

株洲湘江八桥防船撞设施设计及仿真计算分析

顾民杰¹, 伏耀华², 王君杰³

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.上海船舶运输科学研究所有限公司, 上海市 200135;

3.同济大学, 上海市 200092]

摘要:以株洲湘江八桥为工程背景,结合跨江桥梁的防撞研究特点,依据桥区环境特点及大桥主通航孔桥墩防船撞要求,针对性提出释能附体防撞方案。基于 MSC.Dytran 进行有限元仿真分析,模拟船舶及桅杆在失控状态下以漂流速度撞击大桥下层慢行系统梁体的工况,计算桅杆撞击力大小,确定警示拦截方案,验证防船撞设施的设防效果,确保防船撞方案设计的可行性,为实际工程应用提供依据,最大程度保护大桥的防船撞安全。研究结果认为:方案具有设施占用航道空间少,制造和维护便利,耐波性和恶劣环境适应性佳等特点,且具有良好的经济性。

关键词:跨江桥梁;释能附体防撞方案;有限元数值模拟;桅杆撞击力

中图分类号: U443.8

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)08-0083-05

0 引言

株洲湘江八桥(清水塘大桥)为跨越湘江的特大型桥梁工程,主桥为跨径 100 m+408 m+100 m 中承式钢桁拱桥。桥面按人车上下分离式布置,上层为双向 6 车道城市主干路,下层布置慢行系统,其下层梁体通过吊杆下挂于上层主梁结构。大桥为国家重点推进项目——清水塘老工业区改造的配套基础设施工程,其建设对改善现状交通、加强两岸联动、推动片区转型、促进片区发展具有里程碑式意义。

湘江是长江七大支流之一,也是湖南境内最大的河流,下游连通长江黄金水道,具有通江达海的优越水运自然条件。湘江八桥桥位属湘江长沙综合枢纽库区 II 级航道,桥区跨越湘江水道,通航环境较为复杂,桥梁存在被船舶撞击的风险。因此,设计一个合理、经济的桥梁防船撞结构设施,化解船撞风险,是大桥设计中的一个重要环节。

根据港口航道规划,大桥桥区最大通航船型为 3 000 吨级船舶,基于该防船撞等级,根据前期船舶撞击风险分析的结果,设计了一种可行的防撞设施来保护桥墩。为验证防撞设施的设防效果,本文基于有限元分析技术^[1],利用 MSC-Dytran 仿真模拟了一艘 3 000 吨级货船以 4.42 m/s 的速度分别撞击桥墩

和防撞设施的工况,计算分析在设防工况下的船舶撞击影响。同时仿真模拟了 2 000 吨级船舶在失控状态下以漂流状态撞击桥梁时桅杆和大桥下层主梁碰撞的工况,计算桅杆撞击力大小,确定警示拦截方案,以减小对大桥的撞击力,最大程度地保护桥梁的安全。

1 桥梁防撞方案

桥梁的防撞体系分为主动防撞和被动防撞。主动防撞结合桥区水域实际情况和通航环境,通过完善助、导航设施,建立桥区主动防撞预警系统,对过往船舶、工程船舶、靠离泊船舶实施有效监控,防止船撞桥事件的发生。考虑到本工程毗邻港区,无法通过主动防撞预警降低港区船舶失控漂流撞桥风险,故被动防撞设施尤为重要。

被动防撞方案的形式多种多样,有释能附体防撞系统、群桩防撞系统、人工岛防撞系统等。根据桥墩的自身抗撞能力、桥墩位置、桥墩外形、水流速度、水位变化情况、通航条件、碰撞速度等因素综合分析,本项目拟采用浮式释能附体系统作为被动防撞设施。

释能附体防撞设施具有诸多优点:占用航道空间少;易于制造、安装和维护;对撞击船舶的能量(动能)进行消能缓冲,使船舶结构不能直接撞击桥墩结构;在各种水位条件和各种船舶的装载状态下,撞击的船舶结构不能直接触到墩壁,水下的球艏部分不能直接撞到墩身;结构形式和结构布置合理,使船撞事故发生后,通过防撞结构的变形、压溃和撕裂,拨动船头方向,让碰撞船舶带走更多能量,减少桥梁吸收的能量,

