

上海某跨江大桥水中墩防撞设施修复设计

罗东伟

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 上海某跨越Ⅲ级内河航道大桥水中桥墩的防撞设施,在经历过7次船撞事故后,结构严重受损,防撞性能急剧下降,急需修复。通过对防撞设施的原设计资料、船撞事件、历史维修情况的调查及专项检测结果的分析和,确定了内防撞设施采取维修、外防撞设施采取拆除更换的修复方式,既保证了防撞设施的消能效果,又避免了复杂的水上施工,节约了工程造价。同时,针对原外防撞设施被撞后易造成船体划破进水甚至沉船的状况,通过防撞钢套箱结构和构造细节优化及外侧缓冲橡胶护舷增设,极大程度地减缓了碰撞船舶可能所受到的损伤程度。工程的设计研究和成功实践可为今后同类防撞设施的修复提供参考。

关键词: 桥梁;防撞设施;修复

中图分类号: U443.5;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0176-06

Repair Design of Anti-collision Facilities for Water Piers of River-crossing Bridge in Shanghai

LUO Dongwei

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The anti-collision facilities of the bridge piers in a river-crossing bridge over a Class III inland waterway in Shanghai have been severely damaged and the anti-collision performances have drastically declined after seven ship collision accidents, necessitating urgent repair. Through an investigation of the original design documents of the anti-collision facilities, the ship collision events and historical maintenance records, and an analysis of special inspection results, a repair approach is determined such as repairing the inner anti-collision facilities and removing and replacing the outer anti-collision facilities, which not only ensures the energy dissipation effect of the anti-collision facilities, but also avoids the complex over-water construction, thereby saving the engineering costs. Additionally, in response to the issue where the original outer anti-collision facilities could easily cause ship hull rupture, water ingress, or even sinking after collisions, the possible damage to the colliding vessel will be greatly reduced through the optimization of the anti-collision steel casing structure and construction details, as well as the addition of outer buffer rubber fenders. The design research and successful practice of this project can provide references for the repair of similar anti-collision facilities in the future.

Keywords: bridge; anti-collision facilities; repair

0 引言

上海某跨江大桥跨越某一内河航道,航道等级为Ⅲ级,主桥为四跨预应力混凝土变截面连续箱梁,跨径组合80 m+140 m+140 m+80 m,主桥中主墩位于河道中央,采用高桩承台和钢管桩基础。2010年桥梁建成时,该桥中主墩防撞设施采取永临结合方式将施工承台用的钢套箱作为永久性防撞设施。2020年在开展的上海市内河跨航道市管桥梁防撞(护)工程(二期)中,在原有防撞设施外侧增设自浮

式防撞钢套箱,内外防撞设施实景如图1所示。经调研,本桥先后受到7次船舶撞击,不仅造成防撞设施严重受损,碰撞船舶还发生沉船现象。受损防撞设施的防撞性能急剧下降,存在安全隐患,严重影响大桥的行船安全。2024年经业主批准,立项对本桥水中墩防撞设施进行修复。按照业主要求,修复后的防撞设施的船撞力削减比例不低于原设计标准,同时尽量减缓碰撞船舶所受到的损伤程度。这是本项目修复设计的关键和难点。

