



# 船舶失控撞击高桩码头结构的数值仿真分析

汪宏, 段金刚, 陈浩

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 以5万吨级散货船在失控状态下以1 m/s的速度垂直撞击某高桩码头为例, 运用有限元软件模拟该撞击的过程, 得到对应撞击的能量转化情况以及船舶撞击作用力的时程曲线, 并将撞击力仿真计算结果与各类船桥碰撞规范撞击力计算结果进行比较。同时, 通过对撞击后码头结构破坏情况进行分析, 提出防止码头结构由于船舶失控撞击而破坏的措施, 为同类码头的设计、维护及改造提供理论依据。

**关键词:** 船舶失控撞击; 高桩码头; 数值仿真; 能量转化; 撞击作用力

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0051-05

## Numerical simulation of uncontrolled ship's impact on high-piled wharf structure

WANG Hong, DUAN Jin-gang, CHEN Hao

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Taking the 50 000 t bulk carrier in the condition of out of control vertical impact to a high-piled wharf at a speed of 1 m/s for example, we simulate the impact process using the finite element software, acquire the corresponding energy change during striking and ship's impact force time history curve, and compare it with the result of specifications. Meanwhile, analyzing the deformation and damage of wharf structure, we put forward measures to prevent the damage of wharf structure under the uncontrolled ship's impact, which provide theoretical supports for the design, maintenance, and transformation of similar wharves.

**Keywords:** uncontrolled ship's impact; high-piled wharf; numerical simulation; transformation energy; impact force

随着海洋运输业的快速发展、港口货物吞吐量的迅速增长、港口作业的密集程度的增加、大型及超大型船舶进出港频率的提高, 船舶失控撞击高桩码头的事故时有发生。船舶的失控状态是指船舶在舵浆失控等情况下的一种非正常状态, 船舶在失控撞击时的速度要比正常靠泊时的速度要大, 因而所产生的撞击力也会加大, 巨大的撞击力就会造成码头结构破坏损伤, 这样会影响结构整体稳定性及局部强度, 甚至降低结构安全系数、减少码头使用年限, 同时也会影响港口正常作业, 造成大量的人身安全、财产损失。本文采

用 ANSYS/LS-DYNA 对船舶失控撞击高桩码头结构的动力响应进行研究, 得出撞击过程中能量转化以及撞击力的变化情况, 分析撞击结束后码头结构破坏情况, 提出防止码头结构由于船舶失控撞击而破坏的措施, 为同类码头的设计、维护及改造提供理论依据。

### 1 碰撞的基本理论

船舶与码头的碰撞机理跟船桥碰撞机理很相似, 它是在很短的时间内, 在巨大碰撞载荷作用下的一种极其复杂的非线性动态响应的过程。目

收稿日期: 2014-09-18

作者简介: 汪宏 (1960—), 男, 教授, 从事港航工程和海洋结构工程。

前解决碰撞问题的方法主要有经典的 Minorsky 方法、汉斯-德鲁彻理论、各种简化解析方法、简化内部机理的数值解法、试验方法和有限方法等<sup>[1]</sup>。其中利用有限元法来解决碰撞是最常用的方法,因为有限元法计算所反映的碰撞物理现象最为完备,并且得到的计算结果也最为准确。

利用有限元进行碰撞分析,其基本方程一般可以表示为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \times \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \times \mathbf{U} = \mathbf{F}_t \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{U}}$  为加速度向量;  $\dot{\mathbf{U}}$  为速度向量;  $\mathbf{U}$  为位移向量;  $\mathbf{F}_t$  为包括撞击力在内的外力向量。

显式中心差分法是 LS-DYNA 所采用的主要求解方法<sup>[2]</sup>,是一个条件稳定算法,有较高的计算效率,其基本原理如下:

假定  $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  时刻的节点位移、速度与加速度均为已知,现求解  $t_{n+1}(t + \Delta t)$  时刻的结构响应。如用两步长的差分公式来表示位移向量对时间的导数,即:

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} \{U_{t+\Delta t} - U_{t-\Delta t}\} \quad (2)$$

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} \{U_{t+\Delta t} - 2U_t + U_{t-\Delta t}\} \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)可得:

$$\bar{\mathbf{M}} \mathbf{U}_{t+\Delta t} = \bar{\mathbf{F}}_t \quad (4)$$

其中:

$$\bar{\mathbf{M}} = \frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{F}}_t = \mathbf{F}_t - \left[ \mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right] \mathbf{U}_t - \left[ \frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right] \mathbf{U}_{t-\Delta t} \quad (6)$$

