



# 大水位差框架墩式码头动力仿真分析

龙丽吉<sup>1,2</sup>, 左旋峰<sup>3</sup>, 何光春<sup>1</sup>

(1. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;  
3. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017)

**摘要:** 结合三峡库区某框架墩式码头工程, 通过有限元动力仿真方法, 利用非线性分析软件ANSYS/LS-DYNA建立了船舶与独立墩式码头碰撞的有限元模型, 模型中考虑了橡胶护弦的缓冲和吸能作用, 更加真实地模拟出船-护弦-码头三者之间的相互作用。模型分析了船舶速度对墩式结构动力响应的影响。

**关键词:** 动力仿真; 撞击力时程分布; 位移变形; 应力分布

中图分类号: U 656.1\*23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0074-06

## Dynamic simulation for frame-pier in river with large fluctuation

LONG Li-ji<sup>1,2</sup>, ZUO Xuan-feng<sup>3</sup>, HE Guang-chun<sup>1</sup>

(1. Chongqing Southwest Hydro Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing 400074, China;  
2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
3. Sichuan Communications Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Based on the case of Naxigou port in Three Gorge reservoir, taking advantages of the finite-dynamic simulation method, we establish the collision model between ship and frame-pier wharf by non-linear analysis software ANSYS/LS-DYNA. In order to simulate the interaction among the ship, the frame-pier wharf and the rubber fender more accurately, we take the cushioning effect and energy absorption of rubber fender into consideration in this model. The influence of various factors are also analyzed.

**Key words:** dynamic simulation; temporal distribution of collision force; deformation and displacement; stress distribution

港口是重要的基础设施, 必须保证它工作时的安全性和可靠性。框架墩式结构码头是一种新型码头结构, 具有明显的经济优势, 其适用范围广, 目前已经应用于内河和深海。框架墩式结构码头由于其结构特点, 对动力作用反应比较敏感。实践表明, 对大水位差内河框架墩式码头结构, 船舶的撞击力往往是决定墩式结构安全性、耐久性的关键因素。

我国学者刘建成等<sup>[1]</sup>于2002年采用非线性有限元程序仿真计算了一艘4万吨级油轮与长江上某一斜拉桥正向发生碰撞问题, 反映了船-桥碰

撞过程中船艏、桥梁承台、桥面和拉索的力与变形的时间历程。2003年, 佛罗里达州立大学的Consolazio等<sup>[2]</sup>利用ADINA有限元程序对驳船撞击圆形墩和方墩进行了仿真计算, 并将计算结果与AASHTO规范进行比较。Martin J P等<sup>[3]</sup>对船舶与海洋平台结构进行了碰撞的动力学数值模拟研究。Erik Pettersen 等<sup>[4]</sup>用非线性数值方法分析平台与船舶碰撞后的结构荷载和变形关系。王自力等<sup>[5]</sup>在分析显示有限元基本理论和关键技术的基础上, 探讨了船舶动力学过程的数值仿真方法, 并对碰撞过程的力学性能进行了分析。李润培<sup>[6]</sup>对船舶和海

收稿日期: 2012-03-27

作者简介: 龙丽吉(1985—), 女, 博士研究生, 从事港口与近海工程结构动力可靠度及疲劳研究。

工结构进行了详细的研究,建立了船舶与海工结构碰撞的弹塑性分析方法,并考虑了橡胶护弦、构件屈曲、水动力对碰撞过程的影响,对碰撞系统的非线性动力影响进行了数值模拟。李雅宁等<sup>[7-8]</sup>对船-桥碰撞进行了非线性有限元仿真研究,刘建成等<sup>[9]</sup>基于整船整桥模型的船桥碰撞进行数值仿真,仿真结果显示了船艏结构破坏、撞击力演变、能力传递和桥墩内部应力变化的详细情景。王君杰等<sup>[10]</sup>建立了3 000~5 0000 DWT范围内的4艘轮船的碰撞有限元模型,采用LS-DYNA软件计算了船舶1.0~5.0 m/s冲击速度范围内的与刚性墙面的碰撞力时间过程样本,提出了3种船艏正撞刚性墙面的基本冲击荷载模型。

