



三维有限单元法在大型船闸闸首设计中的应用

苏超¹, 李劲松¹, 崔潇菡²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 黄河水利出版社, 河南郑州 450003)

摘要: 合理确定闸首结构的内力是保证船闸结构系统稳定和安全的關鍵, 也是闸首混凝土配筋设计的重要依据。使用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立某大型船闸下闸首三维有限元计算模型, 分析了不同工况下闸首的应力分布规律及变形特点。编制了由应力反求内力的计算程序, 得到各控制点的内力分布情况, 并与规范算法结果进行对比, 结果表明: 规范算法偏于安全, 有限单元法充分考虑了位移的协调和结构变形的整体性, 计算出的内力更加符合大型船闸闸首实际受力情况。

关键词: 闸首; 三维有限元; 应力; 变形

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0112-05

Application of three-dimensional finite element method in design of large lockship structure

SU Chao¹, LI Jin-song¹, CUI Xiao-han²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Conservancy Press, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: It is the key to determine reasonably the internal forces of the lock head for guaranteeing the system stability and safety lock structure, and it's an important basis for the reinforcement design as well. The large-scale finite element analysis software ABAQUS is used to develop a three-dimensional finite element model of the lock head in a ship lock and the simulation scale of foundation. The model can be used to analyze the stress distribution and deformation characteristics under different working conditions. We compile the calculation procedure to get the internal force by the stress, and achieve the internal force distribution of each control point, which is compared with that by the standard algorithm. The results show that the canonical algorithm is conservative, while the finite element method considering the overall deformation and displacement, internal force calculation of large lock head is more consistent with the actual stress.

Key words: lock head; finite element method; stress; deformation

闸首是船闸的重要部位, 对闸首结构内力的合理分析计算是保证船闸结构系统稳定和安全的關鍵, 闸首结构内力计算结果也是闸首混凝土配筋设计的依据。目前闸首结构内力分析仍以规范算法为主, 即通过假设和简化, 将地板与边墩分别计算, 将空间问题转化为平面问题^[1]。此方法人为将边墩和底板割裂, 忽视了闸首结构变形的整体性, 且未考虑边墩与底板间的位移协调和结

构间的互相作用, 因此, 有研究人员采用三维有限元法分析船闸闸首结构^[2-3]。本文通过 ABAQUS 建立船闸闸首的三维模型, 结合三维有限单元法对模型进行计算分析, 计算出闸首关键截面的内力数据, 为船闸设计提供了科学依据, 并对有限元算法所得内力结果与规范算法所得内力结果进行了对比, 分析了两种算法的应用情况。

收稿日期: 2013-08-30

作者简介: 苏超 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事水工结构工程、水运工程数值计算方法与试验研究。

1 工程概况

船闸位于某水电站大坝两侧, 船闸按 2 级水工建筑物设计, 下闸首由底板及岸侧、河侧边墩组成, 总长 34 m, 见图 1。其中, 门前段 4 m, 门库段与支持墙段长度均为 15 m, 闸首总宽 61.6 m,

此闸首规模大、结构复杂, 边墩内有较多空箱, 岸侧边墩内有 14 个空箱, 河侧边墩内有 18 个空箱, 与以往同类闸首相比, 结构更为复杂。本文采用三维有限元法对结构的应力、位移变形进行计算, 为工程结构设计提供科学依据。

