

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.10.053

船舶-桥墩碰撞动力响应分析研究

李选栋, 孔令云

(郑州市市政工程勘测设计研究院, 河南 郑州 450046)

摘要: 船舶撞击作为跨航道桥梁服役期间常见的一种偶然荷载形式, 为桥梁结构的安全运营带来了严重威胁。以某跨江桥梁为例, 采用动力时程分析方法, 对桥梁主墩进行了船-桥碰撞动力分析, 研究不同撞击工况下桥墩的动力响应问题, 并将有限元仿真分析的碰撞力与按国内外规范规定算法计算的撞击力进行了对比, 有关经验可供相关专业人员参考。

关键词: 碰撞; 动力; 有限元; 规范; 对比

中图分类号: U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)10-0211-04

1 概况

某桥主桥采用刚构与提篮式钢箱系杆拱、桁梁的组合结构, 见图 1。跨径布置为 102 m+420 m+102 m。主桥桥墩为 Y 型预应力混凝土刚构主墩, 其中靠近北岸主墩(P1 墩)基础由 9 根直径 3m 的挖孔桩及 17 m × 17 m × 5 m 的承台组成, 靠近南岸的主墩(P2 墩)采用 17 m × 17 m × 6 m 的扩大基础形式, 墩身均采用 14 m × 9 m ~ 12 m × 6.2 m 的变截面空心薄壁结构, Y 型刚构由前后悬臂、主横梁前后次横梁、前后主横梁及系杆索锚固件等结构组成。

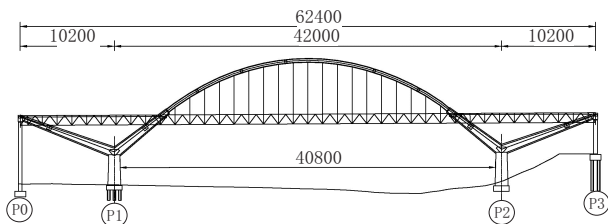


图 1 立面图(单位:cm)

2 船-桥碰撞动力学方程

船桥碰撞时, 在很短的时间内接触碰撞区附近的船艏构件发生塑性变形、屈曲。桥墩在碰撞接触区产生高应力并发生整体位移并由此引起的总体变形应力。在碰撞过程中, 除了船体、桥梁以外, 船身周围的流体亦参与了能量交换与吸收。目前解决船桥碰撞问题的方法有经典的 Minorsky 方法、简化内部机理的数值解法、试验方法和有限元方法等。其中有限元法可反映的碰撞物理现象最为完备, 得到的计算

收稿日期: 2022-05-18

作者简介: 李选栋(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计研究工作。

结果也最为准确。在有限元方法中, 碰撞问题的运动方程可以一般地表示为:

$$[M]\{a\}+[C]\{v\}+[K]\{d\}=\{F^e\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{a\}$ 为加速度向量; $\{v\}$ 为速度向量; $\{d\}$ 为位移向量; $\{F^e\}$ 为包括碰撞力在内的外力向量。

3 船-桥碰撞有限元模型

本节选取具有代表性的 8000DWT 货船作为本文碰撞分析船型, 船型有限元模型见图 2, 其中船宽 19 m, 船深 15 m, 船长 118 m, 吃水深度 5 m。在船舶有限元模型建模过程中, 船艏及船体均采用壳单元模拟, 通过调整船体部分材料密度实现对碰撞船舶质量的调整, 经过试算分析, 船桥碰撞区域的网格尺寸划分为 20 mm, 非碰撞区域的网格尺寸划分为 100 mm。同时, 为提高计算效率, 除碰撞区域外船体单元采用刚体单元模拟。

