

Analysis of Nonlinear Finite Element on Huaishu Lock Structure

Haipeng Dong

The Water Resources Bureau of Dafeng, Yancheng Jiangsu
Email: cqlshy@163.com

Received: Jan. 5th, 2017; accepted: Jan. 19th, 2017; published: Jan. 24th, 2017

Abstract

Aimed at the complex problems of Huaishu lock head structure, the three-dimensional FEA software ABAQUS is adopted to analyze the displacement field and stress field of the lock head structure under different working conditions. In this paper, the calculation result shows that the horizontal and vertical displacement all meet the specification requirement; the tensile stress exceeds the allowable tensile stress of concrete; the carrying capacity of all parts of lock head structure meets the requirement after reinforcement. The results of three-dimensional FEA can accurately and intuitively reflect the state of overall strength and displacement of buildings and lay the foundation for the evaluation of the structure security state.

Keywords

Lock Heads, Nonlinear Finite Element, Displacement, Stress, Calculation Model

淮沭船闸闸首结构非线性有限元分析

董海鹏

盐城市大丰区水利局, 江苏 盐城
Email: cqlshy@163.com

收稿日期: 2017年1月5日; 录用日期: 2017年1月19日; 发布日期: 2017年1月24日

摘要

淮沭船闸闸首的输水廊道底板上设有空箱结构边墩, 结构较为复杂, 常规的解析法在计算时往往采用大量的简化假设, 计算所得的值与实际值有较大的出入。为了对闸首整体结构的受力状态有一个比较全面的理解, 采用三维有限元分析软件ABAQUS分析研究闸首结构在不同工况下的位移场及应力场。结果表

明, 淮沭船闸闸首各部件的水平位移和垂直位移均满足规范要求, 虽然各工况下的拉应力均超过混凝土允许拉应力, 但各混凝土构件都有配筋, 验算结果表明各构件承载能力满足要求。三维有限元分析结果能较直观、准确反映建筑物整体强度与位移状况, 可以为评价结构安全性态提供依据。

关键词

船闸闸首, 非线性有限元, 位移, 应力, 计算模型

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

淮沭船闸位于淮安市淮阴区杨庄村, 闸首采用钢筋混凝土整体式底板结构。底板底高程为 2.6 m, 底板顶高程为 5.0 m, 闸顶高程为 16.0 m, 顺水流方向长 14.5 m, 垂直水流方向长 21.9 m, 边墩宽 5.8 m, 两边墩净宽 10.3 m, 左右边墩对称布置; 人字形钢闸门底高程为 4.8 m, 顶高程为 15.8 m; 闸首设有阀门、输水廊道。

船闸闸首结构受力状态十分复杂, 承受的荷载既有垂直于船闸纵轴线方向的横向和竖向荷载, 又有平行于船闸纵轴线的纵向荷载, 还有人字闸门传来的巨大集中力。纵向荷载和竖向荷载沿船闸纵轴方向变化较大, 横向荷载沿船闸纵轴线方向也有变化[1], 因此闸首结构是一个典型的空问受力结构。船闸的输水廊道结构较为复杂, 受力情况也比较复杂。许多学者采用不同的手段和方法对闸首结构进行了分析研究。河海大学的冯大江[2]将结构、土体与结构接触面看成一个系统中相互作用的 3 方面, 采用 Duncan 等提出的非线性本构模型和 Desai 接触面单元, 应用 Biot 固结原理, 结合考察施工缝封合前后, 地基固结时间效应, 结构物浇筑、边墩墙前后回填土填筑, 地下水控制的相互作用影响, 对结构施工进度及加载过程进行模拟, 得到了与原型观测较为接近的结果。周清华[3]结合 Biot 固结理论和 Duncan & Zhang 双曲线本构模型, 既考虑土体材料的非线性, 又考虑变形协调条件对固结过程的总应力的影响, 研究了墩底分浇式船闸闸首底板的算法, 实测数据验证表明, 应用 Biot 固结理论法能较好地反映地基与结构共同工作过程中的力学特性。冯夏庭、张治强和盛谦等[4]设计三峡第三闸首结构时, 根据闸首结构受力特点, 采用了合理的计算假定和计算方法, 对结构进行整体稳定验算和应力、变形及锚杆受力计算。经计算分析, 闸首结构在各设计工况下, 均能靠结构自重满足整体抗滑稳定和抗倾稳定要求。尽管很多学者对船闸闸首结构的受力情况进行了一些研究, 但是并没有充分考虑土体的非线性、闸首结构物与土体的相互作用以及闸首结构物在各种水位作用下的受力变形分析。为了对闸首整体结构的受力状态有一个比较全面的理解, 本文采用空问三维有限元软件对位移场和应力场进行研究分析, 以评价其工作性态。