收稿日期: 2022-02-18

作者简介: 顾民杰(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,从事桥梁设计工作。

降低船撞力;一旦发生船撞,结构易损,但拆除更换较容易。综上,释能附体防撞设施具有很好的可靠性、安全性和经济性。

浮式防撞设施内部通过型材、板材、肘板等组成骨架,外部焊接钢板,内外层间填充吸能材料,形成一个整体后附着在承台外侧。防撞设施外部设计成流线形,以改善波流力,同时在船撞时可以有效调拨船首,使撞击船舶的能量大部分保留在船舶上,最大限度地减少桥墩、船舶和防撞设施的损伤。

主墩浮式释能附体防撞设施总长 45.7 m, 型宽 13.2 m, 型深 3.8 m。根据防撞功能的不同采用变截面的形式,主迎撞侧厚 4.5 m,次迎撞侧厚 2.0 m。为减轻结构重量和减小波流力的影响,释能附体外板开有减轻孔。释能附体外部安装护舷,小型船舶撞击时,护舷起到初期缓冲和消能的作用,同时可对船舶加以保护。图 1、图 2 分别为防撞设施平面和立面示意图。

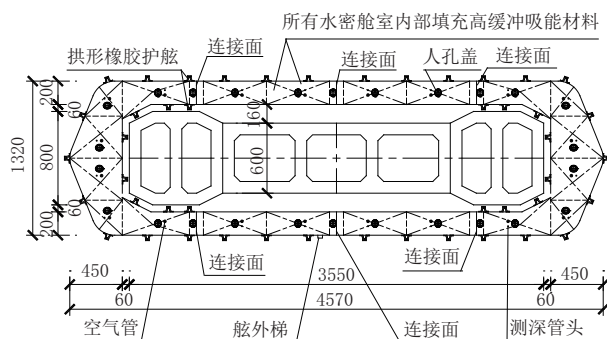


图 1 主墩释能附体防撞设施平面示意图(单位:cm)

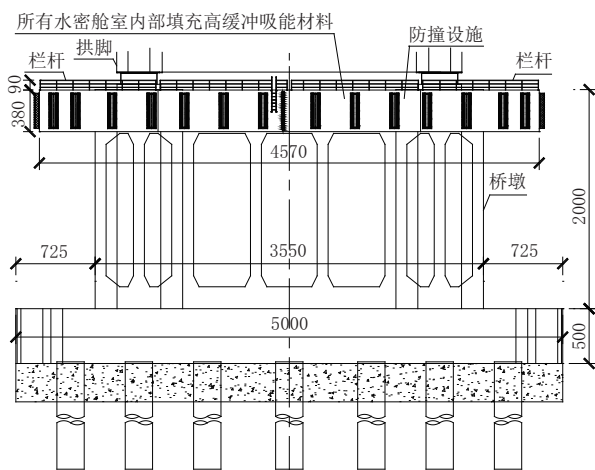


图 2 主墩释能附体防撞设施立面示意图(单位:cm)

2 有限元仿真分析

利用 Patran 建立船桥碰撞有限元模型,定义模型材料属性、载荷、速度、约束等条件,利用 MSC.Dytran 进行仿真计算^[2],验证防撞设施的吸能效果。

2.1 有限元模型

有限元模型中,撞击船的船体后半段采用刚性板

单元模拟,船艏部采用可变形的弹塑性板单元模拟。对碰撞区内的船体结构,计算模型做了比较精细的描述,对于远离碰撞区的结构,由于在碰撞中基本上不发生变形,因此为了减小模型规模、提高计算效率,简化为由船体外板和甲板组成的刚性模型,船艏和后半段中间采用了过渡单元连接^[3]。大桥桥墩采用刚性板单元模拟,防撞钢套箱采用弹塑性板单元模拟。有限元模型如图 3 至图 6 所示。