式(4)中  $\bar{\mathbf{M}}$ 、 $\bar{\mathbf{F}}_t$  分别为等效质量矩阵和等效外载荷。求解方程组(4),即可获得  $t_{n+1}(t + \Delta t)$  时刻的单元应力与应变。

应用显式中心差分法求解碰撞问题时,一个特别值得注意的问题就是时间步长的选取,因为中心差分法是条件稳定的,其时间步长不能超过临界时间步长。实用中常以有限单元网格的特征长度除以应力波速来近似临界时间步长<sup>[3]</sup>,即

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \min\left(\frac{L}{C}\right) \quad (7)$$

## 2 船舶与高桩码头碰撞仿真计算模型

### 2.1 高桩码头结构模型

该码头是经改造后的码头,原码头为3万吨级,改造后可供5万~7万t的船舶靠泊。具体改造方案为在原有排架江侧增设桩台,每榭需改造的原排架需增设4根 $\phi 900$  mm的钢管桩,上部再浇筑节点与原排架结合成新的排架结构<sup>[4]</sup>。

建立的码头有限元模型包括前方承台和后方承台,见图1。其中前方承台包括码头上部结构和桩,上部结构主要包括面板、横梁、纵梁和桩帽,桩则包括直桩和叉桩。由于船舶靠岸时的撞击力主要作用在码头的前方承台,然后传递到后方承台,对接岸结构等影响较小,并且码头各结构分段间的相互约束较弱,结构分段可作为独立的一个空间受力体系进行分析,因此模型选取码头结构的4跨5榭排架作为计算分析对象。

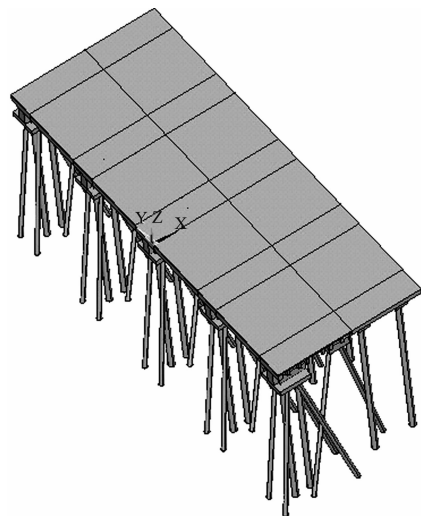


图1 高桩码头有限元模型

码头上部结构和桩全部采用 SOLID164 单元模拟,上部结构材料为混凝土材料,选用动力硬化桩帽模型表达混凝土材料的本-构模型,设置参数为:密度  $\rho = 2\,700 \text{ kg/m}^3$ , 剪切模量  $G = 11 \text{ GPa}$ , 体积模量  $V = 14 \text{ GPa}$ , 破坏包络线参数  $\alpha = 2.7 \times 10^7$ , 破坏包络线性参数  $\theta = 0.11$ , 破坏包络线指数参数  $\gamma = 8.0 \times 10^6$ , 破坏包络线指数  $\beta = 1.4 \times 10^{-7}$ ,

硬化桩帽面长短轴比  $R = 4.43$ , 硬化法则指数  $D = 4.6 \times 10^{-10}$ , 硬化法则系数  $W = 0.42$ , 硬化法则指数  $XO = 1.1 \times 10^8$ 。桩的形式采用钢管桩, 选用线弹性材料模型, 密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $210 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ 。

由于撞击力作用于码头的上部结构为短暂的受力过程, 受岸坡土体边界条件的影响相对较小, 因此根据 JTS 167-4—2012 《港口工程桩基规范》中的规定, 计算出桩基的受弯嵌固点深度, 然后把嵌固点以下桩基全部固结来等效桩-土间的作用。

表1 船体模型的主要参数

结构参数	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	屈服应力 $\sigma_y/\text{MPa}$	切线模量 $E_t/\text{GPa}$	硬化参数 $\beta$	应变率参数 $C$	应变率参数 $P$	失效应变 $\varepsilon_f$
弹塑性体参数	7850	210	0.3	235	1.17	0.5	40.4	5	0.34
刚体参数	7850	210	0.3						

