

DOI:10.11784/tdxbz202405031

# 单塔斜拉桥在船舶撞击下动力响应及防撞设计

田力<sup>1,2</sup>, 张晗奇<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300350)

**摘要:** 首先, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立船-桥碰撞有限元模型, 以附加质量模型考虑流体效应, 利用落锤冲击试验验证了撞击作用下混凝土本构模型的有效性. 其次, 开展了不同撞击角度、不同船舶航速下船舶高速撞击斜拉桥桥塔数值模拟, 分析了桥塔损伤、碰撞力、桥塔位移、桥面位移、索力变化等方面的差异, 并将碰撞力与国内外规范公式进行对比分析. 再次, 研究了 30.0 节 (1 节 = 0.5144 m/s) 船速下桥塔瞬时倒塌过程及桥塔受损后持续荷载作用下倒塌机理. 最后, 为桥塔设计一种以 FRP 和橡胶为主要材料的防撞装置, 模拟分析其在降低桥塔动力响应方面的防撞效果. 结果表明: 当船舶以高速撞击斜拉桥桥塔时, 船桥碰撞整体动力响应随撞击角度和船舶航速增大而增大; 采用一些国内外规范中的碰撞力公式偏于不安全; 船桥碰撞后斜拉索索力迅速增大, 靠近桥塔处索力变化率最大; 船速为 30.0 节时, 桥塔在碰撞后发生桥塔肢腿错位断裂的倒塌; 船速为 25.0 节时, 塔柱已有较大损伤破口, 桥塔在遭受船舶碰撞后向碰撞侧倾斜, 在重力及桥面荷载的持续作用下桥塔侧向位移逐渐增大而发生桥塔倒塌; 设计的防撞装置能有效避免桥塔损伤, 能削减碰撞力峰值、塔顶侧向位移、桥面位移及桥塔能量, 同时保护斜拉桥与船舶.

**关键词:** 船-桥碰撞; 数值模拟; 附加质量; 动力响应; 防撞装置

中图分类号: U443.26

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)04-0343-14

## Dynamic Response of Single-Tower Cable-Stayed Bridge Under Ship Impact and Corresponding Anti-Collision Design

Tian Li<sup>1,2</sup>, Zhang Hanqi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** First, based on the finite element software ANSYS/LS-DYNA, the finite element model of ship-bridge collision was established with the fluid effect being taken into account by an additional mass model, and the validity of the concrete constitutive model under impact was verified by a drop hammer impact test. Second, numerical simulations of a cable-stayed bridge under the impact of a ship at different impact angles and different ship speeds were carried out, so to analyze the differences in changes in the bridge tower damage, collision force, bridge tower displacement, bridge deck displacement and cable force. In addition, the simulated value of collision force was compared with those calculated using the standard formulas both at home and abroad. Third, the instantaneous collapse process of the bridge tower at a ship speed of 30.0 knots (1 knot = 0.5144 m/s) and the collapse mechanism under long-term load after the bridge tower damage were studied. Finally, an anti-collision device with FRP and rubber as its main materials was designed for the bridge tower, thus simulating its anti-collision effect from the perspective of reducing the dynamic response of the bridge tower. Results show that when the ship collides with the cable-stayed bridge tower at high speeds, the overall dynamic response of ship-bridge collision will increase with both the growing

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-11-08.

作者简介: 田力(1970—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 田力, ltian@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178310, 52078333).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51178310, No. 52078333).

impact angle and the growing ship speed. The values of collision force calculated using the standard formulas both at home and abroad are inclined to be unsafe. The cable force will rapidly go up after the ship-bridge collision, and its rate of change near the bridge tower is the largest. At a ship speed of 30.0 knots, the bridge tower will collapse after the collision, with its leg being misaligned at the impact point. In comparison, the tower column will have significant damage and openings at a ship speed of 25.0 knots, and the bridge tower tends to tilt towards the impact side after the collision. Under the continuous action of gravity and bridge deck load, the lateral displacement of the bridge tower will gradually rise and eventually lead to the collapse of the bridge tower. The anti-collision device designed in this paper can effectively avoid damage to the bridge tower and reduce the peak value of the collision force, the lateral displacement of the tower top, the bridge deck displacement and bridge tower energy while protecting the cable-stayed bridge and the ship.

**Keywords:** ship-bridge collision; numerical simulation; additional mass; dynamic response; anti-collision device

近年来,世界各地出现了一些劫持船舶、胁迫船员进行危险航行的行为. 这类危险航行行为如果实施于跨江、跨海大桥上,其引发的社会、经济、环境等问题将不堪设想. 一般而言,危险航行指驾驶船舶高速撞击桥梁等构筑物,进而引发桥梁损伤及倒塌等事故. 因此,以危险航行行为为主要背景,研究船舶高速撞击斜拉桥的动力响应具有极大的工程价值.

在船撞桥的动力响应研究方面,国内外学者针对不同桥型,采用数值模拟的方式进行了相应桥梁的抗撞能力分析. Shen 等<sup>[1]</sup>基于 LS-DYNA 复现了长江太阳埠大桥倒塌的全过程,得出该连续梁桥最不利碰撞工况为船身侧面撞击梁桥,而非船艏正撞或船艏斜撞. Fan 等<sup>[2]</sup>建立了 4 跨连续梁桥有限元模型,考虑桥墩腐蚀、冲刷和碰撞共同作用下的桥墩动力响应,得出腐蚀和冲刷在碰撞过程中的不利影响,并提出有规范缺乏对最大冲击速度的规定. Kameshwar 等<sup>[3]</sup>研究了驳船对桥梁立柱的冲击性能,得出了不同设计参数和桩基自由长度对桥梁立柱破坏模式的影响,其破坏可能是由剪切、弯曲或者两者共同作用引起的. 郑益华<sup>[4]</sup>建立了大跨度悬索桥模型,研究了单船及船队撞击下的主塔动力响应,得出大型船队相较单船的撞击力提高幅度小的结论. 郑植等<sup>[5]</sup>建立了精细化流固耦合模型以考虑水与船、梁桥的相互作用,结论为考虑流体作用对碰撞力大小影响较小,但不同工况下船舶的航迹显著不同. 王贵春等<sup>[6]</sup>基于 ANSYS 建立了斜拉桥桥墩模型,比较了不同桩土模型对船撞桥的动力响应影响,结论为不同桩土模型下碰撞力数值接近,而桥墩动力性能随船速和船舶质量的增大而增大. 此外,国内外规范中也有相应的桥梁船撞力经验公式,利用经验公式研究船桥碰撞的方法简便快捷:国内规范主要有《铁路桥涵设计规范》<sup>[7]</sup>、《公路桥涵设计通用规范》<sup>[8]</sup>和《公路桥梁抗撞设计规范》<sup>[9]</sup>

等;国外规范主要有 AASHTO 规范<sup>[10]</sup>、Eurocode 规范<sup>[11]</sup>等.

在防撞装置研究方面,一些学者设计出了诸多不同材料、型式的被动防撞装置. Jiang 等<sup>[12]</sup>基于 LS-DYNA 设计出了一种以纤维增强复合材料(fiber reinforced plastics, FRP)为主要材料的浮式防撞结构,并对该结构进行了船舶碰撞分析,结果表明 FRP 材料具有良好的吸能能力,能显著降低碰撞力. Sun 等<sup>[13]</sup>提出了一种新型抗撞结构玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced plastics, BFRP)护栏,并将其与钢护栏对比进行抗撞数值模拟分析,结果显示 BFRP 护栏的防撞性能优于钢护栏. Chen 等<sup>[14]</sup>提出了两种新型波纹钢桥墩防撞结构,两种结构外板分别为波纹钢板和普通钢板,并基于 LS-DYNA 进行摆锤冲击模拟分析,结果显示两种结构均能减小碰撞力和位移响应,且波纹钢板的吸能效果更优异. 冯明扬等<sup>[15]</sup>提出橡胶混凝土外包覆层防撞结构,利用摆锤撞击桥墩试验检测防撞和减振性能,结果显示该结构能有效减小撞击力、墩顶位移、墩底应变,具有良好的耗能性能.

综上所述,不同桥型桥梁在船舶撞击下的结构响应研究已经有较多成果,不同材料的防撞装置也正被诸多学者广泛研究,但对于斜拉桥在船舶以高速危险航行速度撞击下的损伤效应及倒塌研究较少,且目前设计出的防撞装置在船舶高速撞击下的防撞效果有待进一步检验. 为此,本文以一座单塔斜拉桥为研究对象,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 研究万吨船舶高速撞击下斜拉桥桥塔损伤、碰撞力、整体位移及倒塌情况. 此外,本文结合防撞结构研究现状及该桥参数,设计一种以纤维增强复合材料和橡胶为主要材料的防撞装置,并比较有无防撞装置在损伤、碰撞力峰值、桥塔位移、桥塔能量等方面的差异.

