

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.011

# 桥墩倾斜方向对自浮式防撞装置防护效果影响研究

张磊<sup>1,2</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 王伟峰<sup>3</sup>, 张晓丹<sup>3</sup>, 吴卫国<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 3. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430041)

**摘要:**随着航道上大跨度桥梁的建设愈加广泛,其桥墩在水面附近往往具有一定的倾斜角度。为研究桥墩倾斜方向对自浮式防撞装置防护效果的影响,文章基于装备自浮式防撞装置的2种倾斜方向的桥墩与6000DWT级散货船为研究对象进行非线性有限元仿真碰撞计算,分析桥墩倾斜方向对不同航速船舶撞击下桥墩冲击力、系统能量转换、船舶结构破坏的影响。结果表明:外倾式桥墩受到冲击力更小,其防撞装置通过变形吸收能量更多、防护效果更好。研究成果可为大跨度桥墩设计与防撞装置的开发提供重要的参考价值。

**关键词:**船桥碰撞;防撞装置;数值仿真;倾斜桥墩;索塔

**中图分类号:**U663.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0214-06

## Research on the effect of inclination direction of bridge pier on the protection of self-floating anti-collision device

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, WANG Weifeng<sup>3</sup>, ZHANG Xiaodan<sup>3</sup>, WU Weiguo<sup>1</sup>

(1. Green and Smart River-Sea-Going Ship, Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. Yangtze River Channel Planning and Design Institute, Wuhan 430041, China)

**Abstract:** With the construction of long-span bridges on the waterway becoming more and more extensive, their piers often have a certain inclination angle near the water surface. To study the influence of the inclination direction of the pier on the protection of the self-floating anti-collision device, this paper uses the piers equipped with the self-floating anti-collision device with two inclination directions and 6000DWT class bulk carrier as the research object to carry out the nonlinear finite element simulation of the collision, and analyzes the influence of the inclination direction of the pier on pier impact force, system energy conversion and bow structure failure under ship collision at different speeds. The results show that the cambered pier is less affected by the impact force, and its anti-collision device absorbs more energy through deformation and has better protection effect. The research results can provide reference for the design of long-span piers and the development of anti-collision devices.

**Key words:** ship-bridge collision; anti-collision device; numerical simulation; tilted pier; cable bent tower

## 0 引言

为了满足日益增长的交通运输需求,大跨度

桥梁被广泛地运用到水面航道上。随着全球航运业的蓬勃发展,船舶的吨位与航速都在迅速增加,使得船桥碰撞的风险越来越大,因此无论是已有

收稿日期:2022-12-20;修回日期:2023-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52271326);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021III023JC)

作者简介:张磊(1997—),男,湖北荆州人,武汉理工大学硕士生;

刘斌(1985—),男,江西新余人,博士,武汉理工大学教授,博士生导师;

吴卫国(1960—),男,湖北黄冈人,武汉理工大学教授,博士生导师。

的桥梁或是新建桥梁,都需提升防撞性能、加装防护装置。由于位处航道边缘,大跨度桥梁的索塔结构被船舶碰撞的风险最高。索塔作为桥梁的承重构件,其结构形式有多种类型,常用的形式有单柱形、A 形、倒 Y 形、倒 V 形等。不同形式的索塔,其水面附近塔柱结构倾斜方向也不同。

在船桥碰撞过程中,桥墩受到的撞击力与多重因素有关,船桥碰撞的问题是一个涉及多种复杂过程的非线性冲击动力学问题。最近国内外船桥碰撞方向的研究内容包括船撞力的影响因素<sup>[1-3]</sup>、船桥碰撞的等效模型研究<sup>[4-5]</sup>、基于新型防撞装置的性能研究<sup>[6-8]</sup>。这些研究采取数值仿真计算方法,分析船桥碰撞的破坏机理、总结撞击力的影响因素、研发新型防撞装置并验证其性能,以此使桥梁在船桥碰撞过程中更具有安全性,为桥梁结构设计与防撞装置的研制提供科学依据。各国学者在制定桥梁设计规范时提出桥梁撞击力计算经验公式,这些经验公式的原理各不相同,有的是通过大量试验总结而来,有的则是基于数值仿真的结果。这些研究成果并未考虑到桥墩倾斜方向对船撞力的影响,且较少讨论防撞装置的作用。其他研究船桥碰撞的方法包括实验法<sup>[9-10]</sup>、简化解析法<sup>[11]</sup>和有限元数值模拟<sup>[12-13]</sup>等。随着计算机软硬件技术的飞速发展,尤其是非线性有限元技术的日益进步和成熟,使得在船桥碰撞问题的研究中,数值仿真技术的应用日益广泛。