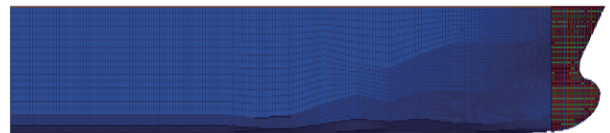


图 2 8000DWT 货轮船艏有限元模型

在本文分析中, 考虑到桥墩为主要发生碰撞部位, 为提高分析效率, 仅建立了桥墩的有限元模型, 上部结构荷载以集中荷载形式施加于墩顶。桥墩、承台、桩基部分均采用实体单元模拟, 钢筋采用梁单元模拟, 混凝土和钢筋之间的连接采用流固耦合方式模拟。

4 船-桥碰撞动力分析

由于 P1、P2 主墩除基础形式差异外, 二者外形相

同,经初步试算分析二者在船舶撞击下的响应也较为接近,故本文统一以P1主墩作为代表性桥墩进行船桥碰撞动力分析,分别计算了P1桥墩在最高通航水位下船舶以5.84 m/s正撞(碰撞角度为0°)和斜撞(碰撞角度为30°)工况下桥墩结构的动力响应。

4.1 工况一:8000DWT货船0°正撞

图3给出了8000DWT货船满载货物状态下以5.84 m/s的航行速度正向撞击P1桥墩的碰撞荷载、墩顶位移及能量变化时程。

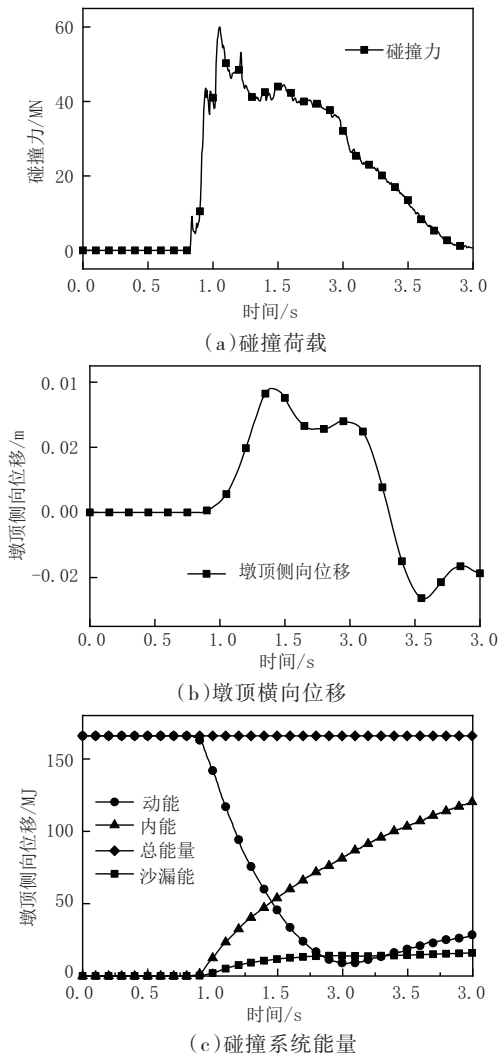


图3 工况一碰撞荷载、位移与能量时程曲线

从图3(a)中可以看出,在船-桥碰撞发生后,碰撞力在短时间内(约0.3 s)由0增至峰值,之后随着碰撞过程的结束,碰撞力逐渐衰减至0,整个碰撞时间大约持续2.0 s,碰撞过程中撞击力峰值接近60 MN。同时,在碰撞开始的一段时间内桥墩墩顶横向位移不断增大,见图3(b),最大横向位移接近40 mm,之后随着船舶动能的降低,桥墩墩顶的弹性变形逐渐恢复,碰撞结束后,桥墩墩顶出现了约20 mm的塑性变形,可以看出桥墩的抗推刚度较大,在该工况撞击

下,墩顶的位移较小。图3(c)给出了碰撞过程中系统的能量变化规律,从图中可以看出,在碰撞过程中,系统的总能量保持不变,符合能量守恒定律,同时系统沙漏能占比较低(低于10%),表明计算结果具有可信度。船舶的动能和系统的内能在碰撞过程中相互转化,船舶初始动能166.0MJ,碰撞完成后船舶动能降低至45MJ,整个碰撞过程中约有120MJ的动能转化为船舶及结构内能。

