

内河桥梁考虑水动力效应的防撞研究

严杰^{1,4}, 于国军¹, 杜成斌³, 葛晶², 何骏¹

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏宏远科技工程有限公司, 江苏 常州 213161;

3. 河海大学 力学与材料学院, 南京 210098; 4. 常州市武进建筑设计院有限公司, 江苏 常州 213161)

摘要: 内河跨越高等级航道的桥梁普遍具有跨径大、通航船舶尺度大且密度高的特点,这使得其面临的船舶撞击风险尤为突出。然而,以往的桥梁抗撞设计往往考虑因素不够全面,通常采用简化的静力计算或忽略环境耦合效应,尤其对水流、船体运动与结构响应之间的复杂耦合作用分析不足,导致设计可能与实际动力冲击状况存在偏差。为更精确地评估新建桥梁的抗撞性能需求,并系统优化其防撞设计方法,本研究以某内河新建大跨桥梁为工程背景,考虑水流动力因素,建立了精细化的流固耦合船桥碰撞数值模型,以模拟真实的船-水-桥相互作用过程。利用 Hypermesh 进行高精度的有限元网格划分和前处理建模;运用 LS-DYNA 显式动力分析软件,进行船舶撞击过程的瞬态非线性仿真,捕捉碰撞中的接触、大变形和能量耗散;结合 Midas Civil 软件对桥梁整体结构在撞击荷载下的响应进行辅助分析与验证。系统量化船舶撞击力时程、桥梁关键构件的抗力响应以及船体结构损伤程度等关键性能指标。结果表明:水流对船桥碰撞影响较大,在船-桥模型和船-防撞-桥的模型中作用机制不同,防撞研究应考虑水动力效应;桥梁防撞应从加强桥梁本体抗撞性能和加装被动防撞措施两个方面考虑;研究结果揭示了水动力效应对船舶和防撞设施的作用机理,合理考虑水动力效应能够优化防撞设施设计。

关键词: 桥梁防撞装置; 流固耦合; 有限元分析; 风险评估

中图分类号: U698

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0153-10

Research on Collision Prevention of Inland River Bridges Considering Hydrodynamic Effects

YAN Jie^{1,4}, YU Guojun¹, DU Chengbin³, GE Jing², HE Jun¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu China;

2. Jiangsu Hongyuan Science and Technology Engineering Co. Ltd., Changzhou 213161, Jiangsu China;

3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Changzhou Wujin Architectural Design Institute Co. Ltd., Changzhou 213161, Jiangsu China)

Abstract: Bridges spanning high-grade inland waterways generally feature large spans, large navigational vessel sizes, and high traffic density. As a result, these bridges face a particularly high risk of ship collision. However, previous bridge anti-collision designs often failed to comprehensively account for key factors, typically relying on simplified static calculations or neglecting environmental coupling effects, particularly the complex interactions among water flow, vessel motion, and structural response. This can lead to significant discrepancies between design assumptions and actual dynamic collision conditions. To more accurately assess the anti-collision performance

收稿日期: 2025-06-03

修回日期: 2025-09-22

接受日期: 2025-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12372091);江苏省重点研发项目(BE2022162);常州市科技项目(CF20240032)

作者简介: 严杰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为桥梁防护

通信作者: 于国军(1981-),男,教授,博士,主要研究方向为防灾减灾工程,Email: gju9@ujs.edu.cn

引用格式: 严杰,于国军,杜成斌,等. 内河桥梁考虑水动力效应的防撞研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 153-162.

Yan J, Yu G J, Du C B, et al. Research on collision prevention of inland river bridges considering hydrodynamic effects[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 153-162.

requirements of newly built bridges and systematically optimize their design, this study uses a newly constructed large-span inland river bridge as the engineering background and develops a refined fluid-structure interaction numerical model that incorporates hydrodynamic effects to simulate realistic ship-water-bridge interactions. Specifically, HyperMesh was used for high-precision finite element meshing and preprocessing; LS-DYNA was employed to perform transient nonlinear simulations of ship collisions, capturing contact behavior, large deformations, and energy dissipation; and Midas Civil was applied to assist in analyzing and validating the global structural response of the bridge under impact loads. Key performance indicators were systematically quantified, including the time histories of ship impact forces, the resistance responses of critical bridge components, and the extent of structural damage to the vessel. The results show that hydrodynamic effects significantly influence ship-bridge collisions, with distinct mechanisms observed in ship-bridge and ship-anti-collision-bridge models. Therefore, hydrodynamic effects should be explicitly considered in bridge anti-collision research. Bridge anti-collision measures should focus on both enhancing the inherent impact resistance of the bridge structure and installing passive protective systems. The findings elucidate the mechanisms by which hydrodynamic effects act on vessels and protective facilities, demonstrating that proper consideration of hydrodynamics can significantly improve the design of anti-collision systems.