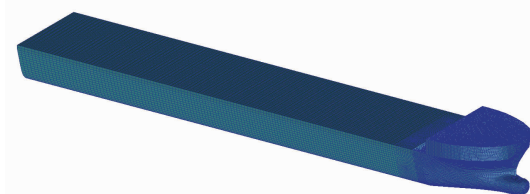


图 3 3 000 吨级船舶有限元模型

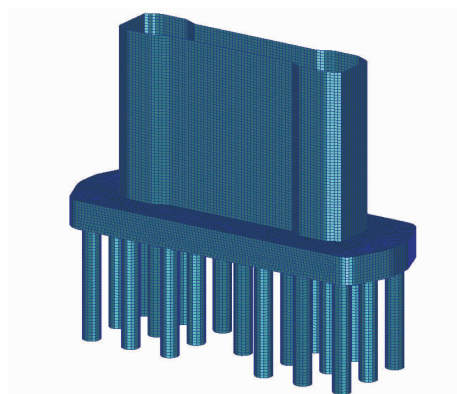


图 4 主墩有限元模型

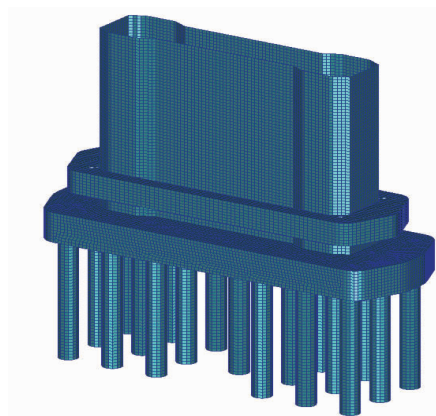


图 5 主墩与钢套箱有限元模型



图 6 船与钢套箱碰撞有限元模型

2.2 防撞计算工况

撞击工况根据 AASHTO 规范给出的建议选取,防撞船型根据规划考虑 3 000 吨级货船满载高水位

以 4.42 m/s 的速度分别正面撞击桥墩和钢套箱防撞设施,并对防撞效果进行分析(见表 1)。

表 1 设计防撞计算工况表

船型	吨级	满载排水量 /t	速度 /(m·s ⁻¹)
货船	3 000 吨级	4 200	4.42

2.3 船和防撞钢套箱碰撞有限元模拟计算结果

非线性动态有限元模拟技术可以对结构细节和碰撞时间历程给出良好的仿真效果^[4],且较为精确地计算碰撞力。3 000 吨级货船以 4.42 m/s 的速度正面撞击桥梁主墩防撞钢套箱时碰撞力及碰撞体响应的计算结果见图 7 至图 13。

