

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.04.054

大跨连续刚构桥-船撞击动力响应研究

汪洋,曾琼瑶

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川成都610041)

摘要:以某高速公路新建连续刚构桥为工程背景,采用非线性有限元分析方法,通过大型通用非线性有限元程序LS-DYNA建立全桥有限元模型和1000t船舶模型,对船-桥碰撞动力过程进行模拟,以确定船-桥碰撞过程中碰撞力的大小,并将有限元计算结果与规范经验公式进行比较。结果表明:船-桥碰撞过程中,船舶发生较大变形,吸收大部分的能量,将动能转化为势能;碰撞过程具有明显的非线性波动特征;各个规范经验公式计算的碰撞力差异较大,且规范经验公式具有一定的局限性,有限元分析法能完整再现船-桥碰撞结构内部动力学过程,弥补规范经验公式的不足。

关键词:船-桥碰撞;非线性有限元;碰撞力;LS-DYNA;连续刚构桥

中图分类号:U443.162

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)04-0204-04

0 引言

近年来,随着跨江跨河桥梁的大量建设和水运事业的蓬勃发展,船舶撞击桥梁的事故日益增多[1]。据不完全统计,我国每年平均发生严重船撞事故约17起^[2],给社会和经济造成巨大的损失和恶劣的影响。因此,桥梁防船撞设计具有重要的现实意义。

目前船舶-桥梁碰撞力主要有以下3种计算方法:(1)简化公式方法;(2)数值计算方法;(3)有限元分析方法。其中,统计方法的简化公式简单明了,但计算精度较低。数值计算方法相对于简化公式方法而言,计算精度较高,但是本质上仅是简化的非线性有限元方法。随着非线性有限元技术的日益成熟,非线性有限元分析在船舶桥梁碰撞问题中的应用越来越广泛^[3]。通过非线性有限元仿真分析,工程师们能更加精确地模拟船舶-桥梁碰撞过程,对船舶-桥梁碰撞过程中结构构件的动力响应有更加清晰地认识。

本文以京昆高速公路某嘉陵江特大桥为工程背景,采用显式瞬态非线性有限元分析方法,通过LS-DYNA建立精细有限元模型,进行船-桥碰撞计算仿真分析,计算了船在4.88m/s的正常航速下正撞桥梁主墩时的动力响应,为后续进行桥梁防船撞设计提供一定的参考。

收稿日期:2022-05-23

作者简介:汪洋(1977—),男,学士,高级工程师,从事道路与桥梁设计工作。

1 船桥碰撞计算分析方法

1.1 船桥碰撞分析理论

船桥碰撞经典理论主要有Minorsky理论和Heins-Derucher理论。Minorsky基于对26起船舶相撞事件的研究,通过建立了损伤-能量模型,得出了变形的钢体积和吸收冲击能之间的线形关系,即著名的米诺斯基曲线^[4]。Heins和Derucher教授则基于能量守恒原理以一个弹簧质量体系组成的静力学模型等效模拟船舶撞击桥梁的过程,并假定桥墩或桩基通过多组弹簧系统保持平衡状态^[5],通过简化的数学模型计算碰撞过程中的最大响应。

1.2 数值解法

数值解法采用简化的非线性有限元进行船桥碰撞分析,其源于船-船碰撞理论,后被应用到船-桥碰撞领域。数值解法中具有代表性的是Petersen^[6]方法和梁文娟^[7]计算理论。Petersen模拟了碰撞过程中船舶的水平运动,将其归结为两维问题。梁文娟则将问题拓展到三维层面,考虑了碰撞过程中船舶有六个自由度,分别有横摇、横漂、摇首、纵倾、升降和进退等形式。

1.3 简化公式计算法

简化公式计算法主要基于动量定理、冲量定理等理论结合船桥碰撞试验统计数据拟合得到或通过有限元模拟船撞动态时间过程,经过数理统计得出。目前常见的有美国AASHTO规范公式、IABSE公式、《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—99)公式和《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)等。

