

裕溪船闸大型三角闸门刚性防撞体系研究

曹士政¹, 蔡建国², 张晓辉², 王新³

(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; 3. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 本文结合裕溪裕溪一线船闸扩容改造工程大型三角闸门设计, 对船闸三角闸门的刚性防撞体系进行了有限元建模。针对 2000t 的船舶正常通过船闸时出现的最不利工况, 开展了刚性防撞体系的船舶撞击动力分析。研究表明, 刚性防撞体系可以对三角闸门主体结构起到有效地保护作用, 但刚性防撞体系由于消能作用差, 在撞击过程中防撞面板和防撞杆件会出现塑性损伤, 需要在最不利工况时对防撞体系进行维护。

关键词: 三角闸门; 刚性防撞体系; 撞击; 防撞面板

中图分类号: U641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 08—0086—03

近年来, 三角闸门已成为最常用的工作闸门型式。船舶在经过闸室时, 存在与闸门发生碰撞的概率, 造成闸门损坏, 给航道的正常通行带来隐患。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。目前工程中使用最多的船闸闸门防撞结构为刚性防撞结构, 所谓的刚性防撞结构指防撞面板和面板的支撑杆系都是由钢质材料组成。在闸门刚性防撞系统方面, 相关学者做了一定的研究。迟朝娜^[1]对陡壁船闸分析表明, 无论是直线形防撞板还是折线形防撞板, 均能起到减缓闸门主体构件受撞击作用的效果; 沈波^[2]根据淮安三线船闸人字闸门的工作特点建立有限元模型, 分析了不同水位下人字闸门的自振特性和在不同撞击位置、不同撞击方向、不同水深条件下的振动规律; 张志宁^[3]等基于 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。有关船闸闸门刚性防撞的研究相对较少, 但除闸门外, 相关专家还研究了其他的刚性防撞体系。吴琼^[4]等以赣江某跨桥梁为研究对象, 利用 ANSYS 有限元软件进行船桥碰撞建模分析, 研究船舶以不同的速度及质量撞击桥墩的动态响应; 王新^[5]等采用实船撞击试验, 验证了向家坝升船机船厢防撞装置的可靠性; Liu Jiancheng^[6]设计了一艘 4 万吨级油轮在长江上与船相撞的仿真方案, 研究表明有限元方法比经验公式和简化分析方法能得到更准确的结果。由此可知, 尽管规范公式可以快速计算撞击的响应, 但是在对复杂的模型进行分析时, 有必要使用有限元方法来研究撞击响应。

本研究以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34m 口门大型三角闸门为研究对象, 针对刚性防撞体系进行研究, 运用有限元软件 ABAQUS 分析刚性防撞体系撞击时的特点, 研究其在闸门防护中的适用性、安全性等特点。

1 刚性防撞结构设计

刚性防撞结构包括防撞杆件以及防撞刚性面板, 其和三角闸门主体结构共同组成刚性防撞体系, 如图 1 所示, 材料均为 Q345 钢质材料。防撞杆件包括竖梁、横梁、支撑、加劲肋和中片。本文以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34m 口门三角闸门为研究对象, 其中设计通过的最大船型为 2000 吨级, 满载为 2800t, 长度为 55m, 宽度为 10.8m, 对三角闸门刚性防撞结构进行了设计。防撞面板的厚度为 12mm, 防撞杆件的具体尺寸如表 1 所示。

表 1 防撞结构的杆件截面尺寸 (mm)

中片支架 (mm)	支撑 (mm)	横梁 (mm)	竖梁 (mm)	加劲肋 (mm)
方钢 250×250×16 方钢 150×150×12 方钢 100×100×8 方钢 125×125×12	双槽钢 22	工字钢 22b	H 型钢 20	板 200×12

2 有限元建模

在有限元软件 ABAQUS 中对三角闸门、刚性防撞结构进行建模。闸门主体结构中, 端柱承受闸门自重并将网架传来的水压力传递给支承结构, 通过端柱将上、下几榀水平网架联接在一起, 使闸门形成整体。本文采用组合“工”字形结构, 其刚性大, 强度高。端柱、浮箱、门体结构的挡水面板均采用壳单元按照实际构造精细化建模。网架部分采用梁单元建模。门体结构的有限

元模型如图 2 所示。防撞体系的杆件采用梁单元，防撞面板采用壳单元。刚性防撞结构和三角闸门主体结构之间在模型中通过绑定进行连接。刚性防撞体系的最终模型如图 1 所示。

门体结构在运行过程中通过网架顶部的液压直推式启闭机的推拉杆提供动力绕着端柱转动。其约束情况为在端柱的顶部限制 x 、 y 两个方向约束，在端柱底部限制 x 、 y 和 z 三个方向的约束，在端柱附近的圆钢管上作用有液压直推式启闭机的推拉杆，约束采用固接。具体的约束施加情况如图 2 所示。门体结构和刚性防撞结构中材料选用为 Q345 钢材，弹性模量为 210GPa，屈服强度为 345 MPa。在 ABAQUS 中赋予杆件理想弹塑性本构关系。

