

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003018

# 驳船撞击下RC桥墩的非线性动力响应与损伤特征分析\*

邵俊虎<sup>1</sup>, 占玉林<sup>2</sup>, 陈宁<sup>3</sup>, 向正松<sup>4</sup>

(1. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 3. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 4. 四川路桥勘察设计分公司, 四川 成都 610004)

**摘要:** 针对世界范围内时有发生船舶撞击桥梁事故, 为研究桥墩在驳船撞击下桥墩的动力响应与损伤特征, 建立了驳船-桥墩碰撞的有限元模型。通过与已有落锤冲击试验的结果进行了对比, 对本文有限元模型的可靠性进行了验证。基于本文建立的驳船-桥墩碰撞有限元模型, 分析了1000 t驳船以4 m/s速度撞击下桥墩的动力响应与损伤变化机理, 并研究了驳船撞击速度、撞击吨位、撞击点以及轴压比对损伤特征的影响规律。结果表明, 桥墩较不利部位为撞击点区域与墩底区域, 钢筋应变率效应使钢筋屈服强度提高11.7%~22%, 一定程度上会增大桥墩抗力; 撞击速度与吨位会影响桥墩的损伤程度, 但不会影响桥墩的损伤特征; 撞击点与轴压比的变化会改变桥墩的损伤程度与特征; 随着撞击点的减小与轴压比的增大在一定程度上会增大桥墩的抗撞能力。

**关键词:** 桥墩; 船撞桥; 非线性动力响应; 损伤特征; 平均损伤因子

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0081-11

## Nonlinear Dynamic Response and Damage Characteristic Analysis of RC Pier under Barge Collision

SHAO Junhu<sup>1</sup>, ZHAN Yulin<sup>2</sup>, CHEN Ning<sup>3</sup>, XIANG Zhengsong<sup>4</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering of Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. Survey and Design Company of Sichuan Road & Bridge, Chengdu 610004, China)

**Abstract:** Regarding frequent accidents of ship-bridge collisions around the world, a finite element model of barge-pier collision was established to study the dynamic response and damage characteristics of the pier under barge impact. The reliability of the finite element model is verified by comparing it with the results of the previous drop impact test. Based on the finite element model, the dynamic response and damage evolution mechanism of piers under 1000 t barge collision at the speed of 4 m/s are investigated, and the influence of impact velocity, impact tonnage, impact point and axial compress-

\* 收稿日期:2020-03-10;修回日期:2020-05-17

基金项目:四川省科技计划项目(2017JY0514)、国家自然科学基金项目(51878564)、国家重点研发计划项目(2016YFB1200401)、湖南省教育厅一般项目(16C0645)资助

作者简介:邵俊虎(1986—),男,讲师,博士。主要从事桥梁船撞及结构力学行为等方面的研究。E-mail:junhushao@qq.com

通讯作者:占玉林(1978—),男,副教授,博导,博士。主要从事桥梁结构动力学等方面的研究。

E-mail:yulinzhan@home.swjtu.edu.cn

sion ratio on the damage characteristics is studied. The results show that the most disadvantageous positions is the pier bottom and collision point area; the yield strength of rebar is improved by 11.7%~22% due to the strain rate effect, which increases the resistance of the pier; the collision velocity and tonnage can affect the damage degree of the pier, but do not affect the damage characteristics of the pier; the damage degree and characteristics are changed by the impact point and the axial compression ratio; the resistance of piers increase with decreased impact points and increased axial compression ratio.

**Keywords:** pier; ship-bridge collision; nonlinear dynamic response; damage characteristics; average damage factor

## 引言

随着我国的经济的发展,国家相继提出了“加快推进长江黄金水道建设”、“提升珠江水系航道等级”的同时,公路以及铁路交通建设也快速发展,河流中通航船舶对桥梁桥墩的安全性造成了严重影响。桥梁船撞方面的研究得到了广泛关注,目前的研究主要集中于船撞力、桥墩的防撞装置以及风险评估,此外,有文献也关注于桥梁连续倒塌方面的研究,H. Jiang等<sup>[1]</sup>通过数值模拟方法对一座连续梁桥在驳船撞击作用下的连续倒塌过程进行了研究,提出了连续梁桥的船撞倒塌机理。

现有文献主要研究车辆、小球以及落锤冲击荷载作用下桥墩的损伤,且由于冲击试验成本较高,试验难度较大,研究者主要采用数值模拟方法进行研究。田力、程小卫等<sup>[2-3]</sup>相继对桥墩在小球等冲击物撞击下的动力响应过程进行了有限元模拟,并分析了各撞击参数对破坏模式与损伤状态的影响。D. Y. Zhou等<sup>[4]</sup>采用LS-DYNA软件建立了车桥碰撞模型,并对不同撞击参数下桥墩的损伤指标进行了计算,提出了不同的桥墩性能指标对应的损伤指标范围。T. V. Do等<sup>[5-6]</sup>对普通桥梁以及预制节段桥墩在车辆撞击下,车辆的撞击力以及桥墩的损伤机理进行了研究。陈林等<sup>[7]</sup>研究了车辆撞击典型钢筋混凝土桥墩在不同的边界条件以及配筋条件下的动力响应、损伤特征以及破坏形态。刘飞等对钢筋混凝土梁<sup>[8]</sup>与钢筋混凝土柱<sup>[9]</sup>在冲击作用下的动力响应过程以及破坏机理进行了研究。赵武超等<sup>[10]</sup>基于落锤冲击试验验证了有限元技术模拟冲击过程的正确性,并研究了梁的抗冲击性能以及损伤机理。现有文献对于桥墩船撞损伤状态方面的研究则比较少见,相对于车辆、小球以及落锤冲击,船舶撞击桥墩具有撞击质量大、撞击速度较低,以及船头刚度相对

桥墩刚度小的特点,属于质量大、低速、柔-刚冲击,驳船撞击作用下,桥墩的动力响应过程以及桥墩的损伤特征均不明确,因此,进行本文研究具有较大的实际意义。

由于船撞桥试验研究难度大,成本高,难以重现船撞墩全过程,因此本文基于有限元模拟技术,建立了驳船-桥墩碰撞有限元模型,并对船撞桥的全过程进行了模拟,根据计算结果分析了桥墩在船撞作用下的全过程动力响应,并研究了撞击速度、吨位、撞击点、桥墩轴压比等撞击参数下桥墩对损伤特征的影响。