1.4 有限元仿真分析法

有限元仿真分析法能将碰撞过程中的各种非线性问题模拟出来,相较于理论分析法、数值解法、简化公式计算法而言,有限元仿真分析法更便于操作,成本更低,准确性更好,并且能得到碰撞全过程的结果。因此有限元仿真分析成为了目前研究船-桥碰撞的主要手段。

在船-桥碰撞有限元仿真分析中,能考虑相撞结构材料的非线性本构关系、几何非线性和接触非线性等一系列复杂非线性问题^[8]。通过对实际碰撞过程的仿真分析,可计算从碰撞开始到结束的每个时间步相撞结构的响应,得到船舶撞击力、损伤变形、能量转换和内部应力等力学指标的时程曲线。

2 船桥碰撞有限元仿真分析

本文基于 LS-DYNA 碰撞计算模块,对船-桥正撞桥墩主墩进行仿真分析,计算得到了结构的动力响应,能量转换时程曲线、船舶撞击力时程曲线,精细完整地再现结构内部动力学过程。

2.1 桥梁背景

某高速公路新建桥主桥为 95 m+180 m+95 m 预应力混凝土连续刚构桥,主梁采用单箱单室截面,主墩采用空心薄壁墩。主墩构造见图 1。工程河段代表船型为内河 III—(3)代表船队,船舶尺度 160.0 m × 10.8 m × 2.0 m (长 × 宽 × 设计吃水),设计最高通航水位 460.71 m,最低通航水位 438.00 m。大桥采用单孔双向通航的方式,通航孔净空高度 53.36 m,通航净宽 154 m。

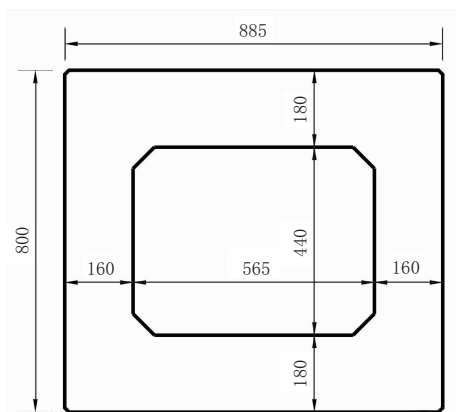


图 1 计算模型简图(单位:cm)

2.2 有限元模型的建立

2.2.1 计算参数

(1)计算工况:考虑为最高通航水位,1 000 t 船舶满载 0°正撞于主墩。

(2)船舶撞击速度:船舶航行速度取 4.99 m/s,水

流平均速度 3.53 m/s,根据《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)插值求得,船舶撞击速度为 4.88 m/s。

(3)船舶参数(见表 1)

表 1 代表船舶参数

船舶类型	船长 L/m	型宽 B/m	型深 H/m	满载吃水 T/m	排水量 T/t
货船	44.65	8.75	3.45	2.95	1580

2.2.2 材料模型参数

在船-桥碰撞中,碰撞区域内构件变形主要以塑性大变形为主,因此船艏部位为可变形弹塑性材质。本文中船艏结构采用线形强化弹塑性 Cowper-Symonds 模型^[9],其主要特性有以下:弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}$ N/m²、材料密度 $\rho=7.85 \times 10^3$ kg/m³、泊松比 $\mu=0.3$ 、硬化模量 $E_h=1.18 \times 10^9$ N/m²、屈服应力 $\sigma_0=2.35 \times 10^8$ N/m²,应变率强化参数 $D=40.4$ 、 $q=5$ 。混凝土材料采用偏于保守的弹性本构关系,材料密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³、泊松比 $\mu=0.17$ 。

2.2.3 有限元模型

本次建模桥梁上部结构、主墩、承台和群桩基础采用 solid164 单元模拟,考虑桩土效应。本次计算主要关注船-桥碰撞区域结构的响应,而上部结构仅起到提供质量和刚度的作用,因此,主梁采用四面体单元划分。下部结构中主墩碰撞区和桩基采用六面体单元,并在碰撞区域适当加密网格,见图 2,主墩非碰撞区和承台采用四面体单元划分。

