

某大桥桥墩防撞设计研究与应用

吴建臻

(福建农业职业技术学院, 福建 福州 350007)

摘要: 为有效避免船桥碰撞以及降低撞击力对桥梁结构的影响, 基于某大桥桥梁通航情况和桥墩形式的具体分析, 提出了浮动式柔性钢套筒、浮动式钢覆复合材料结构, 同时结合主动预警系统的复合桥墩防撞方案, 并通过建立船桥碰撞有限元模型验证设计方案的可行性。结果表明: 采用浮动式柔性钢套筒防撞方案的R4号桥墩其横桥向正撞船撞力由18.89 MN降至9.39 MN, 顺桥向侧撞船撞力由9.45 MN降至4.54 MN, 降幅均超过50%, 下降后的船撞力未超过桥墩相应的横桥向抗力9.9 MN和顺桥向抗力5.1 MN, 防撞设施效果显著; 采用浮动式钢覆复合材料结构防撞方案的R3、R5号桥墩其船撞力经计算也分别下降超35%、37%, 均未超过桥墩实际抗力; 桥墩防撞设施安装工艺成熟、施工方便, 配合桥梁防撞主动预警系统, 显著提升了桥墩与航道的综合安全水平。

关键词: 防撞设施; 预警系统; 船撞力; 有限元分析

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0170-06

Research and Application on Anti-collision Design of Bridge Piers of a Certain Bridge

WU Jianzhen

(Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350007, China)

Abstract: To effectively avoid the ship-bridge collisions and reduce the impact force on the bridge structure, based on the specific analysis of the navigation conditions and the pier form of a certain bridge, a composite bridge pier anti-collision scheme is proposed, featuring floating flexible steel casing box and floating steel cladding composite material structure, combined with an active early warning system. The feasibility of the design scheme is verified by establishing a finite element model for ship-bridge collision simulation. The results show that for Pier R4 equipped with the floating flexible steel casing, the transverse head-on collision force is reduced from 18.89 MN to 9.39 MN, and the longitudinal side collision force is reduced from 9.45 MN to 4.54 MN, both exceeding a 50% reduction. The post-reduction collision forces are below the corresponding transverse resistance of 9.9 MN and longitudinal resistance of 5.1 MN for the pier, demonstrating significant effectiveness of the anti-collision facilities. For Piers R3 and R5 equipped with the floating steel cladding composite material structure, the calculated collision forces are also reduced by over 35% and over 37%, respectively, and remain below the actual resistance of the piers. The installation process for the pier anti-collision facilities is mature and convenient for construction. Combined with the active collision warning system of bridge, the overall safety level of the piers and the waterway is significantly enhanced.

Keywords: anti-collision facilities; early warning system; ship collision force; finite element analysis

0 引言

随着我国通航水域桥梁的日益增多及水上运输的日益繁忙, 船桥碰撞风险日益凸显。船桥碰撞事故后果严重, 不仅可能导致桥梁结构损毁、交通中断, 造成巨大经济损失, 更会严重威胁船舶和人员安全, 引发灾难性后果^[1-3]。因此, 开展桥梁防撞设计

研究, 保障桥区通航安全, 已成为桥梁工程领域的重要课题。

现如今, 国内外学者对于桥墩的防撞设计已经取得了丰富的成果。章双燕等^[4]设计出一种碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)蜂窝型组合防撞装置, 使船舶撞击力折减率达到82.7%。刘剑等^[5]基于实际桥梁工程, 提出了针对性的自浮式钢-复合材料夹层浮式桥墩防撞方案, 并通过有限元模型验证了该方案的可行性。方大^[6]提出了兼具围堰功能的漂浮式柔性钢套筒防撞设计方案, 在面对3 000 t船舶正