## 1 数值仿真方法验证

由于桥墩在船舶撞击作用下的数值模拟难度较大,因此本节以落锤冲击钢筋混凝土梁试验为对象建立数值模型,旨在验证本文数值模型使用的材料以及接触碰撞算法的正确性。

### 1.1 验证试验概况

为验证本文有限元仿真方法的正确性,本文以K. Fujikake等<sup>[11]</sup>试验的S1616工况对应的钢筋混凝土梁为研究对象,建立了有限元模型。文献中的试验梁的基本尺寸如图1所示,梁总长为1.7 m,梁高0.25 m,梁宽0.15 m。全梁布置了4根直径为16 mm

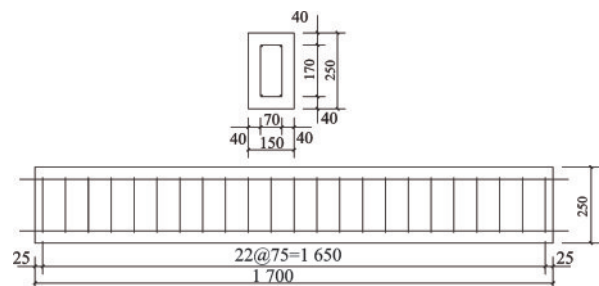


图1 钢筋混凝土梁尺寸

Fig.1 Dimensions of the reinforced concrete beam dimensions

的纵向钢筋,受压区与受拉区分别布置2根,箍筋为直径为10 mm,箍筋间距为75 mm。试验中采用落锤装置进行加载,落锤总质量为400 kg,落锤锤头表面为半圆形,直径为180 mm,装置布置如图2所示。

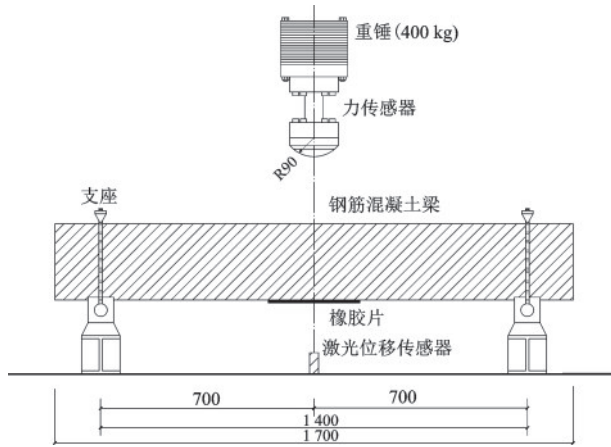


图2 冲击试验  
Fig.2 Impact test

### 1.2 验证试验有限元模型

本文采用LS-DYNA软件建立了落锤撞击钢筋混凝土梁的有限元模型,如图3所示。混凝土有限元模型采用MAT159(\*MAT\_CSCM)<sup>[12-13]</sup>材料进行模拟,该材料模型由美国联邦公路管理局开发,只需输入混凝土抗压强度以及最大骨料粒径即可自动生成模型其他参数。\*MAT\_CSCM材料混凝土抗压强

度取42 MPa,骨料粒径为0.01 m<sup>[14]</sup>,材料密度为2400 kg/m<sup>3</sup>。由于影响撞击力的主要因素为接触面形状及材料性质,为节省计算时间,对落锤进行简化,仅考虑落锤与梁接触的半圆形部分,且改变材料密度使得简化后的落锤质量与试验中一致,落锤采用刚体材料(\*MAT\_RIGID)模拟。钢支座与钢筋均采用弹塑性随动硬化模型(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)<sup>[13]</sup>进行模拟,钢筋的应变率效应采用Cowper-Symonds模型模拟,具体表达式见式(1)。

$$\frac{\sigma_y^d}{\sigma_y^s} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\sigma_y^d$ 表示应变率对应下的动态流动应力; $\sigma_y^s$ 表示静态流动应力; $C$ 、 $P$ 分别表示应变率强化参数。

落锤与钢筋材料见表1。混凝土梁与落锤以及支座钢筋的接触类型均采用自动面面接触。本文对落锤高度为0.6 m与0.12 m的工况进行了模拟,根据落锤高度不同情况,换算为落锤与梁接触时的撞击速度,各工况的撞击速度见表2。

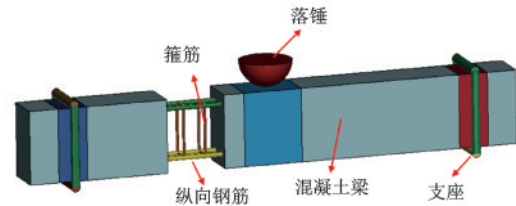


图3 有限元模型  
Fig.3 Finite element model

表1 落锤以及钢筋材料参数

Table 1 Material parameters of the drop hammer and rebar

类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	切线模量/GPa	应变率参数C	应变率参数P	失效应变
梁纵筋	7 850	2×10 <sup>11</sup>	0.3	426	3	40.4	5.0	0.15
梁箍筋	7 850	2×10 <sup>11</sup>	0.3	295	3	40.4	5.0	0.15
钢支座	7 850	2×10 <sup>11</sup>	0.3	426	3	40.4	5.0	0.15
落锤	262 116	2×10 <sup>11</sup>	0.3	—	—	—	—	—

表2 落锤高度以及撞击速度

Table 2 Height and impact velocity of the hammer

工况	高度H/m	撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> )
S1616-1	0.6	3.429
S1616-2	1.2	4.850

### 1.3 计算结果与试验结果对比

图4、5与图6、7给出了重锤高度分别为0.6 m与1.2 m时,数值模拟结果与试验结果的撞击力以及实验梁跨中挠度的对比图。由图中可以看出,两种工况下,数值计算结果最大撞击力与最大位移结

果与试验结果比较吻合,虽然撞击力时程在后期震荡较试验结果剧烈,但基本能反映出撞击力变化趋势。

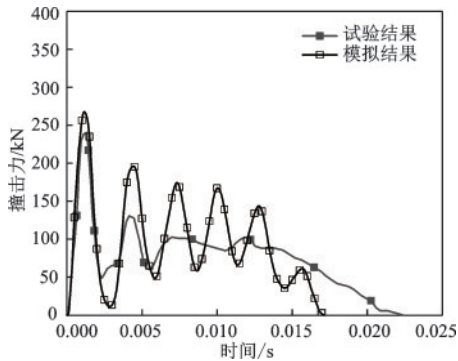


图4 撞击力对比( $H=0.6\text{ m}$ )