# 1 有限元模型

## 1.1 船舶有限元模型

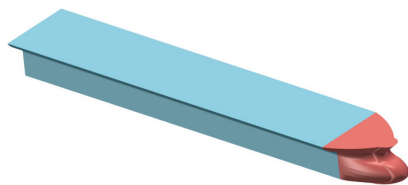
本文的船舶模型参考  $1 \times 10^4$  t 散货船的型线结构设计图, 将船舶分为船艏和船身两部分.

船艏部分为球鼻型艏, 采用 Shell163 单元, 并进行精细化建模, 网格尺寸控制在 300 mm 以内. 船身部分远离碰撞区域, 采用 Solid164 单元, 近似按刚体处理, 网格尺寸控制在 1000 mm 以内. 船舶具体参数见表 1. 整船有限元模型共 45 126 个单元, 其中船艏部分为 29 326 个单元. 船舶模型及船艏网格划分模型如图 1 所示.

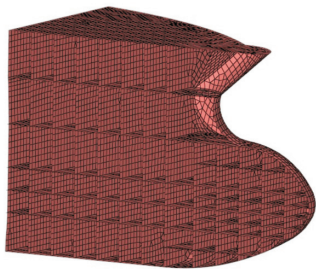
表 1 船舶主要参数

Tab.1 Main parameters of ship

总长/m	设计水线长/m	型宽/m	型深/m	吃水/m	排水量/t
126.43	121.46	17.97	9.44	7.01	12 733.08



(a) 船舶模型



(b) 半边船舶网格划分模型

图 1 一万吨散货船模型

Fig.1 Model of bulk carrier of  $1 \times 10^4$  t

## 1.2 斜拉桥有限元模型

本文的斜拉桥模型以泸州泰安长江大桥<sup>[16]</sup>为蓝本, 全桥布置如图 2 所示. 本文主要对桥塔的动力响应及损伤效应进行详细数值模拟分析, 因此对桥面及

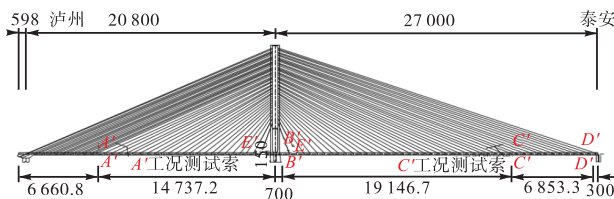


图 2 斜拉桥全桥布置(单位: mm)

Fig.2 Layout of whole cable-stayed bridge (unit: mm)

斜拉索等部件参数进行一定的修正及简化.

斜拉桥有限元模型全长修正为 540 m, 桥面宽度为 29.5 m, 由桥塔、桥面、斜拉索、桩基和土体组成. 桥塔为混凝土结构, 形式为横桥向“H”形, 顺桥向“一”字形. 桥塔模型由塔柱、3 道横梁、墩身和承台组成, 具体参数见表 2(以横桥向方向为长, 以顺桥向方向为宽). 塔柱和横梁为箱型截面, 截面厚度为 1 m, 桥身和承台为实心矩形截面. 主梁为单箱 4 室箱梁. 斜拉索采用  $\phi 15.24$  环氧喷涂钢丝线, 共 76 根. 主塔下采用 20 根直径 2.5 m 的群桩基础, 顺桥向 4 排, 横桥向 5 排, 桩长 22 m, 两桩中心距 6 m. 土体平面尺寸的长、宽分别为承台长、宽的 2 倍, 高为 15 m, 土体周围采用黏弹性人工边界.

表 2 桥塔主要尺寸

Tab.2 Main dimensions of bridge tower

部件	长/m	宽/m	高/m
单个塔柱	6.0	13.0	146.0
墩身	21.0	13.0	6.0
承台	31.3	22.5	7.0
上、中横梁	17.5	13.0	3.0
下横梁	28.2	13.0	6.0

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 建立全桥模型, 如图 3 所示. 斜拉索为 Beam161 单元, 其余均为 Solid164 单元. 斜拉桥为漂浮体系. 斜拉索与桥塔和桥面均以铰接的方式连接, 即耦合桥塔节点和主梁节点与斜拉索两端节点在各个方向的自由度. 主梁两侧设置边界支座用以支撑. 土体底面和桩底按固结处理. 桥塔靠近碰撞区域的单元网格尺寸控制在 250 ~ 500 mm, 远离碰撞区域的网格尺寸控制在 1 500 mm 以内. 斜拉桥模型共计 230 256 个单元.

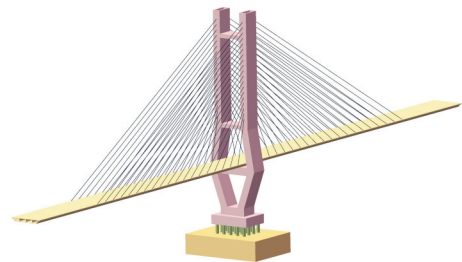


图 3 斜拉桥有限元模型

Fig.3 Finite element model of cable-stayed bridge

## 1.3 附加质量模型

经典的船舶碰撞问题中常采用附加质量法考虑流体在碰撞中的影响, 一般通过增加远离碰撞区域的船舶密度来实现附加质量. 本文为船桥碰撞问题, 除了考虑船舶的附加质量外, 也考虑斜拉桥桥塔附连水质量<sup>[17]</sup>.

(1) 船舶的附加质量取船舶质量的 0.04 倍.

(2) 承台、墩身、塔柱基于 Morison 方程求解单位柱体高度的动水压力, 并按不同水位高度施加附加质量. 根据文献[17], 简化的单位高度附加水质量公式为

$$M_w = (C_m - 1)\rho\pi D^2/4 \quad (1)$$

式中:  $C_m$  为质量系数;  $\rho$  为柱体密度;  $D$  为迎水面边长. 本文的承台、墩身和桥塔均为矩形截面, 因此质量系数的计算公式为

$$C_m = 1.51(D/L)^{-0.17} + 1 \quad (2)$$

式中  $L$  为顺水面边长.

各部件单位高度的附加水质量  $M_w$  计算结果见表 3.

表 3 单位高度附加水质量

Tab.3 Additional water mass at unit height

柱体类型	迎水面边长 $D/m$	顺水面边长 $L/m$	质量系数 $C_m$	单位高度附加水质量 $M_w/kg$
承台	22.5	31.3	2.597	635 043.352
墩身	13.0	21.0	2.638	217 450.516
单一塔柱	13.0	6.0	2.324	175 739.293

(3) 桩基的单位高度附加水质量参照式(1), 其中  $C_m$  取 2. 同时由于桩基是群桩形式, 应考虑群桩效应. 根据文献[17]可知, 本文中群桩系数  $K = 1.4$ . 单一桩体的单位高度附加水质量应乘以群桩系数  $K$ , 即本文单桩的  $M_w$  为 6 872.234 kg. 桩基均埋于水中, 需要对全桩施加附加水质量.

除船舶外, 其余部件的附加质量通过定义关键字 \*ELEMENT\_MASS\_PART 实现, 根据不同的水位施加不同的附加水质量数值. 船艏构件定义自动单面接触. 船舶与斜拉桥、桩基与土体、桥塔与桥面碰撞部分定义自动面面接触.

## 2 本构模型及模型有效性验证

### 2.1 本构模型

船艏处于碰撞区域, 其钢材本构模型选用 \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC, 其参数见表 4, 其中  $\rho_0$  为密度,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $\sigma_0$  为屈服强度,  $E_t$  为切线模量,  $C$  为应变率系数,  $f_s$  为失效应变. 船身远离碰撞区域, 对碰撞的影响较小, 故选用 \*MAT\_RIGID 即刚体材料进行模拟.

表 4 船艏钢材材料参数

Tab.4 Material parameters of bow steel

$\rho_0/(kg/m^3)$	$E/Pa$	$\nu$	$\sigma_0/Pa$	$E_t/Pa$	$C/s^{-1}$	$f_s$
7 850	$2.1 \times 10^{11}$	0.3	$2.35 \times 10^8$	$1.2 \times 10^9$	40.4	0.335

土体材料模型选用 Drucker-Prager 模型, 其参数见表 5, 其中  $\theta$  为内摩擦角,  $c$  为内聚力. 通过关键字 \*MAT\_ADD\_EROSION 设置土体失效主应变为 0.1, 失效剪应变为 0.5.

表 5 土体材料参数

Tab.5 Material parameters of soil

$\rho_0/(kg/m^3)$	$E/Pa$	$\nu$	$\theta/rad$	$c/Pa$
1 890	$2.1 \times 10^8$	0.35	0.253	$1.8 \times 10^4$

桥塔选用 HJC 模型, 即定义关键字 \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE, 其主要计算参数见表 6, 其中,  $f_c$  为准静态单轴抗压强度,  $G$  为剪切模量,  $T$  为最大拉伸静水压力,  $P_1$  为压实压力. 经试算, 取失效主应变为 0.15, 失效剪应变为 0.8.