建造码头的主要功用就是靠泊船舶,满足船舶作业要求,船舶与码头的碰撞无时不在。然而,对大水位差的内河码头框架墩式结构,由于问题的复杂和难度,目前对其动力性能研究和动力荷载作用下的动力特征分析更是少见。在目前的码头设计中,采用传统的分析方法,把船舶撞击的动力作用笼统等效成静力进行加载,虽简单方便,但对于不同的水域条件、不同的结构、不同的靠泊方式在结构中的反应却无从知晓,与实际情况存在较大差异。将撞击力作为一个静载加到结构上的结果是产生静内力和静位移,而将撞击力作为动荷载加到结构上求出的是结构的动内力和动位移,因此两者有着明显的差别。

本文结合三峡库区某框架墩式码头工程,试图通过有限元动力仿真方法,利用非线性分析软件ANSYS/LS-DYNA建立船舶与独立框架墩式码头碰撞的有限元模型,探讨船舶速度对框架墩式结构的动力响应、框架墩式结构的整体受力特征和节点受力特征,对框架墩式码头的设计和安全评估作出比较符合实际的判断。

## 1 基本理论

船-结构碰撞是一个很复杂的过程,它包含了几何非线性,材料非线性和状态非线性,这些非线性物理现象的综合作用结果使船-结构碰撞过程的精确描述和求解十分困难。目前,显示动力有限元仿真方法是碰撞领域最常用的数值计算

方法。显示动力学采用差分格式,不用求解切线刚度,不需要进行平衡,不存在收敛问题,并且在材料模型、接触算法、并行计算方面也具有优势。因此显示方法特别适用于求解高速动力学事件和复杂的接触问题。

显式积分算法用的是中心差分法,假设 $0, t^1, t^2, \dots, t^n$ 时刻的节点位移、速度、加速度均已知,现在求解 $t^{n+1}(t+\Delta t)$ 时刻结构的响应。将加速度、速度的导数采用中心差分代替,即:

$$\begin{cases} \ddot{U}_i = \frac{1}{\Delta t^2}(U_{i-\Delta t} - 2U_i + U_{i+\Delta t}) \\ \dot{U}_i = \frac{1}{2\Delta t}(-U_{i-\Delta t} + U_{i+\Delta t}) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)代入系统的求解方程(运动方程):

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (2)$$

得:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right)U_{i+\Delta t} &= F_i - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M\right)U_i - \\ &\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right)U_{i-\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\widehat{M}U_{i+\Delta t} = \widehat{R}_i \quad (4)$$

$$\text{式中: } \widehat{M} = \frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C$$

$$\widehat{R}_i = F_i - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M\right)U_i - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right)U_{i-\Delta t}$$

如果已经求得 $U_{i-\Delta t}$ 和 $U_i$ ,则可根据式(4)求出 $U_{i+\Delta t}$ 。所以,式(4)是求解各个离散时间点位移的递推公式,这种数值积分法又称为逐步积分法。当 $t=0$ 时,要计算 $U_{\Delta t}$ ,除了已知初始条件的 $U_0$ 外,还要知道 $U_{-\Delta t}$ ,可根据式(4)求得:

$$U_{-\Delta t} = U_0 - \Delta t\dot{U}_0 + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{U}_0 \quad (5)$$

求解线性方程组可以获得 $t+\Delta t$ 时刻的节点位移向量 $U_{i+\Delta t}$ ,将 $U_{i+\Delta t}$ 代回几何方程与物理方程即可获得 $t+\Delta t$ 时刻的单元应力与单元应变。由上述过程可知,中心差分方法在求解 $t+\Delta t$ 时刻的节点位移向量 $U_{i+\Delta t}$ 时,只需要根据 $t+\Delta t$ 时刻以前计算出 $\widehat{M}$ 和 $\widehat{R}$ ,即可计算出 $U_{i+\Delta t}$ ,这种求解方法称为显式算法。

## 2 模型建立及工况分析

模型建立结合长江上游三峡库区内的某框架墩式码头进行。该框架墩式码头结构基础为桩基承台结构,4根桩,桩径1.8 m,桩长21.5 m,桩基嵌入岩基6 m。承台上部采用多层钢筋混凝土框架结构,层高5 m,框架结构总高25 m。

### 2.1 基本假定

1) 船舶靠泊时对码头的撞击是一个非线性碰撞过程,在船艏与结构发生接触的过程中,船艏结构是主要受力部分,因此本文简化了船舶的结构,只建立了船艏部分,整船质量用集中质量分配在船艏模型上,以保证整个模拟过程中动量的实际值。