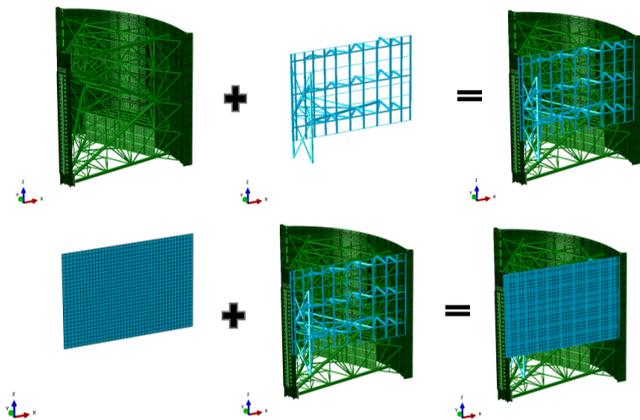


图 1 刚性防撞体系组成示意

船舶的采用实体单元进行建模，在研究中，三角闸门防撞体系为研究对象，船舶考虑为接近于刚体，则通过增大弹性模量提高其刚度。船舶的具体建模情况如图 3 所示。采用 ABAQUS/Explicit 显示动力分析，通过建立接触关系来模拟碰撞，接触关系中的接触对为船头部分和防撞体系中防撞面板，其中船头部分为主面，防撞体系中防撞面板为从面。

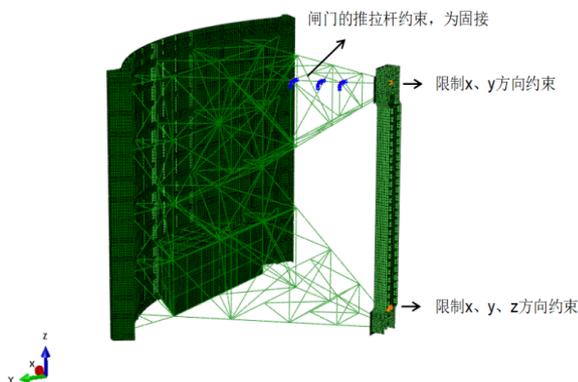


图 2 三角闸门有限元模型和约束情况

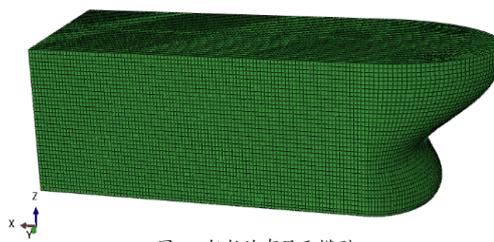


图 3 船舶的有限元模型

3 刚性防撞体系动力分析

3.1 计算工况

本文选择设计船型 2000t 的船舶，考虑到船舶在通过闸室时满载为最不利的情况，所以选择满载重量为 2800t 的船舶进行撞击研究。船舶正常通过闸室的过程中与闸门发生的最大碰撞角度为 4 度，即船头抵在船闸闸门的一侧，船尾抵在中心航道线一侧。根据《船闸总体设计规范》，取船舶的航行速度为 1.4m/s。进闸与出闸相比，出闸为不利工况。选择各种因素最不利的工况，研究船闸闸门刚性防撞结构体系的动力响应。

3.2 撞击位置

为了考虑不同撞击点对三角闸门防撞体系的影响，考虑到撞击位置的任意性，取防撞结构体系上五个撞击点的位置进行研究，如图 4 所示。具体位置是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，从图 4 中可以看出撞击点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。

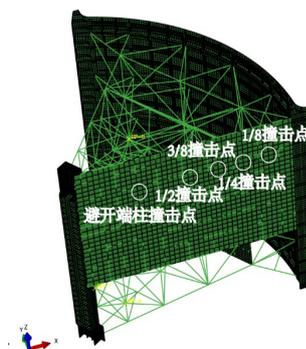


图 4 撞击点位置

3.3 动力分析结果

刚性防撞结构体系分为三角闸门主体和刚性防撞结构。从三角闸门主体和刚性防撞结构两个方面进行研究。研究三角闸门主体的动力响应可以判断刚性防撞结构在计算工况下的防护效果；研究刚性防撞结构可以判断在计算工况下撞击的损伤情况。对刚性防撞结构体系进行分析，从三角闸门主体结构的应变能、应力峰值，防撞