Key words: bridge collision protection devices; fluid-structure interaction; finite element analysis; risk assessment

0 引言

为适应交通运输业的快速发展,内河航道等级正逐步提升,通航船舶的尺度和通航密度越来越大,给跨航道桥梁增加了船撞风险^[1]。新建桥梁为适应通航需求,大多选择大跨径的设计方案,以连续刚构桥、斜拉桥、悬索桥居多。然而,船舶与桥梁的碰撞事故时有发生,给人民生命财产安全带来极大威胁,同时也影响内河交通运输的正常运行。因此,对内河大跨桥梁的船撞风险进行分析评估,研究水动力效应对船桥碰撞的影响,对于提高桥梁安全性、保障内河交通安全具有十分重要的意义^[2-4]。

唐长刚等^[5]通过模型实验研究考虑水动力影响下1010吨货船撞击桥墩的情况。曾嵩等^[6]对斜拉桥对比研究静力响应和动力响应,得出针对船撞问题采用动力分析方法更为准确。许多学者对大型船舶和大跨度桥墩进行碰撞研究,得出一系列撞击力经验公式和修正方法^[7-11]。王君杰和郭进^[12]借鉴地震反应谱概念提出船撞设计的冲击谱方法,更准确更高效地对船撞问题进行分析评估。聂利芳^[13]设计了一种减震钢阻尼防撞装置,评估了该设计的合理性。张文明等^[14]研究了大跨度刚构桥的船撞力和抗撞性能,为内河大跨桥梁抗撞研究提供参考。近年来许多学者通过流固耦合研究水流对船桥碰撞的影响,邹永超和贾恩实^[15]针对柔性浮动式防撞设施的合理尺度进行研究,提出了针对不同工况的最小保障尺度取值方法。王君杰等^[16]开展室内波流相关实

验,分析了独柱墩浮动式防撞设施的起伏运动影响,提出了接触力系数计算方法。叶乔丹和王君杰^[17]研究了防船撞装置对桥梁下部结构波浪荷载的影响,分析了施加防船撞装置后结构波浪荷载的变化。Fan等^[18]研究了水流对船桥碰撞的影响,并提出了简化计算方法。

自浮式防撞装置与桥梁协同耗能,形成船-装置-桥耦合体系。20世纪90年代起得到应用,日本的Bisan-Seto大桥采用了钢质套箱作为防撞措施,其在湛江海湾大桥得到更深入研究^[19]。众多学者通过数值模拟和碰撞试验对柔性防撞装置进行了有效性评估^[20]。方海等^[21]研究了自浮式复合材料防撞设施,优化了耐腐蚀性和弹性性能。Ge等^[22]分析钢制圆管填充耗能芯材的多次碰撞响应,系统地开展了动、静力试验以及数值仿真研究,为自浮式防撞装置的设计和优化提供了重要的理论依据。

针对桥梁防船撞问题,目前已有诸多设计方法和加固手段。在初步设计中,可以通过优化桥墩截面设计或加装防撞装置降低桥墩撞损风险,具体方式有增大桥墩截面面积、优化配筋率、在设防位置加装防撞装置等。

1 工程概况

1.1 桥梁设计资料

以内河某大跨径斜拉桥为研究对象,设计采用(112.75+228+112.75)m双塔斜拉桥跨越航道,与规划航道中心线交角为94°。桥梁主体布置见图1。

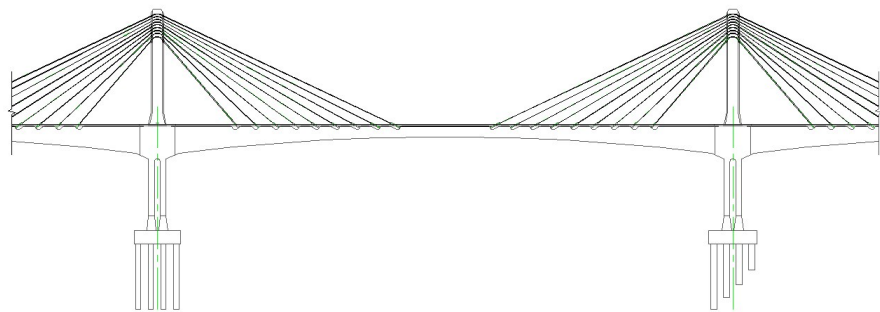


图1 桥梁整体布置图
Fig.1 Overall layout of the bridge

1.2 航道情况

现状航道等级为Ⅲ级,航道规划等级为Ⅱ级。水上运输较为繁忙,船舶密度较大,水深条件普遍较好,且河道较为顺直,没有水下碍航物分布。按3000吨级货船对通航孔两侧桥墩进行防撞设计。设防船型参数见表1。

表1 设防船型参数表
Tab.1 Parameters of design vessel types

船型/DWT	型宽/m	长度/m	吃水/m
1000	11.0	55	2.5
3000	15.8	75	3.3

建立1000吨级和3000吨级船舶模型,为模拟碰撞过程船舶接触和变形的真实情况,船舶内部结构按船级社提供的图纸精细建模,船舶网格模型见图2。

1.3 流体模型

大部分船撞专题研究在处理水流对碰撞的影响时,采用附加质量法,将水流的作用等效为船舶的附加质量,《公路桥梁抗撞设计规范》也是采用这个方法。当船舶吃水深、尺度大时,水流对碰撞过程撞击力和动能转移影响复杂,采用附加质量法会严重低估撞击力和碰撞作用的时程,因此本文建立高精度流固耦合船桥碰撞模型。

流体模型主要由两部分介质组成,分别为空气和水,在LS-DYNA有限元软件中采用ALE多材料

单点积分单元来模拟多介质模型。流体的材料模型选用关键字MAT_NULL,状态方程选用关键字EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,通过改变方程中各参数来实现不同介质的模拟,ALE网格允许平移、转动和缩放,其描述的流体动力学与欧拉单元有所差异,各介质材料参数如表2所示。

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_p。$$
 (1)