收稿日期: 2025-12-12

作者简介: 吴建臻(1989—), 男, 硕士, 讲师, 工程师, 从事土木工程教学工作。

撞、侧撞工况下,均达到了预期防碰撞效果。荆国强等^[7]提出的钢-UHPC(超高性能混凝土)组合式防撞浮箱防撞设施展现出了良好的削减撞击力的能力,能显著降低峰值撞击力并有效保护桥墩。单成林等^[8]提出了一种适用于内河航道桥墩防撞的钢-聚氨酯夹层板圆端形桥墩曲面防撞浮式套箱设计。冯明扬等^[9]提出的外包橡胶混凝土覆层防撞设施兼具实用性与环保性。廖圆圆等^[10]基于湘潭湘江芙蓉大桥的防船撞问题研究,设计实施了复合材料与钢管混凝土独立桩柱相组合的隔离式防船撞系统。李之会等^[11]、郭铮等^[12]设计出一种新型泡沫铝夹芯板桥墩防撞装置,可提高桥墩防撞装置的使用寿命和综合性能。龙海滨等^[13]针对朱亨湘江大桥桥墩抗撞能力较差的特点,提出“四柱墩+钢复合材料浮式圆形防撞系统”,有效地解决了该桥的防撞问题。同时,在研究方法上,多集中于利用有限元软件建立船舶碰撞模型、开展防撞设施碰撞试验等,当前的发展重点在防撞结构设计的优化方面^[14-16]。

本文结合桥梁实际通航要求,对桥墩防撞方案进行了系统设计,并通过有限元模型验证了其防护功效和工程可行性。研究成果对推动桥梁工程技术的进步具有重要的现实意义。

1 项目背景

1.1 桥梁概况

背景工程大桥位于福州市西南区域,跨越闽江南港,是连接福州市仓山区与闽侯县南屿镇的重要交通桥梁。桥梁主桥采用单肋拱加劲 V 型撑刚构形式,全长 376 m。该桥设计时速 80 km/h,采用双向车道,总宽 34 m,设计荷载为公路-I 级。

大桥主桥布置图见图 1。

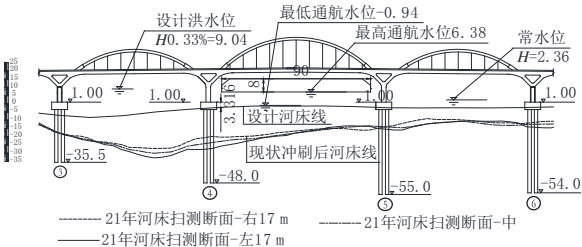


图 1 大桥主桥布置图(单位:m)

主桥桥墩 R3、R4、R5、R6 采用薄壁双柱式墩,整体呈“Y”形。R4、R5 号墩高 10 m,与上部结构固结;R3、R6 号墩高 9.8 m,在墩顶设支座。基础为 $\phi 2.5$ m 的双排钻孔灌注桩基础,桩长 35~55 m。主墩一般构造图见图 2。

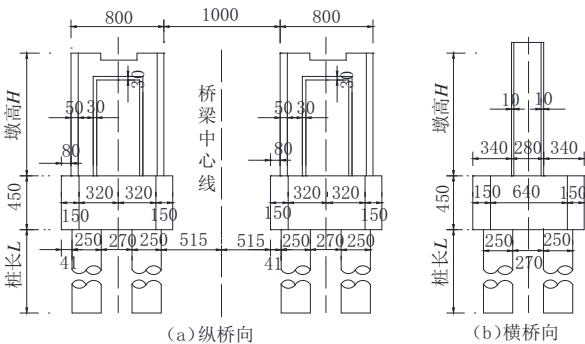


图 2 主墩一般构造图(单位:cm)

1.2 通航概况

大桥所在地航道等级为内河 IV 级,需满足 1 000 t 级闽江干流标准运输船舶的通航要求。根据福建省港航勘察设计研究院的《某特大桥通航安全评估报告》,大桥采用单孔双向通航,单向通航孔净空宽度不应小于 70 m,桥梁所需最小通航净高为 8.0 m。而大桥实际通航孔跨度为 106 m,经计算其实际通航净宽为 90.2 m,通航净高为 10.8 m,满足代表船型单孔双向通航的规范要求。