2. 非线性有限元分析

2.1. 非线性因素的处理

在建模过程中, 综合考虑材料非线性、几何非线性和接触非线性等因素计算闸首的结构内力。计算模型中的材料均按弹塑体考虑, 混凝土材料的本构关系采用 Hooke 定律, 地基土的本构关系采用 Drucker-Prager 模型[5]; 在模型计算分析*STEP 选项中, 把 NLGOM 参数设为 ON, 并在节点上用

*TRANSFORM 选项定义局部方向，在整个分析过程中始终保持不变，且不随变形而转动，并利用 INC 参数指定允许的最大增量步为 25 步[6]；采用主—从接触算法，由主控面和从属面构成接触对，完整的接触模拟包括接触对和定义接触面的本构关系，在闸首结构建模过程中，需要考虑边墩和底板之间、边墩和回填土之间、回填土和地基之间和闸门与边墩支持墙之间的相互作用，并设置相应的接触参数[7]。

2.2. 本构模型的选取

土体属于弹塑性材料，弹塑性材料的一个显著性特点是应力超过屈服点后，应力应变关系呈非线性，且加载与卸载的路径不一样。地基土材料和回填土考虑成 Drucker-Prager 屈服准则的弹塑性材料，Drucker-Prager 屈服准则为

$$aI_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中： a 和 k 分别维岩土材料的粘结力 c 和内摩擦力 ϕ 的相关系数； I_1 为应力第一不变量； J_2 为应力偏张量第二不变数。

$$a = \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \phi}} \quad (2)$$

$$k = \frac{\sqrt{3}c \cos \phi}{\sqrt{3 + \sin^2 \phi}} \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5)$$

2.3. 接触面处理

接触问题是一类非线性问题，既非材料非线性也非几何非线性，而是属于边界条件非线性问题。土与结构的共同耦合作用属于接触问题。在 ABAQUS 的接触模拟中使用单纯主从接触算法，在定义接触对时，需要正确的选择主从面，原则是：从面的网格应该比主面更精细；当主从面网格接近时，选择材料刚度较大的平面作为主面；对于有线滑移，从面节点在分析过程中尽可能地不要落在主面之外。

接触面之间的相互作用包含两个部分：一是接触面的法向作用，二是接触面的切向作用。

1) 接触面的法向模型

本次计算采用硬接触的法向模型，即两物体只有在压紧状态时才能传递法向压力，若两物体之间有间隙，则不能传递法向压力。

2) 接触面的切向模型

接触面切向摩擦模型：当接触 τ_{crit} 面处于闭合状态(即有法向接触压力)时，接触面可以传递切向应力或摩擦力。若摩擦力小于某一极限值如时，ABAQUS 认为接触面处于粘结状态。若摩擦力大于 τ_{crit} ，则接触面开始出现相对滑移变形，称为滑移状态。

3. 计算模型

3.1. 模型建立

在建立空间三维有限元模型时，地基模型尺寸地选取对计算结果有一定影响，为了使计算结果更符合实际，根据萨布尼斯等著的相关国际权威文献中对试验模型尺寸的要求，认为取地基单边尺寸为结构