Fig.4 Comparison of impact force( $H=0.6\text{ m}$ )

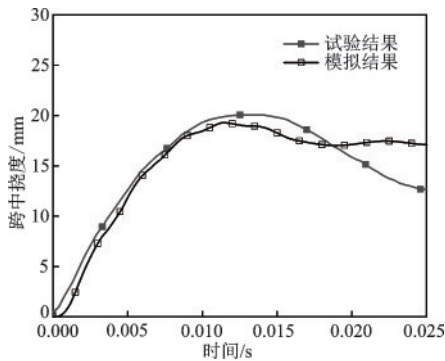


图5 跨中位移对比( $H=0.6\text{ m}$ )

Fig.5 Comparison of mid-span displacement( $H=0.6\text{ m}$ )

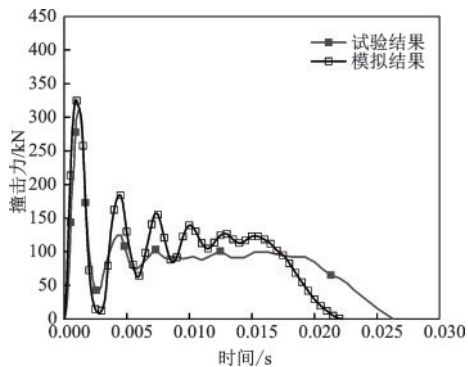


图6 撞击力对比( $H=1.2\text{ m}$ )

Fig.6 Comparison of impact force( $H=1.2\text{ m}$ )

图8、9给出了两种工况下试验梁的损伤结果,由图中可以看出数值模拟结果中出现的裂缝分布于实验中的裂缝分布比较吻合,损伤部位也较为一致。

通过以上分析表明,本文所采用的混凝土以及

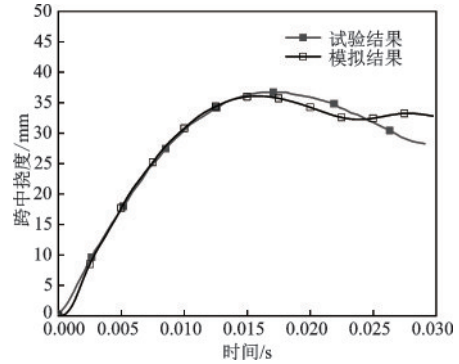


图7 跨中位移对比( $H=1.2\text{ m}$ )

Fig.7 Comparison of mid-span displacement( $H=1.2\text{ m}$ )

钢筋的材料模型可以有效的模拟冲击荷载作用下,钢筋混凝土梁的损伤全过程。

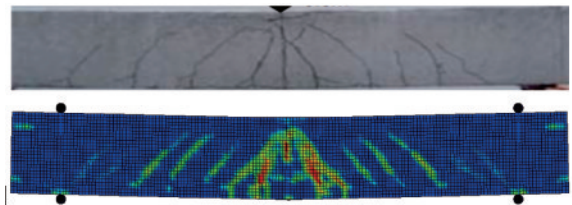


图8 破坏形态对比( $H=0.6\text{ m}$ )

Fig.8 Comparison of damage pattern( $H=0.6\text{ m}$ )

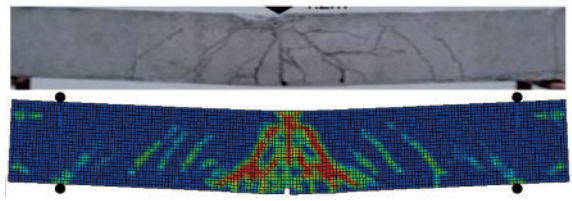


图9 破坏形态对比( $H=1.2\text{ m}$ )

Fig.9 Comparison of damage pattern( $H=1.2\text{ m}$ )

## 2 驳船撞击桥墩有限元模型

### 2.1 桥墩以及驳船有限元模型

桥梁在施工期间会受到船舶撞击,而对于采用悬臂浇筑施工的桥梁,上部结构没有足够的横向约束,可简化为自由边界条件,处于较为不利的状态。因此,本文建立了有限元模型对这种状态进行了讨论。将公路桥梁中常用的圆形桥墩作为研究对象,对桥墩进行了简化,考虑到本文主要研究桥墩在驳船撞击作用下的损伤状态,采用单个桥墩为对象对全桥进行简化研究,假定将桥墩上部视为自由边界,上部结构自重以质量块代替<sup>[15]</sup>。为考虑结构自

重初始应力的影响,本文采用软件中的动力松弛方法对自重应力进行初始化,主要分为两步:(1)在桥墩上施加重力加速度,并采用动力松弛方法计算桥墩在自重作用下的结构响应,程序将计算结果写入