大桥桥区通航孔布置见图 3。

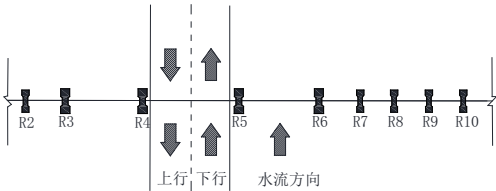


图 3 大桥桥区通航孔布置

1.3 桥墩防撞设计

根据实际工程需求与桥墩结构特点,对大桥 R3、R4、R5 号主墩进行防撞设计。

(1) R4 号主墩位于主通航孔中心区域,遭受正向船舶撞击的风险概率较高,对防撞设施的消能能力和结构可靠性要求也高,且经计算桥墩抗撞力较小,故采取“浮动式柔性钢套箱”防撞设施,如图 4(a)所示。该设施由内外双层钢套箱及中间阻尼元件组成。船舶撞击时,外层钢套箱先变形吸能并引导船头转向,内层钢套箱与阻尼元件再次吸能,实现分级消能,特别适用于抵御高能量、大吨位船舶的正向或大角度撞击。设施采用分段拼装安装方式直接安装到承台上方。

(2) R3、R5 号主墩位于主通航孔两侧,船舶撞击角度一般较小,更易发生侧向擦碰或小角度撞击。综合考虑防撞设施的耐久性和经济性,采用“浮动式钢覆复合材料结构”,如图 4(b)所示。该结构以钢材为主体,外覆耐腐蚀的纤维增强复合材料,内部填

充高饱和度缓冲芯材以确保浮力,并通过内壁的橡胶护舷与桥墩柔性接触。船舶撞击时,设施通过材料与结构的变形有效吸收能量,并引导船舶滑移以分散撞击力,在保护桥墩的同时降低船舶损伤,抗冲击性能优异,建养成本低。设施采用工厂预制分段,现场螺栓拼装。

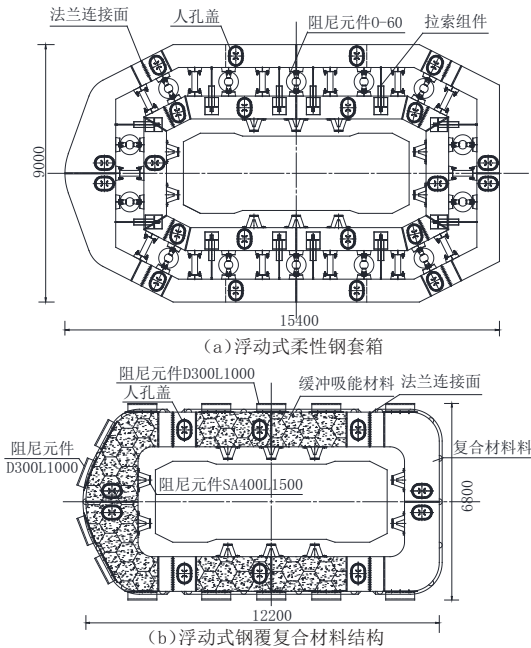


图4 主墩防撞设施具体构造图(单位:mm)

2 桥墩防撞设施性能验证

2.1 建模方法介绍

通过 ANSYS 软件完成有限元建模的部分前处理工作,随后采用 LS-DYNA 软件进行设防后船桥碰撞有限元模型分析。模型由船体与桥墩两部分构成。

船体按实船尺寸建立全尺寸模型,并通过合理配重确保质量重心与实船一致;由于船艏结构形式对撞击力影响较大,对船艏等关键区域采用精细化网格,对船体其他部位则进行适当简化。采用四面体网格划分以提升模型计算效率。桥墩墩身的网格尺寸为 10 mm;为准确模拟碰撞,船艏结构网格尺寸进一步加密为 5 mm;船体其他部位和远离碰撞位置的桩基础网格划分较为粗糙,其网格尺寸分别为 70、200 mm。