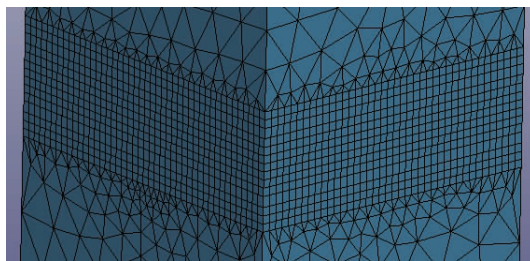


图 2 主墩碰撞区网格划分

船艏是碰撞和吸能的关键部件,是仿真模拟研究的重点。船艏采用 shell163 单元模拟,并精细划分网格,以保证计算精度,船艏网格划分见图 3。由于船后部位远离碰撞区域,仅提供质量和刚度,因此对船的中后部做了一定简化,将其视为刚体,用刚性板简化模拟船体中后部结构。

本文中对船体周围流体的影响进行简化处理,将碰撞过程中船体和流体间的相互作用以一个附加水质量来代替。本文中附加水质量按船舶质量的 0.04 倍考虑,通过增大船体材料密度来实现。

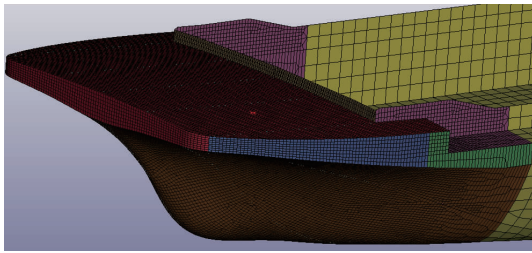


图3 船艙网格划分

3 碰撞计算结果和分析

3.1 碰撞过程

初始阶段,船舶和桥墩之间留有 20 cm 微小空隙,船舶在初速度 4.88 m/s 下正撞于桥墩,总作用时间考虑为 2 s,船-桥碰撞有限元模型见图 4。船舶首先和桥墩发生接触碰撞,在撞击力的作用下,船舶发生较大变形,通过船艙变形吸收大部分的能量,将动能转化为势能。

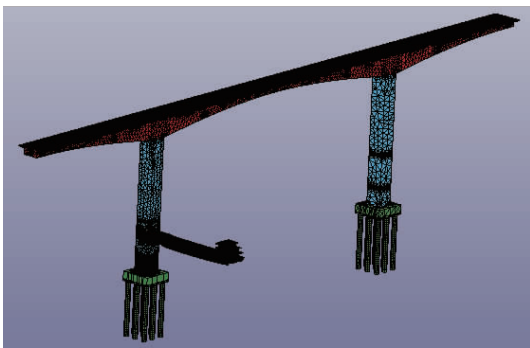


图4 船-桥碰撞有限元模型

3.2 碰撞能量分析

图 5 为整个碰撞过程的能量转化图,从能量转化曲线可看出,船舶动能的绝大部分转换为结构内能,总能量趋近于不变,沙漏能占总能量的 3.6%,小于 5%,由此可说明整个碰撞过程能量基本守恒,计算结果可靠。

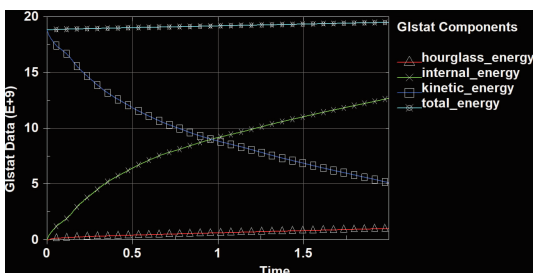


图5 能量时程曲线

3.3 碰撞力分析

图 6 为碰撞力时程曲线,从图中可以看出,碰撞过程具有明显的非线性波动特征,碰撞力峰值出现多次卸载,每一次卸载代表了某个构件的失效或破坏。从图 6 中可看出,最大碰撞力 $P_{max}=16.8$ MN。

