

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.040

固镇船闸三角闸门的静力数值分析

王善春, 陶言祺

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘要: 针对三角闸门空间计算一直比较复杂的现状,以固镇船闸三角闸门为研究背景,采用有限元分析软件 ANSYS 对三角闸门空间效应进行了模拟研究。计算出各构件的内力、应力及变形,分析了不同工况条件下闸门整体应力应变情况,校核了闸门的静力特性,评估出闸门的安全性。研究成果可为设置浮箱的三角闸门设计、安装、运行提供理论参考。

关键词: 三角闸门; ANSYS; 浮箱; 稳定性

中图分类号: TV663.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0211-05

Numerical Analysis on Static Force for Sector Lock Gate of Guzhen

WANG Shanchun, TAO Yanqi

(Anhui Provincial Communications Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui 230041, China)

Abstract: The space calculation of the sector lock gate is complex, taking the sector lock gate of Guzhen as an example, this research adopted ANSYS to simulate the space effect. The internal force, stress and deformation of each component was calculated, and the overall situation of stress and strain of sector lock gate was analyzed under different conditions, the static characteristics of the sector lock gate was checked, the safety of the sector lock gate was also evaluated. This research results are helpful for providing technical reference for design, installation and maintenance of sector lock gate which has pontoon.

Keywords: sector lock gate; ANSYS; pontoon; stability

船闸钢结构三角闸门具有能够承受双向水头和
在动水中启闭的特点,通过短廊道输水或门缝输水,
使闸门两侧水位一致,开闸加速船舶安全过闸。平
面双开式三角闸门较之横拉闸门,没有水下行走机
构,结构简单,维护方便。近年来,三角闸门在巢湖
流域、淮河流域的船闸建设中得到广泛应用,一般
布置于河口地区的船闸,三角闸门还兼顾洪水季节
防洪作用。

由于三角闸门挡水面板远离门轴柱轴线,门体
重心偏前,较重的面板容易造成门头下垂,抵抗船
舶撞击效果不佳。三角闸门挡水面板与门轴柱之
间采用空间桁架连接,对结构进行受力分析时,无
成熟的计算方法。三角闸门在工作时,水压差、风
载等荷载作用在闸门面板上,由钢桁架传递至门
轴柱,闸门各

构件共同分担外部荷载^[1]。设计时通常将闸门
组成构件从空间体系分离单独进行受力分析,或
将闸门简化为平面体系进行分析。各构件受力最
不利情况的组合以及简化为平面体系分析并不
是三角闸门空间结构在工作中的最危险工况,不
能反映三角闸门的空间效应和真实工作情况,所
得三角闸门结构尺寸不够经济合理。近年来,三
角闸门三维计算不断出现,邢述炳等^[2]对京杭
运河上低水头三角闸门进行了有限元分析计算;
罗家安等^[3]结合南水北调工程对中高水头大型
三角闸门进行了静力特性研究;胡剑杰等^[4-5]
对三角闸门静力特性及自振特性进行了分析;
祝智卿等^[6]对中高水头三角闸门的流固耦合
动力特性进行了研究。由于三角闸门结构按空
间体系进行有限元分析较为复杂繁琐,设计工作
中依

收稿日期:2016-02-15

修稿日期:2016-03-07

作者简介:王善春(1963—),男,安徽庐江人,高级工程师,主要从事港口与航道工程咨询与设计工作。E-mail:0551wsc@163.com

通讯作者:陶言祺(1989—),男,安徽蚌埠人,工程师,主要从事水利规划和水工设计工作。E-mail:1056047556@qq.com

然将三角门简化为平面体系进行分析。

为了进一步研究三角闸门空间体系在实际工作中的静力特性,本文基于沱淦河航道梯级工程中固镇复线船闸三角闸门设计,结合启闭机运行特点^[7],通过合理布置浮箱,利用浮箱的浮力来调节门体自重,采用 ANSYS 软件建立了下闸首三角门三维有限元模型,分析三角闸门在防洪、通航、检修等工况下的强度、刚度、稳定性,验证三角闸门的安全可靠性。