基础单边尺寸的 1~5 倍就可以反映地基对基础的作用，本次计算的地基在长度方向取下闸首长度的 3 倍即 65.7 m，宽度方向取下闸首宽度的 3 倍即 43.5 m，深度取下闸首高度的 2 倍即高程-24.2 m。为了提高网格的划分质量，在不影响计算结果的前提下，对所建的模型做了一定的简化处理。在定义材料时，闸室和土体采用弹塑性材料，假定服从 Drucker-Prager 屈服准则，由于土体自重产生的变形已基本完成，故计算中不计入土体自重引起的应变。在定义接触时，闸底板作为主控接触面，土体作为从属接触面。在定义荷载时主要考虑结构自重、水重、扬压力、水压力、土压力、边荷载等[8]。该模型左右及前后边界为垂直于该面的链杆约束，底面为固接约束。淮沭船闸闸首有限元整体计算模型图见图 1，计算模型图见图 2。

3.2. 网格划分

划分网格是有限元模型的一个重要环节，有限元网格数量的多少和质量的好坏直接影响到计算结果的精度和计算规模的大小。一般来说六面体网格分析精度更高、速度更快，是最优选择。闸首结构网格划分时采用结构化网格划分技术，即将一些标准的网格模式应用于一些形状简单的几何区域。为了更有利于非线性有限元分析，网格单元类型采用标准的八节点线性六面体减缩积分单元，其特点是对位移的求解结果很准确，网格存在扭曲变形时，分析精度不会受到大的影响。其中下闸首离散为 16,563 个单元，24,727 个节点数，土基离散为 43,560 个单元，47,656 节点数。

3.3. 基本荷载和计算工况

- 1) 固定荷载：① 结构自重；② 闸上的竖向荷载(包括交通桥等上部结构)。
- 2) 回填土荷载：墙后水平土压力按主动土压力和垂直土重进行计算，其余按边荷载考虑。
- 3) 水荷载：考虑四个计算工况(检修工况：上游水位 12.00 m，下游水位 5.00 m；设计工况：上游水位 14.60 m，下游水位 7.50 m；校核工况：上游水位 15.40 m，下游水位 7.50 m；地震工况：上游水位 14.60 m，下游水位 7.50 m，同时考虑 7°地震作用)。

对于以上各水位同时考虑相应的扬压力。对于结构计算模型取以下四种荷载组合的工况进行计算：

- ① 固定荷载 + 回填土荷载 + 检修水位，② 固定荷载 + 回填土荷载 + 设计水位，③ 固定荷载 + 回填土荷载 + 校核水位，④ 固定荷载 + 回填土荷载 + 地震水位[9]。
- 4) 地震荷载：按设防烈度为 7°考虑。

4. 计算结果分析

按照上述计算模型和参数，分别对闸室结构的四种工况进行了空间有限元计算，从位移及应力角度对闸室结构进行分析并作出安全评价。

1) 位移分析

根据计算结果的位移云纹图进行分析，具体计算的各工况下的闸室竖向位移(沉降)云图见图 3、图 4、图 5、图 6，闸室水平位移(顺水流方向)云图见图 7、图 8、图 9、图 10。

闸首竖向位移(沉降)计算成果见表 1，闸首水平位移(顺水流方向)计算成果见表 2。

由计算结果的位移云图及表 1、表 2 可知：各工况下底板底面和边墩顶面的沉降差较小，最大沉降差分别为 1.58 cm 和 1.81 cm，根据规范最大沉降差不宜超过 5.00 cm，故闸首结构沉降差满足规范要求；底板底面和边墩顶面的最大沉降量均为 9.96 cm，根据规范，最大沉降量不宜超过 15.0 cm，故地基沉降满足规范要求。各种工况荷载作用下，整体结构在水平方向的位移都较小。顺水流向水平位移的最大值发生在地震工况下的桥墩，沿顺水流方向从上游向下游发生位移，最大值为 18.1，位移较小满足要求。

