

船闸闸室结构的船-墙碰撞三维有限元分析

鄢亚军, 陶桂兰

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以江苏某重力式船闸闸室结构为例,采用ABAQUS软件建立船舶-闸室结构-土体三维有限元模型,对船舶撞击闸室进行瞬态动力分析,得到不同工况下的撞击力时程曲线和撞击力值等结果。研究表明:船舶撞击闸室的法向平均撞击力大小与船舶排水量的1/2次方、撞击速度的1次方、撞击角度的1次方成线性关系;将软件模拟的船舶法向撞击力数值与依据JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》得到的计算值比较,发现规范公式得到的数值普遍偏小,低估了过闸船舶撞击力的影响。

关键词: 闸室结构; 平均撞击力; 数值模拟; 瞬态动力分析; 影响因素

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0131-05

Three dimensional finite element analysis of lock chamber wall in collision with ship

YAN Ya-jun, TAO Gui-lan

(College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the gravity ship lock chamber structure, the finite analysis software ABAQUS integral algorithm was used to establish the three dimensional finite element model of ship, lock chamber structure and soil. The process of collision was simulated to obtain the impact force-time curve and the value of impact force in different working conditions. The results show that the normal average value of ship impact force is linear with the square root of ship displacement, the first power of impact velocity, the first power of impact angel. Comparing the normal average value of ship impact force of software simulation with the calculated value according to JTJ 307—2001 *Code for Design of Hydraulic Structures of Shiplocks*, it can be concluded that the calculated value is relatively small, and the influence of the ship impact force to lock wall is underestimated.

Keywords: lock structure; average impact force; finite element analysis; transient dynamic analysis; influence factors

随着我国水运事业的快速发展,内河主要航线船舶运量呈现逐渐加大的趋势,船闸运行频率逐年增加^[1],船闸各部分结构受船舶碰撞的概率也越来越大^[2]。船舶在进出闸室及在闸室内等待过闸期间,由于驾驶操作原因或者一些不可避免的因素对闸首和闸室墙产生碰擦,使得闸墙表面受损严重。例如南通九圩港船闸,由于超重、超宽的过闸船舶碰撞、摩擦,闸室挡浪板有多处损

坏,闸室墙面磨损严重;吕四船闸闸室墙前沿被掏空,墙体受到严重损坏,直至倒塌^[3]。部分老船闸在设计建造时混凝土强度等级不高,闸室墙在过闸船舶的撞击下,不同程度损坏,有些甚至出现混凝土保护层局部几乎全部破坏,钢筋外露、锈蚀、断损,严重危及船闸的安全运行^[4-6]。

为深入了解船舶-闸墙碰撞产生的撞击力变化规律以及影响因素,本文以江苏某重力式船闸闸

收稿日期: 2016-05-11

作者简介: 鄢亚军(1990—),男,硕士研究生,从事港口、海岸及近海工程研究。

室结构为例，应用 ABAQUS 软件中的 Explicit 显式动力分析模块对船舶-闸室结构-土体进行三维数值模拟，研究了船舶撞击速度、船舶排水量及撞击角度对撞击力的影响规律。

1 船-墙碰撞计算理论与方法

1.1 运动方程

船舶与闸室结构的碰撞问题属结构动力学问题。本文通过 ABAQUS 软件中的 Explicit 模块建立船舶、闸室及结构周边土体三维数值模型，在总体坐标系中，运动方程可表示为：

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F \quad (1)$$

式中： K 、 M 和 C 分别为系统的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵； y 、 \dot{y} 、 \ddot{y} 为位移、速度和加速度列阵。

利用 ABAQUS 中的速度预定义场赋予船舶初始速度，使船舶在初始惯性力作用下撞击闸室，系统获得初始动量，外力荷载 $F=0$ ，进而可以根据动力方程求解结构力和应力随时间的动力响应。

1.2 计算方法

ABAQUS/Explicit 是显式求解器，它采用中心差分法显式地对运动方程在时间域上进行积分，利用上一增量步的平衡方程动态地计算下一增量步的平衡状态。显式求解器的中心差分算子在初始时刻满足动态平衡程：

$$M\ddot{u} = P - I \quad (2)$$

$$I = C\dot{u} + Ku \quad (3)$$

式中： u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 分别为增量步的位移、速度、加速度； I 为结构中的内力； P 为所施加的外力。以后每一增量步结束时刻的状态均可以由增量步开始时刻的位移、速度和加速度决定。