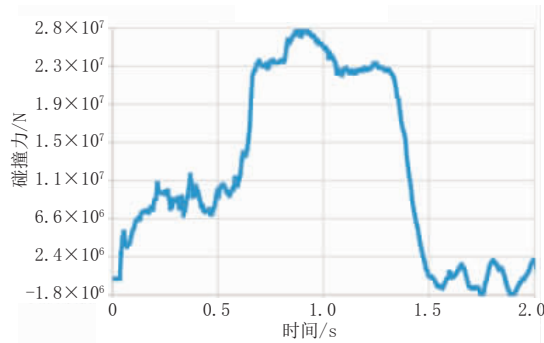


图 7 碰撞力时程曲线

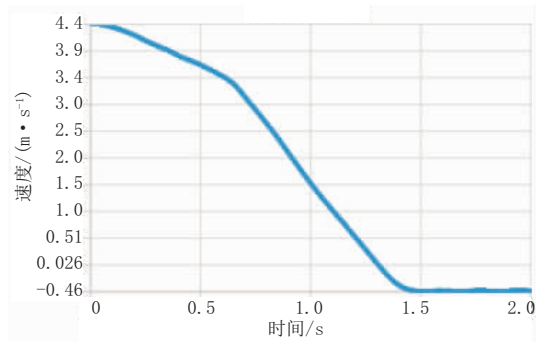


图 8 船舶速度时程曲线

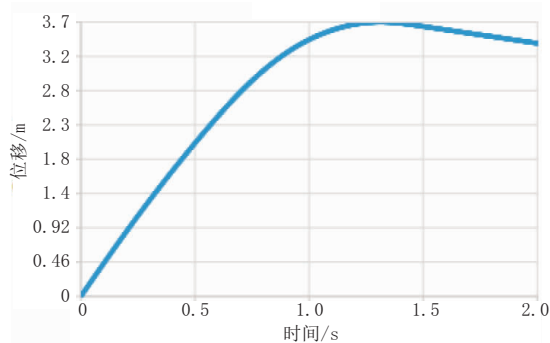


图 9 船舶位移时程曲线

通过计算分析可得,3 000 吨级货船在满载状态下以 4.42 m/s 的速度正面撞击桥墩防撞钢套箱,最大碰撞力为 27.7 MN,设防前的最大碰撞力为 37.1 MN,主墩的船舶撞击力降低了约 25.3%。