流体介质对碰撞的影响主要通过附连水质量来体现, 目前, 附连水质量可以采用切片法进行计算或用经验公式来估算。为简单起见, 本文采用附加质量法, 附加质量取  $0.04$  倍的船舶排水量<sup>[5]</sup>。

### 3 撞击仿真计算结果及其分析

#### 3.1 撞击过程能量的转化

本文将船舶与高桩码头作为一个完整的系统, 在撞击过程的各个阶段中是否满足能量守恒定律是判别撞击模拟成功与否的标准之一。撞击中船舶的动能 (包括附连水的动能) 会转化为: 船的变形能及船舶剩余动能 (包括附连水的剩余动能)、高桩码头的变形能及动能、构件之间的滑移能 (摩擦能) 以及由于计算而出现的沙漏能。图2是船舶垂直撞击码头的能量变化曲线。

从图2中可以看出, 在撞击的整个过程中, 系统的动能逐渐减小, 内能逐渐增加, 即系统动能逐渐转化成为系统内能, 同时产生了沙漏能和滑移 (摩擦) 能, 但整个系统的总能量保持不变, 这说明了撞击过程中的能量是满足能量守恒定律的。

#### 2.2 船舶模型

船舶模型选用5万吨级的散货船, 满载排水量为  $63792 \text{ t}$ , 由于本文分析的对象是高桩码头, 所以无需细致模拟全船结构, 只需建立相似模型, 船首发生变形会吸收部分能量, 故采用线性强化弹塑性本构模型。船中后区远离碰撞区域基本不发生变形也不吸收能量, 只考虑刚度和质量, 所以简化成刚性板, 全船采用 Shell163 显式结构壳单元, 并约束刚体竖直、水平方向的平动和转动, 然后通过定义刚体惯性来施加船体质量。船舶速度取  $1 \text{ m/s}$ , 船体模型的主要参数见表1。

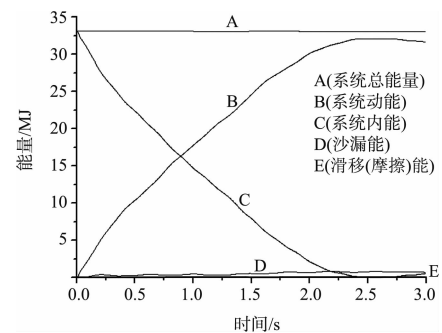


图2 能量变化曲线

#### 3.2 撞击力分析

船舶垂直撞向高桩码头时, 在很短的时间内会在撞击区域产生巨大的撞击力, 导致被撞部位的损伤变形, 继而整个码头也会发生一定的变形或破坏。图3是船舶垂直撞击码头时撞击力时程曲线。

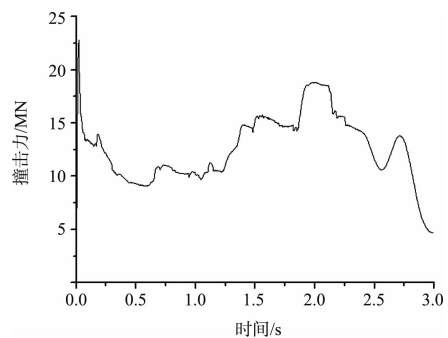


图3 撞击力时程曲线

从图3可以看出, 撞击力时程曲线具有很强的非线性波动特征, 在撞击过程的不同阶段, 撞击力出现了多次卸载现象, 每一次卸载都代表着系统某些构件的失效或破坏。由图3可知最大撞击力出现时间为  $t=0.021\text{ s}$ , 撞击力为  $F=22.785\text{ MN}$ 。

### 3.2.1 国内外各撞击力规范计算结果

就目前对船舶撞击码头撞击力的研究来看, 还没有现成的计算公式可以套用, 但是在桥梁和公路铁路规范中有撞击力的计算公式, 所以借鉴国内外船桥碰撞的规范来计算船舶对高桩码头的撞击力, 并且将结果与有限元数值计算得到的撞击力进行比较分析。

1) 美国 AASHTO 规范公式<sup>[6]</sup>。

$$P=0.98(DWT)^{1/2}(v/8) \quad (8)$$

式中:  $P$  为等效静态撞击力 (MN);  $DWT$  为船舶载质量 (t);  $v$  为船舶撞击速度 (m/s)。经计算得  $P=27.392\text{ MN}$ 。