表 6 混凝土材料参数

Tab.6 Material parameters of concrete

$\rho_0/(kg/m^3)$	$f_c/Pa$	$G/Pa$	$T/Pa$	$P_1/Pa$
2 440	$5 \times 10^7$	$1.48 \times 10^{10}$	$4 \times 10^6$	$8 \times 10^8$

桥面分为两部分建模, 在碰撞阶段可能与桥塔发生碰撞的部分采用与桥塔相同的本构模型, 而无法发生碰撞的部分采用线弹性模型, 密度为  $2 400 kg/m^3$ . 斜拉索需要施加预应力, 材料本构为 \*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL, 然后再使用关键字 \*LOAD\_THERMAL\_LOAD\_CURVE 进行预应力的施加.

鉴于文献防撞装置中的 FRP 材料具有各向异性和弹性的性质, 采用正交各向异性弹性模型进行模拟, 参考文献[12], 其主要材料参数见表 7, 其中,  $E_x$ 、 $E_y$  和  $E_z$  为弹性模量,  $G_{xy}$ 、 $G_{xz}$  和  $G_{yz}$  为剪切模量, NUXY、NUXZ 和 NUYZ 为次泊松比. 取失效主应变为 0.12.

表 7 FRP 材料参数

Tab.7 Material parameters of FRP

材料参数	取值
$\rho_0/(kg/m^3)$	1 560
$E_x/Pa$	$1.03 \times 10^{10}$
$E_y/Pa$	$8.9 \times 10^9$
$E_z/Pa$	$8.9 \times 10^9$
$G_{xy}/Pa$	$4.2 \times 10^9$
$G_{xz}/Pa$	$3.6 \times 10^9$
$G_{yz}/Pa$	$3.6 \times 10^9$
NUXY	0.2
NUXZ	0.2
NUYZ	0.2

橡胶使用 Mooney-Rivlin 模型, 材料参数见表 8, 其中  $C_{10}$  和  $C_{01}$  为橡胶硬度. 取橡胶失效主应变为  $0.35^{[18]}$ .

表 8 橡胶材料参数

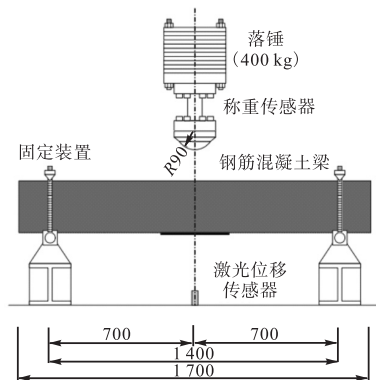
Tab.8 Material parameters of rubber

$\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\nu$	$C_{10}/\text{Pa}$	$C_{01}/\text{Pa}$
1 200	0.499	$7 \times 10^5$	$3.5 \times 10^4$

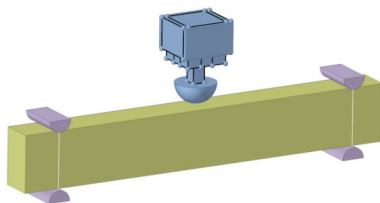
## 2.2 模型有效性验证

Fujikake 等<sup>[19]</sup>开展了钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,获得了撞击力和跨中最大位移的时程曲线.本节选取其中的 S1616 工况进行数值模拟以验证本文采用的 HJC 模型模拟桥塔受撞击的可靠性.

本试验中的矩形截面梁全长 1.7 m,截面宽 0.15 m,高 0.25 m.在距跨中 0.7 m 处设置特殊支撑装置,防止移位并可使梁自由旋转.落锤总重为 400 kg,前端有一个半径为 0.09 m 的半球形打击头,落锤距梁高度为 0.15 m.数值模型严格按照上述试验装置进行建模,梁体采用 HJC 模型,落锤使用刚体模型,并设置自动点面接触模拟落锤和梁的接触.试验装置和有限元模型见图 4.梁体及落锤靠近碰撞处的网格尺寸控制在 10 mm 以内.



(a) 试验装置示意(单位:mm)



(b) 有限元模型

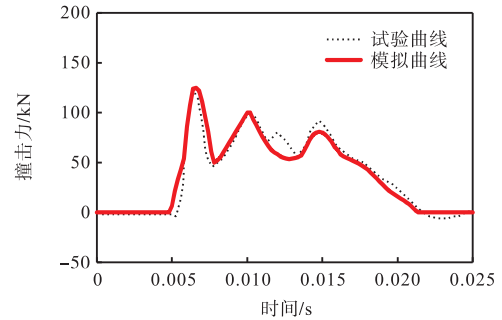
图 4 试验装置和有限元模型示意

Fig.4 Schematic of test device and finite element model

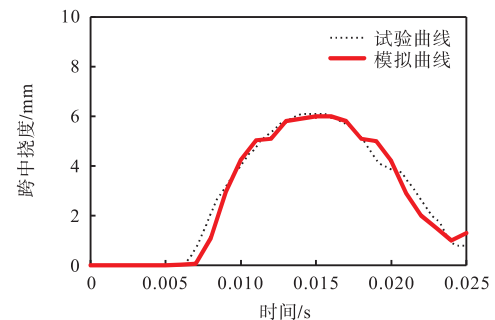
如图 5 所示,撞击力峰值分别为 124 kN 和 125 kN,相差 0.8%;跨中挠度峰值分别为 6.09 mm 和 6.01 mm,相差 1.3%.数值模拟的边界条件是理想状态,试验有人为操作不当等因素影响,因此峰值和曲线不能达到完全拟合的状态.但数值模拟的撞击力和跨中最大挠度的时程曲线与试验测得的曲线

大致相同,且峰值误差极小,因此本文采用的桥塔数值模型能较好地模拟桥塔承受撞击作用.

Guo 等<sup>[20]</sup>开展了船撞桥的缩尺试验,并用 LS-DYNA 对其进行数值模拟对比分析.试验和数值模拟中船艏均由钢板构成,且桥为钢筋混凝土梁桥.结果表明,试验结果与数值模拟结果相近,验证了模拟碰撞过程中冲击响应的有限元建模方法,其结论也增强了本文数值模型的可行性.



(a) 撞击力时程曲线



(b) 跨中挠度时程曲线

图 5 数值模拟曲线与试验曲线对比

Fig.5 Comparison between numerical simulation and test curves

## 3 船舶高速撞击下斜拉桥桥塔动力响应及倒塌分析

### 3.1 不同撞击角度下桥塔动力响应分析

以船舶航行方向与横桥向方向夹角  $\alpha$  为撞击角度并将其作为本节工况的变量,取  $\alpha$  分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $75^\circ$ ,分别对应工况 1~5.如图 6 所示,船舶撞击位置为塔柱侧棱边.船舶吨位为  $1 \times 10^4$  t,航行速度为 27.5 节(1 节 = 0.5144 m/s),水位为 17.5 m.本节各工况计算时长为 8 s.

本节工况模拟的水位线较高,相较于低水位线工况更为危险.这是因为处于高水位时,船艏上部和球鼻艏处会撞击塔柱,造成的损伤破口体积更大;处于低水位时,船艏只有球鼻艏处会撞击墩身或承台,损伤较小.其次,墩身和承台相较于塔柱几何尺寸更

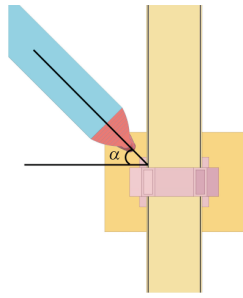


图 6 撞击角度为  $\alpha$  时工况示意

Fig.6 Schematic of working condition at impact angle  $\alpha$

大,且为实心混凝土,刚度更大,因此高水位时本桥受船舶碰撞动力响应影响更显著.

图 7 展示了各工况在第 8 s 时桥塔局部损伤云图.由图 7 可知,随着撞击角度的增大,失效单元数量逐渐增多,桥塔损伤体积逐渐增大.船舶沿角度分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和  $75^\circ$ 撞击时均产生较大破口,其中迎撞塔柱沿横桥向方向完全被破坏,沿顺桥向方向破口长度均超过 6 m,沿高度方向破口长度均超过 9 m.

