



# 裕溪船闸三角闸门新型防撞结构体系研究

孙立武<sup>1</sup>, 蔡建国<sup>2</sup>, 张晓辉<sup>2</sup>, 张迪<sup>1</sup>, 曹晓军<sup>1</sup>

(1. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230092;  
2. 东南大学, 国家预应力工程技术研究中心, 江苏 南京 210096)

**摘要:**以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34 m 口门三角闸门为研究对象, 提出一种新型的三角闸门防撞结构体系, 该结构由铝制蜂窝面板和刚性支撑杆件组成。对新型防撞结构体系进行有限元建模, 并进行撞击模拟, 同时将新型防撞结构体系与传统刚性防撞结构体系进行对比。结果表明: 新型防撞结构体系在计算工况下工作状况良好, 没有出现塑性; 与传统刚性防撞结构相比, 在消能、轻质和更换方面具有很好的优势。

**关键词:** 新型防撞结构体系; 消能; 轻质; 有限元仿真

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0006-06

## Research on new anti-collision system for triangle gate of Yuxi ship lock

SUN Li-wu<sup>1</sup>, CAI Jian-guo<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>2</sup>, ZHANG Di<sup>1</sup>, CAO Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230092, China;  
2. National Prestress Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Taking the 34 m gate of the expansion and reconstruction project of Yuxi first ship lock as the research object, we propose a new type of anti-collision structure system of triangle gate, which is composed of aluminum honeycomb panel and rigid supporting bars. We establish the finite element model of the new anti-collision structure system, carry out the impact simulation, and compare the new anti-collision structure system with the traditional rigid anti-collision structure system. The results show that the new anti-collision structure system works well under the calculation condition, and there is no plasticity. Compared with the traditional rigid anti-collision structure, it has good advantages in energy dissipation, lightweight, and replacement.

**Keywords:** new anti-collision structure system; energy dissipation; lightweight; finite element simulation

近年来, 江苏省沿江附近的船闸建设中, 三角闸门已成为最常用的工作闸门形式。随着经济的快速发展, 船闸的年过闸客货量迅速增长, 在船舶经过船闸时不可避免地会与闸门发生碰撞。为了避免船闸闸门发生损坏, 在三角闸门的迎水面会设置防撞系统。防撞系统可以分为刚性防撞系统和柔性防撞系统, 相关学者对这两种系统都做了一定的研究。在刚性防撞系统方面, 张志宁等<sup>[1]</sup>基于 ABAQUS 的显示动力分析对三角闸门的刚性防撞体系从撞击角度、船舶吨位以及撞击位置进行分析, 研究闸门在撞击过程中的响应。张

启灵等<sup>[2]</sup>采用非线性有限元方法模拟船舶正面撞击三角闸门的过程, 分析三角闸门结构瞬态动力响应。迟朝娜<sup>[3]</sup>、许佳妮<sup>[4]</sup>利用 ANSYS/LS-DYNA 程序对闸门与船舶的碰撞进行动力有限元模型计算, 分析影响三角闸门船舶撞击承受能力的主要因素。但是刚性防撞体系由于质量较大, 在船舶碰擦时几乎没有消能作用, 易发生变形损坏, 并引起门体震动, 造成焊缝开裂和运转部件损伤, 且维修更换不便。在柔性防撞体系方面, 一些学者研究了汽车柔性缆索护栏。雷正保等<sup>[5-7]</sup>、刘助春等<sup>[8]</sup>通过建立车辆、护栏有限元仿真模型, 对

收稿日期: 2020-04-10

作者简介: 孙立武 (1966—), 男, 正高级工程师, 从事水运工程项目管理。

新型柔性护栏碰撞安全性、4 索交叉缠绕式 A 级柔性护栏、交叉缠绕式柔性护栏的碰撞进行综合分析。借鉴上述方法, 张志宁等<sup>[9]</sup>将柔性索应用于船闸三角闸门的防撞系统中, 研究其对闸门的保护作用。但是柔性索结构由于体系柔性过大, 在撞击过程中船首在法线方向的位移过大, 最终船首来不及掉转而撞向羊角, 造成船闸主体结构发生破坏。

为了解决防撞系统过刚和过柔问题, 本文提出一种新的结构防撞体系, 该防撞结构将柔性和刚性结合起来, 具有“刚柔并济”的特点, 其中“柔”体现在防撞面板采用的是具有消能特性的铝合金蜂窝面板; “刚”体现在面板后面的支撑为刚性支撑, 避免船首在法向位移过大来不及调转撞向羊角而造成主体发生破坏。本文以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34 m 口门三角闸门为研究对象, 结合船闸三角闸门的结构形式、受力特点以及减震消能要求, 研究开发轻质、消能、便于更换的船闸三角闸门新型防撞系统, 改善三角闸门的防撞性能, 提高结构安全可靠, 降低维护成本。