表2 流体材料参数
Tab.2 Fluid material parameters

介质	材料参数/方程系数	数值
空气	密度/(kg·m ⁻³)	1.184 5
	截断压力/Pa	-10
	黏性系数/(N·s·m ⁻²)	1.844×10 ⁻⁵
	C ₄	0.4
	C ₅	0.4
	E ₀ /Pa	2.533×10 ⁵
	V ₀	1
水	密度/(kg·m ⁻³)	998.21
	截断压力/Pa	-100
	黏性系数/(N·s·m ⁻²)	8.648×10 ⁻⁴
	C ₀ /Pa	1.013×10 ⁵
	C ₁ /Pa	2.25×10 ⁹

ALE流体的质量、动量守恒采用连续性方程和纳维-斯托克斯(N-S)方程表示,在笛卡尔坐标系下的质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - (v_i - u_i) \frac{\partial \rho}{\partial x_i}，$$
 (2)

其中:ρ为流体密度;∂t为时间;∂v为流体速度;∂x为长度微量;∂u为网格速度。

流体模型总体尺寸为120 m×30 m×15 m,网格大小为0.2 m,高度范围内定义上部5 m为空气,下部15 m为水,1000吨级船舶吃水2.5 m,船体内填充

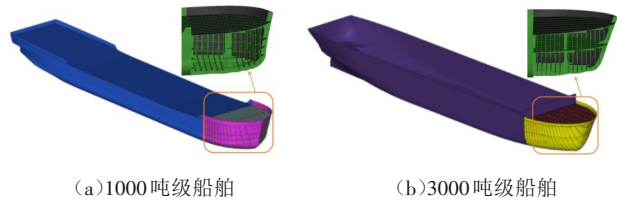


图2 船舶网格模型
Fig.2 Finite element mesh model of the vessel

空气ALE材料组。在远离碰撞区域的水体中,由于碰撞过程产生的力学扰动影响可忽略不计,采用无反射边界条件对无限域流体动力学行为进行数值模拟。

船舶分为船艏和船身,船艏采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 动态塑性本构模型来模拟船用低碳钢材料,使用 Cowper-Symonds 模型来反映船体钢材应变速率效应。船身因远离碰撞区域,定义刚体材料来提高计算效率。

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right], \tag{3}$$

式中: σ_y 为动态屈服应力; σ_0 为初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; C, P 为 Cowper-Symonds 应变率参数,对于低碳钢取 $C=40.4, P=5$ 。

采用桩端固定约束边界条件模拟基桩的嵌固效应,在船舶与桥墩结构间设置 20 m 初始间距以确保水流场充分发展,研究船舶行进诱导的水动力扰动对桥墩结构的影响机制。碰撞接触采用面面自动接触算法,动摩擦系数为 0.15,静摩擦系数为 0.2,船-桥-水流固耦合动力相互作用模型见图 3。

数值仿真结果表明,流固耦合模型(FSI)与碰撞分析模型(CAM)在船舶-桥墩碰撞动力学行为上呈现较大差异。图 4 中 FSI 模型的碰撞持续时间大于 CAM 模型,FSI 模型船-桥碰撞过程中船舶受到较大的水阻力,撞击力时程曲线相对平缓,而 CAM 方法的撞击力时程曲线波峰较多。其本质机理可归结于流固耦合效应引发的多物理场相互作用,CAM 模型因忽略流体介质影响,导致船舶-桥墩接触后迅速分离;而 FSI 模型中,水体通过环状束缚流场产生的逆向压力梯度与附加质量效应,显著延长了有效接触时间,减少了撞击力曲线的波动幅值。

2 确定船舶撞击力

2.1 船舶偏航速度

美国 AASHTO 建议的确定船舶设计撞击速度的方法为:在航道范围内,船舶以正常速度行驶;在航道中心线至三倍船长以外处,船舶以水流速度漂流,水流速度可按航道所在处的多年平均流速确定;此两者之间的区域,设计船速按直线内插确定。《公路桥梁抗撞设计规范》中也是采用此方法来确定船舶撞击速度。

$$V = \begin{cases} V_T, & X \leq X_c, \\ \frac{X_L V_L - X_c V_L - X(V_T - V_L)}{X_L - X_c}, & X_c < X < X_L, \\ V_L(V_{\min}), & X > X_L, \end{cases} \tag{4}$$

式中: V 为设计船舶撞击速度; V_T 为船舶在航道内的正常行驶速度; $V_{\min}$ 为船舶最小设计撞击速度,可由所在水域的多年平均流速确定; X 为桥墩中心线至航道中心线的距离; X_c 为航道中心线至航道边缘的距离; X_L 为航道中心线至 3 倍船长处的距离。按照代表船型的船长尺度,确定最高通航水位下撞击主塔的速度为 3.9 m/s,撞击边墩的速度为 2.8 m/s。

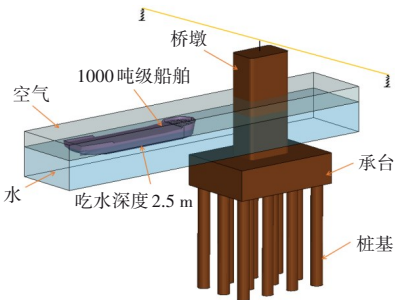
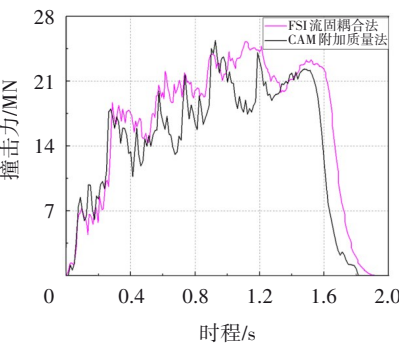
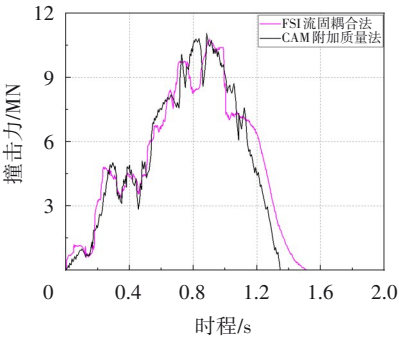