1 工程概况

1.1 防撞设施设计介绍

本桥按3 000 t级内河散货轮船进行防撞设计,

收稿日期: 2026-03-15

作者简介: 罗东伟(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。



图1 内外防撞设施实景

现状防撞设施由内固定式防撞钢套箱和外自浮式防撞钢套箱组成,防撞设施布置如图2所示。

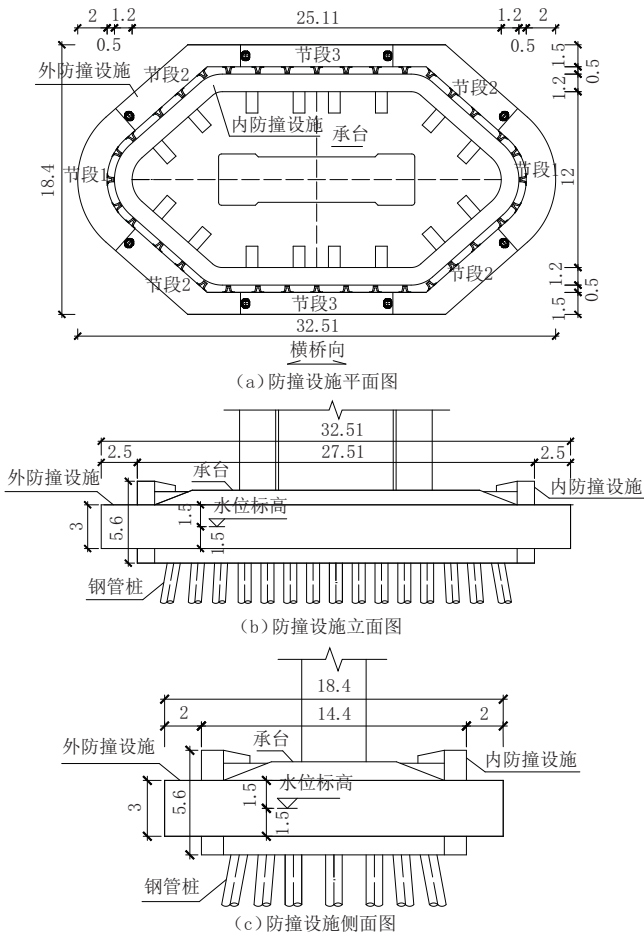


图2 防撞设施布置(单位:m)

内固定式防撞钢套箱的设计与建桥时承台的施工相结合,即内固定式防撞钢套箱既作为建桥时承台施工用的钢模板,又作为防止运营期船舶直接撞击承台的防护设施,内钢套箱与承台固定式连接。内钢套箱平面尺寸为27.51 m(横桥向)×14.4 m(顺桥向),高5.6 m,套箱壁体为双壁结构,厚1.2 m。

外自浮式防撞钢套箱为桥梁建成后新增结构,自浮在内固定式防撞钢套箱外围。外钢套箱由内侧板、外侧板、底板、顶板、舱壁板、箱内加劲及拱形橡胶护舷组成,箱体内部填充耗能芯材,拱形橡胶护舷

位于钢套箱的内侧面,起到与内钢套箱缓冲隔离的作用。外钢套箱表面采用玻璃纤维增强复合塑料进行防腐,采取增加配重的方式,使其在水上、水下的高度比例为1:1。外钢套箱平面尺寸为32.51 m(横桥向)×18.4 m(顺桥向),高3 m,顺桥向套箱厚1.5 m,横桥向套箱厚2 m。为了运输和施工安装方便,外钢套箱共分为8个节段,节段间采用法兰连接。

1.2 防撞设施船撞事故与维修历史

经调研,自2021年4月至2024年4月,本桥共发生7起船撞事故,具体如表1所示。

表1 船撞事故统计

编号	时间	事故描述
1	2021-04-29	一装载钢渣货船与防撞设施碰撞,船体右侧舷板6.5 m撕裂口进水,船舶当场沉没
2	2021-06-01	一装载黄沙货船与防撞设施碰撞,船体右侧舷板2.5 m撕裂口进水,船舶抢滩后进水搁浅
3	2021-06-25	一装载石子货船与防撞设施碰撞,船舶右舷后侧破损进水,当场沉没于桥西侧距南岸约40 m处
4	2021-08-13	一装载石子货船与防撞设施碰撞,船体右侧舷板进水,后因抢滩未果,沉没河道中
5	2021-08-22	一装载黄沙货船与防撞设施碰撞,船体进水,后因抢滩未果,沉没河道中
6	2023-05-04	一装载陶土货船与防撞设施碰撞,卸货减载后成功脱险,船体左侧中部围板约3 m裂口
7	2024-04-11	一装载石子货船与防撞设施碰撞,船舶逃逸