船体模型简化表见表 1。

桥墩模型外形尺寸根据实际图纸建模并使用关键字*MAT_RIGID*进行刚体材料模拟以提高计算效率。采用关键字*SET_NODE_LIST*和*BOUNDARY_SPC_SET*,将桥墩桩底定义为全约束;使用关键字*INITIAL_VELOCITY_GENERATION*来赋予船舶初

表 1 船体模型简化表

模型部位	简化说明	单元类型
船艏外板	撞击过程中的关键吸能结构,是仿真重点	板单元
船艏其他构件	船艏的各层甲板、肋板等	壳单元
船艏其他构件	纵、横向加强骨架等	梁单元
船体中后部	远离撞击区,仅提供刚度和质量的影响,因此简化	板梁组合模型

始运动速度;采用罚函数算法驱动的面面接触关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*来定义桥墩和船艏结构间的碰撞接触。在桥墩和船艏结构碰撞接触设置中,将船艏结构定义为接触面,桥墩定义为目标面。

设防后船桥碰撞有限元模型见图 5。

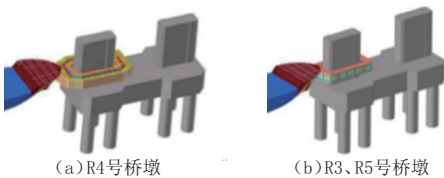


图5 设防后船桥碰撞有限元模型

2.2 理论数值确定

根据大桥通航安全风险及抗撞性能综合评估分析,选取载重最大的闽福州货 0893(2 000 DWT 级,满载排水量 2 700 t)作为设防代表船型。根据《公路桥梁抗撞设计规范》(JTGT 3360-02—2020)计算桥墩设防前的各项理论数值(撞击速度、侧撞角度、设防前船撞力、桥墩抗撞力),结果见表 2。

表 2 桥墩设防前理论数值统计

输入参数	R3 号墩	R4 号墩	R5 号墩
撞击速度/(m·s ⁻¹)	3.54	4.06	3.80
侧撞角度/(°)	20	20	20
设防前船撞力/MN	横桥向	16.47	18.89
	顺桥向	8.24	9.45
桥墩抗撞力/MN	横桥向	11.5	9.9
	顺桥向	5.8	5.1

表 2 中的桥墩抗撞力计算流程如下:

(1)首先采用 SAP2000 截面设计器计算设防桥墩的控制性截面(墩底截面)抗力 R_{sec} (截面抗弯、抗剪承载力)。

(2)采用 MIDAS/Civil,建立全桥静力分析模型(见图 6),模型节点为 1 906 个,单元数量为 2 053 个,计算桥墩在各种荷载及荷载组合下控制性截面的内力 S_{sec} 。

(3)截面抗力 R_{sec} 减去恒载+活载状态下的内力,即为截面的抗力富余储备,而抗力富余储备/单位船撞荷载 $\bar{P}$ 作用下的截面内力,即为截面的船撞抗力

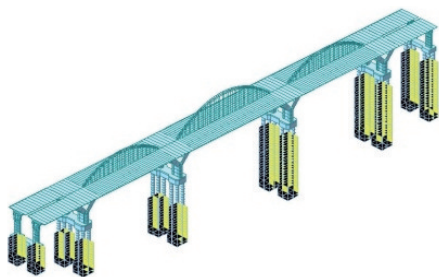


图 6 MIDAS/Civil 全桥静力分析模型

系数 α_{sec} , 表达式为:

$$\alpha_{\text{sec}} = \frac{R_{\text{sec}} - R_{\text{sec}}(\text{恒} + \text{活})}{S_{\text{sec}}(\bar{P})} \tag{1}$$