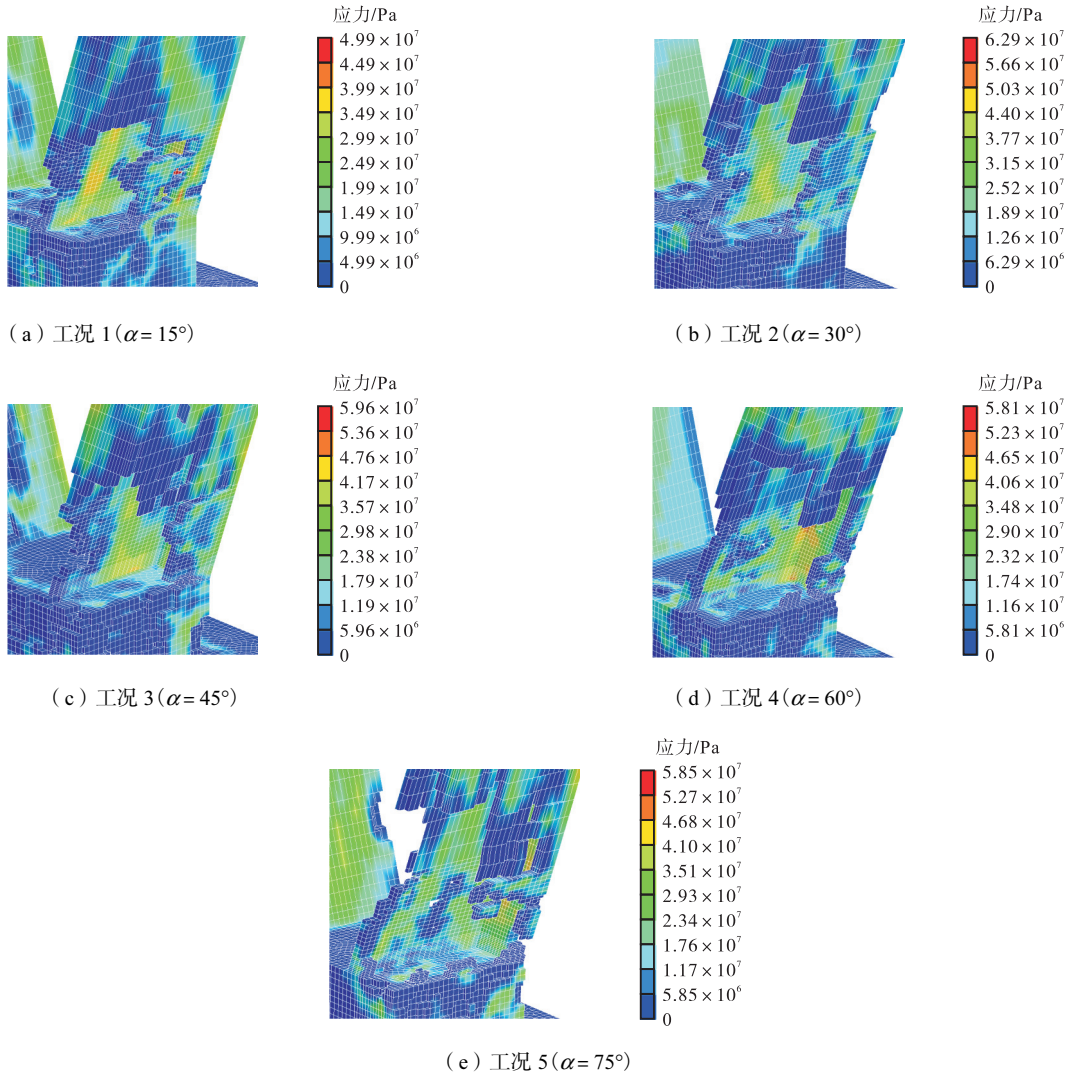


图 7 不同撞击角度的桥塔损伤应力云图

Fig.7 Damage stress nephogram of bridge tower at different impact angles

不同撞击角度工况的碰撞力峰值(数值模拟值)如表 9 所示,并将其与规范设计值进行对比.当撞击角度分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和  $75^\circ$ 时,该峰值分别出现在碰撞开始后的 0.22 s、0.24 s、0.32 s、0.34 s 和 0.40 s.由此可知:随着撞击角度的增大,碰撞力峰值会逐渐增大且峰值出现的时间也越长.由表 9 可知,小角度撞击时,最接近数值模拟结果的是《公路桥梁

抗撞设计规范》<sup>[9]</sup>的设计值.若工况 1 采用该规范进行桥梁抗撞设计则是偏于安全的.大角度撞击时,以 AASHTO<sup>[10]</sup>设计值较接近数值模拟结果,但仍低于数值模拟的数据,最大相差率为 23.5%.《铁路桥涵设计规范》<sup>[7]</sup>则相差最大,若以该规范进行设计则会偏于不安全.

为测得各类工况下斜拉桥沿不同高度处的位移

表9 不同撞击角度的碰撞力峰值

Tab.9 Peak values of collision force at different impact angles

工况	碰撞角度/(°)	数值模拟值/MN	文献[9]设计值/MN	文献[7]设计值/MN	文献[8]设计值/MN	文献[10]设计值/MN	文献[11]设计值/MN
1	15	183	198.6	38.30	141.5	169.8	100.0
2	30	190	185.8	34.30	141.5	169.8	100.0
3	45	207	165.4	28.00	141.5	169.8	100.0
4	60	210	138.9	19.80	141.5	169.8	100.0
5	75	222	108.0	10.26	141.5	169.8	100.0

大小,以桩顶为 0 m 测点处,塔柱塔顶为 159 m 测点处,沿近撞侧桥塔高度方向选取 25 个点,测出其沿横桥向方向和顺桥向方向的位移,如图 8 所示。

各测点位移峰值曲线见图 9。由图 9 可知:随着

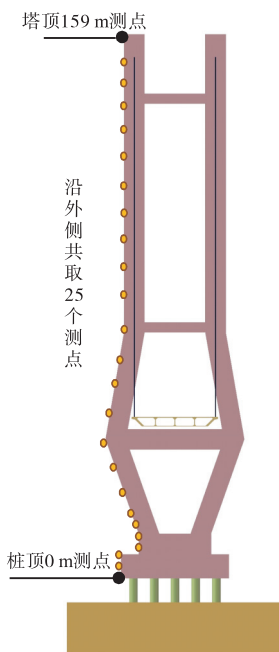
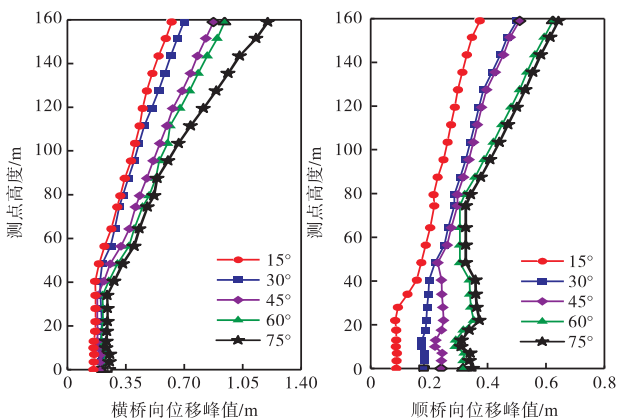


图8 桥塔测点示意

Fig.8 Schematic of measuring points on bridge tower



(a) 横桥向位移峰值曲线 (b) 顺桥向位移峰值曲线

图9 不同撞击角度的桥塔测点位移峰值曲线

Fig.9 Peak displacement curves for measuring points on bridge tower at different impact angles

撞击角度的增大,桥塔在横桥向和顺桥向位移响应均逐渐增大. 因为碰撞力沿顺桥向方向的分量随角度增大而逐渐增大,所以顺桥向位移响应也随之增大. 在横桥向位移响应方面,随着角度增大,塔柱和墩身之间的桥塔部分损伤体积逐渐增大,失效单元也随之增多,截面削弱程度不断增大,最终反映了横桥向位移响应随撞击角度增大而增大的趋势。

各工况位移响应最大的位置均位于塔顶处. 15°、30°、45°、60°和 75°对应的桥塔测点横桥向位移最大值分别为 0.625 m、0.698 m、0.874 m、0.942 m 和 1.210 m,顺桥向位移最大值分别为 0.374 m、0.501 m、0.512 m、0.623 m 和 0.643 m. 随着撞击角度增大,塔顶位移也逐渐增大。

为测得斜拉桥桥面梁沿顺桥向方向不同位置的位移,以桥面板一端沿横桥向的跨中为 0 m 测点处,以另一端沿横桥向的跨中为 540 m 测点处,共选择 21 个测点,如图 10 所示。

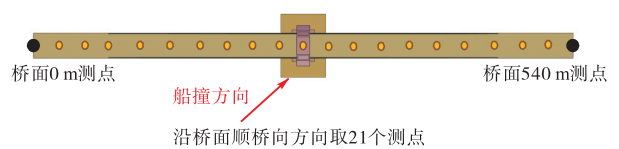


图10 桥面测点示意

Fig.10 Schematic of measuring points on bridge deck

各个测点竖向位移峰值曲线见图 11。由图 11 可知,随着撞击角度的增大,桥面竖向位移响应增大. 各工况竖向位移峰值均在 3/4 跨度位置附近。

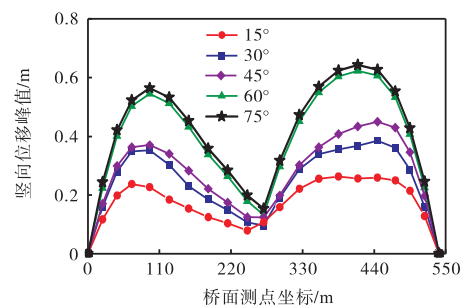


图11 不同撞击角度的桥面测点竖向位移峰值曲线

Fig.11 Peak vertical displacement curves for measuring points on bridge deck at different impact angles

此外,根据数值模拟分析得到 15°、30°、45°、60° 和 75° 工况对应的桥面测点横桥向位移最大值均在 3/4 跨度位置处,分别为 1.390 m、0.838 m、1.190 m、0.577 m 和 0.882 m. 各个角度工况的桥面 1/4 跨度位置的横桥向位移时程曲线如图 12 所示. 根据《铁路桥涵设计规范》<sup>[7]</sup>的规定,梁体的水平挠度不应大于梁体计算跨度的 1/4 000,即 0.135 m. 显然,各工况梁体水平挠度均超过规范限值,这会对桥面上行车、行人造成巨大威胁.