图3 流固耦合动力相互作用模型
Fig.3 Fluid-structure interaction dynamic model



(a)3000吨级船舶撞击力对比



(b)1000吨级船舶撞击力对比

图4 考虑水动力与否的船桥撞击时程曲线对比
(船-桥-水模型)

Fig.4 Comparison of ship-bridge impact time-history curves with and without hydrodynamic effects (ship-bridge-water model)

2.2 船舶冲击力

2.2.1 数值模拟

为了预测最真实的撞击力,综合考虑水流、船舶形状、桥墩构造等因素,采用LS-DYNA有限元显式动力算法,建立流固耦合(FSI)船-桥-水碰撞模型,如图5所示。同时结合附加质量法(CAM)和各规范公式计算结果,对比分析。

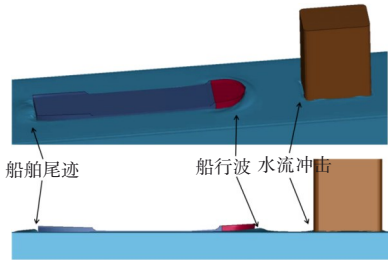


图5 船舶引起的水动力扰动

Fig.5 Ship-induced hydrodynamic disturbances

2.2.2 规范公式法

1)AASHTO规范

美国规范根据船撞刚性墙试验所得数据经过拟合而得到的,适用于船正撞桥墩的情况,但未计入撞角度的影响。

$$P_t=0.98(DWT)^{1/2}(v/8)=0.122v(DWT)^{1/2}, \quad (5)$$

式中: P_t 为船等效正面撞击力,MN;DWT为船载重量,t; v 为船速度,m/s。

2)EUROCODE规范

依据欧洲规范中的相关规定,船舶最大撞击力公式为:

$$P=v\sqrt{Km}, \quad (6)$$

式中: P 为碰撞体的撞击力,N; v 为船速度,m/s; K 为碰撞体的等效刚度,N/m; m 为碰撞体的质量,kg。

3)《公路桥梁抗撞设计规范》

我国公路行业规范将水动力效应通过附加质量表达,计算公式为:

$$F=a\eta\gamma V[(1+C_m)M]^{0.62}. \quad (7)$$

各计算方法的计算结果见表3,速度较低时(2~3 m/s)撞击力的仿真计算结果与采用内河船舶刚度的欧洲规范公式相近;当速度较高时(3~5 m/s),仿真计算结果与我国《公路桥梁抗撞设计规范》、美国AASHTO规范公式等计算结果较为接近,采用数值模拟计算结果对桥梁进行安全评估。

2.2.3 计算结果

由仿真结果可知,船舶在航行过程中,由于水流的黏性等特性,船舶和舷侧周围会形成船行波,并向远端发展,船舶尾迹会产生负压涡流,水流会对桥墩表面产生冲刷。在进行船舶碰撞数值模拟时,水动力效应的影响应考虑在内。在撞击完成后,由于水动力效应,船舶与桥墩还会继续接触,而不考虑水动力效应模型中船舶与桥墩会完全分开。因此考虑水动力效应的流固耦合模型计算结果更准确。

根据计算结果可知,同一工况通过不同规范公式计算结果亦有差距,其中公路桥梁抗撞设计规范结果与数值模拟结果更为贴近。

3 桥梁本体抗力分析

3.1 建立模型

在船撞力的作用下,墩柱在墩底处产生最大弯矩和剪力,桩基在桩顶处产生最大弯矩和剪力,一般情况下,可以将墩柱底截面和桩顶截面作为最危险控制截面进行计算。通过Xtract软件进行桥墩最危险截面处弯矩-曲率曲线的模拟计算。在截面分析软件Xtract中输入材料参数,按照实际截面尺寸和配筋建模,网格的划分根据截面尺寸和分析效果进行划分,得出弯矩-曲率曲线。钢筋混凝土构件的弯矩-转角的关系见图6。弯矩-曲率分析一般分两个阶段,分别是混凝土开裂、钢筋屈服两个阶段,该墩柱具有正常配筋率,受拉钢筋首先屈服,取钢筋屈服时的弯矩作为截面的极限弯矩。

建立的极限弯矩计算模型控制截面的截面形状及网格划分情况见图7。为了确定该斜拉桥主桥自身内力,通过MIDAS建立桥梁整体模型,如图8所示。

表3 船舶撞击力计算表(正撞)

Tab.3 Calculation of ship impact forces (head-on collision)

船型/DWT	桥墩	速度/(m·s ⁻¹)	AASHTO/MN	EUROCODE/MN	公路桥梁抗撞设计规范/MN	数值模拟/MN
1000	主塔	3.9	14.8	8.7	10.2	10.6
3000	主塔	3.9	25.6	15.1	24.8	25.1
1000	边墩	2.8	10.6	6.3	7.3	7.5
3000	边墩	2.8	18.4	10.8	17.8	18.2