由表1可知,船舶与防撞设施发生碰撞时,在造成防撞设施受损的同时,也发生了沉船事件。经相关分析,沉船是由外自浮式防撞设施因碰撞变形在外表面形成尖锐凸起物划破船体所致。这是修复方案需特别关注的重点。经历前5次船撞事故后,外自浮式防撞设施东南角严重受损,钢套箱外表面凹凸,表层玻璃纤维防腐层脱落。针对外防撞设施破损情况,桥梁养护单位采取了如下应急维修措施:(1)对受损的东南角进行水下探摸,对突出原立面的尖锐凸起物进行水下切割,并在东南角凹陷位置补充轮胎防护;(2)在表面玻璃纤维防腐层脱落位置涂刷水性环保油漆;(3)沿防撞设施一圈布设警示照明灯带;(4)在桥梁助航标志上方和桥墩四周增设泛光灯。防撞设施经过上述维修后一直使用至此次修复整治。航道部门针对船撞事件,在航道上下游设置船舶行驶引导标志,加强监管桥区范围内的船舶驾驶。

1.3 防撞设施专项检测

在此次修复方案确定前期,由专业检测单位对本桥防撞设施进行了专项检测,检测结果如下。

(1)桥墩检测结果。墩柱及承台结构完好,仅表面有少量混凝土收缩裂缝。

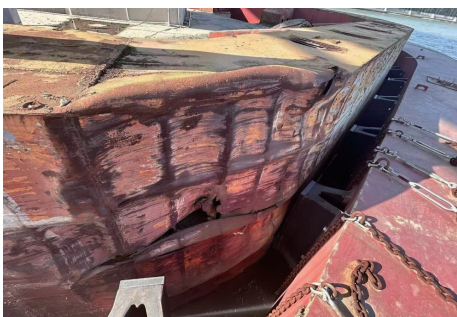
(2)内防撞钢套箱检测结果。顶板有3处局部锈蚀,每处锈蚀面积约 1 m^2 ,锈蚀深度约 4 mm [见图3(a)]。外侧板有2处较大变形,最大变形面积约 1.8 m^2 [见图3(b)];1处严重变形破损,面积约 8.8 m^2 [见图3(c)]。另外,钢结构涂层局部脱落。



(a) 顶板锈蚀,锈蚀面积约 1 m^2



(b) 外侧板变形,变形面积约 1.8 m^2



(c) 外侧板严重变形破损,面积约 8.8 m^2

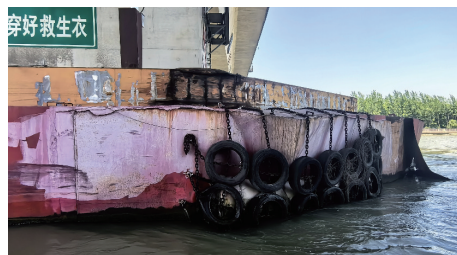
图3 内防撞钢套箱现场检测结果

(3)外防撞钢套箱检测结果。钢套箱外侧板多处变形,其中2处较大内凹变形深度分别达到 300 、 500 mm [见图4(a)];2处焊缝开裂,最大长度约 750 mm ,最大宽度约 10 mm [见图4(b)];表层玻璃纤维防腐层大面积脱落[见图4(c)];钢套箱内部有进水现象,整体向东南方向倾斜,倾斜角度约 1.18° 。

2 防撞设施修复设计

2.1 内固定式防撞钢套箱修复方案

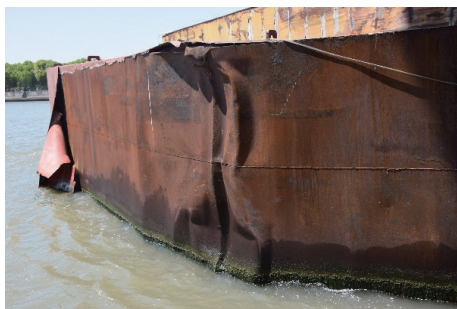
由于内防撞钢套箱整体状况较好,仅1处外侧钢板变形破损和2处局部变形,可以通过局部修复恢复原有防撞性能。若采取拆除更换,涉及水上、水下