图4给出了8000DWT货船与P1桥墩正向碰撞全过程的塑性损伤云图。可以看出,随着碰撞过程的进行,桥墩的塑性损伤程度及区域不断扩大,在碰撞行为刚发生时,仅船桥接触区域出现损伤,之后在船舶的碰撞下桥墩碰撞部位出现严重损伤,部分混凝土单元失效,普通钢筋断裂,桥墩结构未发生整体破坏失效。

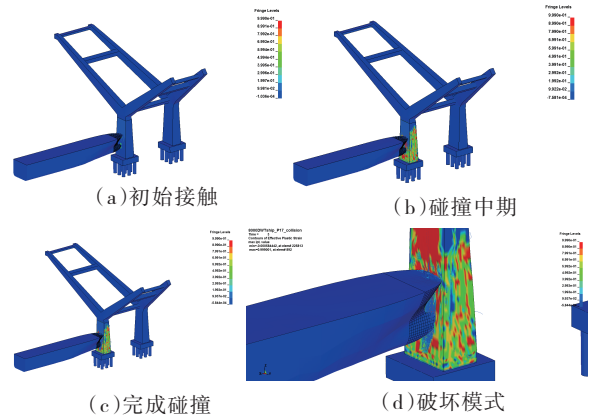


图4 工况一桥墩损伤与破坏模式

4.2 工况二:8000DWT货船30°斜撞

图5给出了8000DWT货船满载货物状态下以5.84 m/s的航行速度斜向撞击(碰撞角度30°)下P1桥墩的碰撞荷载、墩顶位移及能量变化时程。

从图5(a)中可以看出,与工况一正撞过程类似,船-桥碰撞过程中,碰撞力由0逐渐增至峰值,之后又逐渐衰减至较低水平,碰撞力峰值约为48.9 MN,小于正撞情况下的峰值碰撞力,主要是由于当船舶与桥墩斜向碰撞时,二者之间的碰撞接触面积减小,进而导致碰撞力降低。从图5(b)可以看出,在碰撞过程中,墩顶最大横向位移达到290 mm,远大于正撞下墩顶的横向位移,主要是由于桥墩横桥向的刚度远大于顺桥向的刚度(墩身截面的特性决定),当斜向碰撞时,一部分碰撞力通过桥墩沿顺桥向传递,而顺桥向桥墩的抗推刚度较小,因此该碰撞工况下墩顶的位移较大。从图5(c)可以看出在碰撞过程中系统的能量变化规律与工况一较为相似,此处不再赘述。