1 工程概况

固镇复线船闸位于安徽省固镇县境内,是沱淦河进入淮河下游段的第二个梯级船闸,设计最大船舶等级为 1 000 t,船闸尺寸(闸室长×闸室宽×槛上水深)为 200 m×23 m×4.0 m。船闸水文参数见表 1。

表 1 船闸特征水位

| 位置 | 最高校核水位/m | 最高设计通航水位/m | 最低设计通航水位/m | 常水位/m |
|----|----------|------------|------------|-------|
| 上游 | 19.02 | 18.54 | 14.15 | 17.00 |
| 下游 | 19.40 | 18.42 | 13.00 | 14.67 |
| 备注 | | 十年一遇 | 最低蓄水位 | 正常蓄水位 |

注:下闸门底槛高程 8.87 m。

1.1 闸门有限元模型

船闸三角闸门门体主要构件包括门轴柱、空间桁架、梁格、支臂、面板、浮箱等。下游闸门尺寸为 R12.39 m×70°×10.85 m,面板厚为 10 mm^[8],浮箱沿面板竖中线对称,尺寸及位置见图 1,采用焊接方式与门体连接。

为提高闸门空间结构的强度和刚度,挡水面板上的隔板、梁的截面型式采用 T 形,各梁之间焊接加筋板;闸门空间桁架的构件为空心钢管,钢管对接的位置焊接空心焊接球,形成空间球节点。

平面双开式三角门两扇门叶结构型式相同,约

束条件和所受荷载对称,静力分析时仅需建立单扇门叶的数值模型,如图 2 所示。对 ANSYS 三角闸门模型进行网格划分,得到 18 902 个节点;应用 ANSYS 单元库中 Beam188 单元模拟各类杆件^[9]、面板梁、浮箱梁,梁单元共 4 289 个;应用 Shell63 单元^[10]模拟门轴柱构件和各类板,板单元共 15 241 个。

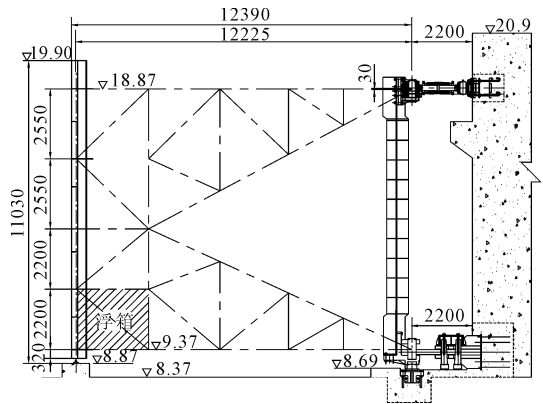


图 1 下闸首三角门立面布置图(高程:m,尺寸:mm)