(a) 外侧板凹陷变形,凹陷深度 500 mm



(b) 焊缝开裂,开裂长度约 750 mm



(c) 表层玻璃纤维防腐层大面积脱落

图4 外防撞钢套箱现场检测结果

施工,工序复杂、施工周期长、造价高,对桥梁承台结构也有影响。因此,综合考虑防撞性能恢复性、施工便利性和造价经济性,内防撞钢套箱采取局部维修方案,具体包括2处局部变形钢板矫正、3处锈蚀钢板贴板焊接修复、1处破损钢板切割焊接更换和钢结构外表面防腐涂层整体修复等内容。其中,钢结构外表面防腐涂层修复采用水性环保涂料进行修复。

2.2 外自浮式防撞钢套箱修复方案

外防撞钢套箱出现多处变形、焊缝开裂,以及内部进水呈倾斜状态,防撞性能严重下降。若采取局部修复,防撞性能很难恢复至原设计标准。同时,现场施工时间长、施工风险高、费用相对于拆除新建并无优势。因此,外防撞设施修复采取拆除现状自浮式防撞钢套箱并新建外防撞设施方案。

(1)新外防撞设施型式比选。水中桥墩常见的防撞设施包括附着式防撞设施、群桩防撞设施和浮泊体系拦截设施^[1-2]。群桩防撞设施为在所保护桥墩上下游设置防撞群桩,以群桩被撞来保护桥墩的一种防撞设施。这种设施施工周期长、造价高,一般

适用于航道通航不受限的宽阔水域。本桥所在桥位通航净宽比较紧张,这种设施不适合本项目。浮泊体系拦截设施为一种由浮体、钢丝绳、锚定物等组成,漂浮在水面上的防护措施。这种设施依靠浮体移动、钢丝绳变形和锚定物移动来吸收船舶撞击能量。这种设施占用水域较宽,一般适用于宽阔的非通航孔水域,防止船舶走偏航道,撞击非通航孔桥墩。因此,这种设施也不适合本项目。附着式防撞设施为一种采用钢结构等形成的防撞附着物附着在桥墩周围,以附着物的变形缓冲来保护桥墩的防护设施^[3-4]。这种设施防护性能较好、施工简单、易于维护且造价较低,更适合本项目。

附着式防撞设施又可细分为固定式防撞设施和自浮式防撞钢套箱^[5-6]。固定式防撞设施为防撞附着物采用焊接或者锚栓连接方式固定在承台周围的一种附着式防撞设施。自浮式防撞钢套箱(即现状外防撞设施型式)为防撞钢套箱与承台采用橡胶护舷隔离以自浮状态围在承台一圈的一种附着式防撞设施。对于本项目,自浮式防撞钢套箱因现场安装方便、设施高度较小、位置可随水位变化、对桥梁结构几乎无影响且船撞力削减比例较高而比较适用。本项目在自浮式防撞钢套箱具体设计时,针对现状钢套箱一些破损特点进行优化。

(2)新外自浮式防撞钢套箱优化设计。新外自浮式防撞钢套箱优化设计应满足以下目标:

- a. 不超过原防撞钢套箱的通航结构边界、不侵占航道。
- b. 防撞钢套箱的消能效果维持现状(在代表船型 3 000 t,船舶撞击速度 4.2 m/s 下,防撞设施撞击力削减的平均比例不低于 30%)。
- c. 尽量减缓对碰撞船舶的损伤,根据碰撞事故调查,发生碰撞的船舶易发生船体划破进水甚至沉船事故。
- d. 增加结构的后期维保便利性,原外防撞钢套箱采用玻璃纤维防腐层,一旦该防腐层发生脱落,后期修复困难。