1 工程概况

合裕线航道是合肥经济圈通往长江的唯一水上通道, 是全国内河高等级航道布局“两横一纵两网十八线”中的一线, 也是江淮运河的重要组成部分。裕溪闸水利枢纽位于裕溪河入长江口门处, 是控制巢湖流域防洪、排涝及引水灌溉的综合性水利枢纽, 由节制闸、船闸、鱼道、拦河坝、导流堤等组成。随着江淮运河工程的开工建设, 作为其主要入江线路, 合裕线承担的货运量将逐年增加, 为解决航运瓶颈, 同时适应船舶大型化的发展, 确保安全通航, 决定对 1969 年建成的老裕溪一线船闸进行扩容改造。

新建的船闸为 II 级通航建筑物, 设计最大船型为 2 000 吨级船舶, 船闸基本尺度为 290 m×34 m×5.6 m (闸室长×口门宽×门槛最小水深)。船闸承受双向水头作用, 最大正向设计水头 4.98 m, 最大反向设计水头-3.80 m, 上、下闸首工作闸门均采用三角门型。

2 计算工况

本文选择 2 000 t 的船舶进行撞击研究, 船舶满载总质量为 2 800 t, 撞击角度为船舶在正常通过闸室的过程中与闸门的小角度碰撞, 最大撞击角为 4°, 根据《船闸总体设计规范》<sup>[10]</sup>, 船舶的航行速度取 1.4 m/s。此工况为设计工况, 主要是用来设计防撞体系, 在撞击过程中防撞体系保证不发生损坏, 船舶的具体角度见图 1。

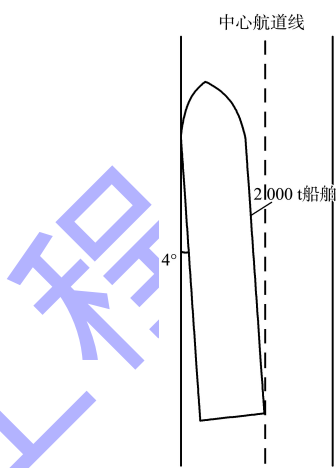


图 1 2 000 t 船舶小角度撞击

3 有限元建模

3.1 新型防撞结构体系杆件

新型防撞体系杆件由竖梁、横梁、支撑以及中片组成, 如图 2 所示。

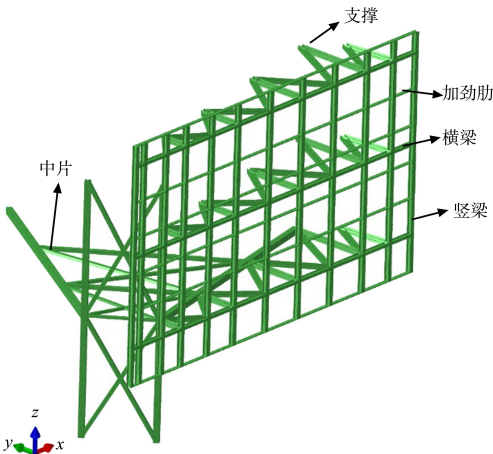


图 2 防撞体系杆件

对于防撞体系, 选择的杆件型号及尺寸为: 中片支架采用 250 mm×250 mm×16 mm (长×宽×厚度)、150 mm×150 mm×12 mm、100 mm×100 mm×8 mm、125 mm×125 mm×12 mm 的方钢,

支撑采用 [ 22a、[ 20a 的双槽钢，横梁采用 I 22b 的工字钢、竖梁采用 HW200 mm×200 mm（腹板高度×翼缘宽度）的 H 型钢，加劲肋采用 170 mm×12 mm（宽×厚度）的钢板。防撞体系中杆件的材料选用 Q345 钢，弹性模量为 210 GPa，屈服强度为 345 MPa。在 ABAQUS 软件中赋予杆件理想弹塑性本构关系，采用 B31 梁单元。

3.2 新型防撞结构体系消能面板

根据防撞结构体系的布置，选择铝制蜂窝面板的尺寸为 1 400 mm×1 450 mm×50 mm（宽×高×厚），总共有 48 块蜂窝面板，布置形式如图 3 所示，其中芯层两边的面板材料属性为铝，厚度为 4 mm，弹性模量为 70 GPa，屈服强度为 272 MPa，面板采用壳单元 S4R 模拟；芯层采用的是蜂窝铝箔单元，单元的壁厚为 0.18 mm，边长为 2.6 mm，总厚度为 62 mm，抗剪和抗压强度分别为 8.5 和