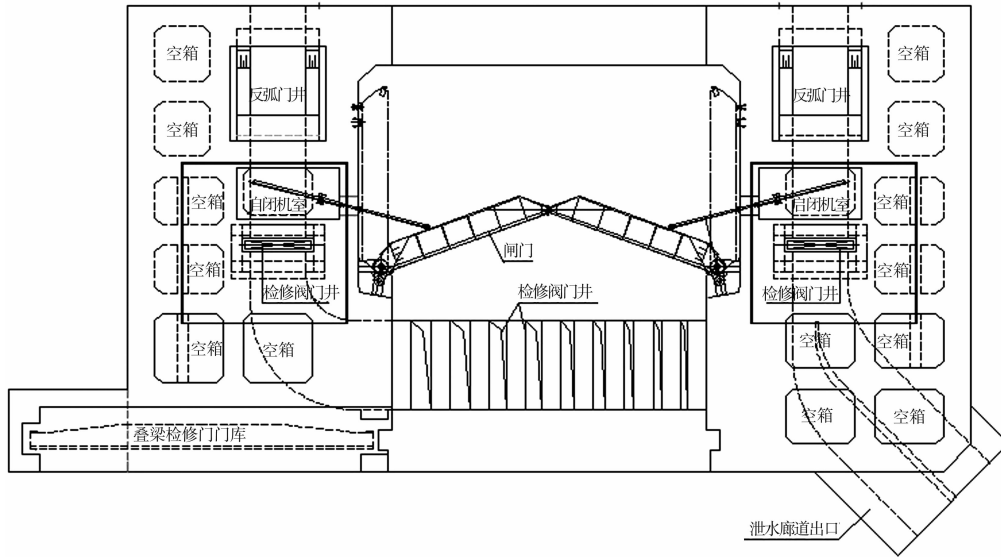


图 1 下闸首结构平面布置

2 计算模型与计算条件

2.1 有限元模型及网格剖分

考虑了闸首底板、边墩、基础岩体等结构, 建立了下闸首-地基系统的三维有限元整体仿真数值模型, 计算范围从底板中心线向上游、下游、左岸、右岸各取 2 倍闸首高度, 沿建基面向下延伸 1.5 倍闸首高度^[4-6]。计算模型坐标原点位于零高程 (国家 85 高程), X 轴正向指向下游, Y 轴正向指向左岸, Z 轴竖向向上。计算模型中共有 146 346 个单元, 168 653 个节点, 有限元计算网格见图 2。

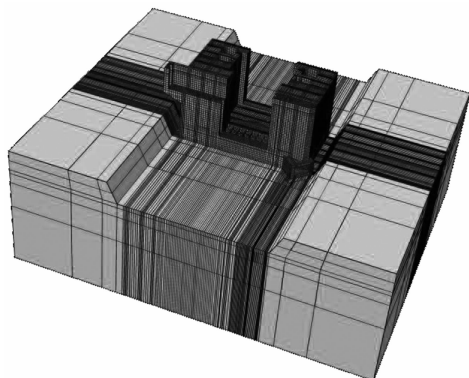


图 2 下闸首结构-地基系统有限元计算网格

2.2 材料参数与边界条件

该船闸建于基岩上, 闸首结构采用强度为 C25 的混凝土, 材料参数见表 1。

表 1 材料物理力学参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·m ⁻³)
混凝土	28	0.167	2.45
基础岩体	30	0.150	

模型边界约束条件为: 地基上下游截断边界处顺水流方向水平位移为零, 地基左右侧截断边界处垂直水流方向的水平向位移为零, 底部截断边界处竖向位移为零^[7]。

2.3 计算工况

以《船闸水工建筑物荷载设计规范》^[8]等规范及相关设计资料为依据, 结构分析中需要计算的工况及水位见表 2。

表 2 计算工况及对应水位

工况	上游水位 (闸室)/m	下游 水位/m	墙后水位/m	
			陆侧	河侧
运行期高水位工况	24.0	3.29	10.5	3.29
完工工况	无水	无水	无水	
检修工况 1	无水	无水	10.5	10.49
检修工况 2	无水	无水	10.5	3.29

3 有限元计算结果分析

3.1 位移

采用线性有限元法对下闸首进行计算,各工况下最大位移结果见表3。各工况中,横河向、顺河向、竖向位移最大值均发生在运行期高水位工况,运行期高水位工况位移分布云图见图3。因承受较大指向下游的水压,顺河向位移极值为0.49 mm,发生在右侧边墩顶部下游侧的叠梁检修门门库位置;横河向位移整体呈左右对称特点:左侧结构指向左侧,右侧结构指向右侧,位移极值为1.70 mm,发生在左侧边墩顶部;竖向位移向下,呈现出沿下闸首纵轴线向左右侧逐渐增大的趋势,极值为-2.04 mm,发生在左侧边墩顶部。闸首各工况下变形规律符合实际,且位移数值均在工程变形允许的范围内。