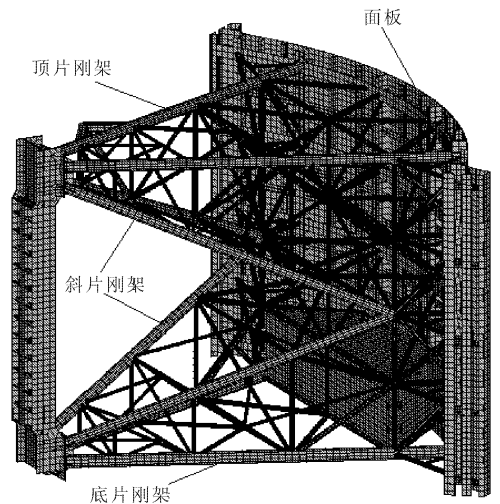


图 2 网格划分后的数值模型

1.2 计算工况、约束条件

根据固镇船闸特征水位,结合三角闸门在实际工作中所受的荷载作用,分析得到表 2 中不同设计工况下的计算水位和闸门模型的约束条件。

表 2 闸门模型的设计工况

| 设计工况 | 闸室侧水位/m | 下游侧水位/m | 约束条件 |
|------|---------|---------|---|
| 工况一 | 18.54 | 14.67 | 边羊角与闸室边接触处:在接触的羊角线上的切线方向的位移约束; 约束推拉杆外端与闸门连接位置 x 、 y 、 z 方向的位移; 双扇门叶闭合位置的对称约束; 约束门轴柱底枢 x 、 y 、 z 方向的位移; 约束门轴柱顶枢水平面内 x 、 y 方向的位移。 |
| 工况二 | 17.00 | 12.87 | |
| 工况三 | 19.02 | 18.87 | |
| 工况四 | 17.00 | 19.40 | |

2 强度、刚度及稳定性的评判标准

船闸三角闸门所用钢材型号为 Q235,泊松比取 0.3,弹性模量取 2.06×10^{11} Pa。材料容许应力 $[\sigma_1] = 160$ MPa, $[\tau_1] = 95$ MPa, 根据《船闸闸阀门设计规范》^[11](JTJ308 - 2003)规定,固镇船闸三角闸门等级为二级,结构强度验算时,需对容许应力进行修正,取调整系数 $k = 0.95$,修正后材料的容许应力为: $[\sigma_2] = 144.4$ MPa, $[\tau_2] = 85.74$ MPa。闸门板构件厚度均小于 16 mm(属钢材尺寸第一组)。钢材局部承压容许应力 $\sigma_{cd} = 240$ MPa,在安全范围内,计算的最大应力值不得超过 240 MPa。

(1) 强度评判标准

在主要荷载作用下,闸门应力分布复杂,主横梁、隔板、各杆件的强度按下式进行计算:

$$\sigma_{eq}^{max} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: σ_{eq}^{max} 为最大等效应力; $[\sigma]$ 为容许应力,取值为 160 N/mm^2 。

(2) 刚度评判标准

三角闸门主梁容许的挠度按下式进行计算

$$[\omega] = l/750 \quad (2)$$

式中 l 为三角闸门主梁的长度,约 15.13 m,因此,构件最大挠度值不得超过容许值 20.17 mm。

(3) 稳定性评判标准

三角闸门空间桁架杆件中部分受压杆件应进行平面内外弯矩作用下的整体稳定验算^[12],圆截面构件计算公式如下:

$$\frac{N}{\varphi A} + \frac{\beta_m M}{W \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_E} \right)} + \eta \frac{\beta_t M}{\varphi_b W} \leq f \quad (3)$$

式中, N 为构件所受轴向压力; A 为钢管的截面积; η 为截面影响系数; φ 为轴心受压杆件稳定系数; φ_b 为受弯圆杆整体稳定系数(均匀弯曲情况); M 为最大弯矩(圆杆计算范围内); $N'_E = \pi^2 EA / (1.1 \lambda^2)$; W

为受弯圆杆的截面模量; β_m 、 β_t 为等效弯矩系数。

3 计算结果与分析

根据计算条件、荷载情况、约束条件等进行 ANSYS 软件的三角闸门数值计算,对各构件的应力、变形结果进行整理分析,对受压构件等进行稳定性验算。

3.1 下闸门整体分析结果

由 ANSYS 计算结果可知工况四为最危险工况,下闸首三角闸门结构大部分应力为 95 MPa,局部为 159 MPa,浮箱结构上应力集中较为严重,下游三角闸门模型的整体应力云图如图 3 所示。三角闸门最大总变形为 6 mm,发生在浮箱结构上,如图 4 所示。

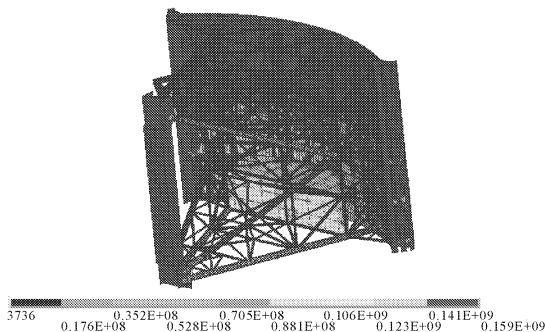


图 3 下闸首三角门整体应力云图(单位:Pa)