17.45 MPa。在 ABAQUS 中对于蜂窝面板芯层的建模按照下列参数进行等效建模： $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的弹性模量  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  分别为 5516、53、53 MPa， $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$  平面上的剪切模量  $G_{xy}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{xz}$  分别为 1 620、30、1 620 MPa。采用各项异性的实体单元模拟蜂窝芯层，面板和蜂窝芯层通过共节点的形式进行连接。

3.3 新型防撞结构体系

新型防撞结构体系见图 3。可以看出，新型船闸防撞结构体系的构成主要有两部分：1）具有刚性的防撞体系杆件；2）具有柔性消能特性的铝合金蜂窝面板。其中刚性防撞体系杆件与船闸主体结构通过支撑刚性连接，防撞蜂窝面板与防撞体系杆件的竖梁进行连接。这两种构成结合了刚性和柔性的特点，是一种新型的船闸闸门防撞体系。

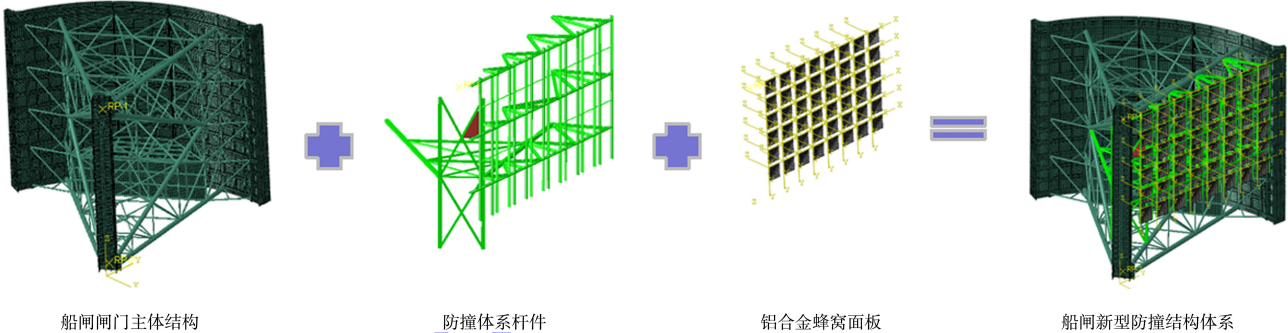


图 3 新型船闸防撞体系构成

蜂窝面板的布置形式为块状分离式布置，破坏基本分布在单块板上，实际情况与杆件的连接采用螺栓连接，在出现损坏更换时，可以快速进行更换，对通航的时间影响较小。

3.4 船舶的建模

船舶的有限元模型见图 4，采用的是 C3D8R 实体单元，在建模过程中将其近似考虑为刚体。船舶长 55 m、宽 10.8 m。

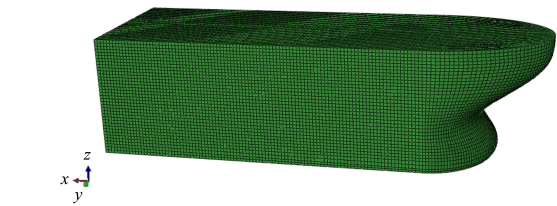


图 4 船舶的模型

4 新型防撞结构体系撞击过程动力响应分析

4.1 新型防撞结构体系撞击点

在对新型防撞体系进行研究时，为了充分考虑不同撞击位置对结构的影响，选取多个撞击点位置进行分析，如图 5 所示。撞击位置沿着防撞体系的竖直方向分为 6 个撞击位置，其中位置 1、3 和 5 为蜂窝面板后面有横梁的位置，每排有 9 个撞击点；位置 2 和 4 为竖梁在横梁之间的跨中位置，位置 6 为悬挑位置，每排有 16 个撞击点。图中仅标示位置 1 和 2，每排分别有 9 和 16 个撞击点。新型防撞结构体系总共有 75 个撞击点，基本覆盖了防撞结构体系的所有可能撞击位置。