表3 各工况位移极值 mm

工况	横河向位移	顺河向位移	竖向位移
运行期高水位工况	1.70	0.49	-2.00
完建工况	0.28	0.18	-1.24
检修工况1	0.31	0.17	-1.12
检修工况2	0.35	0.17	-1.15

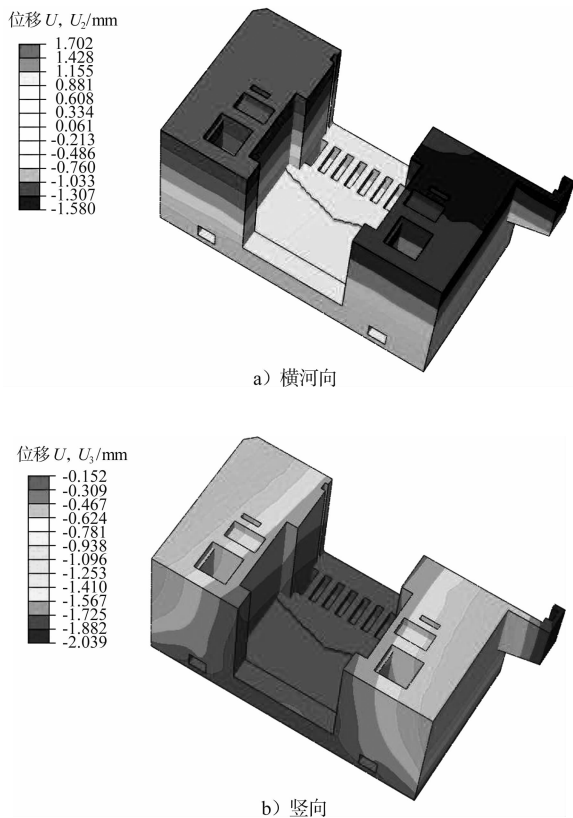


图3 下闸首结构在运行期高水位工况位移分布云图(上游视角)

3.2 应力

各工况的主拉应力、主压应力极值见表4,主拉压应力最大值均出现在运行期工况,图4给出了运行期工况主拉、主压应力分布示意图,受边墩自重及闸门槽上游较大水压作用,底板表面、闸门槽、左右侧边墩与底板上表面连接处、弧形阀门门井四周拐角、廊道底板上表面处及泄水廊道出口处部分区域均出现不同程度的拉应力集中区,主拉应力极值为2.4 MPa,发生在左侧闸门门槽与底板连接处,范围较小;主压应力极值为-6.6 MPa,发生在边墩底板下表面左侧上游部位。

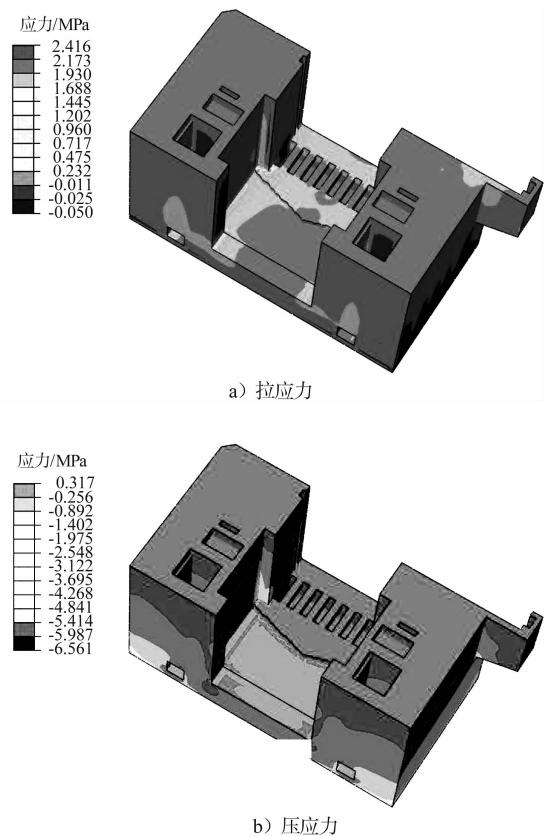


图4 下闸首结构在运行期高水位工况主拉应力分布云图(上游视角)