在满足上述设计目标前提下,新外自浮式防撞钢套箱维持原结构尺寸,针对现状钢套箱一些破损特点,在钢套箱结构、构造细节和外表面防腐等方面进行了优化,具体如下。

(1)钢套箱结构优化。结合专项检测 results 和现场观察,钢套箱的外侧板发生多处较大结构变形或破损,而对应位置的顶板并未发生变形,说明顶板结

构过强、侧板结构偏弱。当发生船舶撞击时,仅外侧板发生变形而顶板不发生变形,整体防撞消能效果未得到有效发挥。同时,外侧板易发生破损,形成凸起尖锐物,易划破船只,严重时可能引起沉船事故。对此,新方案取消防撞设施顶板过强的加劲板,同时提升侧面板的加劲板刚度,将之前的弱肋 L100×80×8 mm 提升为 HP140×9 mm、强肋 L140×90×8 mm 提升为倒 T8×250/10×120 mm,使顶板和侧板共同变形,结构消能更为合理。根据设计经验,钢套箱的外板厚度宜与代表船型的外板厚度接近。此时钢套箱的消能效果和自身抗撞能力更优。本桥所在航道代表船型为内河 3000 t,此类型船舶外板厚度一般为 8 mm,因此新钢套箱外板厚度由原来的 6 mm 加厚至 8 mm。

(2)钢套箱构造细节优化。为减少对碰撞船舶所造成的损伤,在钢套箱横桥向迎撞面增设 SA400 拱形外橡胶护舷进行防撞缓冲,此时不侵占航道。同时,为进一步减少钢套箱的凸出尖锐位置,将钢套箱拐角处由尖角结构改为圆弧过渡,将外侧板顶部 T 接焊缝改为棱角焊缝,并在外侧板底部增设半圆形钢护舷。

(3)钢套箱外表面防腐优化。原外防撞钢套箱采用玻璃纤维防腐层,该防腐层对钢结构的防腐效果较好,但在发生较大撞击时易脱落、后期修复困难。因此,本设计采用重防腐油漆涂装进行防腐。

现状和优化后的外防撞钢套箱结构如图 5 和图 6 所示。

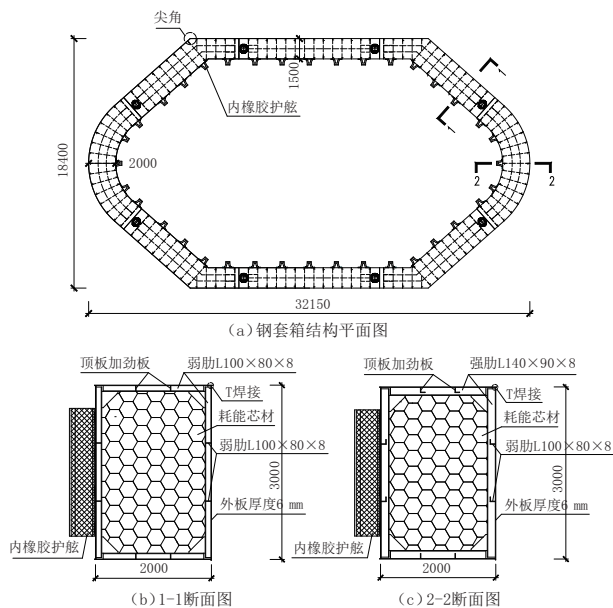


图 5 现状外自浮式防撞钢套箱结构(单位:mm)