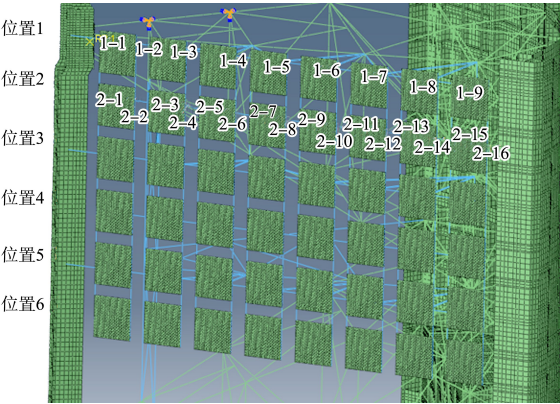


图 5 撞击点位置

4.2 动力分析结果

4.2.1 消能蜂窝面板

在撞击过程中，蜂窝面板不利的位置为位置 2、4 和 6，取这些点的位置进行研究，见表 1。结果表明，蜂窝面板结构的峰值压应力为 6.24 MPa，峰值剪应力为 7.43 MPa，处于设计值范围内。

表 1 不同撞击点撞击过程中面板峰值应力

位置	撞击点	蜂窝面板压应力/MPa	芯层结构剪切应力/MPa
2	2-1	5.03	7.43
	2-2	4.26	4.54
	2-3	5.12	6.96
	2-4	3.84	5.00
	2-5	5.53	6.80
	2-6	3.48	4.22
	2-7	4.90	6.46
	2-8	3.37	4.25
	2-9	4.85	6.15
	2-10	3.36	4.63
	2-11	4.56	5.88
	2-12	3.42	4.77
	2-13	4.37	5.55
	2-14	3.71	4.83
	2-15	6.24	6.48
	2-16	3.12	3.73
4	4-1	4.10	6.28
	4-2	3.61	4.23
	4-3	4.74	6.39

续表1

位置	撞击点	蜂窝面板压应力/MPa	芯层结构剪切应力/MPa
4	4-4	3.58	4.55
	4-5	5.25	6.34
	4-6	3.23	3.82
	4-7	4.49	5.93
	4-8	3.27	4.05
	4-9	4.51	5.67
	4-10	3.30	4.33
	4-11	4.34	5.36
	4-12	3.60	4.58
	4-13	4.16	5.25
	4-14	3.52	4.58
	4-15	6.16	5.12
	4-16	3.02	3.00
6	6-1	3.05	5.10
	6-2	4.65	4.88
	6-3	3.16	5.17
	6-4	3.56	3.97
	6-5	3.60	4.94
	6-6	3.44	3.93
	6-7	3.14	4.83
	6-8	3.51	3.85
	6-9	3.09	4.75
	6-10	3.61	3.82
	6-11	3.20	4.67
	6-12	3.34	3.79
	6-13	3.55	4.66
	6-14	3.40	3.79
	6-15	3.28	5.60
	6-16	2.61	4.08

4.2.2 新型防撞结构杆件

表 2 为新型防撞结构体系杆件竖梁、横梁和支撑的动力响应，竖梁不利的位置为位置 2、4 和 6，横梁和支撑的不利位置为位置 1、3 和 5，取这些位置进行研究。从结果可看出，在计算工况下，新型防撞结构体系处于弹性范围内，没有出现塑性损伤。中片和加劲肋的应力很小，所以未做进一步统计。由此可知，新型防撞结构体系在计算工况下，可以满足要求。

表 2 新型防撞结构体系杆件的最大应力

杆件	位置	撞击点	最大应力/MPa
2		2-1	326
		2-2	267
		2-3	296
		2-4	256
		2-5	300
		2-6	251
		2-7	287
		2-8	248
		2-9	277
		2-10	247
		2-11	269
		2-12	242
		2-13	268
		2-14	241
		2-15	315
		2-16	211
4	竖梁	4-1	285
		4-2	266
		4-3	279
		4-4	243
		4-5	279
		4-6	238
		4-7	272
		4-8	110
		4-9	264
		4-10	235
		4-11	261
		4-12	235
		4-13	257
		4-14	233
		4-15	319
		4-16	222
6		6-1	339
		6-2	302
		6-3	288
		6-4	270
		6-5	280
		6-6	271
		6-7	275
		6-8	266
		6-9	278
		6-10	268
		6-11	277
		6-12	270
		6-13	268
		6-14	236
		6-15	293
		6-16	185

续表2

杆件	位置	撞击点	最大应力/MPa
1		1-1	295
		1-2	42
		1-3	174
		1-4	220
		1-5	163
		1-6	172
		1-7	195
		1-8	227
		1-9	312
		3-1	272
		3-2	133
		3-3	188
		3-4	181
		3-5	231
		3-6	186
		3-7	202
5	横梁	5-1	296
		5-2	49
		5-3	182
		5-4	202
		5-5	198
		5-6	230
		5-7	200
		5-8	218
		5-9	296
		1-1	229
		1-2	116
		1-3	147
		1-4	184
		1-5	113
		1-6	124
		1-7	96
3	支撑	3-1	218
		3-2	98
		3-3	162
		3-4	185
		3-5	132
		3-6	105
		3-7	138
		3-8	122
		3-9	218
		5-1	200
		5-2	101
		5-3	122
		5-4	143
		5-5	105
		5-6	114
		5-7	118
5		5-8	135
		5-9	218