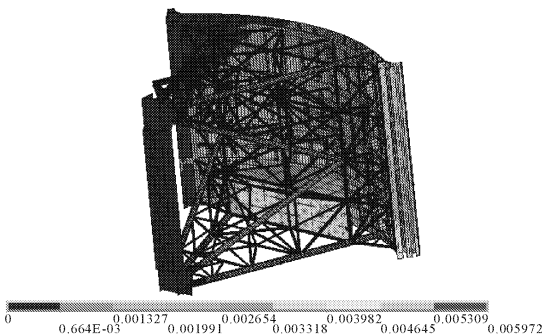


图 4 下闸首三角门整体变形云图(单位:m)

3.2 闸门面板、主梁计算结果分析

根据三角闸门 ANSYS 静力分析结果,将闸门面板各个构件应力按不同工况分类整理列入表 3 中。

表 3 不同工况下闸门面板各构件应力

单位:MPa

| 工况 | 应力 | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 底主梁 | 主梁二 | 主梁三 | 主梁四 | 主梁五 | 水平次梁 | 竖直次梁 | 隔板 | 面板 |
| 一 | 93.9 | 81.2 | 86.8 | 58.7 | 37.1 | 30.9 | 31.1 | 66.2 | 87.9 |
| 二 | 89.7 | 79.1 | 76.2 | 32.1 | 21.2 | 31.7 | 23.7 | 61.7 | 90.2 |
| 三 | 104.0 | 75.9 | 15.6 | 14.2 | 29.0 | 53.9 | 46.2 | 24.7 | 139.0 |
| 四 | 110.0 | 71.0 | 69.0 | 59.4 | 49.8 | 60.5 | 43.9 | 60.4 | 146.0 |

由表 3 可知,在不同工况下,工况四面板的等效

应力最大为 146 MPa。在闸门挡水面板上,空间桁架、

浮箱、横梁以及竖梁隔板等相互交接的部位应力集中明显,面板上其他区域未出现应力集中,如图 5 所示。

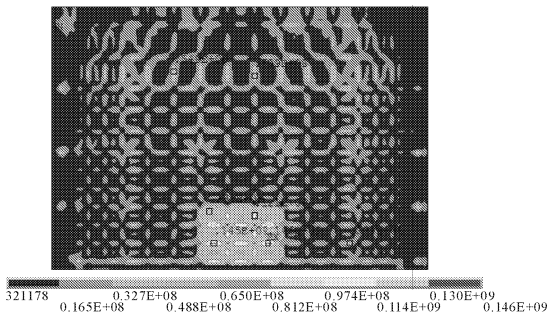


图 5 工况四下挡水面板的应力云图(单位:Pa)

从底主梁(或主梁一)向上排列分别为底主梁、主梁二、主梁三、主梁四、主梁五,通过对主梁的分析计算可知,在水压力和自重作用下,四种工况的底主梁 y 方向(径向)的变形均大于其它主梁,底主梁最大变形均出现在右侧(中缝羊角侧)底主梁与乙型隔板以及浮箱交接部位的中间处,其中工况二该位置挠度最大为 3.9 mm,如图 6 和表 4 所示。

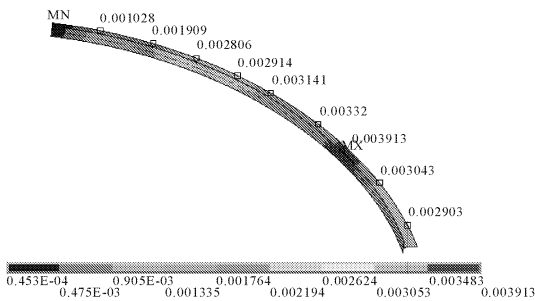


图 6 工况二底主梁径向位移图(单位:m)