2 计算模型

2.1 工程概况

江苏苏北运河上某重力式船闸建于 20 世纪 80 年代，闸室采用重力式钢筋混凝土结构，断面见图 1，闸室尺度为 230 m×20 m×5 m(长×宽×门槛水深)。根据实际通航情况，选取 300、500、1 000 t 过闸船舶作为研究对象，船舶相关尺寸见表 1；闸室墙体、船舶的材料属性见表 2；根据地质条件，土体建模范围处于砂壤土、软黏土层，土质材料参数见表 3。

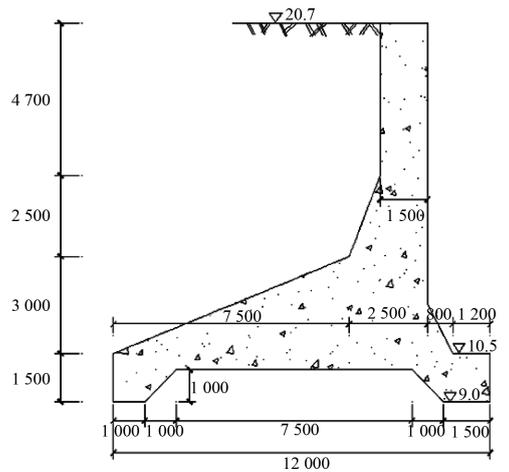


图 1 闸室断面 (高程: m; 尺寸: mm)

表 1 船舶尺度

船舶排水量/t	长/m	宽/m	型深/m	满载吃水/m
300	38	7.3	2.3	1.90
500	47	8.8	2.6	2.10
1 000	55	9.8	3.5	2.85

表 2 闸室与船体材料

部位	材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比 μ
闸室墙体	钢筋混凝土	2 400	28	0.167
船体	钢	7 800	200	0.250

表 3 土层参数

土层	高程/m	密度/(t/m ³)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	杨氏模量/MPa	泊松比 μ	膨胀角 ψ/(°)
黄色砂壤土	6.0~9.0	1.90	2	32	24	0.30	0
灰色砂壤土	-2.6~6.0	1.95	4	36	28	0.30	0
黏土	<-2.6	1.90	19	20	15	0.25	0
回填土	>9.0	1.85	30	17	16	0.35	0

2.2 有限元计算模型

本研究采用 ABAQUS/Explicit 分析模块建立船舶-闸室-土体三维有限元模型。

1) 材料属性与单元划分。

本研究针对分离式重力式船闸, 闸室结构取一个结构段, 沿纵轴线取结构段对称的一半建立闸室模型, 底板纵向长 20 m、横向宽 12 m、高度 11.7 m, 采用实体单元建模, 六面体网格划分, 材料为线弹性, 单元总数为 8 480; 地基土建基面以下取 13.5 m 深、纵向取 20 m 长、横向取 50 m 宽, 建基面以上回填土横向宽 41.5 m、纵向长 20 m, 采用实体单元建模, 土体材料为 Mohr-Coulomb 模型, 单元总数为 26 860, 周边土体采用正对称边界条件约束, 底部完全固定; 船舶简化为钢壳, 采用壳单元模拟, 壁厚取 0.038 m, 材料为弹塑性, 船体排水量采用船体质量和货物总质量模拟, 底部采用法向约束, 使船舶只能在水平方向上自由运动。

2) 接触定义。

模型中考虑在闸室和地基土、闸室和回填土、船舶与闸室之间定义接触, 采用 ABAQUS/Explicit 中的面-面接触, 设置主从面接触对, 选择刚度大的为主面。主从面接触对设置切向行为和法向属性, 切向行为采用罚函数, 闸室与土体之间的摩擦系数取 0.25, 船体与闸室墙体之间的摩擦系数取 0.4^[7]。船体与闸室的接触跟踪方法采用有限滑动法, 允许接触面之间出现任意大小的相对滑动和转动。法向属性采用硬接触, 即两物体只有在压紧状态时才能传递法向压力, 允许船体接触闸室后分离, 一旦船体与闸室墙面分离, 两物体之间有间隙不再传递法向压力。

