

# 内河驳船撞击桥墩的动力响应分析

段敏, 庞臻

(湖州市规划设计研究院, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 内河航道中桥梁水中桥墩在遭受大吨位驳船撞击后会造成严重的安全隐患, 甚至引起桥梁坍塌事故。文中建立内河航道中主要大吨位驳船精细化有限元模型, 分别模拟驳船撞击平面刚性墙及不同截面形状的刚性墩, 研究驳船撞击不同结构的动力响应。结果表明, 驳船与结构物碰撞过程中大部分能量转化为驳船船艏变形能; 驳船撞击力、撞深与驳船初始撞击速度、桥墩截面形状及截面尺寸有关; 撞击力峰值取决于船艏与桥墩碰撞的接触面积。

**关键词:** 桥梁; 桥墩; 内河驳船; 船撞桥; 动力响应

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0122-04

随着城市道路网的不断更新, 通航河流中桥梁数量不断增加。由于市政道路标高的限制, 桥梁不可避免地在水中落墩。随着城市航道等级的提档升级, 水上航运业务量迅速增加, 内河航道中大吨位驳船撞击桥梁的风险与日俱增, 研究桥墩结构在驳船撞击下的动力响应变得尤为迫切。而目前对船撞击桥墩结构的研究主要针对海船撞击桥墩<sup>[1-5]</sup>, 对内河干线航道中主要大吨位驳船对桥墩的撞击研究较少。考虑到现有桥梁船撞中针对大吨位驳船的设计准则很少, 本文采用非线性有限元程序 LSDYNA 对 500 t 内河驳船在不同工况下与桥墩结构发生碰撞时的动力响应进行研究。

## 1 驳船精细化建模

以内河航道常见的 500 t 驳船为原型, 建立精细化驳船有限元模型。该船的满载排水量为 650 t, 船体总长为 53.3 m, 基本参数见表 1。

表 1 500 t 驳船的基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
吨位/t	500	型深/m	2.9
排水量/t	650	型宽/m	12.5
主甲板高度/m	3.22	吃水/m	2.3
总长/m	53.3		

船艏结构在碰撞过程中会发生塑性变形, 为真实反映船艏结构在碰撞中的动态力学行为, 尽可能精细化地建立船艏有限元模型。而远离碰撞区域的

船体结构在碰撞过程中耗能较少, 建模时对船艏以外的区域进行适当简化(见图 1)。船艏内部各杆件之间、船艏与结构物之间的非线性接触模拟及各边界条件的设定采用 LSPREPOST 前处理软件进行。船艏内部杆件结构模型见图 2。

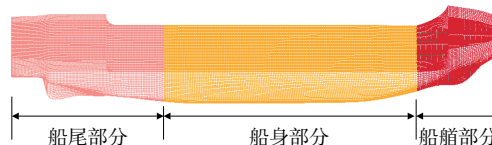


图 1 驳船有限元模型

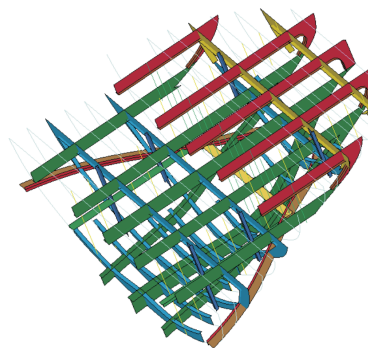


图 2 船艏内部结构模型

驳船与桥墩碰撞时, 船艏区域吸收绝大部分冲击能量, 船艏损伤严重, 而远离船艏的船体及桥墩在撞击过程中产生的变形很小, 基本可忽略不计。因此, 将船艏区域的船艏外壳及纵横肋钢材视为弹塑性材料<sup>[6]</sup>, 将船艏以外的船体结构及桥墩视为刚性材料。单元属性及材料模型见表 2。

驳船与桥墩碰撞过程中存在较多的接触, 正确

表 2 驳船的单元类型

名称	部件	单元类型	材料模型
船舶	船舶外壳	Shell 163	Plastic Kinematic
	纵横肋	Beam 161	Plastic Kinematic
	船身	Shell 163	Rigid
其他部位	船尾	Shell 163	Rigid
	质量块	Solid 164	Rigid
被撞击物	桥墩	Solid 164	Rigid
	刚性墙	Shell 163	Rigid

合理地模拟接触尤为重要。各类接触的模拟如下：1) 船舶与桥墩碰撞面的接触。模型采用面面自动接触定义桥墩与船舶外表面的接触,并将刚度大的桥墩定义为主面,将船舶表面定义为从面。2) 船舶内部各桁架单元间的接触。船舶内部空间桁架杆件较多,为简化模型,将船舶内部各桁架单元之间的接触定义为单面自动接触。3) 船舶内部桁架单元与外壳的接触。船舶内部桁架单元与船舶外壳是相互焊接的整体结构,通过点面固连接触及面面固连接触将船舶内部桁架单元与船舶外壳相互固接。