表4 不同工况下应力极值

工况	主拉应力极值/MPa	主压应力极值/MPa
运行期高水位工况	2.40	-6.60
完建工况	0.96	-2.74
检修工况1	0.86	-2.45
检修工况2	0.93	-2.54

4 有限元应力结果的内力计算及与规范算法的对比分析

4.1 内力计算方法

假设在Z面Y方向单位长度内有N个节点(图5),已知节点应力 σ_x 和 τ_{xy} ,设在Z方向单位宽度内应力值不变,则YZ面的内力可通过数值积分进行计算^[9]。

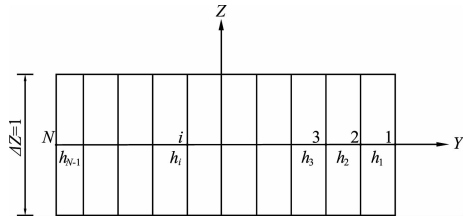


图5 内力计算截面节点

假设第n个单元对应节点i和i+1,而 h_i 为第n个单元的长度, σ_i 和 τ_i 分别为i节点的正应力与切应力, σ_{i+1} 和 τ_{i+1} 分别为i+1节点的正应力与切应力。若采用简单的梯形法进行积分^[10],则内力可以表达为:

$$N = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2} \cdot h_i \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{2} \cdot h_i \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i h_i \left(\frac{h}{2} - \sum_{j=1}^{i-1} h_j - \frac{h_i}{2} \right) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(\sigma_{i+1} - \sigma_i) h_i}{2} \cdot \left(\frac{h}{2} - \sum_{j=1}^{i-1} h_j - \frac{2h_i}{3} \right) \quad (3)$$

$$h = \sum_{i=1}^{N-1} h_i \quad (4)$$

4.2 结构内力对比分析

提取底板、边墩空箱等关键部位多个控制点(图6,7)的有限元应力计算结果,通过后处理得到各控制点的内力分布情况,并将之与规范算法对比,见表5~8。

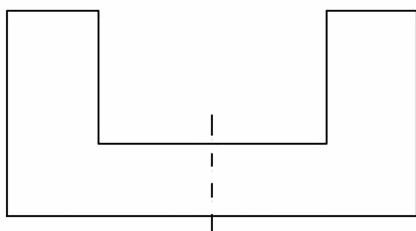


图6 底板中轴线位置



图7 上游侧空箱结构剖面

表5 有限元计算结果推算底板中轴线处部分点轴力 kN

工况	中轴线上、距上游面距离/m			
	0.75	11.85	22.10	32.00
运行期高水位工况	589.41	509.48	972.56	1 009.47
完工工况	-408.58	-264.42	-350.33	-410.40
检修工况1	-450.34	-303.45	-398.25	-450.11
检修工况2	-487.43	-369.70	-531.24	-551.97

表6 有限元计算结果推算的底板中轴线处部分点弯矩值 kN·m

工况	中轴线上、距上游面距离/m			
	0.75	11.85	22.10	32.00
运行期高水位工况	-728.6	-293.5	-888.2	-1 198.3
完工工况	-865.9	-451.7	-802.3	-940.4
检修工况1	-809.7	-488.7	-776.2	-909.1
检修工况2	-764.7	-505.1	-742.1	-879.0