3) 阻尼与流体介质对结构的影响。

本文研究的船舶撞击, 持续时间极短, 阻尼对结果的影响很小, 利用瑞尼阻力可以较准确地模拟出系统的特征频率, 瑞尼阻力模型取 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0$ ^[8]。本文采用大小为船体总质量 0.05 倍的附加水质量来模拟水对于船舶撞击的影响^[9], 其碰

撞船的质量密度为:

$$\rho_1 = (1+k)\rho_0 \quad (4)$$

式中: ρ_0 为船体密度, $\rho_0 = 7\ 800\ \text{kg/m}^3$; 系数 k 取 0.05。

4) 地应力平衡。

本文研究的船舶撞击闸室是在船闸建成后, 以闸室结构后方回填土和地基土稳定固结为初始状态, 对闸室、地基土、回填土三者组成的系统进行地应力平衡, 船舶撞击闸室的模拟过程中不考虑结构在重力作用下产生的位移作用。有限元模型见图 2。

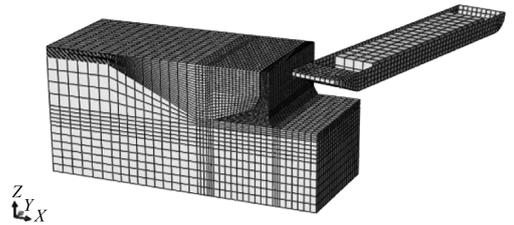


图 2 有限元模型

3 数值模拟结果分析

软件模拟了 300、500、1 000 t 过闸船舶在最大撞击角度的条件下分别以 0.3、0.5、0.8 m/s 的速度撞击闸室墙得到最大撞击力和撞击力时程曲线。根据水文资料可知, 船闸上游最高通航水位 20.0 m, 下游最低通航水位 14.5 m, 船舶撞击位置设在中间水位 17 m 处。

船舶撞击闸室的最大角度按以下方法确定: 设置船舶长度为 L_a 、宽度为 L_b , 则根据图 3 船舶与闸室宽度的关系可建立如下公式:

$$L_a \sin\alpha + L_b \cos\alpha = B \quad (5)$$

根据式(5)可以得到各种船型在闸室中的理论最大撞击角度(表 4)。

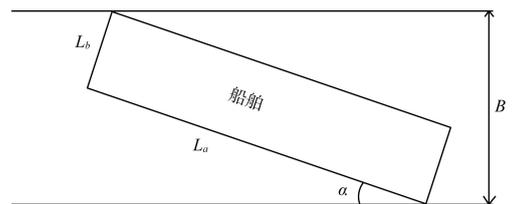


图 3 船舶撞击角度

表4 船舶理论最大撞击角度

模拟船型/t	理论最大撞击角度/ $^{\circ}$
300	20.25
500	14.13
1 000	10.88

3.1 船舶撞击时程曲线

数值模拟 300、500、1 000 t 共 3 种船型在 0.8 m/s 的速度下以 10.88 $^{\circ}$ 撞击闸室墙得到的撞击力时程曲线见图 4。

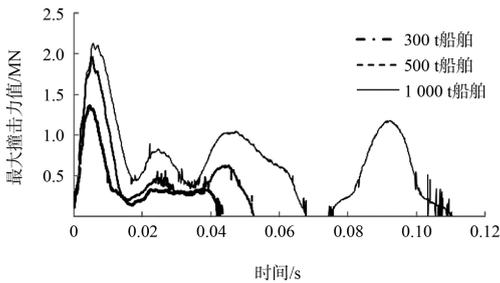


图4 撞击力时程曲线

由图 4 可知从船舶接触闸室开始，撞击力绝对值从 0 开始增大；在达到峰值后，撞击力逐渐减小，当撞击力快减小为 0 后又发生连续的 2~3 次碰撞，但后续的撞击力数值明显小于第 1 次碰撞的力。3 种船型发生第 1 次碰撞的历时都非常短暂，基本持续了 0.02 s 左右，产生最大撞击力的时间点基本一致。其瞬时最大撞击力分别为 1 362.0、1 962.1、2 127.7 kN，表明船舶吨位越大则产生的撞击力越大。由图 4 可以看出，船舶吨位越大，发生多次撞击的几率越大，撞击的持续时间更长，对结构的影响更为不利。