数据文件;(2)将记录计算结果的数据文件导入有限元模型,赋予混凝土与钢筋单元初始应力与变形。最后在应力初始化的有限元模型基础上进行船撞墩仿真计算。

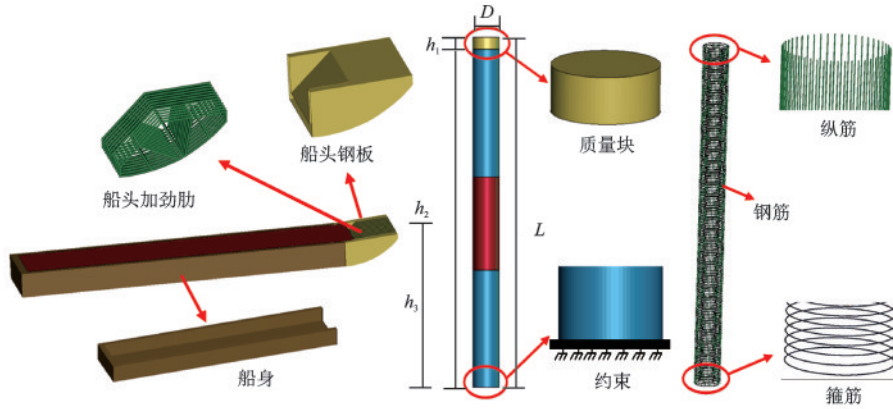


图10 船墩碰撞有限元模型

Fig.10 Finite Element Model of ship-pier collision

船墩碰撞的有限元模型图10,驳船有限元模型的几何尺寸参考文献[16]进行取值,驳船尺寸如图11~12所示。

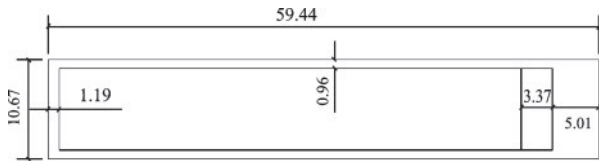


图11 驳船平面图

Fig.11 Ship Plan

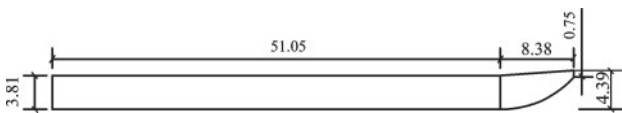


图12 驳船立面图

Fig.12 Ship elevation

船身采用壳单元进行建模,单元尺寸在0.1~0.2 m之间,货物采用实体单元建模,且不考虑货物对船舶刚度贡献,其中船头与船头加劲肋采用弹塑性随动硬化模型(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)模拟,考虑到船身与船载货物并不参与直接碰撞且非线性程度较低,故船身与装载货物采用弹性材料(\*MAT\_ELASTIC)模拟,船载货物采用弹性材料模拟,货物的材料密度参数根据撞击吨位的实际情况进行取值。各材料参数的具体取值见表3。

图10中桥墩截面为实心圆形,直径 $D$ 为2.26 m,桥墩高度 $L$ 为29.9 m, $h_1$ 表示质量块高度,质量块直径与桥墩直径一致, $h_2$ 表示质量块底部到桥墩底部高度, $h_3$ 表示驳船撞击点高度。其中桥墩纵筋与箍筋均采用HRB400的钢筋,纵筋直径为28 mm,箍筋直径为16 mm。圆形截面纵筋沿圆周等距布置,一共为64根,箍筋间距为200 mm,纵筋与箍筋均采用梁单元模拟,单元尺寸在0.1~0.2 m之间,其材料模型为\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC,具体参数见表3。桥墩混凝土为C40,采用实体单元模拟,单元尺寸在0.05~0.1 m之间,其材料模型为\*MAT\_CSCM,抗压强度取26.8 MPa,当单元的最大主应变超过极限应变时删除,从而实现裂缝的模拟,文献[17]建议当单元的最大主应变超过0.1或0.05时定义为单元失效,本文取0.1,其余单元参数由程序自动生成。质量块采用弹性材料模拟,其中材料的密度根据轴压比确定。桥墩底部进行固结处理,不考虑钢筋与混凝土之间的滑移,将钢筋与混凝土之间进行耦合处理<sup>[18]</sup>。

## 2.2 计算工况

为全面分析桥墩在各种工况下的损伤状态,本文分析的变量包括撞击速度、撞击吨位、撞击点高度、轴压比4个变量。本文主要研究Ⅲ、Ⅳ级航道的船舶撞击桥墩,根据《内河通航标准》<sup>[19]</sup>中的相关规定,Ⅲ、Ⅳ级航道的船舶吨级分别为500 t与1 000 t,

表3 驳船材料参数

Table 3 Material parameters of the ship

类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	切线模量/GPa	应变率参数C	应变率参数P	失效应变
船头	7 800	2.1×10 <sup>11</sup>	0.3	235	1.18	40.4	5.0	0.34
船身	7 800	2.1×10 <sup>11</sup>	0.3	—	—	—	—	—
货物	可变量	2.1×10 <sup>8</sup>	0.3	—	—	—	—	—
钢筋	7 800	2.1×10 <sup>11</sup>	0.3	400	1.18	40.4	5.0	0.15

因此,本文中船舶撞击吨位的选取在600~1 200 t之间。船舶撞击速度与船舶正常航行速度以及水流速度有关<sup>[20]</sup>,文献[20]观测了长江航道驳船上行与下行的速度在1.11~4.16 m/s之间,虽然本研究的

船舶航行航道等级较低,仍参照文献[20]将撞击速度在1~5 m/s进行取值。分析过程中,改变其中一个变量,保持3个变量不变,分析桥墩损伤状态的变化规律。具体工况所对应的变量参数见表4。

表4 计算工况及参数

Table 4 Case of calculation and parameters

序号	工况	撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> )	撞击吨位/t	撞击点高度/m	轴压比	集中质量密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
1	C-1	1	1 000	0.5 L	0.15	284 000
2	C-2	3	1 000	0.5 L	0.15	284 000
3	C-3	5	1 000	0.5 L	0.15	284 000
4	C-4	4	600	0.5 L	0.15	284 000
5	C-5	4	800	0.5 L	0.15	284 000
6	C-6	4	1 000	0.5 L	0.15	284 000
7	C-7	4	1 000	0.2 L	0.15	284 000
8	C-8	4	1 000	0.8 L	0.15	284 000
9	C-9	4	1 200	0.5 L	0	2 400
10	C-10	4	1 200	0.5 L	0.15	284 000
11	C-11	4	1 200	0.5 L	0.3	564 000

### 3 驳船撞击桥墩动力响应与损伤分析

#### 3.1 桥墩动力响应与损伤过程变化机理分析

本文以桥墩轴压比为0.15时,1 000 t驳船以4 m/s速度撞击桥墩工况(C-6)为例说明驳船撞击桥墩的动力响应全过程。

图13给出了碰撞过程中的能量变化,其中船舶的动能大部分转化为了系统的动能,沙漏能控制在总能量的10%以内,滑移能控制在5%以内,说明模型计算结果合理,需要说明的是总能量在碰撞后期有所增大,出现此现象的原因是本文考虑了结构重力加速度,导致碰撞后期重力势能转换为了桥墩的内能所致。