取所有截面抗弯、抗剪船撞抗力系数最小值(对于群桩基础还有群桩侧向船撞抗力系数和单桩抗剪船撞抗力系数),并乘以单位船撞荷载 $\bar{P}$ (本设防船型取 1 000 kN),即可得桥墩在此工况下的桥墩抗撞力 R_c :

$$R_c = \bar{P} \cdot \min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i, \dots) \tag{2}$$

2.3 结果对比分析

R3 号桥墩受船舶正向、侧向撞击时的数值模拟计算结果见图 7、图 8。

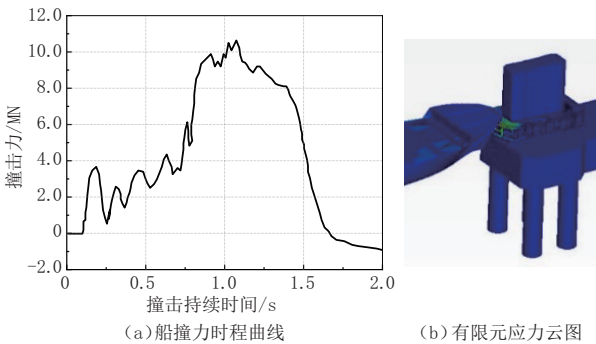


图 7 R3 号桥墩受船舶正向撞击时的数值模拟计算结果

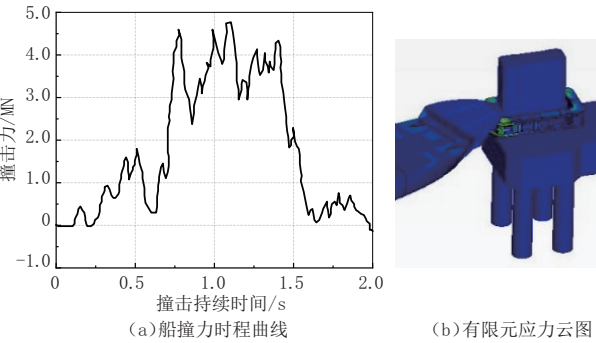


图 8 R3 号桥墩受船舶侧向撞击时的数值模拟计算结果

由图 7、图 8 可见:桥墩设防后,其横桥向正撞船撞力由 16.47 MN 降至 10.63 MN,顺桥向侧撞船撞力由 8.24 MN 降至 4.86 MN,降幅均超过 35%,说明防撞结构能有效削弱船舶撞击力。设防后的船撞力均低于桥墩相应的横桥向抗力 11.5 MN 和顺桥向抗力 5.8 MN,表明在 2 000 DWT 级船舶正撞或侧撞情况