驳船与桥墩碰撞过程中,船舶与桥墩间会出现相对摩擦,该摩擦力能够释放一部分撞击瞬间产生的能量。但实际工况下很难确定接触的摩擦因数,参考既有桥梁船撞数值分析结果,静态摩擦因数取 0.15,动态摩擦因数取 0.1。

2 驳船碰撞刚性墙

通过数值模拟 500 t 驳船以不同初始速度  $v$  撞击平面刚性墙(见图 3),分析驳船在撞击刚性墙过程中的能量转换关系,同时观察船舶撞深、接触碰撞力与初始船速的关系。驳船撞击刚性墙时的能量变化、撞击力变化、撞深变化见图 4~6 和表 3。

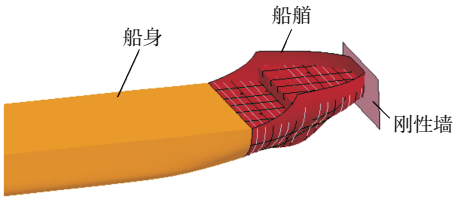


图 3 驳船撞击刚性墙

由图 4 可知:驳船碰撞刚性墙时的总能量由驳船的动能、船舶的变形能、桁架间的摩擦能、碰撞面间的滑移能及沙漏能等组成;碰撞过程中损失的驳船动能几乎全部转化为船舶变形势能,接触滑移能

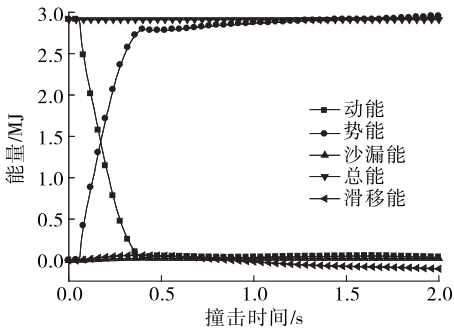


图 4 驳船撞击刚性墙时的能量时程

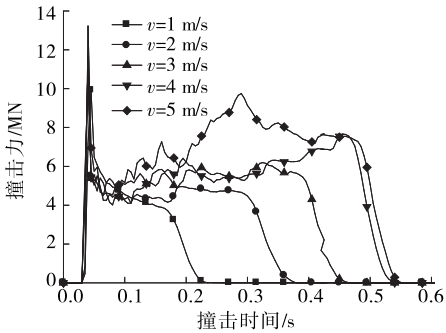


图 5 驳船正面撞击刚性墙时的撞击力时程

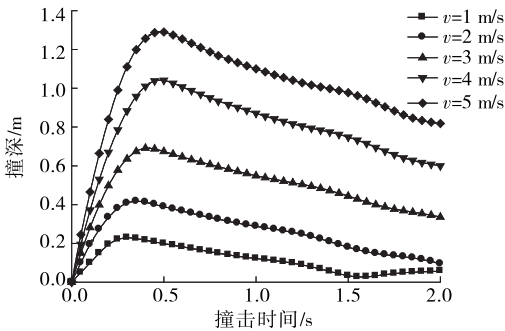


图 6 驳船正面撞击刚性墙时的撞深时程

表 3 驳船正面撞击刚性墙时的模拟结果

撞击速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰值撞击力及对应时间		最大撞深及对应时间	
	峰值撞击力/MN	对应时间/s	最大撞深/m	对应时间/s
1	9.919	0.185	0.229	0.305
2	10.624	0.095	0.417	0.355
3	11.420	0.065	0.691	0.410
4	11.630	0.050	1.042	0.480
5	13.233	0.040	1.291	0.480

和沙漏能占总能量的比例基本可忽略不计,符合能量守恒定律。

由图 5、图 6 和表 3 可知:1) 驳船与刚性墙接触瞬间即出现瞬时撞击力峰值段,随后撞击力迅速下降,出现持续时间相对较长的缓和段,最终撞击力降

为零。撞击过程中,冲击力峰值段的持续时间很短,若以碰撞力峰值作为驳船等效静力值,会使结构设计过于保守。由于数值模型中初始状态船艏与桥墩间有微小间距,船舶须经历一定时间才能接触撞击墩身,冲击力时程曲线初段中出现冲击力为零的情况。2) 驳船初始碰撞速度越快冲击力峰值越大,且冲击力缓和段持续时间越久。碰撞中船艏区域出现多次反复加、卸载情况,船艏内部新杆件参与抵抗变形时出现明显的加载现象,船艏内部某刚构件屈曲时出现明显的卸载现象,说明驳船撞击刚性墙产生的冲击力具有明显的非线性特征。3) 驳船初始撞击速度越快,船艏区域的撞深越深,且撞深峰值出现时间推迟。驳船开始反向运动时,船艏区域处于回弹卸载阶段,撞深缓慢下降。由于船艏内部杆件及船体外表面在接触过程中已发生塑性变形,最终船艏撞深不会降为零。