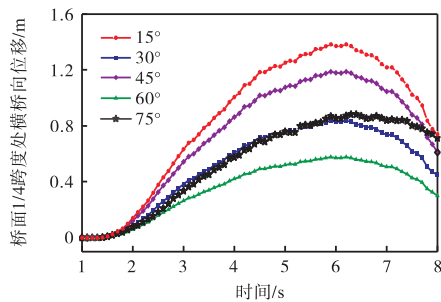


图 12 桥面 1/4 跨度位置的横桥向位移时程曲线

Fig.12 Time-history curves for transverse bridge displacement at a quarter span position of bridge deck

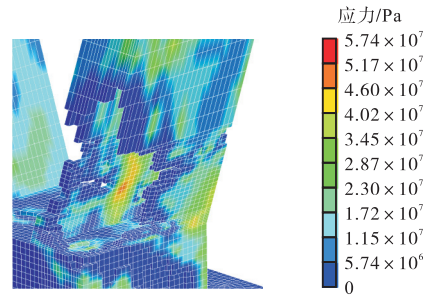
综上所述,在船舶行驶速度过高时,无论从任何角度撞击,都会对船、桥造成巨大损伤,对行车、行人造成巨大威胁. 因此,有必要针对本文的斜拉桥设计防撞装置.

### 3.2 不同船舶航速下桥塔动力响应分析

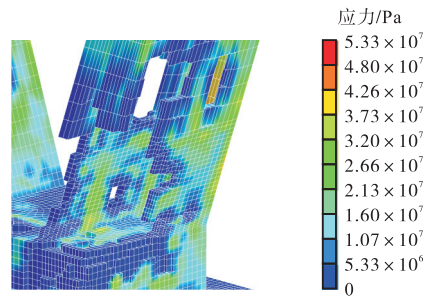
本节工况船速分别取 20.0 节、22.5 节、25.0 节、27.5 节和 30.0 节,分别对应工况 6~10. 船舶吨位为  $1 \times 10^4$  t, 撞击位置为塔柱侧棱边, 撞击角度定义与第 3.1 节相同, 取  $\alpha$  为 60°. 水位为 17.5 m.

图 13 展示了各工况在第 8 s 时桥塔局部损伤有效应力云图. 由图 13 可知,随着船速的增大,失效单元数量逐渐增多,桥塔损伤体积逐渐增大. 当船速为 20.0 节时,船舶仅对迎撞侧塔柱的两个侧面造成损坏,并在计算时间第 6 s 实现船桥相离;当船速为 30.0 节时,船舶贯穿了迎撞侧塔柱,对塔柱的 3 个侧面均造成严重损坏. 从损伤程度考虑,各类工况均有着潜在的倒塌风险,其中 30.0 节船速对应的倒塌概率最大.

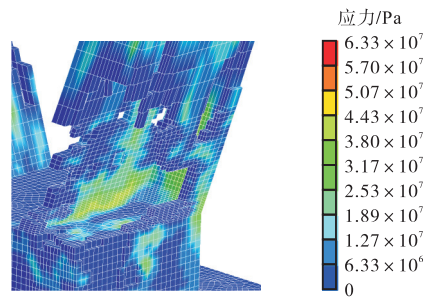
与第 3.1 节相同,将国内外规范中的船撞力经验公式汇总,并与数值模拟的碰撞力峰值进行对比,见图 14. 由图 14 可知:碰撞力随着船速增大而增大. 依据各规范计算出来的碰撞力均小于数值模拟的碰撞力峰值,其中最接近数值模拟数据的是 Eurocode 规范<sup>[11]</sup>中经验公式计算值,但二者的最大



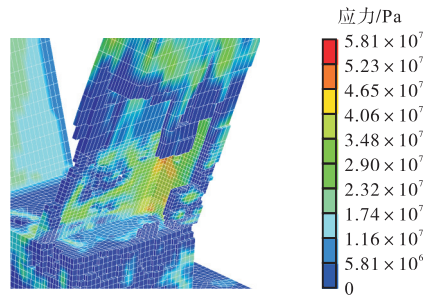
(a) 工况 6 (船速为 20.0 节)



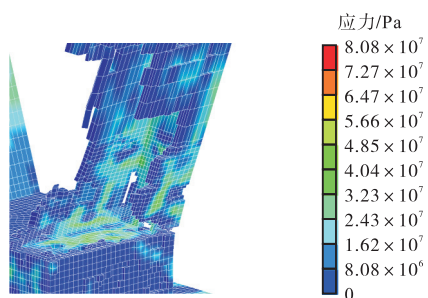
(b) 工况 7 (船速为 22.5 节)



(c) 工况 8 (船速为 25.0 节)



(d) 工况 9 (船速为 27.5 节)



(e) 工况 10 (船速为 30.0 节)

图 13 不同船速的桥塔损伤应力云图

Fig.13 Damage stress nephogram of bridge tower at different ship speeds

相差率仍高达 28%。国内规范以《公路桥梁抗撞设计规范》<sup>[9]</sup>的数据最接近数值模拟数据,二者相差率在 17.3% ~ 31.7%。《铁路桥涵设计规范》<sup>[7]</sup>的数据较数值模拟结果相差最大,相差率在 90%左右,如果按该规范进行抗船撞方面的设计则偏于危险。

造成模拟结果与各规范中经验公式计算数值相差较大的原因有以下几点:首先,规范提供的公式多为经验公式或半经验公式,其理论基础是基于同源的等效准静态分析,公式形式较为简单,考虑的撞击参数有限,而船桥碰撞问题应基于冲击动力学理论来研究,这表明这些公式都有一定的局限性,其普适性仍有待考究;其次,本节工况船速较高,撞击位置是桥梁刚度最低的部件即塔柱,这使得高速撞击下塔柱处会有较大的损伤,同时也延长了碰撞持续时间,使得船桥间动力响应情况更为复杂。

因此,在进行桥梁抗船撞设计时,除了参考设计标准,也应做好足够的应力储备,必要时应进行防撞装置的设计。

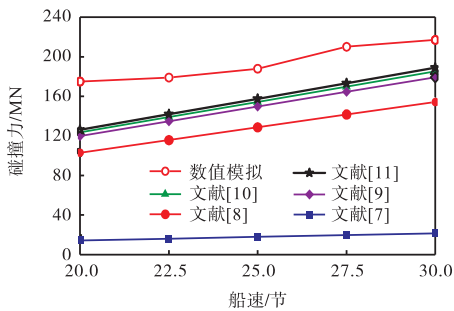


图 14 不同船速下数值模拟的碰撞力峰值与经验公式计算值的对比  
 Fig.14 Comparison between simulated peak value of collision force and values calculated using empirical formulas at different ship speeds

与第 3.1 节相同,在桥塔上选择 25 个测点.测点的位移峰值曲线如图 15 所示.由图 15 可知,随着船速增大,桥塔横桥向位移响应会随之增大.这种位移变化规律反映了这一机理,即船速增大导致桥塔损伤体积增大,进而造成截面削弱,使得塔柱渐渐失去了承载力,桥塔向船撞侧倾斜.此外,顺桥向位移响应呈现随船速递增而先增大后减小的趋势.当船速低于 25.0 节时,桥塔未出现倒塌趋势,船速越高,塔柱损伤体积越大,顺桥向位移响应越大;当船速高于 25.0 节时,桥塔出现了一定的倒塌趋势,且随着船速的增大,倒塌趋势越明显,而倒塌造成的位移增大更多贡献于横桥向方向,对顺桥向方向贡献较小,其中以工况 8 的顺桥向位移响应最大.桥塔位移最大处均位于塔顶.船速为 30.0 节时,塔顶位移超过承台处

位移 3 m 以上,这体现了明显的倒塌趋势.如若延长计算时间,可以预见桥塔最终会产生局部倒塌。

为了研究船舶撞击对斜拉桥索力的影响,本节以工况 6 为例,用数值模拟分析得到船撞前后的索力变化.斜拉索编号如图 16 所示,部分拉索索力变化如图 17 所示,拉索索力变化率如图 18 所示(变化率正值表示索力增长)。