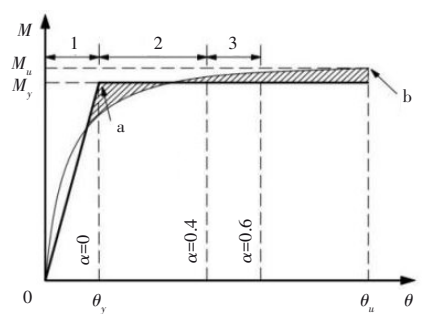


图6 钢筋混凝土构件的弯矩-转角的关系

Fig.6 Bending moment-rotation relationship of reinforced concrete members

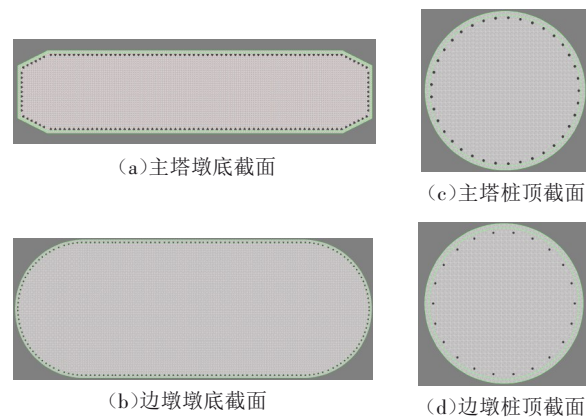


图7 关键截面纤维网格划分

Fig.7 Fiber mesh discretization of key cross-sections

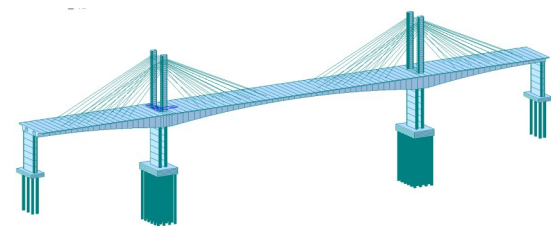


图8 全桥有限元内力计算模型

Fig.8 Finite element model for internal force analysis of the entire bridge

3.2 抗撞性能分析

将动力仿真的结果作为桥梁船撞下的动力需求,将上节计算结果作为关键截面的抗撞能力。通过对比需求与能力,分析船撞下关键位置的安全性,具体结果列于表4,并给出相应的性能状态。

表4 桥梁本体抗撞性能校核

Tab.4 Crashworthiness verification of the bridge structure

单位:MN

桥墩	控制截面	弯矩需求	剪力需求	抗弯能力	抗剪能力	性能状态
主墩	墩底	307.2	24.6	560.4	42.2	满足
	桩顶	18.2	1.7	15.3	3.8	不满足
边墩	墩底	82.5	17.7	160.7	33.9	满足
	桩顶	6.6	1.3	9.8	2.3	满足

主墩桩基在极限工况下抗弯强度不满足船舶撞击需求,承受撞击时桩顶会发生局部张拉破坏,外缘受力主筋屈服。相比于船撞需求,桥墩抗弯承载力偏低,较不安全。边墩整体抗撞性能较好。

4 设防策略

4.1 优化桥梁结构设计

原设计主塔采用2.2 m桩径,不满足抗弯需求,调整桩径为2.5 m,并优化配筋设计,进行截面性能计算,计算结果见图9,抗弯能力达到18.5 MN·m,满足极限工况下的最大弯矩需求。

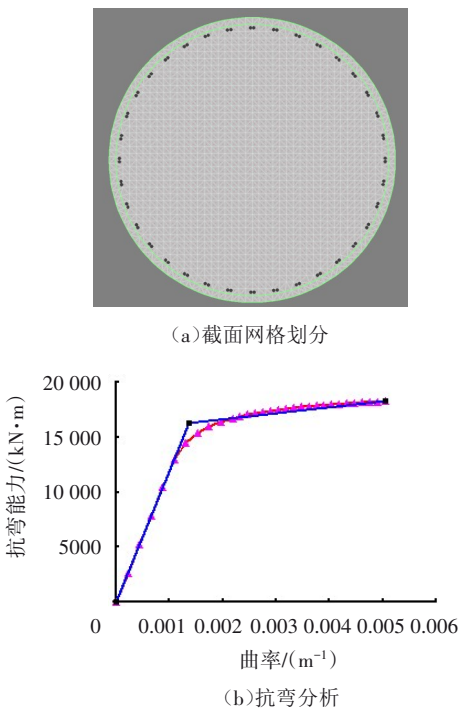


图9 撞击抗弯性能分析

4.2 加装防撞装置

考虑桥区水位落差较大,桥墩截面在设防高度范围内相同,推荐采用浮动式钢套箱防撞装置。基于刚度匹配原理,调整内部龙骨布置,通过多次仿真迭代计算,实现整体刚度低于船舶和桥墩的情况下,能充分吸收设防等级的冲击动能,有效地保护船舶和桥墩的安全,并达到最佳消能效果。

根据设计桥墩浮动式防撞设施尺寸及材料,建立仿真分析模型。防撞设施主体由两种材料构成,主体框架为钢结构,选用材料库中的弹塑性材料(MAT_PLASTIC_KINEMATIC),防撞设施内部填充耗能材料选用软件材料库中的泡沫材料(MAT_

CRUSHABLE_FOAM),对比分析加装防撞设施前后船舶撞击力、桥墩表面损伤和船舶损伤(图10、表5),发现主墩防撞设施的缓冲消力比达到35%左右,同时船舶变形损伤较小,不会发生船舶沉没情况,船桥都能得到有效保护。

为了比较水流动力效应对船-防撞设施-桥墩碰撞接触的影响,分别建立考虑水流和不考虑水流两个模型,图11显示了碰撞后船舶和防撞设施的姿态变化,不考虑水动力效应的模型出现较大角度的偏转。这是因为该模型未能正确考虑作用于船舶的恢复力,船舶和防撞设施接触后会沿接触面发生