2) 考虑到船舶撞击码头结构时首先与橡胶护弦接触,由于橡胶护弦的缓冲作用,船艏结构受力在弹性范围内变化,此处船舶材料取弹性材料。

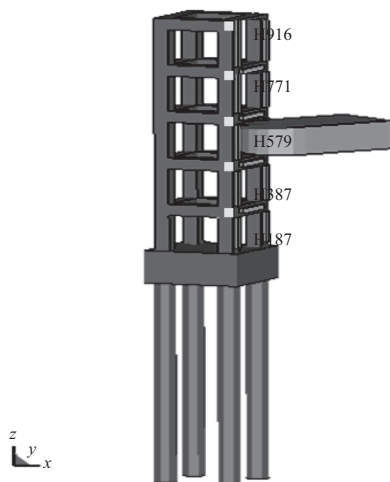


图1 系统结构模型

3) 框架墩的桩基嵌入岩基,嵌入端简化成固结状态。固结深度为岩面下1/3嵌岩深度处。

### 2.2 模型建立及材料选取

框架墩-橡胶护弦-船舶系统模型见图1。

如1图所示,分别建立了混凝土墩式结构整体模型,橡胶护弦等效模型和船舶的简化模型。为了减少计算代价,船舶和码头结构的初始距离留为0.5 m。结构的底部桩基固定,船舶在竖直方向的位移固定,水平方向的位移不加以约束。在计算过程中,框架从上到下分别提取节点916,771,579,387,187的位移和应力值,用来分析

表1 材料参数取值

材料分类	弹模/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
钢筋混凝土墩	31.6	2 400	0.20
钢筋混凝土梁、柱	28.0	2 400	0.20
墩台	26.0	2 400	0.20
船舶	206	7 800	0.30
橡胶护弦	8.04 × 10 <sup>-3</sup>	1 140	0.35

不同框架结构高度的变形和受力特征。结构的材料参数取值见表1。

### 2.3 分析工况

影响船舶和结构之间碰撞相互作用的因素较多,船舶不同运动状态可能对框架墩式码头产生的动力影响也就不同。本文仅就靠船速度做了分析,主要分析了速度的影响:相同吨位的船舶以0.15,0.20,0.25,0.30 m/s的不同速度靠拢墩式码头结构时的动力响应。

### 2.4 撞击力理论值

从理论上讲,船舶的撞击动能

$$E = \frac{1}{2} M v_n^2 \quad (6)$$

式中: $E$ 为船舶理论撞击能量(kJ); $M$ 为船舶的质量(t),按满载排水量计算; $v_n$ 为船舶靠岸时的法向速度(m/s)。

船舶靠岸时,以法向速度 $v_n$ 碰撞码头缓冲设备,其具有的能量由缓冲设备压缩变形,码头结构本身的弹性变形、位移、船体的弹性变形,以及船体与岸边水体挤升、震动、摩擦、发热等吸收能量。其中码头缓冲设备、船体变形以及码头结构变形三者所吸收的能量为有效撞击能。

$$F = \frac{\rho}{2} M v_n^2 \quad (7)$$

对于装设橡胶缓冲设备的码头, $\rho=0.7 \sim 0.8$ 。根据式(7)计算出来的撞击力理论值分别为: $v=0.15$  m/s时, $F=300$  kN; $v=0.20$  m/s时, $F=370$  kN; $v=0.25$  m/s时, $F=400$  kN; $v=0.30$  m/s时, $F=480$  kN。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 碰撞速度对撞击力时程分布和大小影响

图2给出了船舶以不同初速度撞击独立墩式结构时,撞击力随时间的变化曲线。从图中可以看

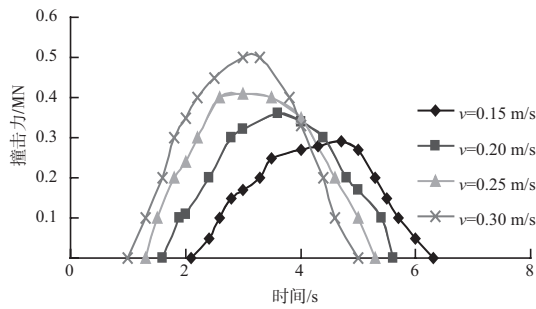
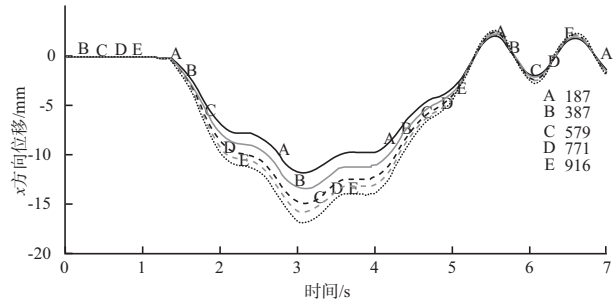


