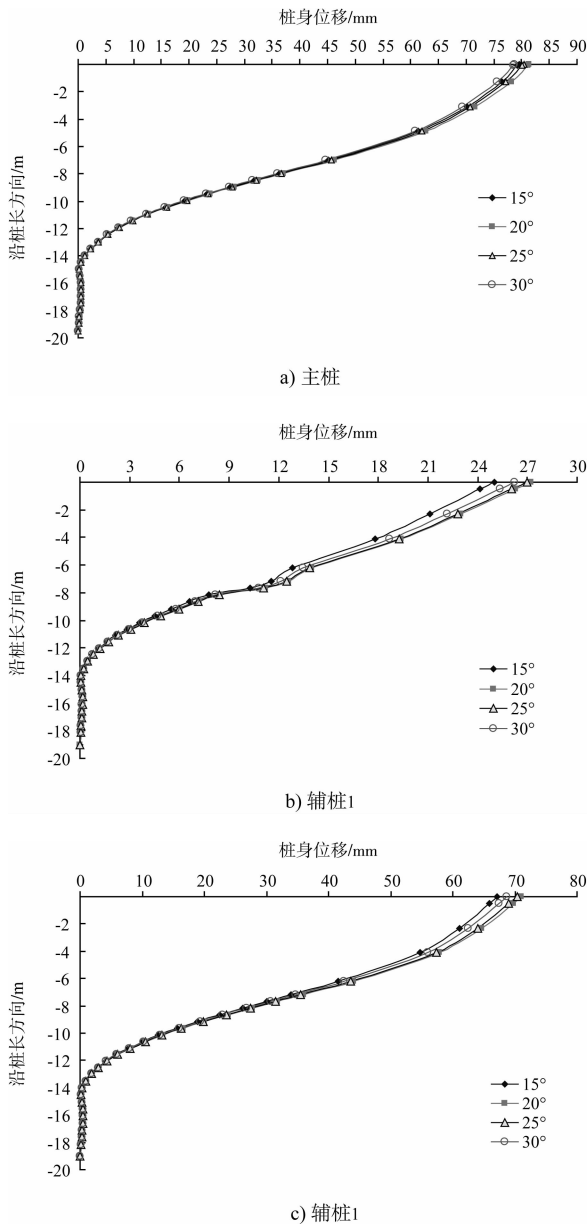


图7 桩身位移

从图7可以看出, 钢桩簇结构的主桩桩顶位移最大, 其次是辅桩2, 最小为辅桩1。同样, 从

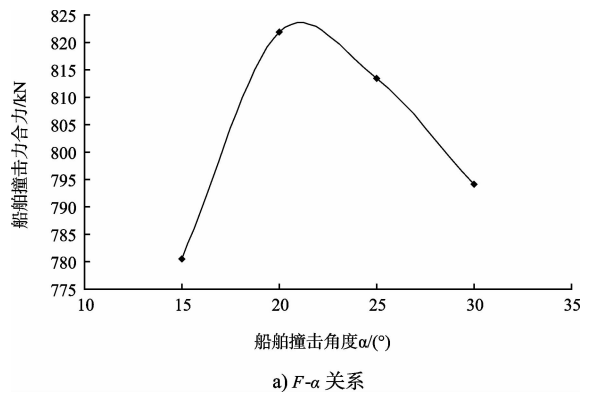
以上图示中也能够看出, 引起桩顶最大位移的船舶撞击角度同样为 20°。

2.4.3 综合分析计算最不利船舶撞击角度

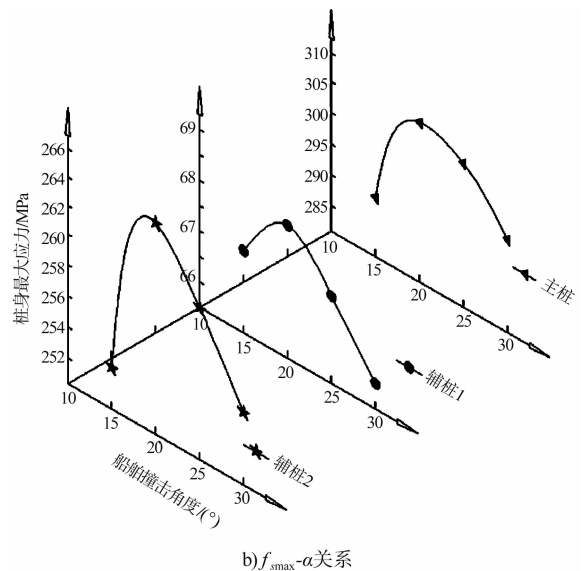
为了计算得出船舶斜向靠泊的最不利撞击角度范围, 通过分析船舶撞击力合力 F , 桩簇结构中各桩的最大桩身应力 $f_{s\max}$, 各桩最大桩顶位移 Δ_{\max} 分别随船舶撞击角度 α 的变化趋势 (图8) 简称 $F-\alpha$ 关系、 $f_{s\max}-\alpha$ 关系以及 $\Delta_{\max}-\alpha$ 关系, 分别计算出这3种情况下的最不利船舶撞击角度 (表2)。