为研究桥墩倾斜方向对自浮式防撞装置防撞效果的影响。本文基于有限元数值模拟方法,结合水路航道船舶吨位与航速增加的现状,选用浮动式钢覆复合材料防撞装置。针对 2 种典型倾斜方式的桥墩,模拟 6 000DWT 级散货船以 2、3、4、5 m/s 速度撞击防撞装置保护下的桥墩。对比计算结果并得出结论,为大跨度桥梁桥墩的设计与防撞装置的研发提供参考。

### 1 结构主尺度与碰撞场景

在船桥碰撞过程中,桥墩在水线面附近的结构是最容易被船舶撞击的部位,因此选择此部位进行数值仿真研究。根据桥墩在水线面附近的倾斜方向可将其分为内倾式桥墩和外倾式桥墩,其实际应用场景如图 1 所示。假定 2 种桥墩除倾斜方向不同外其他的参数均保持一致,桥墩迎撞面倾斜角度大小均为 20°。

浮动式钢覆复合材料防撞装置主体采用刚度较大的加筋钢结构,主要结构由内、外侧板、底板、

甲板、纵横舱壁等板架构件组成。装置主体有多个水密区域,内部装压载物,可以调整防撞装置浮态。其结构主尺度参数见表 1 所列。

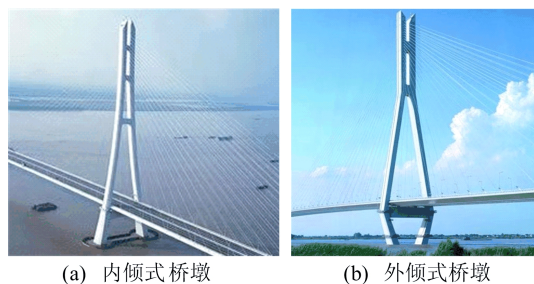


图 1 2 种典型桥墩应用场景

表 1 浮动式防撞装置的主尺度参数

| 名称        | 数值 | 名称   | 数值    |
|-----------|----|------|-------|
| 筒体厚度/mm   | 10 | 总长/m | 17.65 |
| 连接法兰厚度/mm | 40 | 总宽/m | 21.1  |
| 环向加强板厚/mm | 10 | 型深/m | 4.0   |
| 加强肋面板厚/mm | 8  | 吃水/m | 1.8   |
| 加强肋腹板厚/mm | 8  |      |       |

撞击船舶为 6 000DWT 级散货船,具体主尺度参数见表 2 所列。

表 2 6 000DWT 级散货船主尺度参数

| 总长/m | 型宽/m | 设计吃水/m | 满载排水量/t |
|------|------|--------|---------|
| 115  | 18   | 5.2    | 8 442   |

当船舶航行方向与桥墩法线夹角为 0°时碰撞场景为正撞,此时桥墩受到冲击力最大。为对比桥墩倾斜方向对正撞时船撞力的影响,可假定 2 种情况:船舶分别正撞装备有防撞装置的内倾式桥墩和外倾式桥墩,碰撞场景示意图如图 2 所示。为对比不同撞击速度对计算结果的影响,船舶碰撞速度选择具有代表性的 2、3、4、5 m/s。