2) 欧洲统一规范<sup>[7]</sup>。

$$F=v(KM)^{1/2} \quad (9)$$

式中:  $v$  为碰撞体在撞击时的速度 (m/s);  $K$  为碰撞体的等效刚度 (MN/m), 对于内陆航道的船舶,  $K=5\text{ MN/m}$ , 对于远洋船舶,  $K=15\text{ MN/m}$ ;  $M$  为碰撞体的质量 (kg)。经计算得  $F=29.627\text{ MN}$ 。

3) 我国公路桥涵设计通用规范公式<sup>[8]</sup>。

$$P_t = \frac{Wv}{gT} \quad (10)$$

式中:  $P_t$  为漂流物平均撞击力 (kN);  $W$  为漂流物重力 (kN);  $v$  为水流速度 (m/s);  $g$  为重力加速度 ( $9.81\text{ m/s}^2$ );  $T$  为撞击时间 (s), 规范中规定在缺少实际资料时, 撞击时间  $T$  在一般情况下都取为  $1\text{ s}$ 。经计算得  $P_t=50\text{ MN}$ 。

4) 我国铁路桥涵设计基本规范公式<sup>[9]</sup>。

$$P = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (11)$$

式中:  $P$  为设计撞击力 (kN);  $v$  为撞击速度 (m/s);  $W$  为船舶的重力 (kN);  $\gamma$  为动能折减系数;  $\alpha$  为船只或排筏驶进方向与墩台撞击点处切线所成的夹角;  $C_1$ 、 $C_2$  为船只、墩台的弹性变形系数。动能折减系数  $\gamma$  正向撞击时采用  $0.3$ 、斜向撞击

时采用  $0.2$ , 没有实际资料时可以取  $C_1 + C_2 = 0.5\text{ mm/kN}$ , 对于刚度较大的桥墩, 可取  $C_2 = 0$ 。经计算得:  $P=9.396\text{ MN}$ 。

### 3.2.2 撞击力比较分析

图4将以上规范公式计算得到的最大撞击力与软件仿真得到的撞击力进行比较。比较可知有限元法计算得到的最大撞击力大小与美国 AASHTO 规范以及欧洲统一规范公式计算结果相近, 但是与我国公路铁路桥涵规范计算结果相差较大。模型模拟的结果与各类规范计算值不同, 说明了规范公式的局限性, 因此, 不能单纯地选用某一个公式来确定最大撞击力, 而利用有限元方法模拟各类撞击问题可以得到每个时刻对应的撞击力, 有利于撞击过程的分析, 具有一定的优越性。

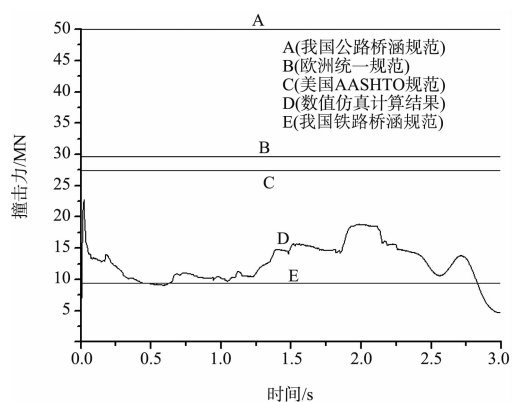


图4 撞击力比较

## 3.3 码头结构破坏分析及改进方法

### 3.3.1 码头结构破坏分析

已知混凝土的破坏准则, 根据码头上部结构在碰撞中的应力分布, 便可以知道码头上部结构的破坏情况。同理, 如果已知钢管桩的屈服极限, 也可以判断桩基的损伤情况。按照混凝土结构设计规范, 取 C30 混凝土的抗压强度标准值  $20\text{ MPa}$ , 钢管桩采用 Q235 钢, 屈服极限为  $235\text{ MPa}$ 。

图5是撞击过程中码头上部结构的最大压力时程曲线。由图5可知, 码头结构所受到的最大压力值在  $t=0.226\text{ s}$  就到达 C30 混凝土抗压强度的标准值  $20\text{ MPa}$ , 这说明码头的混凝土结构从  $t=0.226\text{ s}$  开始到撞击结束一直在断裂失效, 并且从图中可以看出, 混凝土结构受到最大压力的峰值