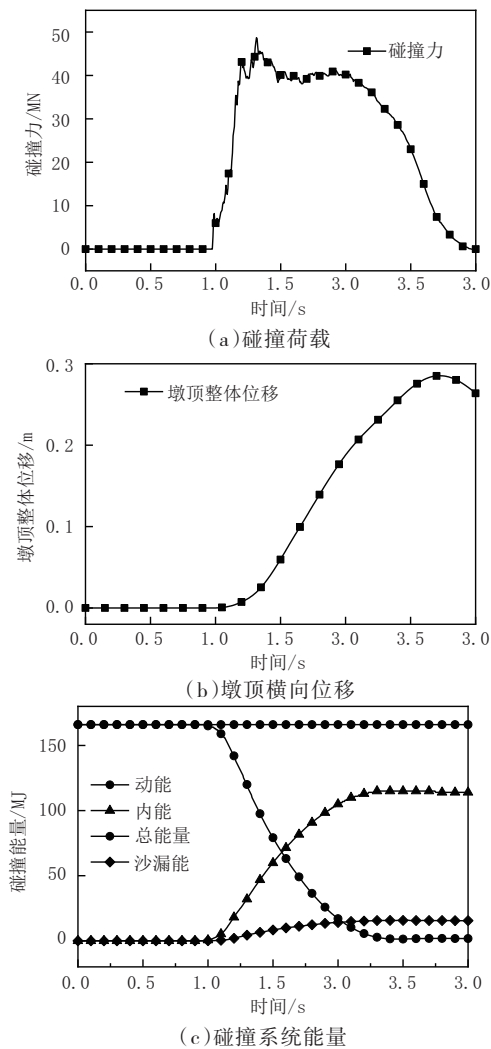


图5 工况二碰撞荷载、位移与能量

图6给出了8000DWT货船与P1桥墩斜撞情况下碰撞全过程的塑性损伤云图,可以看出,随着碰撞过程的进行,被撞墩的损伤范围不断扩大,同时塑性损伤程度相较工况二要更为严重。

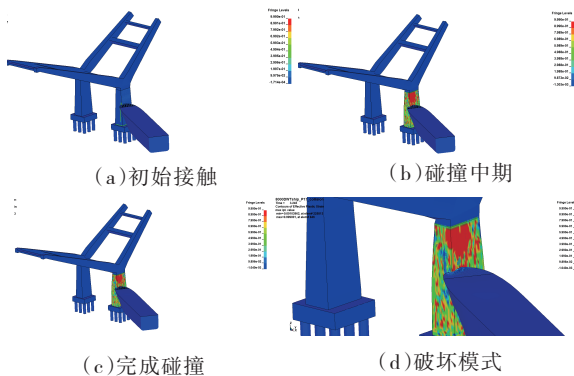


图6 工况二桥墩损伤与破坏模式

5 仿真分析与规范计算结果对比

5.1 各种规范的计算方法

(1)《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[1]计算方法

《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[1]第4.4.6条给出的船舶撞击力计算公式为:

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{c_1 + c_2}} \quad (2)$$

式中: F 为船舶撞击力,kN; γ 为动能折减系数; v 为船舶的撞击速度,m/s; α 为船舶行驶方向与墩台撞击点处切线夹角; W 为船舶载重,kN; c_1 、 c_2 分别为船舶的弹性变形系数和被撞墩台的弹性变形系数,m/kN。

(2)《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[2]计算方法

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[2]第4.4.1条给出的横桥向和顺桥向船舶撞击作用设计值按查表内插法取值。

(3)《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[3]计算方法

《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360—02—2020)^[3]第5.1.4条给出的船舶撞击力计算公式为:

$$F = 0.015 M^{0.70v} \quad (3)$$

式中: F 为船舶撞击力,MN; M 为船舶满载排水量,t; v 为船舶的撞击速度,m/s。

(4)美国AASHTO规范^[4]计算方法

美国AASHTO规范^[4]给出的轮船对桥墩的正面撞击力计算公式为:

$$P_s = 1.2 \times 10^5 v \sqrt{DWT} \quad (4)$$

式中: P_s 为船舶撞击力,N; DWT 为船舶重量,t; v 为船舶的撞击速度,m/s。

(5)欧洲规范^[5]计算方法

欧洲规范^[5]与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[2]计算方法相似,也是采用查表内插法计算横向桥和顺桥向的撞击力。

5.2 仿真分析与规范计算结果对比分析

各种不同分析计算方法计算得到的船舶最大碰撞力计算结果见表1。

表1 仿真分析与规范计算结果对比表

序号	计算方法	最大碰撞力 / MN	
		横桥向	顺桥向
1	《铁路桥涵设计规范》 ^[1]	24.6	8.2
2	《公路桥涵设计通用规范》 ^[2]	35.5	17.8
3	《公路桥梁抗撞设计规范》 ^[3]	54.7	54.7
4	美国 AASHTO 规范 ^[4]	69.6	69.6
5	欧洲规范 ^[5]	14.0	5.0
6	仿真分析(0°正撞/30°斜撞)	60.0/48.9	