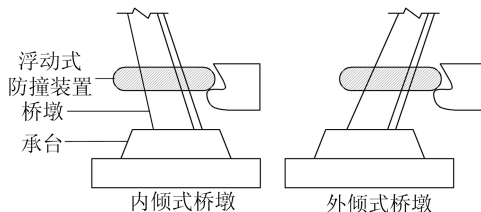


图 2 2 种碰撞场景示意图

### 2 碰撞数值仿真分析

根据上文的计算工况,采用有限元软件 LS-

DYNA 进行有限元仿真模拟计算,比较不同工况下桥墩撞击力时程曲线,分析碰撞过程中的结构损坏与能量转换。

### 2.1 有限元模型的建立

在分析桥墩倾斜方向对自浮式防撞装置防护效果的影响,比较不同碰撞工况下桥墩受撞击力大小的过程中,桥梁的有限元模型选用整桥模型或者单墩模型对计算结果无影响。为节省程序运行时间,桥墩模型截取索塔水面附近的墩台结构进行仿真计算。桥墩模型材料属性设置为刚性材料,材料本构模型选用 LS-DYNA 材料库中的 Mat. 020 Rigid,模型网格特征长度取约 600 mm。

自浮式防撞装置主要由钢材、复合材料夹层板和消能元件构成,其主体为加筋钢结构,内部填充复合材料,通过消元件与桥墩接触。由于内部复合材料在碰撞过程中相较防撞装置整体缓冲消能效果不明显,数值仿真计算时将其忽略。防撞装置主体的加筋钢结构材料为钢材 Q235,有限元模型材料选用 LS-DYNA 材料库中的 Mat. 024 Piecewise Linear Plasticity。其材料参数见表 3 所列,模型网格特征长度约取 200 mm,其真实应力-应变曲线如图 3 所示。

表 3 船舶与防撞装置钢材材料参数

| 材料参数                      | 数值    |
|---------------------------|-------|
| 材料密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 7 850 |
| 杨氏模量/GPa                  | 206   |
| 泊松比                       | 0.3   |
| 屈服应力/MPa                  | 235   |
| 失效应变 $\epsilon$           | 0.2   |
| 应变率参数 $c$                 | 3 200 |
| 应变率参数 $p$                 | 5     |

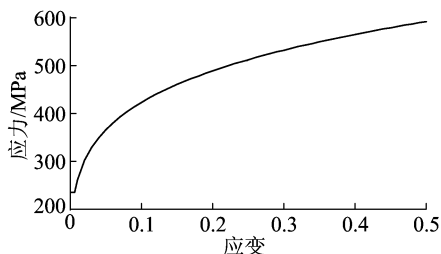


图 3 钢材的真实应力-应变曲线

消能元件的材料为橡胶,采用实体单元建模,材料选用 LS-DYNA 材料库中的 Mat. 027 Mooney-rivlin Rubber,其材料参数见表 4 所列<sup>[7]</sup>,模

型网格特征长度取约 200 mm。

表 4 消能元件材料参数

| 材料参数                      | 数值    |
|---------------------------|-------|
| 材料密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 1 150 |
| 泊松比                       | 0.499 |
| 参数 $a$                    | 0.55  |
| 参数 $b$                    | 5     |

碰撞船舶的主要结构材料与防撞装置主体结构材料相似,均为钢材 Q235。划分网格时,船舶区域划分较为精细,网格特征长度取约 100 mm,远离碰撞区域的船身,网格划分较为粗糙,在保证精度的同时,尽量节省程序运行时间。防撞装置与船舶模型的内部结构如图 4 所示。

船桥碰撞有限元模型如图 5 所示。桥墩定义为刚性体并全约束,桥墩、防撞装置、撞击船舶之间接触定义为 Contact Automatic Single Surface。在有限元分析中,船舶的初始速度分别定义为 2、3、4、5 m/s。

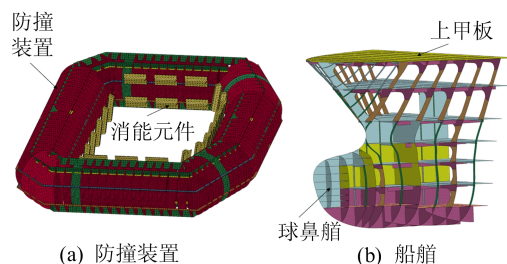


图 4 防撞装置与船舶模型的内部结构

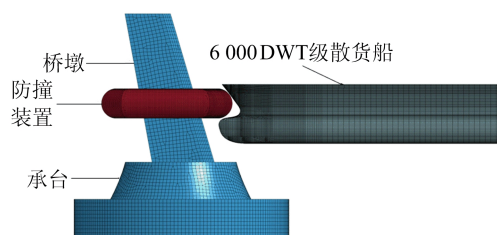


图 5 船桥碰撞有限元模型

## 2.2 数值计算结果与分析

### 2.2.1 船撞力计算结果

4 种速度撞击下 2 种桥墩承受撞击力时程曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,在船舶与自浮式防撞装置发生碰撞后,桥墩所受撞击力立即上升并呈现明显的波动。这是由于在碰撞初期,消能元件在向桥墩传递冲击力的过程中,自身也在不断地通过收缩、扩张吸收并释放能量,传递到桥墩的力出现震荡。当船舶撞击速度较大时,桥墩