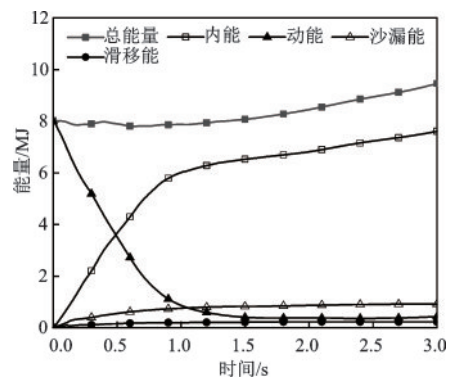


图13 碰撞过程能量变化

Fig.13 Variation of energy at impact process

图14给出了桥墩在驳船撞击作用下的横向变形,由图中可以看出,撞击初期,横向最大位移位于桥墩撞击点区域,此时墩顶位移在集中质量的惯性作用影响下,其位移较小,随着撞击的持续,墩顶位

移开始增大。在这个阶段,以撞击点为分界线,可将桥墩分为两部分,撞击点以上部分位移增大速率较快,以下部分位移增大速率较慢。当撞击时间在1 s左右时,撞击点以上结构的变形超过撞击点以下结构变形,此时桥墩上半段绕撞击点附近区域旋转。图15给出了驳船撞击力时程图,由图中可以看出,1 s以后,撞击力逐渐减小,而此时墩顶的位移仍然增大,说明此时墩顶质量块的惯性作用使得桥墩

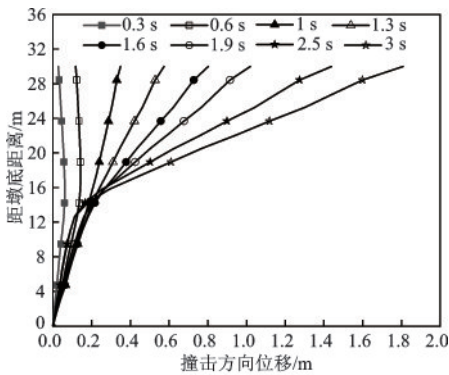
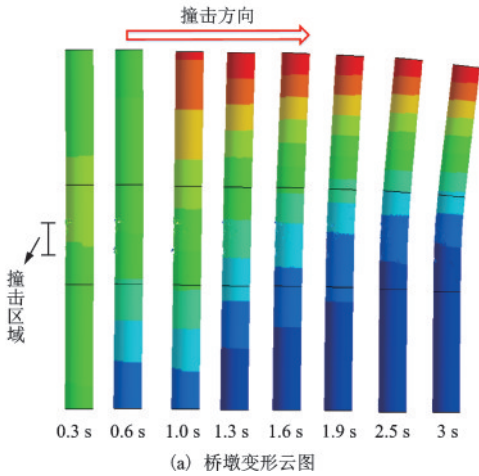


图14 桥墩位移

Fig.14 Pier displacement diagrams

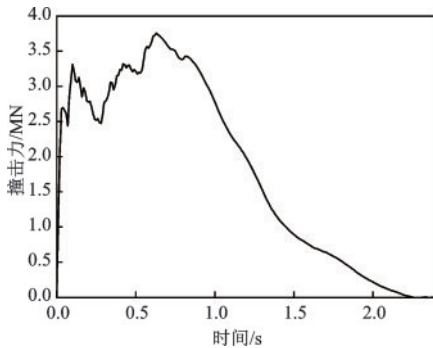


图15 撞击力  
Fig.15 Impact Force

加速往船舶运动方向移动,导致船舶与桥墩之间逐渐脱离,因此撞击力逐渐减小。在这个过程中,桥墩撞击点一侧开始受拉,而位于同侧的S1钢筋的应变也会增大,以上现象说明此时集中质量的惯性力对墩顶位移影响较撞击力大。

图16给出了不同时刻桥墩的损伤云图,由图中可以看出,在撞击初期,撞击区域的撞击一侧出现局部破坏,此时集中质量的惯性作用可视为在墩顶施加了侧向约束,导致另一侧混凝土出现拉应力,在弯曲应力的作用下,混凝土出现损伤,且墩底撞击一侧也出现拉应力。随着撞击过程的深入,墩底撞击一侧损伤区域增大,撞击区域附近混凝土在撞击一侧开始出现弯曲拉应力,且出现损伤,结合图15所示的撞击力时程可以确定,该部位的损伤是由于集中质量的惯性作用所致,从变形图与损伤图可以看出,撞击点区域在撞击结束时刻已形成塑性铰。

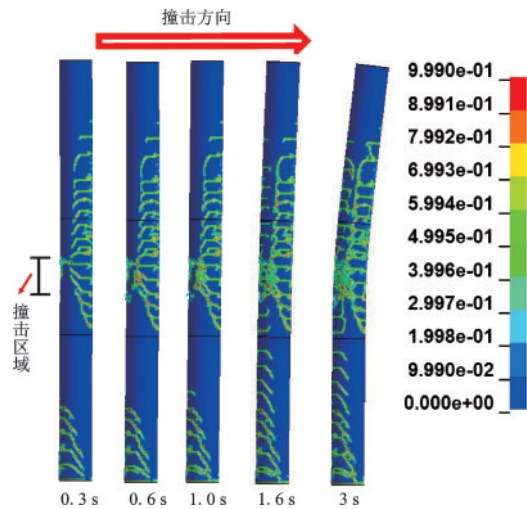


图16 桥墩典型损伤状态

Fig.16 Typical Damage State of the pier

根据图16可以得出桥墩损伤较严重的部位为撞击区域与墩底区域,为说明该部位的损伤机理,图17、18给出了撞击点区域与墩底区域两侧典型钢筋单元的应力与应变时程图,图中S1~S4分别表示桥墩在撞击点与墩底两侧钢筋编号,具体部位见图17。由图17、18可以看出,在撞击过程中,这两处的钢筋均经历了一个加卸载循环,其中撞击区域的动力循环效应较墩底强。由图18中可以看出,这两处的钢筋单元均达到屈服状态,且产生了较大的塑性变形,值得注意的是,撞击区域S1侧钢筋的应变较S3侧小,但撞击区域“转动”效应更加

明显,这说明撞击区域比墩底区域损伤程度大。由图 19 中 S1 侧与 S3 侧的混凝土损伤对比图可以看出,出现这种现象的原因是撞击点区域撞击一侧混凝土出现较多裂缝,损伤更加严重,而最终撞击点区域会先于墩底破坏。需要说明的是,如果考虑上部结构横向约束作用以及上部结构的质量参与比例,两处的损伤程度会有一定程度的变化,但损伤部位不会改变。