图2 撞击力时程分布

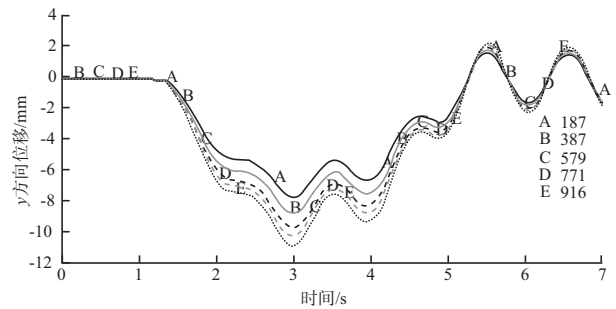
出速度越大撞击力越大。撞击力时程图趋势大致相同。在碰撞船与结构发生接触后, 在很短的时间内在碰撞区域内产生很大的碰撞力, 一般在2 s内撞击力就急剧增加到峰值。

### 3.2 碰撞速度对结构位移变形的影响

图3为框架码头在 $v=0.15\text{ m/s}$ ,  $v=0.25\text{ m/s}$ 的速度下框架墩结构在 $x$ 方向(垂直码头面)和 $y$ 方向(平行码头面)上不同高度的位移变化。从图中可见: 1)随着速度的增加, 结构位移也变大。 $v=0.15\text{ m/s}$ 时,  $x$ 方向最大位移10 mm,  $y$ 方向最大位移6.8 mm;  $v=0.25\text{ m/s}$ 时,  $x$ 方向最大位移为17 mm,  $y$ 方向最大位移13 mm。2)船舶靠岸时往往以一定角度慢慢靠近, 这是墩式码头在空间中两个方向都会产生较大的位移。因此在验算结构的



c)  $v=0.25\text{ m/s}$ 时 $x$ 方向

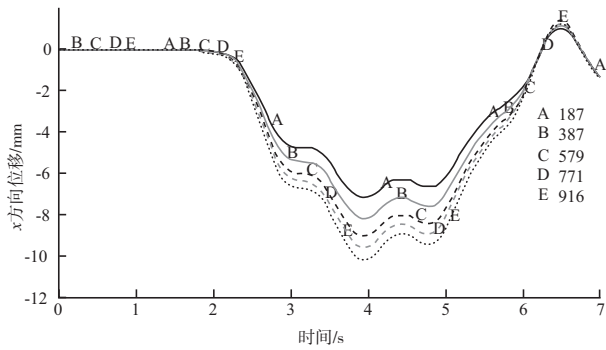


d)  $v=0.25\text{ m/s}$ 时 $y$ 方向

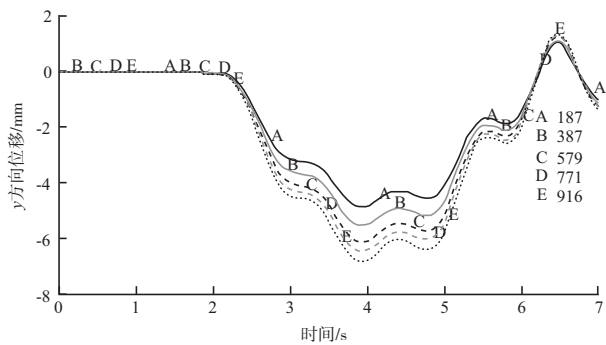
图3 结构位移时程分布

位移时, 必须要考虑框架墩式结构的空问特性。

图4给出了船舶停靠速度与位移大小之间的关系, 从图中可见5 000吨级船舶以 $30^\circ$ 的角度碰撞结构的过程中, 在 $x$ 方向的位移基本是 $y$ 方向位移的2倍。两个方向的位移都随速度的增加增加。但 $y$ 方向的位移值在速度增大到一定值后不再随速度的增加而增加, 而是保持相对稳定的值。