3.2 撞击力与船舶排水量的关系

研究采用 300、500、1 000 t 船舶以相同的撞击角度 10.88 $^{\circ}$ 在 0.3、0.5、0.8 m/s 的速度下撞击闸室墙，通过软件模拟计算输出船舶撞击下的法向撞击力数值，得到 9 组撞击力时程曲线，对撞击力时程曲线积分可以获得撞击力时均值，该撞击力时均值即为平均撞击力。其撞击力平均值可按式计算：

$$\bar{F} = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{i=1}^n F \Delta t \quad (6)$$

式中： \bar{F} 为平均撞击力； t_2 、 t_1 分别为船舶开始接

触闸室与第一次撞击结束时刻； n 为积分时间段个数； Δt 为积分时间间隔。

根据撞击力时程曲线得到平均撞击力计算结果见表 5，利用模拟得到的撞击力数据可以画出船舶撞击力与排水量的关系曲线（图 5）。由图 5 可知，当船舶撞击角度和撞击速度一定时，平均撞击力数值随船舶排水量的增加而增大，但增大的趋势越来越缓。由于撞击力呈非线性增长，根据图 5 可看出增长趋势符合幂函数增长规律，故可以采用幂函数拟合。拟合形式为 $y = \alpha x^{\beta}$ ，拟合结果见表 6，其相关系数 $\bar{R} \approx 0.971$ ，表明拟合的曲线和数据是高度相关的。表 6 中不同速度条件下的 β 值结果较为接近，平均值 $\bar{\beta} = 0.496$ ，故可以近似认为其他条件相同时，船舶撞击力与船舶排水量的 0.5 次方成线性关系。

表5 不同吨位下船舶平均撞击力计算结果

船舶撞击角度/ $^{\circ}$	最大撞击速度/(m/s)	平均撞击力/kN		
		船舶排水量 300 t	船舶排水量 500 t	船舶排水量 1 000 t
10.88	0.3	285.0	368.2	502.2
10.88	0.5	432.2	605.6	804.9
10.88	0.8	666.1	994.9	1 247.4

表6 平均撞击力 F -船舶质量 M 关系曲线拟合结果

撞击速度/(m/s)	F - M 关系曲线	α	β	R
0.3	$F = 19.731M^{0.4692}$	19.731	0.4692	0.990
0.5	$F = 24.189M^{0.5104}$	24.189	0.5104	0.982
0.8	$F = 38.174M^{0.50985}$	38.274	0.50985	0.940

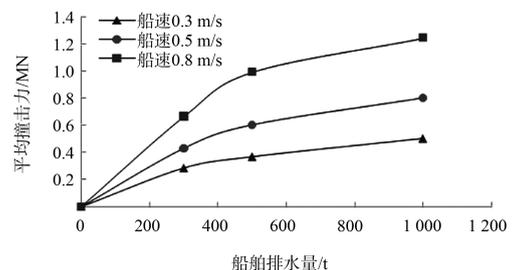


图5 船舶撞击力与船舶排水量的关系曲线

3.3 撞击力与撞击速度的关系

采用 300、500、1 000 t 船舶分别以其在闸室的最大撞击角度撞击闸室墙体，输出船舶撞击的法向撞击力数值，得到撞击力时程曲线，可以计算出船舶的平均撞击力数值（表 7），船舶撞击力

与船舶速度的关系曲线见图 6。从图 6 的曲线发展趋势可以看出, 当船舶排水量和撞击角度一定时, 船舶平均撞击力随撞击速度的增加而增大, 近似成线性关系。采用幂函数 $y = \alpha x^\beta$ 进行拟合, 拟合结果见表 8, 相关系数 $\bar{R} \approx 0.997$, 表明拟合的曲线与数据相关性较好。表中不同船舶排水量下的 β 值结果基本一致, 平均值 $\bar{\beta} = 1.118 6$, 故可以近似认为其他条件相同时, 船舶撞击力与船舶速度的 1 次方成线性关系。

表 7 不同速度下的船舶平均撞击力计算结果

模拟船型/t	最大撞击角度/(°)	平均撞击力/kN		
		0.3 m/s	0.5 m/s	0.8 m/s
300	20.25	560.6	923.8	1 612.1
500	14.13	453.2	878.0	1 432.1
1 000	10.88	446.9	814.1	1 320.3