下,R3 号桥墩结构安全。

R4 号桥墩受船舶正向、侧向撞击时的数值模拟计算结果见图 9、图 10。

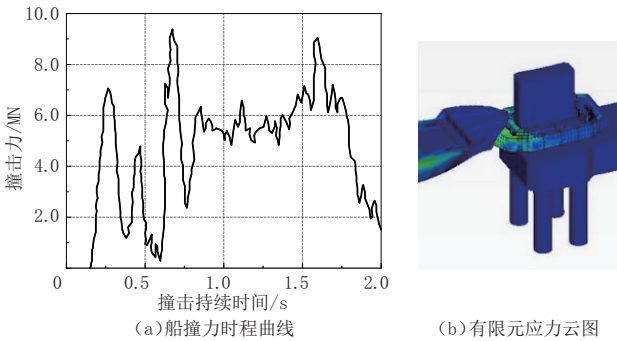


图 9 R4 号桥墩受船舶正向撞击时的数值模拟计算结果

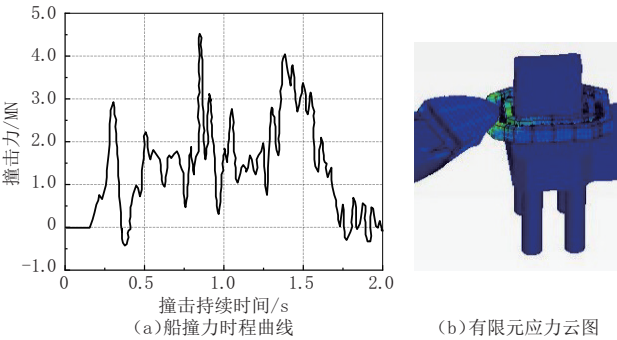


图 10 R4 号桥墩受船舶侧向撞击时的数值模拟计算结果

由图 9、图 10 可见:在设防后,其横桥向正撞船撞力由 18.89 MN 降至 9.39 MN,顺桥向侧撞船撞力由 9.45 MN 降至 4.54 MN,降幅均超过 50%,证明防撞结构能有效削弱船舶撞击力。设防后的船撞力均低于桥墩相应的横桥向抗力 9.9 MN 和顺桥向抗力 5.1 MN,表明在规定级别船舶正撞或侧撞情况下,R4 号桥墩结构不会倒塌。

R5 号桥墩受船舶正向、侧向撞击时的数值模拟计算结果见图 11、图 12。

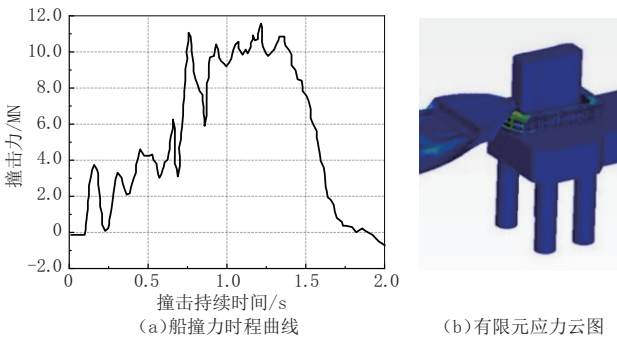


图 11 R5 号桥墩受船舶正向撞击时的数值模拟结果

由图 11、图 12 可见:设防后,其横桥向正撞船撞力由 18.24 MN 降至 11.42 MN,顺桥向侧撞船撞力由 9.12 MN 降至 5.63 MN,降幅均超过 37%。设防后的船撞力均远低于桥墩相应的横桥向抗力 30.5 MN 和