体系的防撞杆件、防撞面板的应力和塑性应变来进行分析。由前面可知，总共有 5 个撞击点，以船舶在 1/8 撞击点为例进行具体说明。

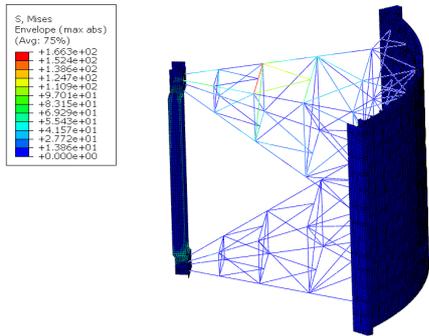


图 5 主体结构应力峰值

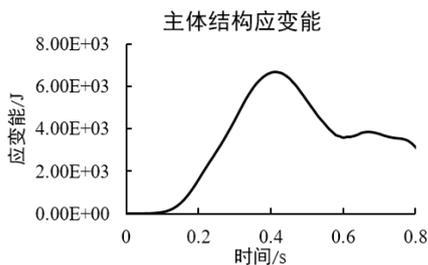


图 6 主体结构应变能

图 5 为三角闸门主体结构的应力峰值，可以看出，最大应力的杆件在推拉杆的约束附近，大小为 166MPa，处于弹性范围内。图 6 为三角闸门主体结构的应变能，其反映了在撞击过程中主体结构应变能的变化，从图中可以看出船头撞击面板前到船头离开面板的过程，应变能先增大后减小，在 0.1s 撞上面板，应变能急剧增大，在 0.4s 达到最大值，最大应变能为 6.66e3J，此时刻船头在垂直于面板方向的速度为 0m/s，随后船头离开防撞面板，应变能减小。可以看出，撞击的时间很短暂，为 0.3s。从防撞面板和支撑杆件的塑性情况可知，在撞击过程中防撞体系出现了损坏。综上，在计算工况下，1/8 撞击点处的刚性防撞结构体系在撞击过程中，三角闸门主体结构没有出现损伤，防撞体系对主体结构起到了良好的保护作用，但是防撞面板和防撞杆件出现了塑性损伤。

对于其他几个撞击点的情况，以表格的形式来呈现，三角闸门主体结构应变能和应力峰值如表 2 所示，防撞面板和防撞杆件计算结果如表 3 所示。

从表 2 和表 3 可以看出，三角闸门主体结构的应力峰值都在弹性范围内，但防撞面板和防撞杆件都出现了不同程度的破坏，且防撞杆件的破坏程度大于防撞面板。

结果分析表明，在正常通过船闸出现的最不利工况下，刚性防撞结构体系在撞击过程中对于主体结构可以起到有效的保护作用，但是防撞体系没有良好的消能作用，导致防撞体系撞击受损。

表 2 船舶撞击下主体结构应变能和应力峰值

撞击点位置	应变能 (J)	应力峰值 (MPa)
1/8 撞击点	6.66e ³	166
1/4 撞击点	6.95e ³	176
3/8 撞击点	5.96e ³	152
1/2 撞击点	4.74e ³	146
避开端柱处	1.97e ³	97

表 3 船舶撞击下防撞面板和防撞杆件计算结果

2000t		防撞面板	防撞杆件
1/8 撞击点	最大塑性应变	1.1e ⁻³	1.3e ⁻³
1/4 撞击点	最大塑性应变	0	1.1e ⁻³
3/8 撞击点	最大塑性应变	1.1e ⁻³	1.3e ⁻³
1/2 撞击点	最大塑性应变	7.1e ⁻⁴	6.15e ⁻³
避开端柱处	最大塑性应变	3.7e ⁻⁴	1.72e ⁻³

4 结论

本文结合合裕线裕溪一线船闸扩容改造工程大型三角闸门设计，开展了设计船舶最不利工况下对刚性防撞结构体系的动力撞击分析，得出以下结论：

- (1) 刚性防撞体系可以对三角闸门主体结构起到有效的保护作用；
- (2) 刚性防撞体系由于消能作用差，在撞击过程中防撞面板和防撞杆件会出现塑性损伤，需要在最不利工况时对防撞体系进行维护。

参考文献：

- [1] 迟朝娜. 船闸三角闸门结构的有限元分析 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 沈波. 船舶撞击下人字闸门的动力反应分析 [D]. 河海大学, 2007.
- [3] 张志宁, 张晓辉, 张骞. 洪蓝船闸闸门刚性防撞体系碰撞研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2018, 18(11): 92-93.
- [4] 吴琼, 刘令令, 邓超, 温永华. 基于船撞桥墩有限元数值仿真分析 [J]. 北方交通, 2020(09): 1-5+9.
- [5] 王新, 胡亚安. 向家坝升船机船厢防撞系统实船撞击试验 [J]. 水力发电学报, 2019, 38(1): 12-19.
- [6] Liu Jiancheng, Gu Yongning. Simulation of the whole process of ship—bridge collision [J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(3): 369-382.