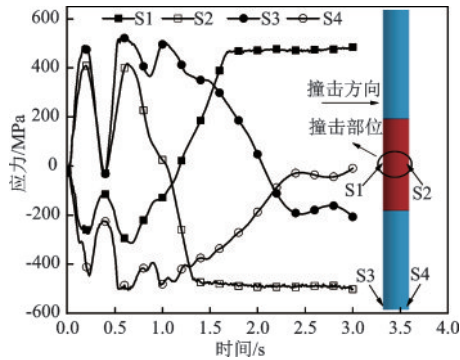


图 17 钢筋应力  
Fig.17 Stress of rebar

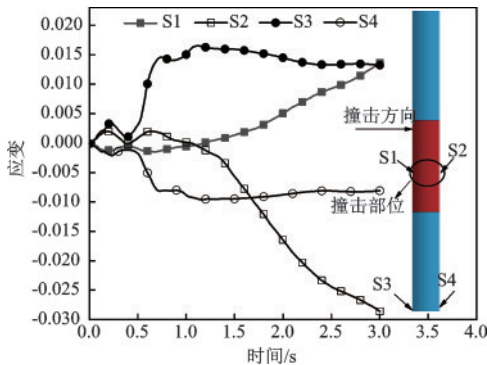


图 18 钢筋应变时程  
Fig.18 Time-history curves of rebar strain

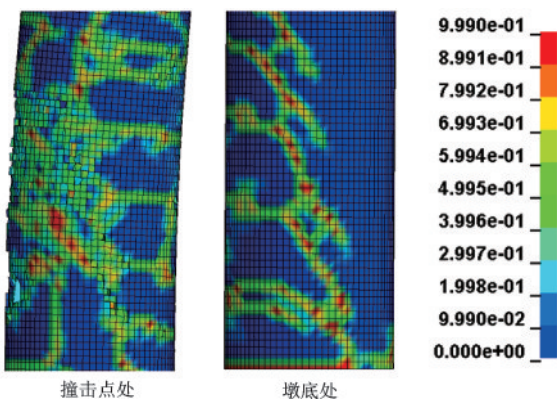


图 19 撞击点与墩底处损伤云图

Fig.19 Damage contour of the collision point and pier bottom

由图 20 可以得出,钢筋 S1 的动屈服应力为 465 MPa, S2 屈服应力为 463 MPa, S3 屈服应力为 488 MPa, S4 屈服应力为 447 MPa,增幅分别为 16.2%、15.7%、22%、11.7%。

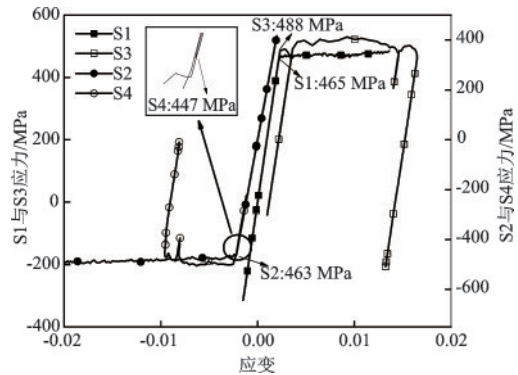


图 20 钢筋应变—应力

Fig.20 Strain-stress relation of the rebar

以上分析表明,桥墩受驳船撞击作用下,桥墩撞击点与墩底处会受到往复循环作用,撞击点区域最终会形成塑性铰,且桥墩的损伤是由船撞力与惯性力共同作用的结果。此外,由于钢筋应变率效应的影响,屈服强度有较大提高,在设计中仍然取静屈服强度将低估桥墩承载能力。

### 3.2 撞击参数对桥墩损伤影响分析

LS-DYNA 中提供了损伤因子<sup>[12]</sup>对单元的损伤程度进行评估,CSCM 材料模型的损伤因子由归一化的累积损伤因子  $d$  表示,主要分为延性损伤与脆性损伤,延性损伤累积主要在混凝土受压且超过损伤能量阈值时开始累积,脆性损伤主要在混凝土受拉时且超过损伤能量阈值时开始累积,两种损伤因子相互独立,其变化范围在 0~1 之间。但该参数评估的对象为单元,针对桥墩进行评估不具备合理性。为采用损伤因子对桥墩损伤情况进行合理评估,文献[10]与文献[7]分别对撞击点处截面与整个桥墩损伤因子进行平均得到了平均损伤因子,但本文撞击点区域与墩底损伤区域大,且存在两个损伤较大部位。为了便于判断桥墩的损伤程度,根据软件中提供的损伤因子,对两个区域的损伤因子进行平均,从而可结合损伤云图评估局部的损伤程度,平均损伤因子计算见公式(2):

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2)$$

式中,  $\bar{D}$  表示选取区域的平均损伤因子;  $d_i$  表示选取区域第  $i$  个单元的损伤因子;  $n$  表示选取区域单元个数。

本节根据 2.2 节中拟定的工况对驳船撞击桥墩的动力响应进行了模拟, 图 21 与图 23 分别给出了损伤云图随撞击吨位、撞击速度的变化; 图 22 与图 24 分别给出了平均损伤因子随撞击吨位、撞击速度的变化。由图 21 与图 23 可以看出, 随着撞击吨位