a)  $v=0.15\text{ m/s}$ 时 $x$ 方向



b)  $v=0.15\text{ m/s}$ 时 $y$ 方向

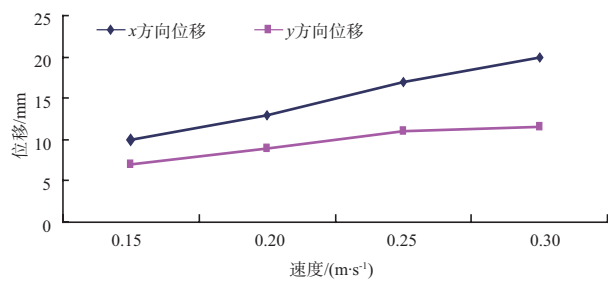


图4 碰撞速度与位移关系

### 3.3 不同速度对结构应力响应的影响

图5为在撞击速度为 $0.15\text{ m/s}$ 时, 最大主应力大约为 $0.175\text{ MPa}$ ; 在撞击速度为 $0.25\text{ m/s}$ 时, 最大主应力为 $0.31\text{ MPa}$ , 从以上数据可以看出, 船舶的撞击速度对结构受力特性有很大的影响, 一方面随着撞击速度的变大, 结构所受的最大主应力值变大; 另一方面, 随着撞击速度的增大, 撞击接触点的主应力震荡越明显。

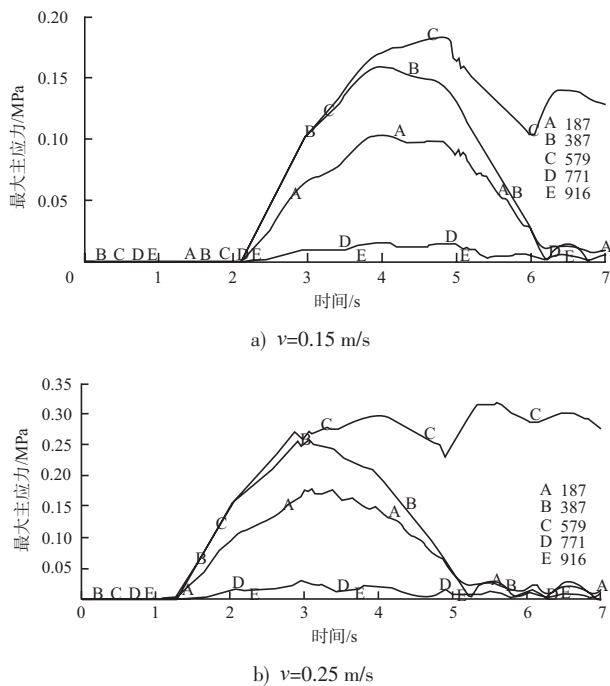


图5 最大主应力时程分布

#### 4 动静对比分析

根据撞击力的动力仿真计算结果，同采用拟静力的计算成果相比较。

##### 1) 静力法和动力仿真法计算撞击力。

从图6, 7可以看出，船舶以低速靠近码头结构时，这时静力计算的撞击力要大于动力计算出的撞击力，但随着靠船速度的增加到一定数值后动力计算出来的结果将大于静力计算结果，同时靠船速度越大，两者的相差越大。因此，如果船舶在靠岸速度较快的情况下，对静力计算出的撞

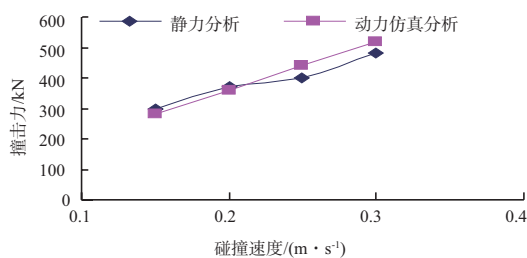


图6 撞击力对比

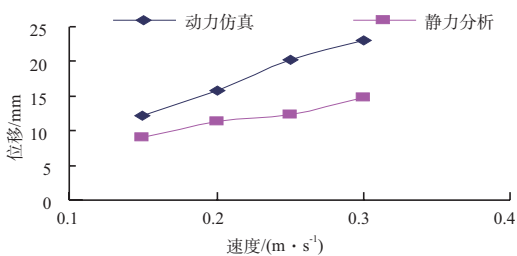


图7 位移对比

击力应该有个扩大系数，根据研究这个扩大系数大约在1.1~1.2。速度较小时取小值。

##### 2) 静力法和动力仿真法位移对比分析。

从图7可以看出，静力和动力计算出来的位移差别非常大。它们之间的相对关系见表2。

表2 位移的动力和静力对比分析

船舶速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	动力计算位移/ mm	静力计算位移/ mm	比值
0.15	12.2	9.0	1.35
0.20	15.8	11.4	1.38
0.25	20.2	12.3	1.38
0.30	23.1	14.8	1.56