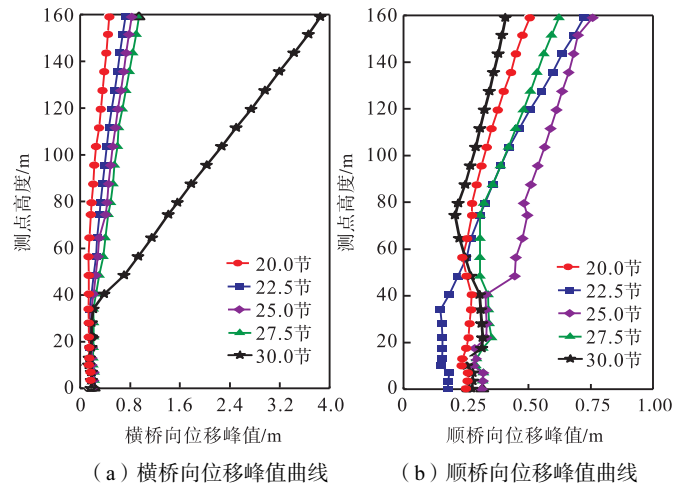


图 15 不同船速的桥塔测点位移峰值曲线

Fig.15 Peak displacement curves for measuring points on bridge tower at different ship speeds

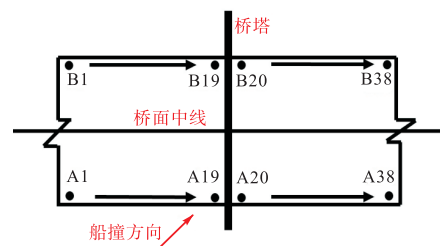


图 16 斜拉索编号

Fig.16 Serial numbers of cables

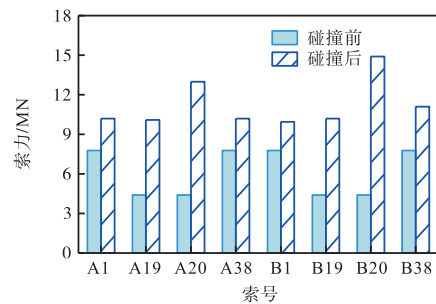


图 17 拉索索力变化

Fig.17 Changes in cable force

由于撞击后塔柱损伤严重,桥塔逐渐向船撞侧倾斜,全桥荷载负担增大,导致拉索索力急剧增大.撞击后索力重分布现象明显,船舶高速撞击对全部斜拉索索力均有较大影响.邻近桥塔最内侧索的索力增长幅度最大,索力最大增长率为 239% (索号 B20),

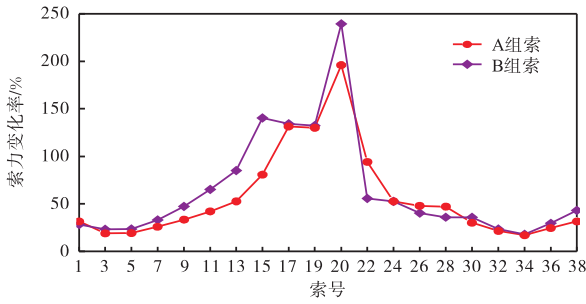


图 18 拉索索力变化率

Fig.18 Rates of change of cable force

远高于远离桥塔的最外侧索的索力增长幅度(例如索号 B1 的索力增长率为 27.9%)。

### 3.3 桥塔倒塌分析

#### 3.3.1 桥塔瞬时倒塌分析

本节工况选取船速为 30.0 节,船舶撞击角度为 45°,水位为高水位,船舶吨位为  $1 \times 10^4$  t,其余参数不变.将计算时间延长至 10 s.第 9 s 时刻桥塔发生瞬间断裂,引发斜拉桥瞬时倒塌.图 19 展示了不同时刻下塔柱损伤有效应力云图.

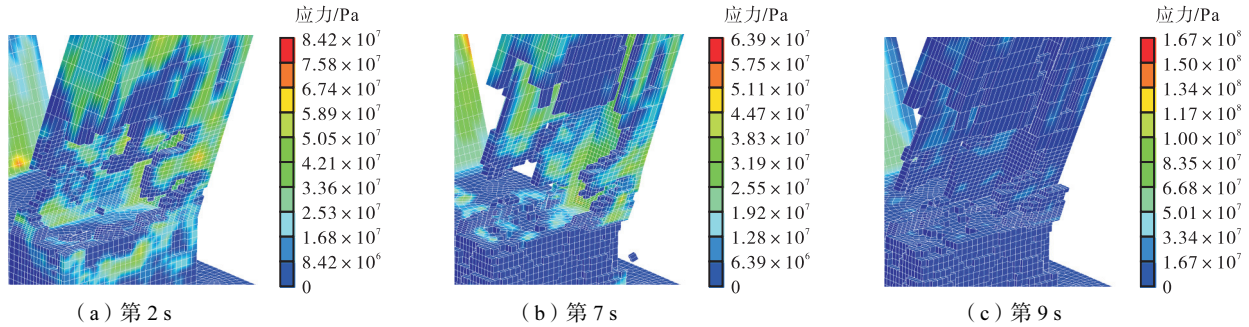


图 19 不同时刻塔柱损伤有效应力云图

Fig.19 Effective stress nephogram of tower column damage at different moments

在第 2 s 时刻,塔柱已经出现较大损伤破口,桥塔仍未出现失稳状态.在第 7 s 时刻,由于船舶贯穿了塔柱,破口面积达到最大,此时桥塔肢腿已经开始出现压溃现象.在第 9 s 时刻,桥塔肢腿已经完全断裂压溃,并发生了错位现象,失去承载力和稳定性.

图 20 展示了桥塔塔顶横桥向位移、顺桥向位移和竖向位移的时程曲线.在第 10 s 时刻桥塔的塔顶横桥向方向位移达到 14.0 m,顺桥向方向位移达到 1.5 m,竖向位移达到 5.7 m,已经严重威胁了桥梁安全以及桥上行人、行车的安全.

不变.利用 LS-DYNA 的重启动技术,将计算时间延长至 90 s.图 21 展示了不同时刻的桥塔变形图.在

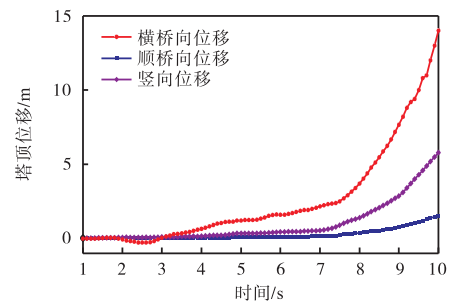


图 20 30.0 节船速工况桥塔塔顶位移时程曲线

Fig.20 Time-history curves for bridge tower top displacement at ship speed of 30.0 knots

#### 3.3.2 桥塔受损后持续荷载作用下的倒塌分析

选取第 3.2 节船速为 25.0 节工况,水位为高水位,船舶吨位为  $1 \times 10^4$  t,撞击角度为 60°,其余参数

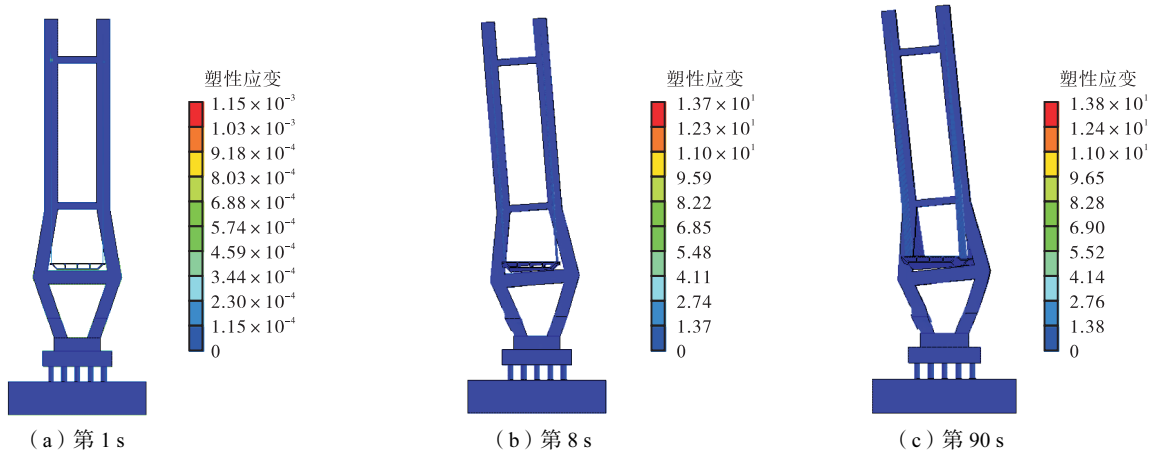


图 21 不同时刻桥塔变形

Fig.21 Deformation of bridge tower at different moments

第 8 s 时刻船舶完全脱离了斜拉桥,此时塔柱虽然有损伤破口,但在横桥向方向位移偏小,仍能保持稳定。之后,由于存在重力荷载及桥面设计荷载,桥塔逐渐向船撞侧倾斜。在第 90 s 时刻,塔顶横桥向位移达到了 13.0 m,顺桥向方向位移达到了 1.2 m,竖向位移达到了 4.2 m,此时塔柱已经达到肉眼可见的倾斜状态,桥塔肢腿产生较大弯曲变形,整桥失去稳定性和承载力,发生了倒塌。