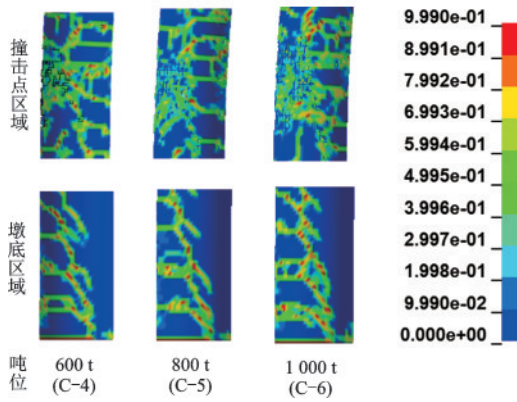


图 21 损伤云图随撞击吨位变化

Fig.21 Variation of damage contour with impact tonnage

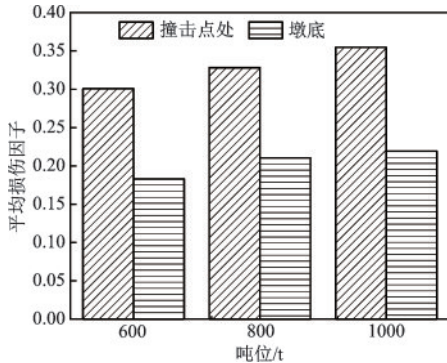


图 22 平均损伤指标随撞击吨位变化

Fig.22 Variation of average damage index with impact tonnage

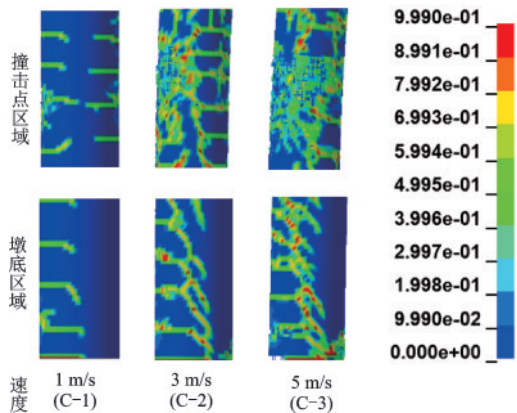


图 23 损伤云图随撞击速度变化

Fig.23 Variation of damage contour with impact velocity

与速度的增大, 桥墩撞击点区域与墩底区域的损伤程度有增大趋势, 损伤特征基本不变; 由图 22 与图 24 可以得出, 撞击点与墩底区域损伤因子随撞击吨位与速度的增大而增大, 此外, 图中墩底区域的平均损伤因子都小于撞击点区域的平均损伤因子, 表明当撞击部位在桥墩中点处时, 撞击点区域处于较不利的状态。

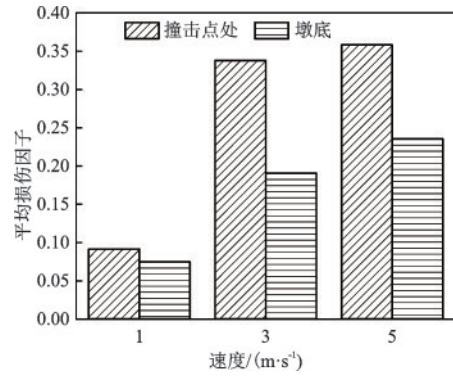


图 24 平均损伤指标随撞击速度变化

Fig.24 Variation of average damage index with impact velocity

图 25、26 给出了轴压比的变化对桥墩损伤的影响, 由图 25 可以发现, 随着轴压比的增大, 撞击点区域损伤特征不变; 而墩底区域当轴压比为 0 时发生弯曲破坏, 轴压比为 0.15 与 0.3 时, 墩底损伤较大区域呈斜向分布, 说明轴压比改变了墩底的损伤特征。由图 26 可以看出, 轴压比在 0~0.15 之间时, 随着轴压比的增大, 桥墩的最不利部位由墩底转换至撞击点区域, 桥墩撞击点区域的损伤程度增大 20%, 墩底的损伤程度减小 11%; 轴压比在 0.15~0.3 之间时, 随着轴压比的增大, 桥墩撞击点

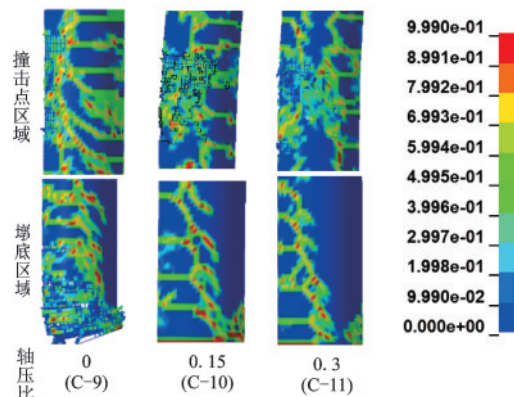


图 25 损伤云图随轴压比变化

Fig.25 Variation of damage contour with axial compression ratio

处损伤程度减小 47%，墩底的损伤程度减小 34%。以上分析表明，轴压比在 0~0.15 之间时，轴压比的增大对桥墩的抗撞能力是否有利需更加实际轴压比进行判断；轴压比在 0.15~0.3 之间时，随着轴压比的增大会增强桥墩的抗撞击能力。

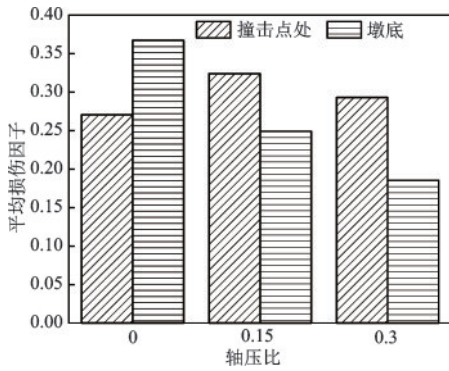


图 26 平均损伤指标随轴压比变化

Fig.26 Variation of average damage index with axial compression ratio

图 27、28 给出了撞击点变化时，桥墩的损伤变化情况。由图中可以看出，撞击点区域的损伤随着撞击点的增高先增大后减小，且当撞击点较低时，撞击点处的初始损伤较小，表现为局部损坏。由图 27 可得，墩底的损伤程度随撞击点的增高而增大，且撞击点较低时，墩底损伤较大的区域呈斜向分布，当撞击点高度在  $0.8L$  时，墩底受压区混凝土出现压碎，表现为弯曲破坏。随着撞击点的增高，桥墩的最不利部位由墩底转换为撞击点区域，此后再转换至墩底。表明最不利部位与撞击点的位置密切相关，但主要还是集中在墩底与撞击点区域。