5 新型防撞结构体系与传统刚性防撞结构体系对比

为了进一步研究新型防撞结构体系的性能, 将其与传统的刚性防撞体系从三角闸门主体结构应变能、应力峰值和整体质量 3 个方面进行对比分析。选择三角闸门主体结构的应变能和应力峰值作为对比主要是因为两种防撞体系结构不同, 选择被保护的相同三角闸门主体结构具有更好的对比性。在此选择和刚性防撞结构体系相同的撞击点进行研究, 撞击点选择 5 个, 以撞击点距离羊角的距离与羊角和端柱距离的比值进行划分, 分别为避开端柱撞击点、1/2 撞击点、3/8 撞击点、1/4 撞击点和 1/8 撞击点, 如图 6 所示。

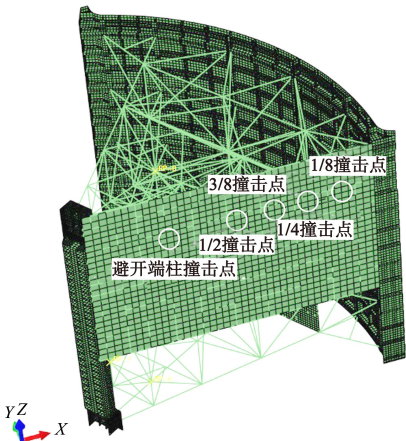
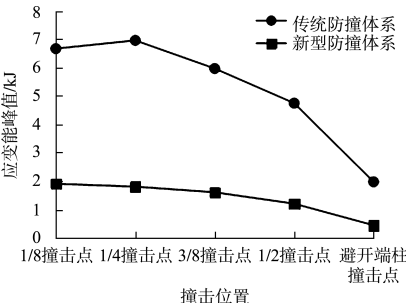


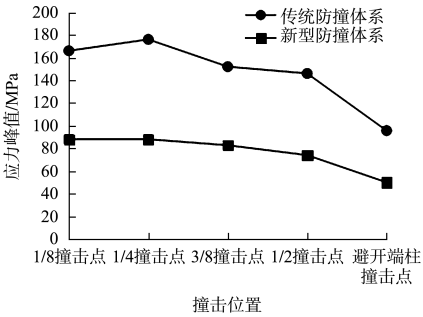
图 6 对比撞击点位置

5.1 三角闸门主体结构应变能和应力峰值的对比

主体结构应变能、应力峰值对比见图 7。可以看出, 船舶撞击时主体结构应变能平均减小 75%, 主体结构应力峰值平均降低 50% 以上, 新型防撞结构体系比传统刚性防撞结构体系具有更好的消能作用, 使得三角闸门主体结构的应力峰值和吸收的应变能比传统刚性防撞结构体系小。由此说明, 新型防撞结构体系比传统刚性防撞结构体系具有更好的保护作用。



a) 应变能



b) 应力峰值

图 7 主体结构应变能及应力峰值对比

5.2 质量对比

防撞体系质量对比见表 3。可以看出, 新型防撞结构体系的总质量相对于传统刚性防撞体系减轻 26.6%, 其中面板相对减轻 72%。在质量方面新型防撞结构具有很大的优势。

表 3 质量对比

防撞体系	面板/t	杆件/t	总质量/t
传统刚性防撞体系	13.90	22.90	36.8
新型防撞结构体系	3.84	23.13	27.0

6 结论

- 1) 新型防撞结构体系在设计工况下蜂窝面板、竖梁、横梁、支撑和中片支架均处于弹性阶段, 未发生塑性损坏。
- 2) 新型防撞结构体系与传统防撞体系在三角闸门主体结构的应变能和应力峰值两个指标上进行了对比, 与传统防撞体系相比, 新型防撞结构体系的应变能减小 75% 以上, 主体结构应力峰值平均降低 50% 以上, 结果表明, 新型结构防撞体系具有明显的优势, 具有良好的消能作用。
- 3) 新型防撞体系较传统防撞体系减重效果明显, 其总质量相对于原传统防撞结构体系减轻 26.6%, 其中面板相对减轻 72%。在质量方面新型防撞结构具有很大的优势。
- 4) 蜂窝面板的布置形式为块状分离式布置, 破坏基本分布在单块板上, 实际情况与杆件的连接采用螺栓连接, 在出现损坏更换时, 可以快速进行更换, 对通航时间的影响较小。