## 4 船舶高速撞击下防撞装置设计

### 4.1 防撞装置模型简介

因为船舶高速撞击时桥塔上出现了巨大损伤破口,具有较大的倒塌风险,所以为本文斜拉桥设计防撞装置具有十分重要的工程意义。

防撞装置包括主动防撞装置和结构性防撞装置。主动防撞装置为桥前警示标志等。结构性防撞装置主体结构由 FRP 板、填充橡胶和橡胶护舷<sup>[21]</sup>组成,如图 22 所示。由 FRP 板组成 12 个区块,区块外围板为波浪状曲面板,其余均为平板。每个区块内部填满橡胶块,区块之间采用榫卯式连接,并在防撞装置与桥塔间布置一定数量的橡胶护舷。为便于建模,忽略连接处理,将各区块的 FRP 板统一建模。该装置采用装配式安装,按区块顺序安装在塔柱外围,需要维修时也分区块进行。

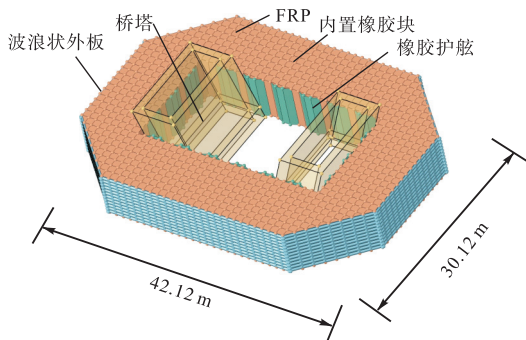


图 22 防撞装置示意

Fig.22 Schematic of anti-collision device

填充橡胶和橡胶护舷使用 Solid164 单元,其余部件均采用 Shell163 单元。FRP 板厚度为 15 mm。船舶内部和防撞装置内部定义为自动单面接触;船舶与防撞装置之间,船舶与斜拉桥之间,防撞装置与斜拉桥之间以及 FRP 板与橡胶之间定义为自动面面接触。

### 4.2 船舶高速撞击防撞装置的数值模拟分析

本节在第 3 节工况基础上加上防撞装置,用 LS-DYNA 模拟碰撞全过程,计算时间为 8 s。

### 4.2.1 桥塔损伤变化

图 23 为装有防撞装置后的碰撞示意。图 24 为 30.0 节船速工况下,第 6 s 时刻桥塔装有防撞装置后的有效应力云图。从图 24 可以看出,应力最大处位于肢腿棱边。由于 FRP 和橡胶均具有良好的吸能效果,桥塔未发生任何损伤,这表明本文防撞装置具有良好的防护效果,其不仅能保证船撞瞬时桥塔不会损坏,也保证整桥在持续荷载作用下不会倒塌。

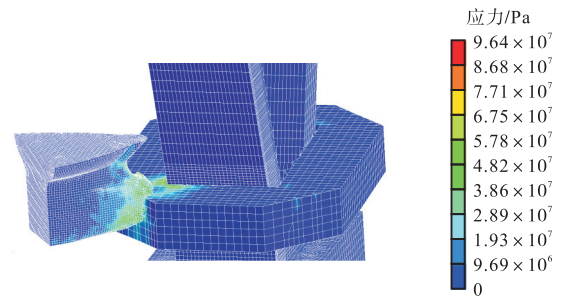


图 23 塔柱安装防撞装置后的碰撞示意

Fig.23 Schematic of collision of tower column after installation of anti-collision device

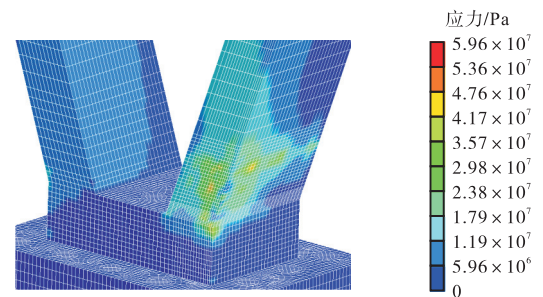


图 24 塔柱安装防撞装置后的有效应力云图

Fig.24 Effective stress nephogram of tower column after installation of anti-collision device

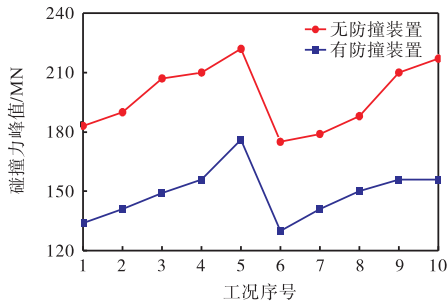
### 4.2.2 碰撞力变化

图 25 展示了有无防撞装置桥塔所受碰撞力峰值的变化及碰撞力峰值削减率。由于防撞装置的缓冲和消能作用,各工况下桥塔受到的碰撞力均受到削减,削减率均位于 20% ~ 30%。削减率最低工况为工况 5,该工况下削减率仍能达到 20.2%,这表明防撞装置能够大幅减少传递给桥塔的碰撞力。

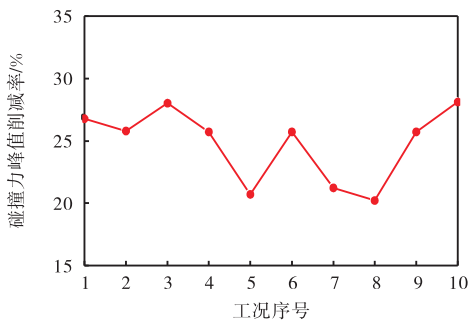
### 4.2.3 桥塔位移变化

本小节以塔顶的侧向(包括横桥向和顺桥向)位移为基准,比较加上防撞装置后桥塔位移削减率,如图 26 所示。由图 26 可知,速度不变时,随着角度的增大,削减率逐渐增大。角度不变时,随着速度的增大,削减率逐渐增大。最低削减率为工况 1 下的顺桥向位移削减率,可以达到 21%,最高削减率为工况 10

下的横桥向位移削减率,可高达 92%,这表明防撞装置能够很好地抑制桥塔侧向位移。



(a) 碰撞力峰值的变化



(b) 碰撞力峰值削减率

图 25 有无防撞装置碰撞力峰值比较

Fig.25 Comparison of peak values of collision force with and without anti-collision device

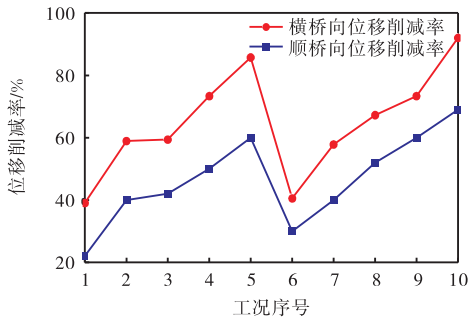
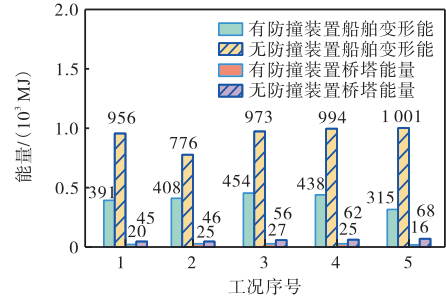


图 26 加上防撞装置后塔顶侧向位移削减率

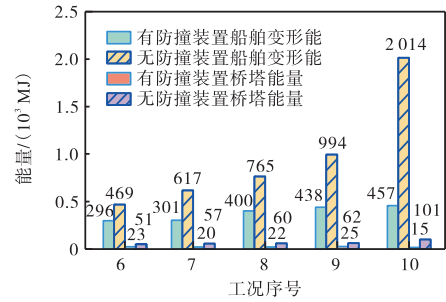
Fig.26 Lateral displacement reduction rate of tower top with anti-collision device

4.2.4 能量变化

图 27 展示了有无防撞装置下的船舶变形能和桥塔能量. 防撞装置可以有效削减船舶从各个角度和以不同速度撞击桥塔造成的巨大桥塔能量,例如工况 1 和工况 10 下的船舶变形能分别削减 59.1% 和 77.3%,桥塔能量分别削减 55.6% 和 85.1%. 可见,防撞装置具有优异的吸能耗能效果,在保护船舶的船艏、龙骨、甲板等方面具有良好的效果,同时其也能极大保护桥塔免受船撞损伤。



(a) 多角度工况下有无防撞装置的能量对比



(b) 多速度工况下有无防撞装置的能量对比

图 27 有无防撞装置的能量对比

Fig.27 Comparison of energy with and without anti-collision device

4.2.5 桥面位移变化

如图 28 所示,无防撞装置时撞击角度为 15°、30°、45°、60°和 75°对应的桥面测点横桥向位移峰值的最大值分别为 1.390 m、0.838 m、1.190 m、0.577 m 和 0.882 m. 有防撞装置时,15°、30°、45°、60°和 75°对应的桥面测点横桥向位移峰值的最大值分别为 0.253 m、0.088 m、0.158 m、0.384 m 和 0.184 m.