为进一步研究有限元仿真分析与简化计算公式

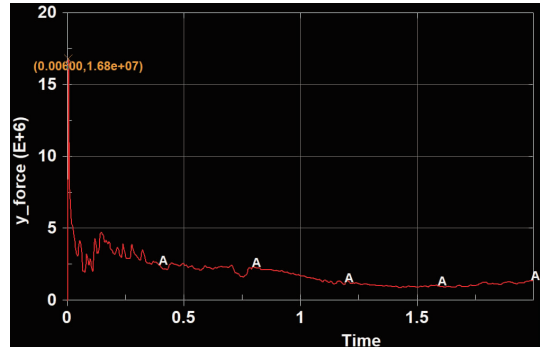


图6 碰撞力时程曲线

差异,把各参数代入规范经验公式计算,求得本文计算工况下的最大碰撞力,将有限元模拟得到的最大碰撞力与规范经验公式计算的最大碰撞力进行比较,见表 2。

表 2 最大碰撞力计算

规范	AASHTO	IABSE	TB	JTG	FEA
碰撞力 /MN	18.5	20.0	11.6	16.4	16.8

从表 2 可知,各个公式计算的船撞力差异较大,其中索尔-诺特格林那公式计算得到的船撞力最大,且达到 20 MN,铁路规范公式计算得到的船撞力最小,为 11.6 MN,规范经验公式计算得到的船撞力最大值与最小值差异达 42%。有限元计算得到的最大碰撞力与 ASSHTO 规范公式计算值和《公路桥梁抗撞设计规范》公式计算值较为接近,且介于二者之间。

理论上,船-桥碰撞力大小与撞击船舶刚度、撞击船的动能大小、桥墩外形、水深和撞击方向均有关,经验公式无法综合考虑上述因素和特征,因此经验公式具有一定的局限性。然而,有限元方法可以考虑到各种影响因素和结构特征,准确模拟出实际碰撞过程,计算得到从碰撞开始到结束的每个时间步相撞结构的响应,为工程师准确把握船-桥碰撞过程中的结构相应提供依据。

4 结语

本文以某高速公路新建连续刚构桥为工程背景,通过显式瞬态非线性有限元分析方法,对船-桥碰撞全过程进行数值仿真分析,得到以下结论:

- (1)通过动态非线性有限元计算结果可知,船-桥碰撞过程中,船舶发生较大变形,吸收大部分的能量,将动能转化为势能。碰撞过程具有明显的非线性波动特征,碰撞力峰值出现多次卸载,而每一次卸载代表了某个构件的失效或破坏。

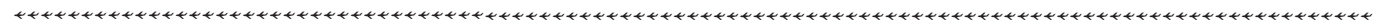
(2)各个规范经验公式计算的船撞力差异较大,其中最大值与最小值的差异达 42%,由此可看出规范经验公式有一定局限性,无法综合考虑船-桥碰撞各种影响因素和结构特征。有限元计算得到的最大碰撞力与 ASSHTO 规范公式计算值和《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)公式计算值较为接近。

(3)通过显式瞬态非线性有限元分析法对船-桥碰撞过程进行数值模拟分析,完整地再现结构内部动力学过程,并且能得到从碰撞开始到结束每个时间步结构的动力响应,弥补了规范经验公式的不足。

参考文献:

[1] 肖祥,余俊伟.船撞作用下大跨度公铁两用斜拉桥行车安全性评估[J].工程与设,2021,35(4):710-713.

[2] 夏焯,邵珠峰,尚军年.桥梁不惧船撞[J].中国公路,2021,591(11):50-53.
 [3] 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),2008,218(6):1065-1070,1075.
 [4] Minorsky V U.An Analysis of Ship Collision to Protection of Nuclear Powered Plant[J].Ship Research, 1959(1):1-4.
 [5] Derucher K.M.Analysis of Concrete Bridge Piers for Vessel Impact [C]//Proceedings of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering, septl 3-19, 1982, China, Part I.
 [6] Pedersen, P.T, et al.Ship impact: Bow collisions [J].Inter-national Journal of Impact Engineering, 1993(2):163-187.
 [7] 梁文娟,金允龙,陈高增.船舶与桥墩碰撞力计算及桥墩防撞[C]//第十四届全国桥梁学术会议论文集,2000.
 [8] 夏玲.船桥碰撞有限元数值仿真研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
 [9] 刘建成,顾永宁.基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真[J].工程力学,2003,20(5):155-162.



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com