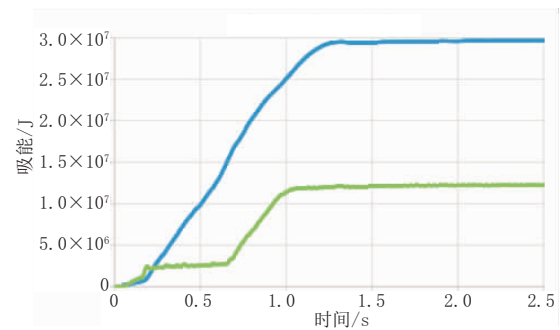


图 10 船首和套箱吸能时程曲线

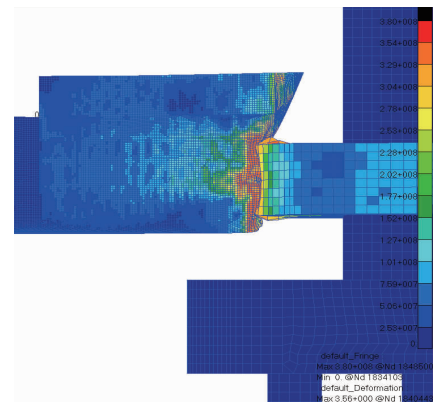


图 11 1.0 s 时碰撞变形及等效应力分布图

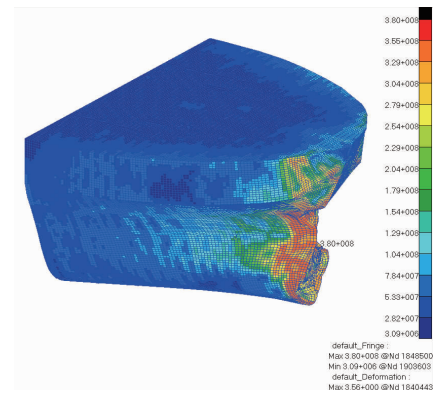


图 12 1.0 s 时船艏变形及等效应力分布图

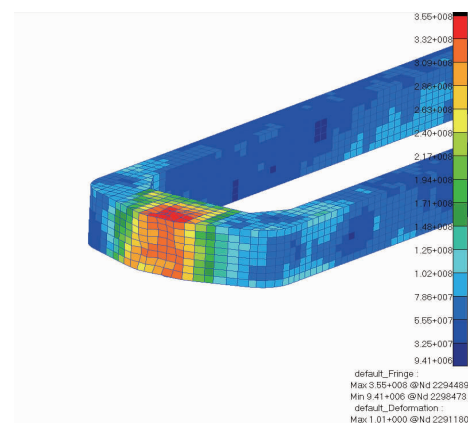


图 13 1.0 s 时钢套箱变形及等效应力分布图

主墩采用释能附体防撞设施后,船桥碰撞过程有了缓冲区域。船舶撞击后,艏部与防撞设施直接碰

撞,碰撞区域内的释能附体局部产生重大压溃和变形。在防撞套箱的各构件中,外钢板吸收能量最多,内钢板吸收的能量次之。水平筋板的设置对系统各部分冲击力、冲击深度和吸收能的影响大于竖向筋板^[5]。碰撞过程的总能量是 44.9 MJ,防撞设施吸收的能量为 12.7 MJ,防撞设施的释能效率为 28.2%。同时,船艏较设防前破损范围有所减小,防撞设施起到了较好的缓冲和消能作用。

3 船舶桅杆撞击桥梁计算分析

3.1 船舶桅杆撞击下层桥面情况分析

根据《内河通航标准》规定,Ⅱ级航道过河建筑物通航净空高度不小于 10.0 m。主桥边跨为 2 000 吨级内河船舶通航孔,吃水线以上高度为 12.0 m,因而在最高通航水位时,存在桅杆撞击下层慢行系统桥面的风险,如图 14 所示。

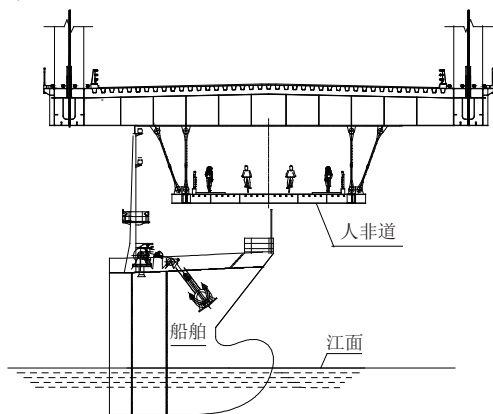


图 14 桅杆撞击桥梁人非道示意图

3.2 桅杆撞击工况有限元模拟

采用有限元模拟船舶桅杆和桥梁碰撞区域主梁,设定对应的边界条件,进行有限元仿真计算分析(见图 15)。

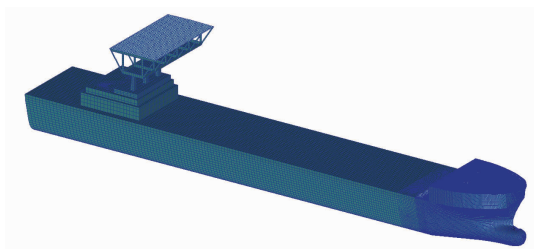


图 15 2 000 吨级船舶桅杆撞击钢梁结构的计算模型

3.3 桅杆撞击工况

由于 2 000 吨级船舶仅在失控状态下有撞击桥梁的可能,因此选取漂流状态进行计算。计算工况见表 2。

3.4 计算结果

船舶撞击力及桅杆破损响应结果如图 16~18 所

表 2 桅杆撞击桥梁计算工况表

工况	船型	撞击位置	速度/(m·s ⁻¹)	备注
F1	2 000 吨级	人非道	1.90	设防前
F2			0.70	警示拦截设防后

示,可知若船舶在失控情况下以漂流速度撞击大桥下层桥面,在碰撞过程中,随着碰撞时间的进程,桅杆变形逐步增大,碰撞力也逐步增加,最后桅杆破

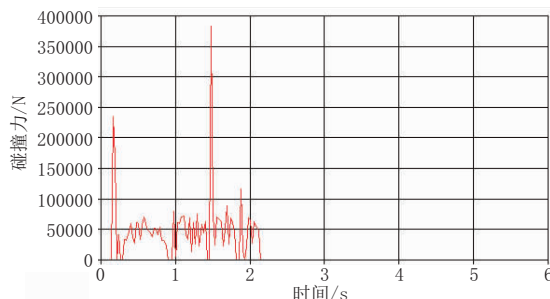


图 16 船舶撞击力时程曲线(设防前)