四种工况下主梁二、三梁中心处偏左侧的位置以及最左侧位置应力最大,主梁四最大应力处位于

右侧距梁中心处约三分之二的位置,主梁五最大应力处位于中心处偏左侧的位置。主梁除了在交接部位有应力集中外,大部分部位应力较小;次梁的等效应力较小,应力较大的位置出现在交接处,竖直次梁最大应力出现在底端与底主梁交接部位附近。

表 4 主梁、隔板变形值

| 工况 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|-----------|-------|------|-------|-------|
| 底主梁变形值/mm | 3.795 | 3.90 | 0.545 | 2.202 |
| 隔板变形值/mm | 3.927 | 3.41 | 0.491 | 3.387 |

由表 4 计算结果可知,闸门面板、主梁等各构件交接部位均有应力集中,经验算最大等效应力和最大变形均小于容许值,各构件满足强度和变形要求。

3.3 闸门构件的压弯稳定分析

三角闸门在实际工作中由于受外荷载作用会出现整体变形,空间桁架在抵抗闸门整体变形的过程中部分构件由于承受压力和弯矩出现压弯效应,可能会导致三角闸门空间结构的失稳破坏,因此,需对闸门压弯构件进行稳定性验算。

闸门两侧水位差较大时,底片钢架的主钢管承受的拉力作用较大,对闸门的整体变形稳定起控制作用,如表 5 所示。将各片钢架杆件的轴力整理,可知在不同工况下大部分杆件承受轴向拉力作用,如表 6 所示。

表 5 主钢管受力

| 工况 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|-------------|---------|----------|---------|----------|
| 底片主钢管受力/kN | 722.147 | 716.000 | 49.418 | 446.331 |
| 下斜片主钢管受力/kN | 397.055 | -308.600 | -99.812 | -484.400 |

表 6 各片钢架中杆件最大轴力

单位:kN

| 设计工况 | 最大轴力 | | | | | | |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 中片一 | 中片二 | 中片三 | 下部斜片 | 上部斜片 | 底片钢架 | 顶片钢架 |
| 工况一 | -191.276 | 254.919 | -142.856 | -113.234 | -113.234 | -214.118 | 104.877 |
| 工况二 | -164.200 | 202.976 | -90.895 | -89.989 | -89.989 | -218.126 | 51.467 |
| 工况三 | -18.924 | -15.555 | 16.703 | 12.090 | 25.689 | -48.226 | -14.165 |
| 工况四 | 137.242 | -178.772 | 138.649 | -84.619 | 83.445 | 149.694 | -117.679 |

注:轴力值为负表示轴力为压力。

危险截面出现在最大轴力处,经验算钢管强度满足要求,按公式(3)验算所有压弯构件均满足整体稳定要求。因此,三角闸门空间桁架在防洪与通航等工况下,压弯构件不会发生失稳,稳定性满足要求。

3.4 浮箱应力变形分析

根据三角闸门 ANSYS 静力分析结果,提取浮箱应力和位移,按侧板、底板、顶板、各梁分类整理如表 7~表 8 所示。

表 7 不同工况下浮箱各构件变形值

| 工况 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|----------|-------|------|-------|-------|
| 侧板变形值/mm | 7.164 | 6.43 | 4.287 | 3.583 |
| 底板变形值/mm | 2.264 | 1.80 | 2.364 | 1.789 |
| 顶板变形值/mm | 2.788 | 2.40 | 3.038 | 2.574 |
| 各梁变形值/mm | 4.538 | 4.30 | 1.629 | 2.694 |

表 8 不同工况下浮箱各构件应力

| 工况 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 侧板应力/MPa | 169.0 | 141.0 | 179.0 | 143.0 |
| 底板应力/MPa | 196.0 | 171.0 | 167.0 | 148.0 |
| 顶板应力/MPa | 124.0 | 103.0 | 133.0 | 101.0 |
| 各梁应力/MPa | 58.2 | 48.8 | 63.5 | 57.9 |