### 3 驳船撞击矩形截面墩

对 500 t 驳船以固定初始速度 3 m/s 正面撞击宽度不同的矩形刚性墩(见图 7)进行模拟,撞击力和撞深变化见图 8、图 9、表 3。

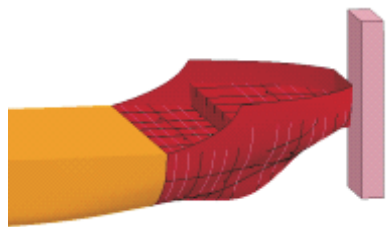


图 7 驳船撞击矩形截面

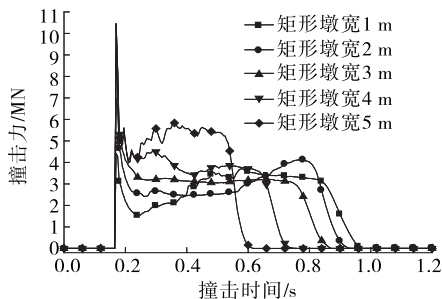


图 8 驳船正面撞击矩形截面墩时冲击力时程

由图 8、图 9、表 3 可知:1) 驳船与矩形截面墩碰撞瞬间接触碰撞力即达到峰值,其后冲击力迅速减小并保持相对稳定,船艏多次出现加载—屈曲—撕裂—卸载的现象。2) 矩形截面墩宽度越大,船艏与桥墩截面接触瞬间产生的冲击力峰值越大,且撞击持续时间越短,冲击力峰值受矩形墩截面宽度变

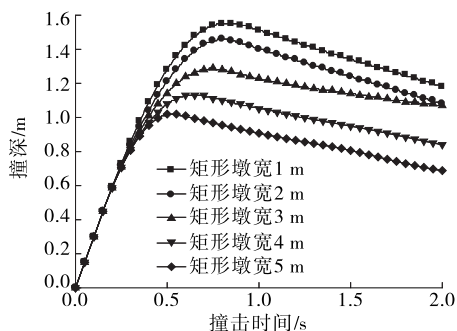


图 9 驳船正面撞击矩形截面墩时撞深时程

表 4 驳船正面撞击矩形截面墩时的模拟结果

矩形截面 宽度/m	峰值冲击力及对应时间		最大撞深及对应时间	
	峰值冲击 力/MN	对应时 间/s	最大撞 深/m	对应时 间/s
1	4.408	0.170	1.555	0.830
2	6.974	0.170	1.457	0.800
3	9.269	0.170	1.286	0.745
4	10.459	0.170	1.132	0.640
5	10.403	0.170	1.019	0.530

化的影响较明显。但冲击力峰值与撞深峰值不在同一时刻出现。3) 矩形截面桥墩宽度越小,最大撞深越大,船艏塑性变形越大。桥墩截面宽度越大,船艏区域与桥墩截面相互接触的面积越大,参与抵抗变形的船艏内部刚构件数量越多,船艏刚度变大,导致冲击力增大而撞深减小。

### 4 驳船撞击圆形截面刚性墩

对 500 t 驳船以固定初始速度 3 m/s 正面撞击不同直径圆形截面刚性墩(见图 10)进行模拟,撞击力及撞深变化见图 11、图 12、表 5。

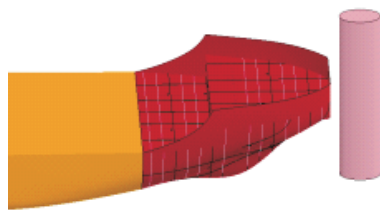


图 10 驳船撞击圆形截面

由图 11、图 12、表 5 可知:1) 墩径越大,船艏区域与圆形墩碰撞接触后产生的冲击力峰值越大,但冲击力峰值大小的变化受墩径的影响较小。当墩径超过一定数值时,冲击力峰值不再随墩径增大而增加。2) 随着墩径的增大,船艏的撞深总体呈减小趋势,但最大撞深随着墩径的变化差异较小。随着船体反方向运动趋势的增强,船艏逐渐脱离桥墩,船艏