通过对比分析发现,《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[1]除考虑船舶吨位和航行速度外,还考

虑了不同碰撞角度的影响,较其他规范规定的更为详细;《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[2]没有对不同碰撞角度下的碰撞力细分;《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[3]和美国 AASHTO 规范^[4]未考虑碰撞角度影响。

《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[3]和美国 AASHTO 规范^[4]计算结果与仿真分析得到的结果更为接近,其他规范计算结果均偏小,可能在某些碰撞工况下不能准确评估船舶碰撞荷载大小,进而导致在船舶撞击下出现较为严重的损伤。因此,对于考虑通航的一些重要跨江、跨海桥梁,为避免服役期间发生船舶撞击损毁的风险,应根据其所处的通航等级和船舶通行情况进行专门的船撞风险论证,通过船-桥碰撞动力时程分析,计算考虑动力效应放大后的船舶撞击力大小,同时可考虑增设必要的防撞设施,降低船舶撞击为桥梁结构带来的损伤。

6 结 语

本文采用有限元软件对船舶碰撞主墩进行了仿

真分析,得到了其碰撞力、结构变形、能量转化过程以及破坏模式,并采用我国铁路规范、公路相关设计规范、美国 AASHTO 规范、欧洲规范中规定的关于船舶碰撞力的计算方法进行了不同撞击工况下的船舶撞击力计算。通过研究发现,在船舶撞击下,被撞墩的墩顶均出现较为显著的横向位移,并且在船舶斜撞(碰撞角度为 30°)作用下,墩顶的横向位移要显著大于正撞工况。同时发现,部分规范计算的船舶撞击力在某些工况下偏不安全,不能保证桥梁结构在船舶撞击下的安全,应当引起设计者注意。

参考文献:

- [1] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].
- [2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] JTG/T 3360-02—2020,公路桥梁抗撞设计规范[S].
- [4] Units C, Edition T. AASHTO LRFD bridge design specifications[J]. 2010.
- [5] European Committee for Standardization. BS EN1991-1-7 Eurocode 1—actions on structures—part 1-7: general actions—accidental actions [S].

~~~~~  
(上接第 210 页)

## 5 结 语

该文通过对永定河特大桥 1:40 的全桥模型振动台试验研究,得到以下结论:

(1)模型桥模态测试结果和计算结果吻合较好,说明了模型的可靠性。

(2)在 E2 地震动作用下,实桥主梁跨中底板最大应变值为 0.034%,小于钢材的弹性应变为 0.2%,实桥整体结构处于弹性状态。

(3)实桥支座在 E1 和 E2 地震动作用下竖向承载力满足要求。

(4)地震动输入结构后,结构竖弯频率与 TMD 设计频率越接近,竖向位移越大,TMD 峰值减震率越大。

### 参考文献:

- [1] 闫聚考,彭天波,李建中.泰州长江公路大桥振动台试验——试验设计及抗震结构体系试验结果分析[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(2):357-362.
- [2] 张超,陈永健,黄颖,等.基于三台阵振动台的多塔自锚式悬索桥抗震性能试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),2013,41(6):1090-1097.
- [3] 高文军,唐光武,黄福伟,等.厦漳跨海大桥北汉主桥振动台试验研究[J].桥梁建设,2013,43(4):7-13.
- [4] 王雷,徐艳.榕江大桥主桥振动台试验研究[J].世界地震工程,2015,31(3):39-44.
- [5] 房贞政,张超,陈永健,等.基于三台阵振动台的多塔斜拉桥试验研究[J].土木工程学报,2012,45(S1):25-29.
- [6] 闫聚考,李建中,彭天波,等.大跨度悬索桥主引桥碰撞效应振动台试验及数值研究[J].振动与冲击,2017,36(7):234-240.
- [7] 韩强.永定河特大桥振动台试验研究[R].北京:北京工业大学,2018.