可能被船舶球鼻艏越过防撞装置直接碰撞,桥墩承受冲击力陡增,碰撞发生的时间点如图 6 中撞击点 A、B 所示。图 6 中:撞击点 A 表示内倾式桥墩被球鼻艏直接碰撞;撞击点 B 表示外倾式桥墩被球鼻艏直接碰撞;

被球鼻艏直接碰撞。随着撞击力逐渐达到峰值,船舶与防撞装置结构不断发生破坏并吸收能量。碰撞发生一段时间后,船速逐渐下降直至回弹,碰撞结束。

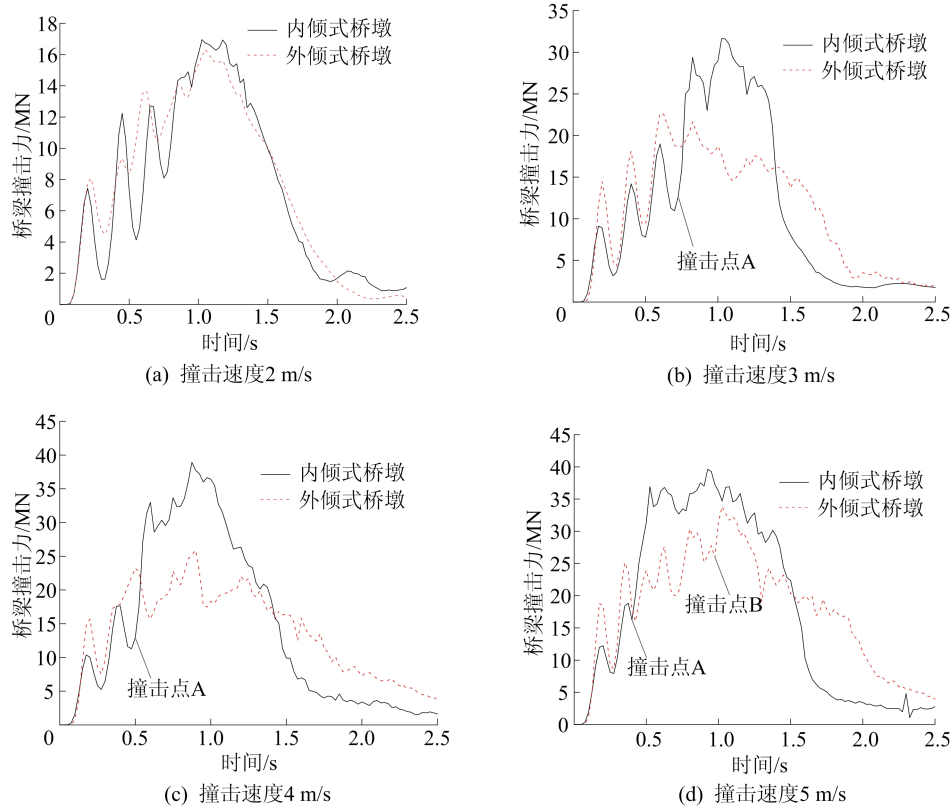


图 6 撞击力与时间曲线对比

撞击力峰值对比情况见表 5 所列。

表 5 撞击力峰值对比情况

| 桥墩类型  | 不同航速下船撞力/MN |       |       |       |
|-------|-------------|-------|-------|-------|
|       | 2 m/s       | 3 m/s | 4 m/s | 5 m/s |
| 内倾式桥墩 | 17.0        | 31.6  | 38.9  | 39.8  |
| 外倾式桥墩 | 16.3        | 22.6  | 25.9  | 33.8  |