2.3 新防撞设施船撞力削减效果验证

为验证新防撞设施船撞力削减效果,利用 Patran

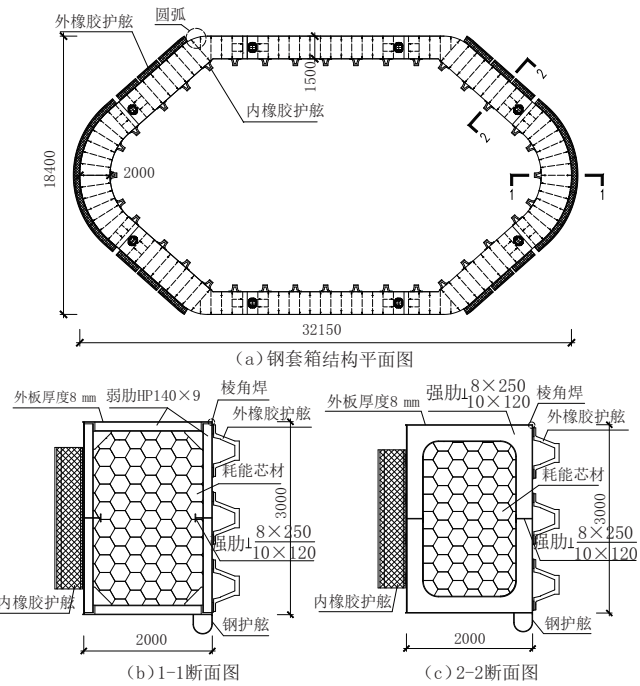


图6 优化后的新外自浮式防撞钢套箱结构(单位:mm)

建立船桥碰撞有限元模型^[7-11],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。船桥撞击工况按照原设计标准选取,考虑防撞船型 3 000 t 级货船满载高水位以 4.2 m/s 的速度分别正面、斜向 10°、斜向 20° 撞击桥墩和钢套箱防撞设施。有限元计算模型如图 7 所示,各工况计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,新防撞设施可以有效减少船舶撞击力,在正撞以及 10°、20° 斜撞工况下,修复后的防船撞设施的船撞力削减比例均能满足原设计标准的消能目标(不低于 30%)。

3 防撞设施修复施工方案

(1)工厂内部件制作和节段运输。新外自浮式防撞钢套箱在工厂内分件分段制作,出厂前进行试拼装。检查无误后,用运输船或平板车运输至桥位施工现场。

(2)现场施工与安装。a. 将现状外防撞钢套箱分拆成 2 段,然后分段拖运至指定位置存放;b. 对内

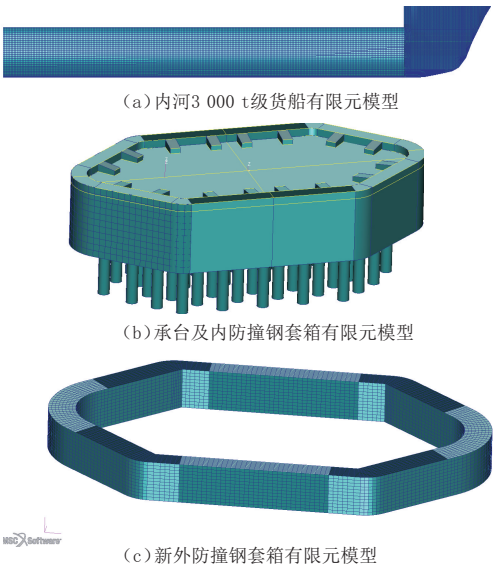


图7 船桥碰撞有限元模型

防撞钢套箱进行修复,修复完毕后,将新外自浮式防撞钢套箱在岸边按照节段组装成 2 个独立单元体;c. 将 2 个独立单元体浮运至桥墩处;d. 采用螺栓将 2 个独立单元体连接成整体,使新自浮式防撞钢套箱安装在内防撞钢套箱的一周。

(3)水上施工警戒方案。内防撞钢套箱维修、外防撞钢套箱拆除更换,均采用船舶施工方式。为保证施工期间施工船舶和桥梁结构的安全,在施工区域上下游必须设置相应的警戒船和警示标志,同时优化施工措施来尽量缩短拆除现状外防撞钢套箱和安装新外防撞钢套箱之间的空窗期。

4 结 语

通过对防撞设施的原设计资料、船撞事件、历史维修情况的调查,以及专项检测结果的分析,确定了内防撞设施采取维修、外防撞设施采取拆除更换的修复方式,既保证了防撞设施的消能效果,又避免复杂的水上施工,节约了工程造价。同时,针对原外防撞设施被撞后易造成船体划破进水甚至沉船的状况,通过防撞钢套箱结构和构造细节优化以及外侧缓冲橡胶护舷增设,极大程度地减缓了碰撞船舶可能所受到的损伤程度。本工程的设计研究和成功实