表 8 平均撞击力 F -船舶速度 v 关系拟合结果

船舶排水量/t	$F-v$ 关系	α	β	R
300	$F = 2 013.642v^{1.075 5}$	2 013.642	1.075 5	0.997
500	$F = 1 901.884v^{1.174 8}$	1 901.884	1.174 8	0.996
1 000	$F = 1 710.601v^{1.034 7}$	1 710.601	1.105 5	0.999

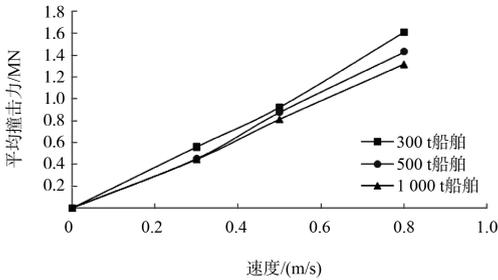


图 6 船舶撞击力与船舶速度的关系曲线

3.4 撞击力与撞击角度的关系

研究采用 300 t 船舶在 10°、15°、20.25° 共 3 种不同角度下撞击闸室, 输出船舶撞击得到的法向撞击力数值, 计算得到船舶平均撞击力数值见表 9, 根据表 9 中的数据可以得到图 7 所示的船舶平均撞击力与撞击角度的关系曲线。由图 7 可以看出, 当船舶排水量和撞击速度一定时, 船舶在较小的角度下撞击闸室墙, 船舶的平均撞击力随撞击角度的增加而增加。采用幂函数 $y = \alpha x^\beta$ 进行拟合, 拟合结果见表 10, 相关系数 $\bar{R} \approx 0.997$, 拟合的曲线与数据相关性较好。表中不同船舶排水

量下的 β 值结果基本一致, 平均值 $\bar{\beta} = 1.259 4$, 近似认为其他条件相同时, 船舶撞击力与船舶速度的 1 次方成线性关系。

表 9 不同角度下的船舶平均撞击力计算结果

模拟船型/t	最大撞击速度/(m/s)	平均撞击力/kN		
		10° (弧度 0.175)	15° (弧度 0.262)	20.25° (弧度 0.353)
300	0.3	246.7	379.2	560.6
300	0.5	403.9	609.9	923.8
300	0.8	580.8	970.5	1 612.1

表 10 平均撞击力 F -船舶撞击角度 θ 关系曲线拟合结果

船舶速度/(m/s)	$F-\theta$ 关系曲线	α	β	R
0.3	$F = 1 853.443\theta^{1.163 8}$	1 853.443	1.163 8	0.997
0.5	$F = 3 049.095\theta^{1.17}$	3 049.095	1.170 0	0.996
0.8	$F = 7 053.858\theta^{1.444 5}$	7 053.858	1.444 5	0.997

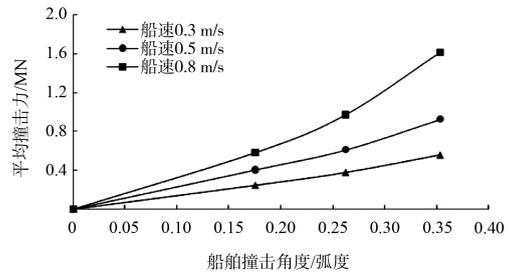


图 7 船舶平均撞击力与撞击角度的关系曲线

4 船舶撞击力数值与规范公式计算结果比较

将 3 种船型以各自最大撞击角度在 0.3、0.5、0.8 m/s 的速度下撞击闸室得到的法向平均撞击力值与 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》中撞击力公式计算得到的撞击力值比较, 其规范公式如下:

$$F = 0.9KW^{2/3} \quad (7)$$

式中: F 为撞击力 (kN); W 为船舶排水量 (t); K 为系数, 闸室取 1.0, 引航道中导航建筑物的直线段取 1.67, 曲线段取 2.0。计算结果和软件模拟值见表 11。由表 11 可知, 软件模拟得到的平均撞击力普遍远大于规范值, 并且船舶运行的速度越大, 两者的差距越大。规范公式未能反映出撞击速度、撞击角度对撞击力的影响, 而根据软件模拟可知撞击速度和撞击角度是影响平均撞击力的重要因素, 因此规范公式作为工程设计指导缺乏一定的合理性。 (下转第 142 页)