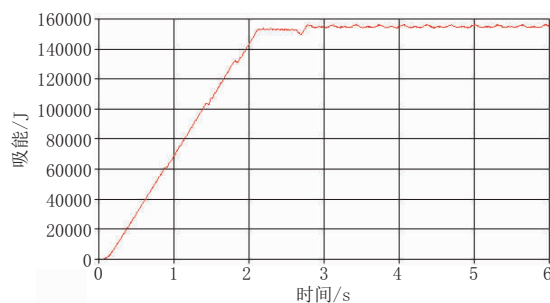


图 17 桅杆破损吸能曲线(设防前)

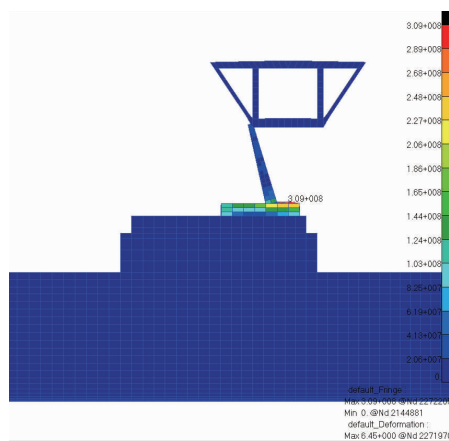


图 18 3 s 时桅杆破损变形应力云图(设防前)

根据计算结果(见表 3)可知,设防前若 2 000 吨级船舶漂流撞击大桥下层桥面,最大撞击力为 0.38 MN,警示拦截设防后,船舶撞击速度降低,2 000 吨级船舶漂流撞击横梁最大撞击力降为 0.24 MN,撞击力降低约 37%,因此警示拦截设防十分必要。

4 结 语

(1)结合桥位处航道、船型、桥墩结构等实际情

表 3 桅杆撞击桥梁计算结果

工况	船型 (DWT)	速度 $/(m \cdot s^{-1})$	碰撞 角度	最大撞击力 /MN	桅杆破损吸能 /MJ
1	2 000 吨级	1.9	正撞	0.38	0.158
2	2 000 吨级	0.7	正撞	0.24	0.100

况,对主墩采用释能附体防撞方案,不仅具有良好的防撞性能,还兼具经济性和易维护性。

(2)通过有限元分析和对比研究,主墩采用释能钢套箱防船撞设施。该设计防撞释能效率可以达到 28.2%。此防撞设计方案具有较好的设防效果,对桥梁和船舶起到了很好的保护作用。

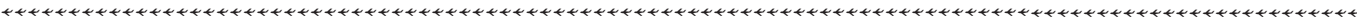
(3)对通航水域的桥梁,需注意通航净空高度和船舶实际吃水线以上高度的关系,若非通航孔通航净高不满足规范要求,需按规定设置明显的警示标志,并采取防止船舶碰撞的保护措施,加强通航监

管,防止船舶的桅杆撞击大桥主梁,造成经济损失。

(4)在本项目中首次采用有限元分析的方法模拟了船舶桅杆撞击大桥主梁的情况,精准计算出撞击力大小,为设防设施的选择提供了可靠的理论基础,保障了大桥和船舶的安全。

参考文献:

[1] 刘建成,顾永宁.船桥碰撞力学问题研究现状及有限元仿真计算[C]// MSC.Software 中国用户论文集.北京:MSC. Software 公司,2001.
[2] Petersen M J.Dynamics of ship collision[J]. Ocean Engineering,1982 (4):295-329 .
[3] 梁文娟,金允龙,陈高增.船舶碰撞力计算及桥墩防撞[C]// 中国公路学会桥梁和结构工程学会 2000 年桥梁学术讨论会论文集. 北京:中国公路学会桥梁和结构工程学会,2000.
[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(6):1065-1070.
[5] 刘建成.船桥碰撞力学与防撞装置研究[M].上海:上海交通大学船舶与海洋工程学院,2002.



《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

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com