从表2可以看出，动力位移在低速时是静力位移的1.3倍，随着速度的增加动力位移相对于静力位移的比值也出现较大幅度的增长，达到1.5倍以上。可见如果按静力方法计算出来的位移满足规范要求时，而实际的动力荷载作用下的位移可能远远超过该值。因此在用静力方法计算对动力荷载反应敏感的大高度墩式码头时，计算结果应该有个修正扩大系数。该系数的大小和靠船速度有关。靠船速度越大，修正系数越大。

#### 5 结论

1) 撞击力大小通过理论值和仿真计算结果的比较可知，两者数值非常接近，说明仿真计算的可靠性。

2) 船舶停靠速度对撞击力大小与结构位移和应力变化有很大影响。随着停靠速度增加，撞击力增大，结构的位移增大。因此有效控制船舶进港靠岸的速度对于结构的安全使用有着积极的作用。

3) 船舶的撞击速度对结构受力特性有很大的影响，一方面随着撞击速度的变大，结构所受的最大主应力值变大；另一方面，随着撞击速度的增大，撞击接触点的主应力随时间的曲线分布也发生较大变化。船舶停靠速度越大，碰撞点处的应力震荡越严重。

4) 船舶靠岸时往往以一定角度慢慢靠近，这是墩式码头在空间中两个方向都会产生较大的

位移。码头结构 $x$ 方向(垂直码头方向)、 $y$ 方向(平行码头方向)的位移随船舶的碰撞速度的增加而增加。 $x$ 方向的位移要远大于 $y$ 方向的位移,并且在 $x$ 方向的变化幅度比 $y$ 方向的变化幅度大。因此在验算结构的位移时,必须要考虑框架墩式结构的空问特性。

5) 船舶以低速靠近码头结构时,静力方法计算出的撞击力稍大于按动力计算出的撞击力,但随着靠船速度的增加,动力计算结果要远大于静力。同时靠船速度越大,两者的差距越大,因此,如果船舶在靠岸速度较快的情况下,对静力计算出的撞击力应该有个扩大系数,根据研究这个扩大系数大约在1.1~1.2。速度较小时取小值。

6) 静力和动力计算出来的位移相差很大,因此在用静力方法计算对动力荷载反应敏感的大高度墩式码头时,计算结果应该有个修正扩大系数。该系数的大小和靠船速度有关,取值范围1.3~1.8。靠船速度越大,修正系数越大。

#### 参考文献:

- [1] 刘建成, 顾永宁. 船—桥碰撞力学问题研究现状及非线性有限元仿真[J]. 船舶工程, 2002(5): 4-9.  
[2] Gary R Consolazio, David R Cowan. Nonlinear analysis

of barge crush behavior and its relationship to impact resistant bridge design [J]. Computer and Structure, 2003, 81: 547-557.

- [3] Martin J Petersen, Preben T Pedersen. Collision between ships and offshore platform[C]. Houston, USA: Proceeding of 13th Annual Offshore Technology Conference. 1981: 163-171.  
[4] Erik Pettersen, Kaare R Johnsen. New nonlinear methods for estimation of collision resistance of mobile offshore units[C]. Houston, USA: Proceeding of 13th Annual Offshore Technology Conference. 1981: 173-186.  
[5] 王自力, 顾永宁. 船舶碰撞过程动力学的数值仿真研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 29-34.  
[6] 鲍莹斌, 李润培, 顾永宁. 船舶与海洋碰撞的动塑性分析[J]. 上海交通大学学报, 1999, 31(7): 40-44.  
[7] 李雅宁. 船—桥碰撞非线性有限元仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.  
[8] 顾海泉. 桥梁船碰撞有限元仿真分析[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
[9] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥数值仿真[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-161.  
[10] 王君杰, 孟德巍, 欧碧春. 轮船船部正撞刚性墙面的基本冲击荷载模型[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 165-170.

( 本文编辑 武亚庆 )

## · 消 息 ·

### 《水运工程》2013年专辑(增刊)征集公告

全国水运工程各单位:

本刊已取得自1992年以来全部连续6版(每4年一版)全国中文核心期刊的市场地位。《水运工程》专辑(增刊)以特有的单位整体专业学术氛围建设水平与单位技术实力展示载体,已然成为支持单位和个人事业愿景提升的平台。

为扎实做好专辑(增刊)的组织工作,特向你们征集2013年专辑(增刊)的出版申请。

本刊2013年专辑、增刊指标共4个,以独家单位和《水运工程》编辑部通过甲乙双方协议的形式确认。

联系电话: 010-64066347, 联系人: 陈路华

欢迎垂询!

《水运工程》编辑部