对比不同速度下 2 种桥墩承受撞击力时程曲线与撞击力峰值表可知,碰撞过程中外倾式桥墩受到撞击力峰值明显更小。当撞击速度为 2 m/s 时,2 种桥墩受到撞击力曲线基本吻合。撞击力峰值出现时间相近,大小差距仅 0.7 MN。说明当船舶撞击速度较小时,桥墩倾斜对自浮式防撞装置防护效果影响很小。当速度增加到 3、4 m/s 时,由于内倾式桥墩分别于 0.75、0.50 s 被船舶的球鼻艏直接撞上,导致撞击力陡增,与相同速度下外倾式桥墩的撞击力曲线相比呈现明显的差异,撞击力峰值差距分别达到 9 MN 与 13 MN。

当速度增加到 5 m/s 时,巨大的动能使 2 种桥墩分别于 0.40 s 与 1.00 s 被球鼻艏直接撞上。由于外倾式桥墩被球鼻艏撞上时船舶大部分动能已经被吸收,撞击力对比内倾式桥墩增加有限,2 种桥墩撞击力峰值差为 6 MN。

### 2.2.2 能量转换结果

根据船桥碰撞外部动力学理论公式:

$$E = E_d + E_m + E_t + E_{(f-d)} \quad (1)$$

其中:  $E$  为船舶碰撞前的初始动能;  $E_d$  为船舶通过变形吸收的能量;  $E_m$  为撞击力为 0 以后船舶的回弹势能;  $E_t$  为碰撞过程中摩擦耗能;  $E_{(f-d)}$  为防撞装置通过变形吸收的船舶动能。船舶的初始动能在碰撞发生后主要转化为船舶和防撞装置吸收能量、摩擦等消耗能量和船舶回弹后动能。

8 种碰撞工况结束后各部分能量占比见表 6 所列。由于自浮式防撞装置结构强度较大,碰撞过程中防撞装置通过结构变形吸收的能量占比较小,船舶的大部分动能通过船舶变形吸收。对比

由于桥墩倾斜方向不同导致能量转换的区别:当撞击速度为 2 m/s 时,碰撞外倾式桥墩时船舶变形吸收的能量占比更多,相较碰撞内倾式桥墩时多吸收 10% 的能量;碰撞过程中摩擦耗能少 10%;防撞装置变形吸能相近,仅少 3%。当撞击速度增大到 3 m/s 以上,撞击外倾式桥墩时船舶

变形吸收量占比相较碰撞内倾式桥墩时少吸收 6%~9% 的能量;防撞装置变形吸收的能量为内倾式桥墩防撞装置的 2~3 倍。2 种桥墩防撞装置变形能与回弹后船舶动能大小相当。综上,当撞击速度大于 3 m/s,外倾式桥墩更能发挥防撞装置缓冲消能的作用。

表 6 典型工况碰撞结束后能量分布占比

| 撞击速度/(m/s) | 桥墩类型  | 能量分布占比/% |      |         |      |
|------------|-------|----------|------|---------|------|
|            |       | 船舶变形能    | 摩擦耗能 | 防撞装置变形能 | 船舶动能 |
| 2          | 内倾式桥墩 | 45       | 35   | 13      | 4    |
|            | 外倾式桥墩 | 55       | 25   | 10      | 7    |
| 3          | 内倾式桥墩 | 62       | 23   | 8       | 4    |
|            | 外倾式桥墩 | 55       | 24   | 15      | 3    |
| 4          | 内倾式桥墩 | 67       | 21   | 6       | 2    |
|            | 外倾式桥墩 | 58       | 21   | 15      | 2    |
| 5          | 内倾式桥墩 | 68       | 21   | 5       | 1    |
|            | 外倾式桥墩 | 62       | 18   | 15      | 1    |

### 2.2.3 船舶与防撞装置变形结果

撞击速度选择具有代表性的 3、5 m/s 进行研究。碰撞过程中船舶与防撞装置应变云图分别如图 7、图 8 所示。从图 7、图 8 可以看出,撞击不同倾斜方向桥墩的船舶船艏凹陷方向也不同。这是由于在碰撞过程中防撞装置受到的力并不均匀,且消能元件不断变形调整位置,防撞装置在撞击发生后产生了朝向桥墩撞击面法线方向的偏转,船舶随之也发生纵倾,纵倾示意图如图 9 所示。纵倾方向不同,船舶受到防撞装置传递的反作用