出现在  $t = 2.73$  s, 此时混凝土结构破坏程度最大。

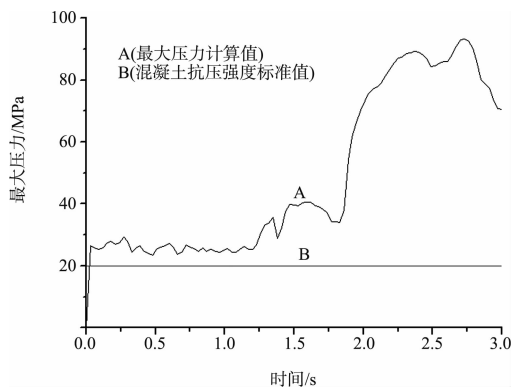


图5 最大压力时程曲线

图6是撞击过程中桩基最大有效应力时程曲线。由图6可知, 桩基的最大有效应力在  $t = 0.09$  s就达到钢管桩的屈服极限 235 MPa, 这说明钢管桩结构从  $t = 0.09$  s 开始就进入塑性阶段或者破坏状态, 并且最大应力峰值出现的时刻为  $t = 1.41$  s, 这时桩基破坏最严重, 会直接导致码头结构失效。

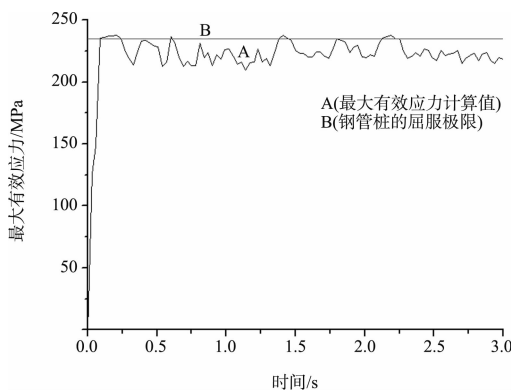


图6 最大有效应力时间曲线

由以上分析可知, 该码头在5万吨级散货船失控以 1 m/s 撞击结束后, 会由于码头上部结构和桩基破坏而造成整体结构的失效, 导致码头严重破坏。

### 3.3.2 改进方法

通过以上模拟和分析, 船舶失控撞击高桩码头造成的巨大撞击力会导致码头结构失效, 造成大量的人身安全、财产损失。因此, 为了保证船舶和码头的安全, 除了安装供正常靠泊使用的橡胶护舷外, 还需增加必要的防冲设备以吸收更多

的船舶撞击能量, 从而避免由于船舶的失控撞击而导致码头结构失效。有以下几种防冲设备可作选择:

1) 防冲桩。在码头外围离码头一定距离按一定间隔设置防冲桩, 如混凝土防冲桩或者复合材料防冲桩, 它们能有效抵抗船舶在失控状态下的撞击, 能对码头进行全方位的防护。

2) 液压式防冲设备。该设备缓冲性能很好, 吸能容量也大, 但是经济性欠佳。

3) 重力式防冲设备。它需要根据码头的实际情况单独设计, 特别适合于承受大型油轮在波浪作用下对码头的横向冲击和竖向剪切, 如果在设备外部加上防冲板, 将会起到极好的防冲效果。

4) 浮动式防冲设备。这类设备多在橡胶内部填充以泡沫、压缩空气、水气混合物等, 可用铁索固定于码头防冲设备外围, 缓冲性能极佳。可以随潮汐的起落而升降, 更利于有效抵抗船舶失控时的撞击, 但是这类设备易于损坏, 维修较困难。

## 4 结论

本文应用非线性显式有限元方法再现船舶失控状态下与高桩码头结构撞击的内部动力学过程, 并对撞击过程中的撞击力、能量转化的整个时间历程以及对撞击结束后码头结构的损伤进行分析, 同时提出相应的改进方法。分析得到的结果如下:

1) 撞击使得系统的动能逐渐转化成为内能, 同时产生了沙漏能和滑移(摩擦)能, 系统的总能量始终保持不变, 表明撞击过程中的能量是满足能量守恒定律的。

2) 撞击过程中撞击力时程曲线具有很强的非线性特征, 表明整个撞击过程始终伴随着系统构件的不断失效和破坏。将有限元法与船桥碰撞规范公式计算结果进行对比分析, 可知船桥撞击力规范公式也可应用到船舶与高桩码头的撞击力计算分析中, 指导防冲设备的选择。