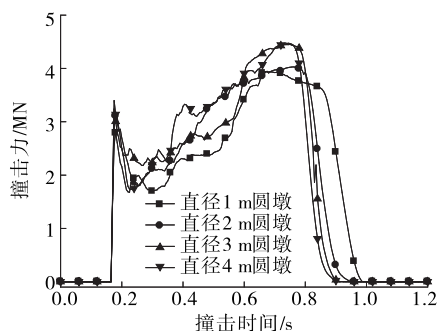


图11 驳船正面撞击圆形截面墩时的撞击力时程

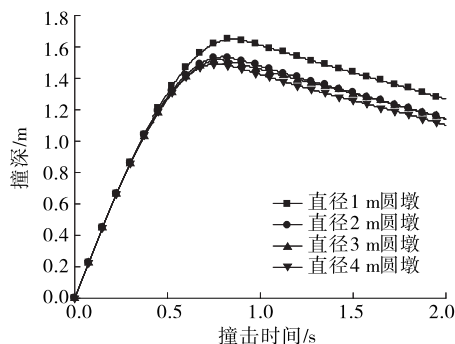


图12 驳船正面撞击圆形截面墩时的撞深时程

表5 驳船正面撞击圆形截面墩时的模拟结果

圆墩直径/m	峰值撞击力及对应时间		最大撞深及对应时间	
	峰值撞击力/MN	对应时间/s	最大撞深/m	对应时间/s
1.0	3.938	0.670	1.648	0.855
1.5	4.008	0.750	1.574	0.815
2.0	4.029	0.760	1.535	0.795
2.5	4.051	0.735	1.549	0.800
3.0	4.449	0.750	1.516	0.780
3.5	4.461	0.715	1.479	0.755
4.0	4.476	0.735	1.493	0.765

内部杆件出现小幅度残余回弹变形。

驳船以相同初始速度撞击矩形截面墩和圆形截面墩时的撞击力与撞深时程曲线存在一定差异<sup>[7-8]</sup>,原因主要在于:1) 矩形墩、圆形墩与船艏的接触刚度不同,船艏与矩形墩接触瞬间,桥墩宽度范围内的船艏桁架单元立即全部参与抵抗变形,撞击瞬间船艏接触刚度就达到最大值,因而接触瞬间碰撞力就达到峰值。2) 驳船与矩形墩碰撞属于面接触碰撞。而驳船与圆形墩碰撞属于点面接触碰撞,参与抵抗变形的船艏内部桁架单元只有接触范围内小部分杆件单元,造成船艏接触刚度小,所以在碰撞瞬间圆形墩受到的撞击力不是峰值撞击力。随着撞击时间的持续,船艏的撞深增大,参加抵抗变形的船艏内

部桁架数量不断增多,圆形墩受到的撞击力不断增大,在碰撞后一段时间内撞击力达到最大值。

## 5 结论

(1) 驳船与刚性平面墙的碰撞过程符合能量守恒定律。接触碰撞中减少的动能大部分转化为船艏区域的变形能,碰撞能量大部分被船艏吸收,而船艏与刚性墙之间的滑移能及沙漏能几乎可忽略不计,总能量保持不变。随着驳船初始撞击速度的增大,峰值撞击力及船艏区域的最大撞深增大,且基本呈线性增加。

(2) 驳船船艏与桥墩碰撞的接触面积影响撞击力、撞深时程曲线变化趋势,且桥墩截面尺寸影响撞击力和撞深峰值。驳船与矩形墩接触碰撞过程中,矩形墩的截面宽度对撞击力变化有显著影响,而圆形墩的直径对撞击力变化的影响不明显,表明驳船船艏撞击力与桥墩截面形状的接触刚度有关。

## 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,2002,24(5):4-9.
- [2] 颜海泉,王君杰.船与大型桥梁基础碰撞过程的仿真分析[C]//中国振动工程学会,中国力学学会,中国航空学会,等.第八届全国振动理论及应用学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2003:9-16.
- [3] 陈诚.桥墩在船舶撞击作用下的损伤仿真研究[J].工程力学,2007,24(7):156-160.
- [4] 何勇,金伟良,张爱晖,等.船桥碰撞动力学过程的非线性数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(6):1065-1070+1075.
- [5] 宁运琳,罗旗帜,刘夏平,等.船舶撞击桥墩的非线性有限元数值仿真[J].广州大学学报(自然科学版),2011,10(5):58-64.
- [6] 王自力,蒋志勇,顾永宁.船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J].爆炸与冲击,2002,22(4):321-326.
- [7] CONSOLAZIO G R, COWAN D. Nonlinear analysis of barge crush behavior and its relationship to impact resistant bridge design[J]. Computers and Structures, 2003, 81(8-11):547-557.
- [8] CONSOLAZIO G R, ASCE A M, COWAN D R. Numerically efficient dynamic analysis of barge collisions with bridge piers[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(8):1256-1266.

收稿日期:2023-02-06