力方向也不同。

由图 7 可知,当撞击速度为 3 m/s 时,内倾式桥墩被球鼻艏越过防撞装置直接撞上,如图 7a 所示球鼻艏发生明显变形。当撞击速度为 5 m/s 时,撞击 2 种桥墩的船舶球鼻艏均直接撞上桥墩,撞击内倾式桥墩的船舶球鼻艏变形更明显。

由图 8 可知,在 2 种速度撞击下,外倾式桥墩的防撞装置变形均更明显,外倾式桥墩的防撞装置在碰撞过程中受到的冲击力更大,通过变形吸收的能量更多。

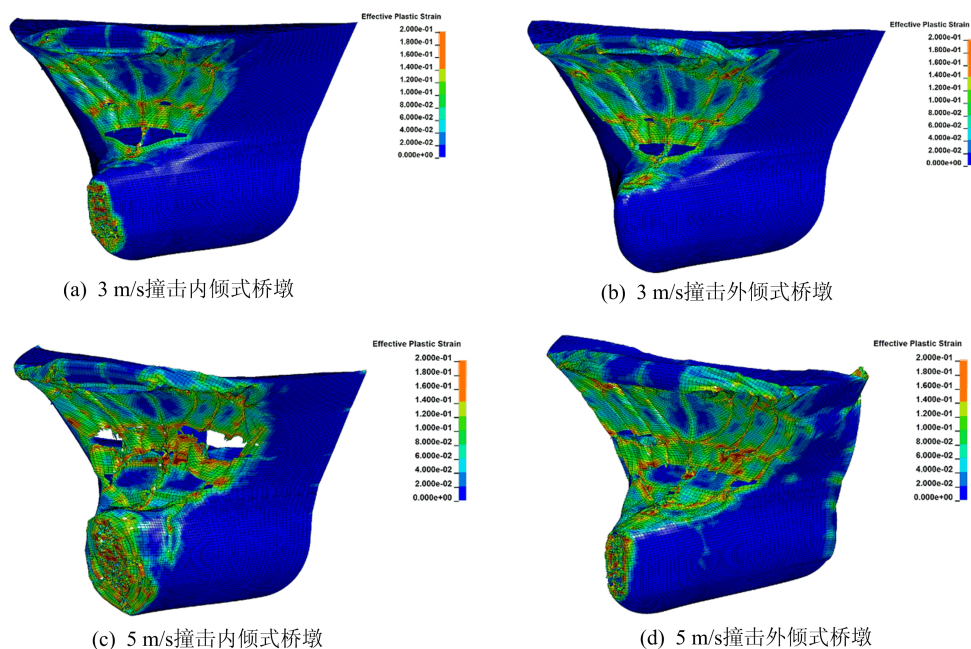


图 7 船舶应变云图

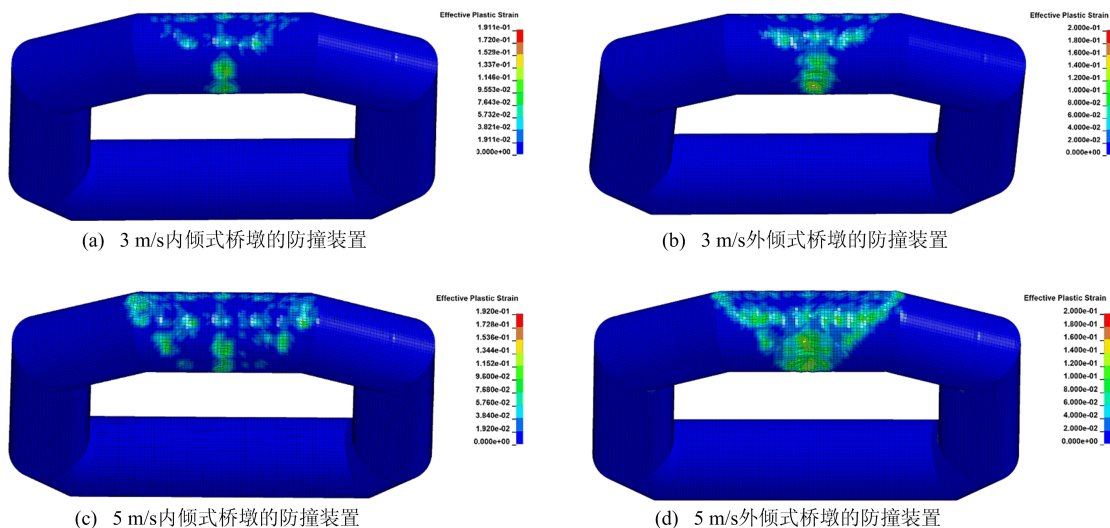


图 8 防撞装置应变云图

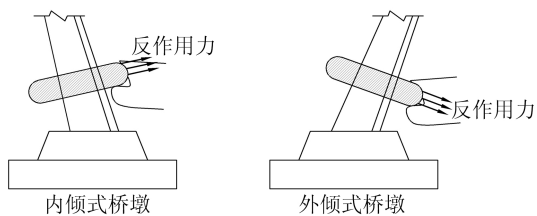


图 9 碰撞时船舶纵倾示意图

### 3 结 论

采用有限元软件 LS-DYNA 仿真 6 000DWT 级船舶分别以 2、3、4、5 m/s 的速度正撞 2 种倾斜方向桥墩的防撞装置。通过分析不同撞击工况下桥墩受到的撞击力与碰撞过程中的能量转换,研究桥墩倾斜方向对自浮式防撞装置防护效果的影响。结论如下:

1) 内倾式桥墩由于自身的形状特点,其水下结构很容易被船舶的球鼻艏越过防撞装置直接撞上,导致桥墩受到的撞击力陡增,极大地削弱了防撞装置的防护作用。相比之下,外倾式桥墩很难被球鼻艏撞上,即使在极端状况下被撞上其撞击力增加有限,对桥墩危害更小。

2) 碰撞过程中,当撞击速度大于 3 m/s 时,外倾式桥墩的防撞装置吸收能量更多,且随着撞击速度增加,其防撞装置吸收能量占比越来越大。外倾式桥墩更能发挥防撞装置缓冲消能的作用。

3) 倾斜的桥墩可能导致防撞装置在碰撞过程中发生偏转,从而使船舶发生纵倾;纵倾方向不同使船艏结构发生塑性应变的位置不同,从而对船舶结构破坏产生影响。

### 【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] 宗莉娜,刘伟庆,方海,等. 船桥碰撞中各因素对船撞力影响的研究[J]. 江苏船舶, 2016, 33(6):9-12.

[3] 喻钊,花泽春. 船桥碰撞撞击力影响因素分析[J]. 交通科技, 2021(5):72-76, 80.

[4] 王银辉,袁伟东,张存辉,等. 船桥碰撞的质量-弹簧等效模型研究[J]. 公路与汽运, 2016(1):186-189.

[5] 兰成坤,唐怀平. 船桥碰撞效应数值分析及动力载荷模型[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2021, 34(4):59-66.

[6] 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.

[7] ZHU L, LIU W Q, FANG H, et al. Design and simulation of innovative foam-filled lattice composite bumper system for bridge protection in ship collisions[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 157:24-35.

[8] FANG H, MAO Y F, LIU W Q, et al. Manufacturing and evaluation of large-scale composite bumper system for bridge pier protection against ship collision[J]. Composite Structures, 2016, 158:187-198.

[9] 陈国虞,杨黎明,刘军,等. 船撞桥墩现场试验的调研和设计[J]. 广东造船, 2012, 31(2):53-57.

[10] 刘昆,王自力,张延昌,等. 基于全耦合技术的船体结构碰撞性能研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(5):574-581.

[11] PEDERSEN P T, VALSGAARD S, OLSEN D, et al. Ship impacts; bow collisions[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 13(2):163-187.

[12] 陈涛,王建国. 船桥碰撞撞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.

[13] 潘晋,张小强,许明财,等. 船-桥梁浮式钢套箱碰撞数值模拟中的流场处理方法对比研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7):124-129.

(责任编辑 闫杏丽)