较大的滑移,导致整体姿态的偏转,而水动力效应可以较大程度地约束偏转运动。并且在不考虑水动力效应的情况下,碰撞持续时间较短,并且峰值撞击力的出现较早。

由图12船撞力曲线对比可知,桥墩防撞设施周围的水体在碰撞过程中表现出显著的缓冲效应。数值模拟结果表明:当船舶与防撞设施发生接触时,FSI模型中的水体通过黏性耗散和涡旋运动等流固耦合机制,参与了初始冲击动能的耗散,使得碰撞力初始峰值比传统附加质量法(CAM)计算结果小,其中3000吨级初始峰值减少了11%,1000吨级初始峰值减少了45%。CAM方法将水体简化为固定附加质量,导致其撞击力时程曲线存在许多尖锐峰值,而FSI模型考虑了水动力能量耗散效应,这种能量转化

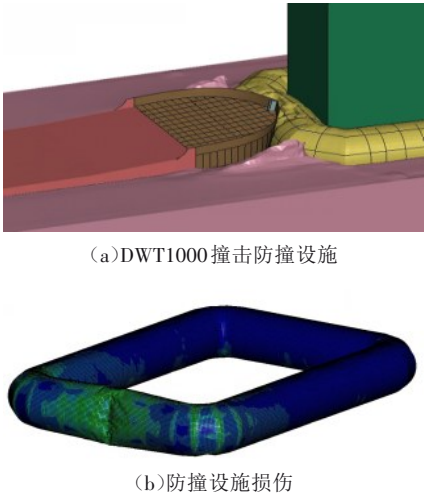


图10 防撞设施碰撞过程
Fig.10 Collision process of protective facilities

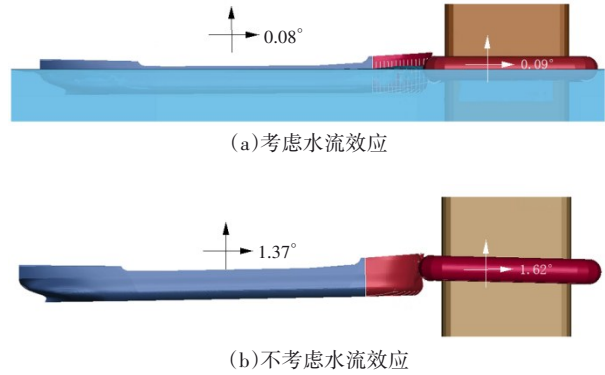


图11 考虑和不考虑水动力效应模型对比
Fig.11 Comparison between models with and without hydrodynamic effects

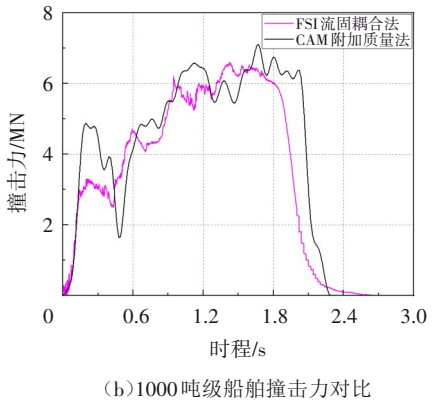
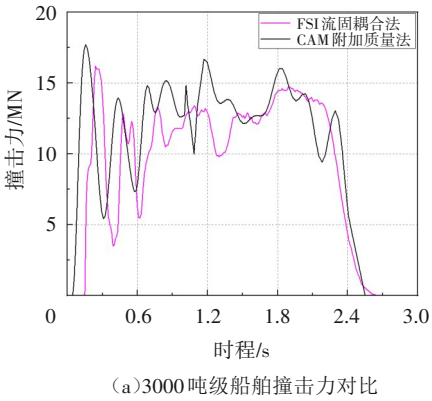


图12 考虑水动力与否撞击力曲线对比
(船-防撞-桥-水模型)

Fig.12 Comparison of impact force curves with and without hydrodynamic effects (ship-protective facility-bridge-water model)

表5 船舶撞击力对比

Tab.5 Comparison of ship impact forces

船型/DWT	速度/(m·s ⁻¹)	设防船撞力/MN	加装防撞设施撞击力/MN	削减百分比/%	撞击时间延长百分比/%
1000	3.9	10.6	6.5	38.7	37.1
3000	3.9	25.1	16.2	35.5	19.4

使船撞力曲线峰值更加平滑,使得FSI方法计算得到的船舶对防撞设施和桥墩的损伤比传统的CAM方法要小。

4.3 冲击试验验证

船舶为钢壳-骨架结构,防撞装置为钢壳-骨架-聚氨酯填充结构,样品构造如图13所示。为了验证本文钢壳和聚氨酯材料组合结构模型的有效性,制作防撞设施试样进行冲击试验,试样与桥梁防撞实际工程采用相同的结构,由钢壳、骨架、聚氨酯填充组成。

钢壳和钢骨架均为Q235材质,聚氨酯密度为45 kg/m³,各构件规格厚度见表6。

试验装置如图14和图15所示,采用20 t刚性小车撞击防撞设施试样,小车撞击面尺寸为2.5 m×1.8 m,设定冲击速度为4 m/s,试样后面布置16个压电式传感器,测试冲击过程的撞击力,水平冲击试验装置主要包含三个核心部分:牵引驱动系统、水平冲击系统以及测试系统。卷扬机通过钢缆和脱钩器将水平冲击器向后拉,同时带动落锤上升至一定高度。