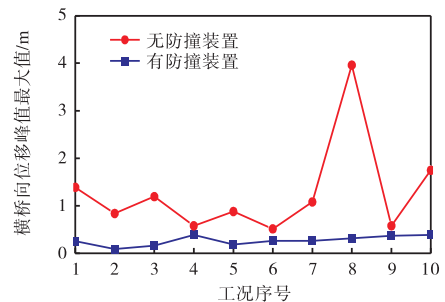


图 28 有无防撞装置桥面各测点处横桥向位移峰值的最大值

Fig.28 Comparison of maximum peak transverse bridge displacement at each measuring point with and without anti-collision device

无防撞装置时,20.0 节、22.5 节、25.0 节、27.5 节和 30.0 节对应的桥面测点横桥向位移峰值的最大值分别为 0.516 m、1.080 m、3.960 m、0.577 m 和 1.750 m. 有防撞装置时,20.0 节、22.5 节、25.0 节、27.5 节和 30.0 节对应的桥面测点横桥向位移峰值的

最大值分别为 0.258 m、0.262 m、0.312 m、0.364 m 和 0.383 m。可见,桥面横桥向位移峰值削减率较高,最大削减率为 92.1% (25.0 节船速工况)。

#### 4.2.6 船艏损伤变化

图 29 为 30.0 节船速工况下的船艏塑性应变。从图 29 中可以看出,装有防撞装置后船艏受损伤面积积极大减小,这也表明本防撞装置的柔性防撞的特点,即其在保护桥梁的同时,也可使船舶避免遭受严重损伤。

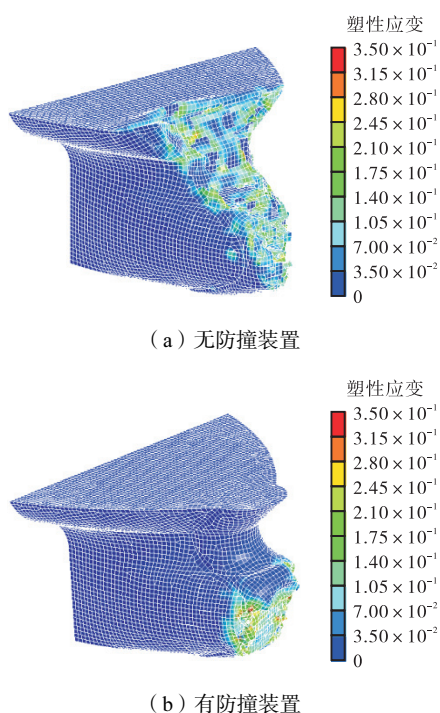


图 29 30.0 节船速工况船艏塑性应变

Fig.29 Plastic strain of bow at ship speed of 30.0 knots

## 5 结论

(1) 本文数值模拟对桥塔损伤、桥塔位移、桥面位移、索力变化等参数进行分析,相较于现有的其他船桥碰撞研究更侧重于高速(不低于 20.0 节)撞击,且考虑参数较全面,弥补了目前船舶高速撞击下桥梁动力响应研究的空白,同时也能为桥梁防船撞设计提供一定的参考。当船舶高速撞击斜拉桥桥塔时,船舶撞击角度和船舶航速对桥塔动力响应影响较大。桥塔损伤、碰撞力峰值、桥塔整体位移响应、桥面位移响应均随着撞击角度和船速的增大而增大。各工况下塔柱损伤破口较大,对桥梁整体稳定性影响大,有一定的倒塌风险,需要引起重视;采用大部分国内外规范进行本桥抗撞设计偏于不安全;梁体侧向位移均超过规范限值,对桥上行人、车辆造成巨大威胁。船

桥碰撞会使所有斜拉索索力急剧增大,索力重分布现象明显,撞后索力值最大处均位于桥塔位置附近;远撞侧的撞后索力值高于近撞侧的撞后索力值。

(2) 万吨船舶高速撞击斜拉桥桥塔会发生两种类型的倒塌:一种类型是 30.0 节船速下在较短时间内使桥塔肢腿发生错位断裂的倒塌;另一种类型是在桥塔已有较大损伤破口后,重力及桥面荷载的持续作用使得桥塔逐渐向迎撞侧倾斜而发生的倒塌。

(3) 防撞装置的材料主要由 FRP 和橡胶组成,属于柔性防撞装置,具有抗腐蚀、轻质高强、可设计性强、构造简单、生产制造简易、便于安装和更换等特点,能够在保护斜拉桥的同时保护船舶、行车和行人。防撞装置在船舶以不高于 30.0 节船速撞击时能够避免桥塔产生损坏。此外,防撞装置能显著降低桥塔所受的碰撞力以及桥面和桥塔的位移响应,具有良好的吸能耗能特征。碰撞力峰值削减率位于 20% ~ 30%,桥塔塔顶水平面位移削减率位于 21% ~ 92%,能量削减率位于 45% ~ 86%。

#### 参考文献:

- [1] Shen D J, Sun W B, Fan W, et al. Behavior and analysis of simply supported bridges under vessel side collisions: Implications from collapse of the Taiyangbu Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(9): 04022076.
- [2] Fan W, Sun Y, Sun W B, et al. Effects of corrosion and scouring on barge impact fragility of bridge structures considering nonlinear soil-pile interaction[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(8): 04021058.
- [3] Kameshwar S, Padgett J E. Response and fragility assessment of bridge columns subjected to barge-bridge collision and scour[J]. Engineering Structures, 2018, 168: 308-319.
- [4] 郑益华. 大跨度悬索桥船撞响应分析[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院, 2023.  
Zheng Yihua. Analysis of Ship Collision Response of Long-Span Suspension Bridge[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2023 (in Chinese).
- [5] 郑植, 耿波, 董俊宏, 等. 不同碰撞角度下水船-墩流固耦合数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(4): 558-572.  
Zheng Zhi, Geng Bo, Dong Juhong, et al. Numerical simulation of water-ship-pier fluid-structure coupling in different impact angles[J]. Journal of Ship Mechanics,

- 2023, 27(4): 558-572(in Chinese).
- [6] 王贵春, 吉喆, 李武生, 等. 考虑桩土作用的船桥碰撞动力性能及影响因素分析[J]. 桥梁建设, 2021, 51(4): 17-24.  
Wang Guichun, Ji Zhe, Li Wusheng, et al. Analysis of ship-bridge collision dynamic property and influential factors considering pile-soil interaction[J]. Bridge Construction, 2021, 51(4): 17-24(in Chinese).
- [7] TB 10002—2017 铁路桥涵设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
TB 10002—2017 Code for Design of Railway Bridge and Culvert[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017(in Chinese).
- [8] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
JTG D60—2015 General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015(in Chinese).
- [9] JTG/T 3360-02—2020 公路桥梁抗撞设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.  
JTG/T 3360-02—2020 Specifications for Collision Design of Highway Bridges[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020(in Chinese).
- [10] Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges[S]. Washington DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO), 2009.
- [11] Vrouwenvelder A C W M. Design for ship impact according to Eurocode I, Part 2.7[C]//Proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis. Copenhagen, Denmark, 1998.
- [12] Jiang H, Chorzepa M G. Evaluation of a new FRP fender system for bridge pier protection against vessel collision[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(2): 05014010.
- [13] Sun S J, Li H Y, Zhu C H, et al. Study on the anti-collision performance of basalt fiber reinforced polymer beam-column guardrail[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114588.
- [14] Chen G C, Huang H D, Xiang Z F. Study on the anti-collision performance of a new corrugated steel protection system for bridge pier[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 1263190.
- [15] 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.  
Feng Mingyang, Liu Baodong, Zhang Minqiang, et al. Experimental study on the anti-collision performance of beam bridge piers with wrapped crumb rubber concrete layers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 269-274(in Chinese).
- [16] 高立勇. 大跨径单塔斜拉桥施工控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院, 2008.  
Gao Liyong. The Study on the Constructing Control of the Long-Span Single-Tower Cable-Stayed Bridge[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2008(in Chinese).
- [17] 杨万理. 深水桥梁动水压力分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2011.  
Yang Wanli. Study on Hydrodynamic Analysis Methods of Deep-Water Bridges[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2011(in Chinese).
- [18] 李华永, 周凌云, 王强, 等. 新型装配式钢-UHPC防船撞装置关键参数及其性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 519-528.  
Li Huayong, Zhou Lingyu, Wang Qiang, et al. Research on key parameters and performance of new fabricated steel-UHPC anti-ship collision device[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(2): 519-528(in Chinese).
- [19] Fujikake K, Li B, Soeun S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8): 938-950.
- [20] Guo J, He J X. Dynamic response analysis of ship-bridge collisions experiment[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2020, 21(7): 525-534.
- [21] 韩建南. 橡胶护舷在桥墩防撞方面的效应分析[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院, 2017.  
Han Jiannan. Study About the Device of Rubber in Pier Anticollision Aspects[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2017(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)