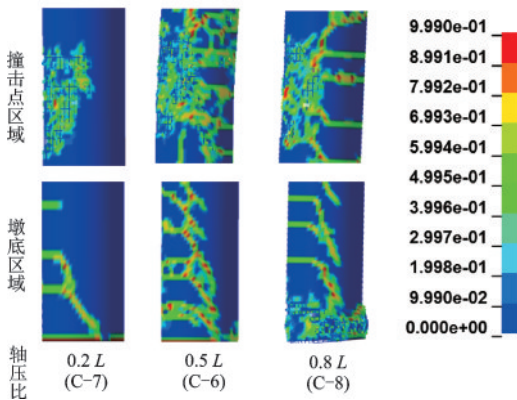


图 27 损伤云图随撞击点变化

Fig.27 Variation of damage contour with impact point

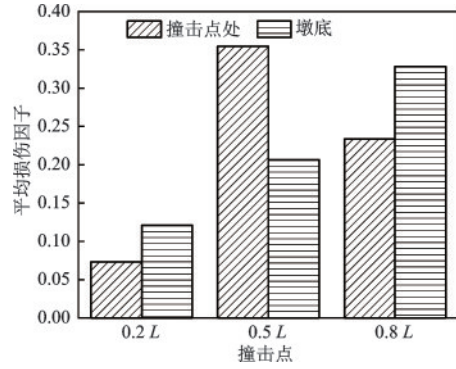


图 28 平均损伤指标随撞击点变化

Fig.28 Variation of average damage index impact point

## 4 结 论

建立了一艘驳船撞击桥墩的有限元模型，并对驳船撞击桥墩的全过程进行了模拟，根据计算结果对桥墩的动力响应以及损伤进行了分析，得到了以下结论：

(1) 桥墩在撞击力与惯性力作用下，撞击点与墩底处受往复作用，且撞击点区域混凝土在这种作用下破坏程度较为严重。

(2) 在 C6 工况下，钢筋 S1 的动屈服应力为 465 MPa，S2 屈服应力为 463 MPa，S3 屈服应力为 488 MPa，S2 屈服应力为 447 MPa，增幅分别为 16.2%、15.7%、22%、11.7%，说明不考虑钢筋应变率影响将低估桥墩的承载能力。

(3) 撞击速度与吨位并不显著影响桥墩的损伤形态，对桥墩损伤程度具有一定的影响；轴压比在 0~0.15 之间时，轴压比与桥墩的抗撞能力之间的关系与实际轴压比相关；轴压比在 0.15~0.3 之间时，随着轴压比的增大会增强桥墩的抗撞击能力；撞击点的降低会增大桥墩的抗撞能力，轴压比与撞击点的变化会影响桥墩的最不利位置以及桥墩底部的损伤特征。

综上所述，考虑到桥墩在驳船撞击作用下，最不利位置可能变化，且钢筋应变率效应比较明显，在实际设计中有必要充分考虑。由于本文将上部结构简化为集中质量进行计算，对施工期间船撞桥墩进行了初步探索，在桥梁运营阶段上部结构的约束以及实际参与质量对损伤的影响还需更加深入研究。

## 参考文献:

- [1] Jiang H, Wang J, Chorzepa M G, et al. Numerical investigation of progressive collapse of a multispan continuous bridge subjected to vessel collision[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(5): 04017008.
- [2] 田力, 朱聪, 王浩, 等. 碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的动态响应及破坏模式[J]. *工程力学*, 2013, 30(2):150-155.  
Tian L, Zhu C, Wang H, et al. Dynamic response and failure modes of RC columns under impact[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2):150-155. (in Chinese)
- [3] 程小卫, 李易, 陆新征, 等. 撞击荷载下钢筋混凝土柱动力响应的数值研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(2):53-63.  
Cheng X W, Li Y, Lu X Z, et al. Numerical investigation on dynamic response of reinforced concrete columns subjected to impact loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(2):53-63. (in Chinese)
- [4] Zhou D Y, Li R W. Damage assessment of bridge piers subjected to vehicle collision[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(15):2270-2281.
- [5] Do T V, Pham T M, Hao H. Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2018, 156(1):243-259.
- [6] Do T V, Pham T M, Hao H. Numerical investigation of the behavior of precast concrete segmental columns subjected to vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2018, 156(1):375-393.
- [7] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 等. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(13):261-267, 273.  
Chen L, Zeng Y Y, Yan Z F, et al. Dynamic response and damage characteristics of a RC pier under vehicle impacting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(13):261-267, 273. (in Chinese)
- [8] 刘飞, 罗旗帜, 蒋志刚. 低速冲击下 RC 梁的动力响应和破坏机理研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(5):163-169.  
Liu F, Luo Q Z, Jiang Z G. Dynamic response and failure mechanism of RC beams to low velocity impact[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5):163-169. (in Chinese)
- [9] 刘飞, 罗旗帜, 严波, 等. RC 柱侧向冲击破坏模式的数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(16):122-127.  
Liu F, Luo Q Z, Yan B, et al. Numerical study on the failure mode of RC column subjected to lateral impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(16):122-127. (in Chinese)
- [10] 赵武超, 钱江, 张文娜. 冲击荷载下钢筋混凝土梁的性能及损伤评估[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1):111-122.  
Zhao W C, Qian J, Zhang W N. Performance and damage evaluation of RC beams under impact loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1):111-122. (in Chinese)
- [11] Fujikake K, Li B, Soeun S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 135(8):938-950
- [12] Murray Y D. User's manual for LS-DYNA concrete material model 159[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2007.
- [13] LSTC. LS-DYNA Keyword user's manual[EB/OL]. 2015-03-23 [2020-2-26]. <https://lstc.com/download/manuals>.
- [14] Wang W, Morgenthal G. Dynamic analyses of square RC pier column subjected to barge impact using efficient models[J]. *Engineering Structures*, 2017, 151:20-32.
- [15] 赵武超, 钱江. 重型车辆撞击桥墩的破坏模式及抗撞性能分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(1):67-74, 88.  
Zhao W C, Qian J. Failure mode and impact performance of bridge piers subjected to heavy vehicle collision[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(1):67-74, 88. (in Chinese)
- [16] Cowan D R. Development of time-history and response spectrum analysis procedures for determining bridge response to barge impact loading[D]. Gainesville: University of Florida, 2007.
- [17] Murray Y D, Abu-Odeh A, Bligh R. Evaluation of LS-DYNA concrete material model 159[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2007.
- [18] 姜华, 贺拴海, 王君杰. 钢筋混凝土梁冲击试验数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15):140-150.  
Jiang H, He S H, Wang J J. Numerical simulation of the impact test of reinforced concrete beams[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15):140-150. (in Chinese)
- [19] 内河通航标准:GB 50139—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [20] 陈国虞, 陈明栋, 郑丹. 计算船撞力选择撞击速度时考虑墩位流速的方法[J]. *广东造船*, 2010, 29(3):33-37.  
Chen G Y, Chen M D, Zheng D. Considering water flow velocity at every pier in selection of impact speed to calculate ship collision force[J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2010, 29(3):33-37. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)