释放脱钩器,落锤下落通过钢缆带动水平冲击器沿钢轨加速滑行。当冲击器撞击防护装置时,反力作用在均质钢板上,压电式传感器采集数据,并通过时域叠加的方式累加16组信号,以获得防护装置传递给反力墙的撞击力。

采用LS-DYNA建立冲击试验的有限元模型,冲击车、试样外壳和筋板、反力墙采用Shell163壳单元模拟,试样填充聚氨酯采用Solid164体单元模拟。冲击车和反力墙采用MAT_RIGID材料模型,试样外壳和筋板采用MAT_PLASTIC_KINEMATIC材料模型,试样填充聚氨酯采用MAT_CRUSHABLE_FOAM材料,冲击试验有限元模型及网格划分见图16。

试样受撞击后发生永久变形,接触面中间发生凹陷,两边侧板向中间轻微弯曲,试样圆弧面被撞击后近似呈现为平面。实际测得刚性小车冲击速度为4.068 m/s,撞击后以相反的方向回弹,回弹速度测得1.325 m/s。

如图17所示,数值模拟中试验变形趋势和冲击试验一致,试验的试样中间最大撞深为13 mm,数值模拟的试样中间最大撞深为15 mm。

如图18所示,根据对比撞击力时程曲线,最大撞击力数值模拟结果为1 597.1 kN,试验结果为1 435.0 kN,相差11.3%,数值模拟结果偏大,分析是因为在有限元模型中将冲击车和反力墙设定为理想刚性材料,试验小车和反力墙的刚度虽然远大于试样,但达不到绝对刚体,小车、反力墙和地基会吸收部分能量,导致试验测得撞击力偏小。

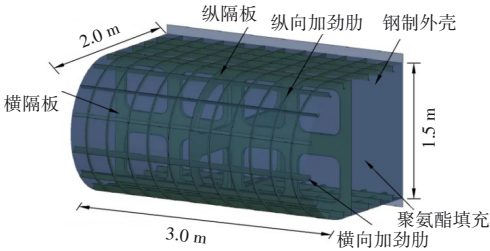


图13 试样构造图

Fig.13 Structural configuration of the specimen

表6 试样构件规格

Tab.6 Specifications of specimen components

构件名称	规格
钢外壳	厚度5 mm
横隔板	厚度5 mm
纵隔板	厚度5 mm
横向加劲肋	(L63×40×5) mm
纵向加劲肋	(L40×40×5) mm



图15 20 t冲击车

Fig.15 20 t impact vehicle

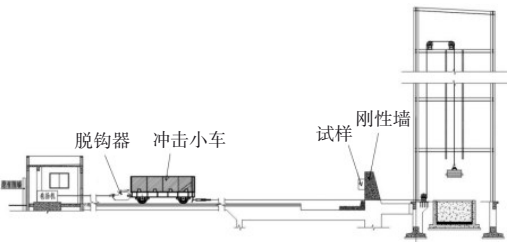


图14 水平冲击试验装置

Fig.14 Horizontal impact test setup

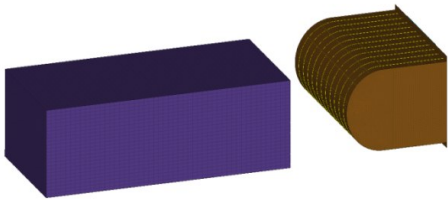


图16 冲击试验有限元模型

Fig.16 Finite element model of the impact test

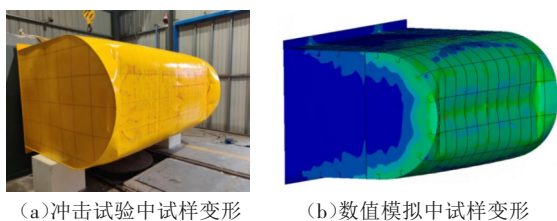


图17 试样变形对比

Fig.17 Comparison of specimen deformation

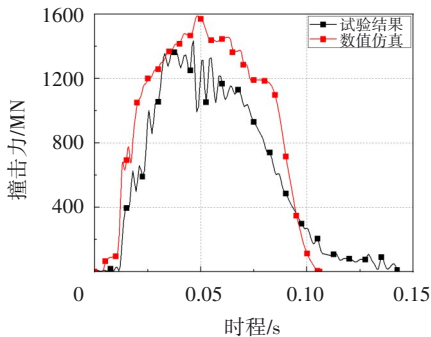


图18 试样冲击力对比

Fig.18 Comparison of specimen impact forces

5 结论

通过对碰撞响应和桥梁结构分析,可以得到如下结论:

1)采用FSI流固耦合法计算得到的船撞力峰值与CAM附加质量法接近,水动力效应使FSI法的撞击时间比CAM法延长10%左右;

2)经有限元分析,在考虑水流动力效应下,采用浮动式防撞设施可以将设防撞冲击力削减35%以上,同时能有效保护船舶安全;

3)加装浮动式防撞设施后,水动力缓冲效应使FSI法撞击力峰值比CAM法小5%左右,曲线波动幅度小;

4)水平冲击试验结果与数值模拟结果相差15%以内,验证本文数值模拟方法中与碰撞相关的材料参数和接触条件设定是可靠的,后续研究将开展水动力工况试验。

参考文献:

- [1] 樊伟,钟正午,王君杰,等. 桥梁船撞研究进展综述: 事故、分析与防护[J]. 中国公路学报,2024,37(5):38-66.
Fan W, Zhong Z W, Wang J J, et al. Summary of research progress on bridge ship collision: Accident, analysis and protection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024,37(5):38-66.
- [2] 项海帆,范立础,王君杰. 船撞桥设计理论的现状与需

进一步研究的问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002,30(4):386-392.