表2 最不利船舶撞击角度参考计算结果

衡量参数	撞击力合力 F	最大桩身应力 $f_{s\max}$			最大桩顶位移 Δ_{\max}		
		主桩	辅桩1	辅桩2	主桩	辅桩1	辅桩2
最不利撞击角度/(°)	21.0	21.5	20.2	21.0	20.5	21.5	21.2



a) $F-\alpha$ 关系



b) $f_{s\max}-\alpha$ 关系

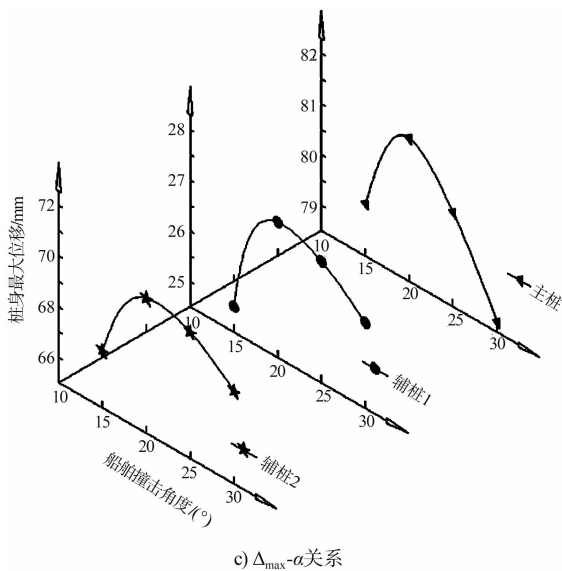


图8 船舶撞击力、桩身应力及位移随船舶撞击角度 α 的变化趋势

从图8可以看出,船舶撞击力合力 F , 桩身最大应力 $f_{s\max}$ 以及桩顶最大位移 Δ_{\max} 随船舶撞击角度 α 的变化趋势均为“先增加后减小”,可从图中读出相应的最不利船舶撞击角度。但由于本文中散点数据样本相对较少,因此所得到的最不利船舶撞击角度仅供参考。

从表2中的数据可以看出,针对于该工程实例情况下的斜向靠泊最不利船舶撞击角度参考值约在 $20^\circ \sim 22^\circ$, 该结果可为同类型船舶在靠泊设计计算过程中提供一定有价值的参考。

3 结论

1) 当船舶撞击力斜向作用于靠船构件上时,沿切向 (x 方向) 的撞击力大小不可忽略。

2) 对于该工程实例中的钢桩簇结构而言,船舶撞击力合力、桩身最大应力以及桩顶最大位移随船舶撞击角度的变化均呈现出“先增后减”的趋势。

3) 计算得到该工程实例中船舶斜向靠泊的最不利船舶撞击角度参考值约在 $20^\circ \sim 22^\circ$ 。

综上所述,建议在类似工程项目设计过程中应充分考虑到船舶斜向靠泊问题的重要性,可参考本文的计算方法计算斜向船舶撞击力,并验算靠船结构的桩身应力和桩身变位,保证结构的使用要求,为靠船结构的设计计算、安全使用及可靠性评估提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 谢耀峰. 港口靠船桩工作形状计算的双参数法[J]. 海洋工程, 2005, 20(2): 38-42.
- [2] 刘速. 钢簇桩设计中桩与护舷能量分配比例的计算[J]. 水运工程, 2008(4): 23-25.
- [3] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [4] 宗绍利. 船舶撞击力及系泊船舶波浪作用下的撞击力研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [5] 邱拓荒, 张颖, 孙克俐. 船舶撞击高桩码头的系统动力仿真研究[J]. 港工技术, 2013(1): 37-39.
- [6] BS 6349: 1994-4 Maritime structures-code of practice for design of fendering and mooring systems[S].
- [7] 劳伟康, 周立运, 王钊. 大直径柔性钢管嵌岩桩水平承载力试验与理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 770-1 777.
- [8] 司银云. 钢管嵌岩桩在马鞭洲港区码头工程中的设计及施工[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [9] 姜满山, 高社林. 植入法嵌岩钢管桩设计与施工技术探讨[J]. 港口科技, 2007(3): 47-49.
- [10] 陈俊海, 仲彦, 韩雪艳, 等. 钢管嵌岩桩施工工艺及控制要点[J]. 水运工程, 2009(8): 169-172.
- [11] JTJ 285—2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规程[S].
- [12] 吴林键, 舒丹, 王明祥, 等. 竖向弹性地基梁法与假想嵌固点法在砂性地基高桩码头设计中的应用[J]. 水运工程, 2013(4): 159-165.
- [13] JTS 152—2012 水运工程钢结构设计规范[S].