表7 规范算法计算出的底板中轴线内力包络值

底板分段	轴力/kN		弯矩/(kN·m)	
	最小值	最大值	最小值	最大值
底板门前段	-2 010	2 183	-4 956	42
门库段	-2 443	2 049	-3 537	-114
底板支持墙段	-1 781	2 151	-5 596	-4 823

表8 上游侧空箱结构内力对比

位置	序号	有限元法		规范算法	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
河侧空箱	1	-4.20	10.25	-509.9	409.6
	2	-39.41	1.84	-673.0	172.0
	3	-185.6	-8.46	806.7	5 545.0
	4	-191.4	3.81	-333.0	406.7
岸侧空箱	1	-37.49	1.58	-672.4	163.3
	2	-4.80	12.31	-510.6	396.9
	3	34.16	-7.72	-3 337.0	587.1
	4	32.87	30.46	-1 448.0	573.9

由表5与表7对比可知,有限元计算的轴力均在规范算法计算出的轴力包络图内,且比规范算法结果小了50%左右。由表6与表7对比可知,4个工况弯矩规律基本一致,底板门前段、门库段中轴线上点的有限元计算结果求出的弯矩均在规范算法求出弯矩包络值内,底板支持墙段上有限元推求的弯矩在规范算法得出的弯矩包络值内,且比规范算法小了70%。从表8中可以看出,空箱轴力有限元计算结果比规范算法小42%以上,弯矩有限元计算结果比规范算法小90%以上。

通过比较可以看出,有限元计算结果均比规范算法计算结果小,其原因是规范算法将三维整体结构简化为梁、板等简单结构进行计算,有限元法考虑了位移协调和结构变形的整体性,规范算法偏于保守。

5 结语

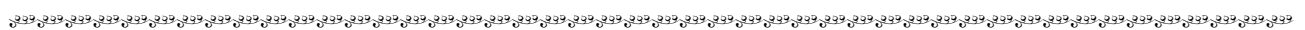
本文结合某大型船闸工程,运用有限元软件ABAQUS,对下闸首在各工况下应力分布规律和变形特征进行计算,三维有限元方法计算结果精确度高,并根据有限元内力计算原理及方法编制内力计算程序,将闸首主要控制点的有限元计算结果转化成内力,并与规范算法进行了对比,得出

“规范算法偏于保守、存在较大的安全富裕度”的结论。

参考文献:

- [1] 李永新. 船闸人字闸门结构三维有限元分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 116-118.
- [2] 王丽英. 基于 ABAQUS 的船闸闸首结构有限元分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [3] 刘康生. SAP5 程序用于贵港船闸闸墙结构有限元分析[J]. 广西交通科技, 2007, 27(102): 87-90.
- [4] 满广生. 水闸设计及闸室结构的有限元分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [5] 陈敏, 曹邱林. 基于有限元船闸结构应力分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 114-119.
- [6] 樊宇娇. 无帷墙人字门船闸闸首结构计算系统的开发与应用[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [7] 苏超, 崔潇菡, 李炳华. 三维有限单元法在某大型分离式船闸闸室中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 133-137.
- [8] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].
- [9] 徐道远, 黄孟生, 朱为玄, 等. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.
- [10] 邹开明. 基于有限元方法的船闸结构仿真分析及可靠度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第101页)

- [4] 黄岳, 宗慕伟. 广西桂林春天湖船闸工程输水系统论证分析及模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.
- [5] 刘本芹, 黄岳, 宗慕伟, 等. 广西长洲水利枢纽1号船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.
- [6] 宣国祥, 黄岳, 李君. 四川省岷江航电犍为枢纽工程可行性研究阶段船闸水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [7] 宣国祥, 李君, 黄岳. 四川省岷江航电老木孔枢纽工程船闸水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [8] 谢红, 刘本芹. 引江济汉通航工程高石碑船闸输水系统布置[J]. 水运工程, 2012(7): 135-139.
- [9] 金国强, 刘本芹, 宣国祥, 等. 富春江船闸改扩建工程船闸输水系统布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 60-64.

(本文编辑 郭雪珍)