表 2 各工况下船桥碰撞计算结果

工况	防撞设施	船型	速度/(m·s ⁻¹)	碰撞角度	最大撞击力/MN	撞击时间历程/s	消能效果
1	无防撞设施	内河 3 000 t	4.2	正碰	22.03	2.2	—
2	无防撞设施	内河 3 000 t	4.2	10°斜碰	19.82	2.0	—
3	无防撞设施	内河 3 000 t	4.2	20°斜碰	15.03	1.5	—
4	新防撞设施	内河 3 000 t	4.2	正碰	15.35	2.7	30.3%
5	新防撞设施	内河 3 000 t	4.2	10°斜碰	13.42	2.3	32.3%
6	新防撞设施	内河 3 000 t	4.2	20°斜碰	9.63	1.7	35.9%

践为今后同类防撞设施的修复设计和施工提供了参考。修复后的防撞设施实景如图 8 所示。



图 8 修复后的防撞设施实景

参考文献:

- [1] 李才志,付欧阳.上海内河跨航道桥梁防撞设施分析[J].水运工程,2017(11):141-145.
- [2] 伏首圣,伏耀华,王仁贵.嘉绍大桥水中区引桥防船撞设施研究[J].公路,2013(5):202-204.
- [3] 蒋迪斌,魏思斯,曾家岩.嘉陵江大桥船撞设防标准研究及防撞方案设计[J].公路交通技术,2019(3):53-59.
- [4] 王玲,谭兴丰,徐伟洲.通航桥梁既有防船撞墩加固改建方案研究[J].城市道桥与防洪,2023(5):103-105.
- [5] JT/T 1414—2022 公路桥梁防船撞装置通用技术条件[S].
- [6] 杨海平.大跨径斜拉桥防船撞设施设计[J].城市道桥与防洪,2018(9):142-144.
- [7] 周雨立,张安宇,唐茂皓.某长江公路大桥防船撞设施研究[J].城市道桥与防洪,2023(8):131-134.
- [8] 顾民杰,伏耀华,王君杰.株洲湘江八桥防船撞设施设计及仿真计算分析[J].城市道桥与防洪,2022(8):83-87.
- [9] 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.
- [10] 董海斌,刘勇.多塔斜拉桥船撞力及防撞性能研究[J].公路工程,2025(3):173-177;202.
- [11] 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.
- [12] 阮怀圣,李龙安,杨光武,等.黄冈铁两用长江大桥抗震技术研究[J].桥梁建设,2013(43):34-39.
- [13] Camara A, Astiz M A. Analysis and control of cable-stayed bridges subject to seismic action[J]. Structural Engineering International, 2014, 24: 27-36.
- [14] Martinez-Rodrigo M D, Filiatrault A. A case study on the application of passive control and seismic isolation techniques to cable-stayed bridges; A comparative investigation through non-linear dynamic analyses[J]. Engineering Structure, 2015, 99: 232-252.
- [15] Zhang X I, Fu G N. Seismic performance and its favorable structural system of three-tower suspension bridge[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 50: 215-229.
- [16] Guan Z, Li J, Xu Y. Performance test of energy dissipation bearing and its application in seismic control of a long-span bridge[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010(15): 622-630.
- [17] 汪磊.大跨度斜拉桥减震策略分析[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [18] Zhou L, Wang X, Ye A. Shake table test on transverse steel damper seismic system for long span cable-stayed bridges[J]. Engineering Structures, 2019, 179: 106-119.
- [19] 李冲,杨雷,刘得运,等.地震作用下多塔斜拉桥横向约束体系研究[J].世界桥梁,2022,50(5):61-66.
- [20] 季阳,耿方方,刘丹丹,等.多塔斜拉桥纵向约束体系地震反应及减震控制研究[J].江苏建筑,2019(1):64-68.
- [21] Shen X, Wang X, Ye Q, et al. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges[J]. Engineering Structure, 2017, 141: 14-28.
- [22] JTG T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].
- [23] 张菊辉,钱逸卿,管仲国.非规则平行匝道桥部分减隔震体系地震响应与减震机理[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):1019-1031.

(上接第 155 页)

置的减震效应研究[J].地震工程与工程振动,2013(33):146-152.