Xiang H F, Fan L C, Wang J J. State of art of ship collision design for bridges and future research[J]. Journal of Tongji University, 2002,30(4):386-392.

- [3] 张俊,陈玉骥. 桥梁防撞装置研究现状分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2017,35(1):81-86.
Zhang J, Chen Y J. Analysis on current status of bridge anti-collision device [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2017,35(1):81-86.
- [4] 冯忠居,李维洲,戴良军,等. 中国跨海大桥防撞体系的应用现状[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(11):40-45.
Feng Z J, Li W Z, Dai L J, et al. Application status of anti-collision system of Chinese cross-sea bridges [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017,34(11):40-45.
- [5] 唐长刚,王敏,杨黎明. 船撞桥墩模型实验及分析[J]. 力学季刊,2010,31(4):478-484.
Tang C G, Wang M, Yang L M. Physical model experiment and analysis about impact between ship and pier[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010,31(4):478-484.
- [6] 曾嵩,耿波,吕成林,等. 斜拉桥碰撞荷载下静动力响应对比分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(3):384-387.
Zeng S, Geng B, Lv C L, et al. Static and dynamic response comparison analysis of cable-stayed bridge under vessel collision load [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011,30(3):384-387.
- [7] 何栋梁,范彬. 船桥碰撞及防撞结构研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2005,23(6):742-745.
He D L, Fan B. Studies on ship-bridge collision and protection structure of bridge [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2005,23(6):742-745.
- [8] 罗林阁,曹映泓,陈国虞,等. 船舶撞击桥梁的撞击力计算方法探讨[J]. 中外公路,2006,26(5):78-81.
Luo L G, Cao Y H, Chen G Y, et al. Discussion on calculation method of impact force of ship hitting bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006,26(5):78-81.
- [9] 潘晋,姜伟,许明财. 散货船与桥墩碰撞力的经验公式与数值模拟对比研究[J]. 振动与冲击,2012,31(19):123-127.
Pan J, Jiang W, Xu M C. Comparison of collision force between bridges and bulk carriers based on empirical formulas and numerical simulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(19):123-127.
- [10] 姜华,王君杰,贺拴海. 钢筋混凝土梁桥船舶撞击连续倒塌数值模拟[J]. 振动与冲击,2012,31(10):68-73.

- Jiang H, Wang J J, He S H. Numerical simulation on continuous collapse of reinforced concrete girder bridge subjected to vessel collision [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 68-73.
- [11] 邵俊虎, 占玉林, 陈宁, 等. 驳船撞击下 RC 桥墩的非线性动力响应与损伤特征分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 81-91.
- Shao J H, Zhan Y L, Chen N, et al. Nonlinear dynamic response and damage characteristic analysis of RC pier under barge collision [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 81-91.
- [12] 王君杰, 郭进. 多点地震动激励下的高效反应谱方法[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 810-823.
- Wang J J, Guo J. An efficient seismic response spectrum method under multi-support excitations [J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 810-823.
- [13] 聂利芳. 附加消能单位的浮式防船撞设施研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(11): 114-117.
- Nie L F. Research on floating anti-ship collision facilities with additional energy dissipation units [J]. Railway Construction Technology, 2024(11): 114-117.
- [14] 张文明, 王志伟, 赖亚平. 大跨梁-拱组合刚构桥船撞力和抗撞性能研究[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 132-142.
- Zhang W M, Wang Z W, Lai Y P. Vessel collision force and anti-collision performance of long-span beam-arch composite rigid frame bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(5): 132-142.
- [15] 邹永超, 贾恩实. 桥墩柔性自浮式防撞装置基本结构尺度研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(4): 112-118.
- Zou Y C, Jia E S. Study on basic structural scale of flexible self-floating anti-collision device for bridge piers [J]. Bridge Construction, 2024, 54(4): 112-118.
- [16] 王君杰, 叶乔丹, 王昌将, 等. 独柱墩-自浮式防船撞装置波浪荷载研究[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 172-184.
- Wang J J, Ye Q D, Wang C J, et al. Study on wave load of single-column pier-self-floating anti-collision device [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(8): 172-184.
- [17] 叶乔丹, 王君杰. 防船撞装置对桥梁下部结构波浪荷载的影响研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 63-69.
- Ye Q D, Wang J J. Research on the influence of anti-collision device on wave load of bridge substructure [J]. Highway, 2022, 67(2): 63-69.
- [18] Fan W, Hu L K, Ye X D, et al. Dynamic behavior and simplified analysis of bridge structures subjected to water-driven vessel collisions [J]. Ocean Engineering, 2024, 313: 119374.
- [19] Wang J J, Song Y C, Wang W, et al. Evaluation of flexible floating anti-collision device subjected to ship impact using finite-element method [J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 321-330.
- [20] Wang F, Chang H J, Ma B H, et al. Flexible guided anti-collision device for bridge pier protection against ship collision: Numerical simulation and ship collision field test [J]. Ocean Engineering, 2023, 271: 113696.
- [21] 方海, 邓向阳, 邓成刚, 等. 桥墩采用新型复合材料防撞设施技术研究[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 148-153.
- Fang H, Deng X Y, Deng C G, et al. Study on the technology of adopting new composite anti-collision facilities for piers [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4): 148-153.
- [22] Ge J, Luo T Y, Qiu J. Experimental investigation of the dynamic responses of thin-walled and foam-filled steel tubes subjected to repeated impacts [J]. Materials, 2024, 17(5): 1018.

(编辑 康 艳)