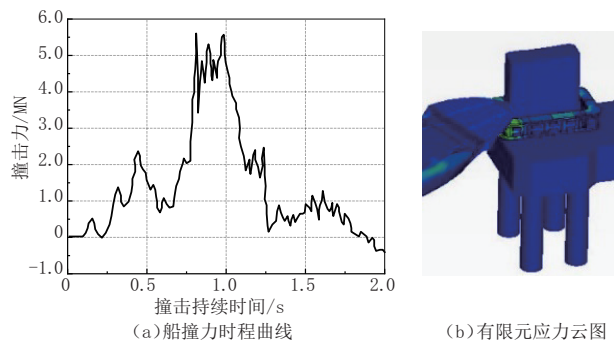


图12 R5号桥墩受船舶侧向撞击时的数值模拟结果

顺桥向抗力 33.6 MN,表明在船舶正撞或侧撞情况下,R5号桥墩结构安全。

综上可知,R3、R4、R5号桥墩在加装防撞设施后,其船撞力较理论数值下降幅度分别超过35%、50%、37%,且均低于桥墩抗力,证明桥墩防撞方案可行。

3 桥墩防撞系统应用

3.1 防撞设施安装

3.1.1 浮式防撞设施安装

(1)浮箱入水。将防撞箱体预拼装成便于安装的组合节段,并吊装入水。

(2)浮箱拖运。使用小船辅助浮箱移动至安装区域附近,从承台一侧靠近桥墩,浮箱就位后小船保持不熄火,顶推定位以防止浮箱飘动。

(3)浮箱连接。由船舶将节段牵引至桥墩安装区域附近,使相邻节段间距约 50 cm。随后,利用手拉葫芦和起重设备将连接端调整至统一高度,先使用高强螺栓快速完成连接板的水上部分初装,再按相同方法连接另一侧。水下部分的螺栓连接由蛙人下水作业,并全程保持通讯畅通。最后,对所有分段连接处的螺栓进行统一检查。

(4)检查。完成浮箱连接后,需进行整体调整,包括固定吊梁索具以平衡箱体等,合格后向监理单位报验。需要注意的是,合拢口的螺栓初拧与终拧工作必须在 24 h 内完成,特殊情况下不得超过 48 h。

浮式防撞设施安装流程示意图见图 13 至图 15。

3.1.2 固定式护舷安装

(1)定位。首先进行现场测量放线,确定锚固位置。需探测桥体结构钢筋,若与设计孔位冲突则进行调整,并据此在工厂预制时预留准确的锚固孔。

(2)钻孔。使用钢筋探测仪避开原结构钢筋,按设计图纸要求进行钻孔。若孔位需大幅调整,应及时联系设计单位确认。钻孔直径应满足《公路桥梁

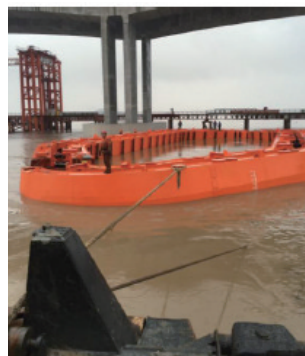


图13 防撞浮箱分段下水

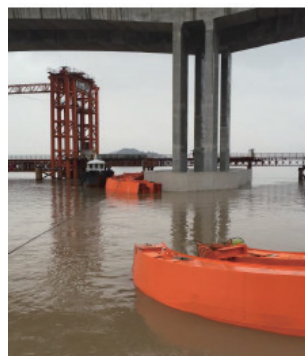


图14 直浮箱节段托运至桥墩



图15 浮箱连接作业示意图

加固施工技术规范》(JTG/T J23—2008)的要求。

(3)清孔。钻孔完成后,必须彻底清理孔内的灰渣与杂物,以确保后续植筋的黏结质量。

3.1.3 施工安排与安全防护

现场安装以保证结构安全和航道通畅为前提,在天气、水文条件允许的情况下,合理安排作业时段,优先选择气象条件稳定、通航环境良好的窗口期进行施工。施工作业期间需严格遵守航道与水上作业安全管理规定,并采取必要的临时交通组织与安全警示措施,确保施工过程安全有序,最大限度地降低对正常通航的影响。

3.2 主动预警系统

为确保某大桥桥梁主体安全和过往船舶通航安全,桥梁需设置主动防撞预警系统。系统包括在某大桥两侧安装雷达偏航超速检测仪、跟踪摄像机、监控摄像机、激光超高监测仪、声光报警器及LED信息播报屏各2套;AIS基站、VHF电台、水位计、雷达数据处理器等设备。主动防撞预警系统总体架构采用

分层设计方法,从而可大大加快开发效率,提高系统的可靠性、安全性和可扩展性,同时也便于日后的维护和升级。

预警系统总体架构见图 16。该系统的主要应用场景有:



图 16 主动预警系统总体架构

(1)结合桥区水域特征,通过划分预警区、警戒区、航道区、禁航区、礁石危险区等功能区域,实现对船舶通航行为的组织,降低船舶碰撞事故发生的几率,提升桥区通航安全水平和通航效率。