浮箱侧面板上最大的位移为径向 7.164 mm,较闸门面板位移大,是由于浮箱所处位置水压普遍比闸门面板大。浮箱侧板和底板与梁交接处有应力集中,最大应力为 196 MPa,出现在与闸门面板相对的板上;主要是由于浮箱结构承受水压较大,因此侧底板应力大于闸门面板上的应力。由分析结果可知浮箱最大应力和最大位移均小于容许值,满足强度和刚度要求。

4 结 论

基于有限元分析软件 ANSYS 对三角闸门进行了数值模拟,静力分析结果表明:

(1) 采用有限元分析软件 ANSYS 对三角闸门进行静力数值分析能够准确反映三角闸门应力变形,为钢构三角闸门安全评估提供参考依据。

(2) 三角闸门结构在各构件交接处应力集中,底主梁与乙型隔板以及浮箱的交接部位应力和位移

均较大。

(3) 经验算,闸门满足强度、刚度和稳定性要求,设计合理,ANSYS 数值模拟三角闸门方法可供类似水工钢闸门设计借鉴。

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,2007:2-8.
- [2] 邢述炳,戴振华.邵伯三线船闸闸门设计[J].交通科技,2012(6):64-67.
- [3] 罗家安,孙保虎,黄亚栋,等.中高水头大型三角闸门静力数值分析[J].水运工程,2011(12):127-131.
- [4] 胡剑杰,胡友安,陈卫冲,等.弧面三角闸门的静力数值分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):218-221.
- [5] 胡剑杰,胡友安,王 煦,等.基于 ANSYS 的弧面三角闸门自振特性研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):24-27.
- [6] 祝智卿,朱召泉.中高水头船闸三角门流固耦合动力特性分析[J].水运工程,2013(6):119-122.
- [7] 吕传亮,崔海涛.弧形工作闸门冬季运行件加热系统设计[J].水利与建筑工程学报,2012,10(6):160-161.
- [8] 安徽省交通勘察设计院有限公司.固镇复线船闸施工图设计[Z].合肥:安徽省交通勘察设计院有限公司,2012.
- [9] 胡友安,王 孟.水工钢闸门数值模拟与工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2010:24-27.
- [10] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007:7-12.
- [11] 中华人民共和国交通部.船闸闸阀门设计规范:JTJ308-2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [12] 中华人民共和国建设部.钢结构设计规范:GB50017-2003[S].北京:中国计划出版社,2003:53-58.
- [9] 郭利娜,李同春,赵兰浩,等.重力坝深层抗滑稳定分析[J].人民黄河,2011,33(1):101-105.
- [10] 姜 妮,王瑞骏.复杂坝基条件下混凝土面板堆石坝抗滑稳定分析方法[J].水资源与水工程学报,2012,23(3):138-143.
- [11] 李振龙,李守义,范瑞朋.里底水电站溢洪道竖井式预应力闸墩应力及应变分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(5):140-143.
- [12] 黄耀华,廖春武,陈兴周.某水电站溢洪道导墙坝段有限元应力分析[J].水利科技与经济,2010,16(6):684-693.
- [13] 高洪远,章荣发,李春光.白鹤梁水下保护工程导墙结构分析[J].人民长江,2014,45(11):9-11.
- [14] 朱伯芳.有限单元法原理及应用[M].北京:水利水电出版社,1998.
- [15] 商跃进,王 红.有限元原理与 ANSYS 实践[M].北京:清华大学出版社,2012.
- [16] 中华人民共和国国家经济贸易委员会.混凝土重力坝设计规范:DL5108-1999[S].北京:中国电力出版社,1999.
- [17] 林继镛.水工建筑物[M].5版.北京:中国水利水电出版社,2009:33-52.

(上接第 153 页)