(2)系统采集船舶 AIS 数据和雷达数据,经过融合处理后,实现对船舶目标更快速、更稳定的识别和跟踪。

(3)系统可以自主采集船舶数据,经过运算后,自主判断船舶航行态势和风险程度,可通过 VHF 语音、AIS 报文、声、光等多种形式提醒和警示船舶,及时采取行动。

(4)系统可自主排查存在航行态势异常的风险船舶,并向后台值班人员提醒,便于开展桥区通航监管工作。

4 结 语

(1)采用浮动式柔性钢套箱防撞设计的 R4 号桥墩在设防后,其横桥向正撞船撞力由 18.89 MN 降至 9.39 MN,顺桥向侧撞船撞力由 9.45 MN 降至 4.54 MN,降幅均超过 50%,且均低于桥墩相应的横桥向抗力 9.9 MN 和顺桥向抗力 5.1 MN。

(2)采用浮动式钢覆复合材料结构防撞设计的 R3、R5 号桥墩在设防后,其横桥向正撞船撞力分别

由 16.47、18.24 MN 降至 10.63、11.42 MN,顺桥向侧撞船撞力由 8.24、9.12 MN 降至 4.86、5.63 MN,降幅分别超过 35%、37%,且均低于桥墩抗力。

(3)2 种桥墩防撞设施安装工艺成熟,施工安全可控。此外,主动预警系统功能突出、应用广泛,显著提升了桥墩与航道的综合安全水平。本研究为解决同类桥梁的安全保障问题提供了有价值的理论依据和实践经验。

参考文献:

[1] 张爱锋,刘少康,姚苗苗,等.船桥碰撞结构损伤及船撞力影响因素分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(3):121-127.

[2] 王凯,李茜,宋彦臣,等.桥墩被动防船撞设施发展评述[J].公路交通科技,2024,41(1):116-125.

[3] 于伟.航道中桥梁桥墩防撞技术及设施浅析[J].城市道桥与防洪,2014(12):89-93.

[4] 章双燕,何孔德,刘绍鹏,等.CFRP 组合式桥墩防撞装置的设计与优化研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(4):104-112.

[5] 刘剑,杨祖涛,曹萱,等.涉水桥墩防船撞设计及性能研究[J].交通科技,2025(2):71-74;81.

[6] 方大.某公路工程双塔组合梁斜拉桥的桥墩防撞设计探讨[J].珠江水运,2024(9):21-23.

[7] 荆国强,李清岭,马海英,等.钢-UHPC 组合式防撞浮箱防撞性能研究[J].公路交通技术,2023,39(1):75-81;89.

[8] 单成林,黄兆亮.圆端形夹层结构桥墩防撞浮箱的碰撞性能分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(2):113-119.

[9] 冯明扬,刘保东,张敏强,等.外包橡胶混凝土覆层对梁式桥墩防撞性能影响的试验研究[J].振动与冲击,2020,39(2):269-274.

[10] 廖圆圆,刘煜,祝露,等.外设复合材料圈的独立桩柱防船撞系统设计与模拟[J].中外公路,2024,44(5):183-191.

[11] 李之会,郑祥,许磊,等.泡沫铝夹芯板桥墩防撞装置性能分析[J].河南科技,2024,51(19):30-33.

[12] 郭铮,易雪斌,王斌,等.桥墩泡沫铝基组合防撞装置耗能机理及缓冲效果[J].铁道建筑,2023,63(5):87-93.

[13] 龙海滨,刘汉彪.朱亭湘江大桥桥墩防撞方案研究[J].公路工程,2020,45(4):115-119;166.

[14] 张哲,李万达.有限元分析技术的船桥碰撞模拟[J].舰船科学技术,2018,40(18):46-48.

[15] 沈旭东,周玉娟,高恩全,等.船舶-桥墩防撞系统碰撞过程精细化分析[J].城市道桥与防洪,2016(1):159-163.

[16] 陈涛,王建国.船桥碰撞冲击力的有限元数值模拟与分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(1):82-87.