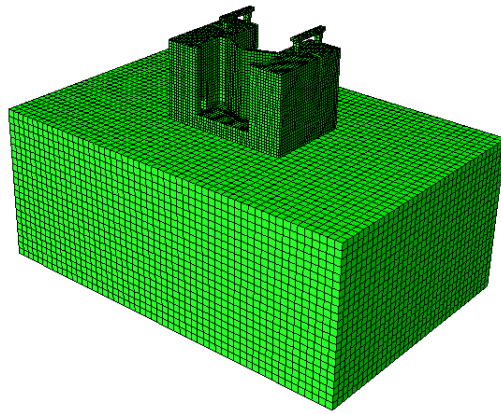


Figure 1. Global finite element calculation model figure of Huaishu lock head

图 1. 淮沭船闸闸首有限元整体计算模型图

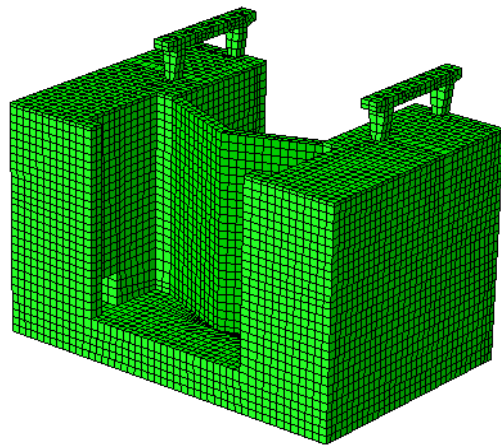


Figure 2. Calculation model figure of Huaishu lock head

图 2. 淮沭船闸闸首计算模型图

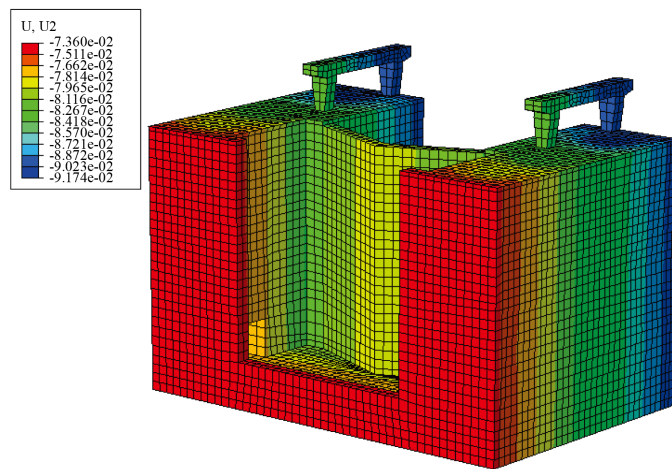


Figure 3. Vertical displacement (subsidence) distribution figure in repair working condition (m)

图 3. 检修工况竖向位移(沉降)分布图(m)

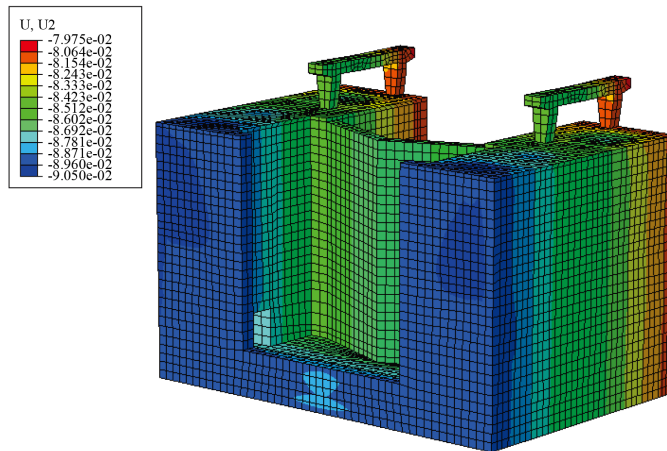


Figure 4. Vertical displacement (subsidence) distribution figure in design working condition (m)

图 4. 设计工况竖向位移(沉降)分布图(m)

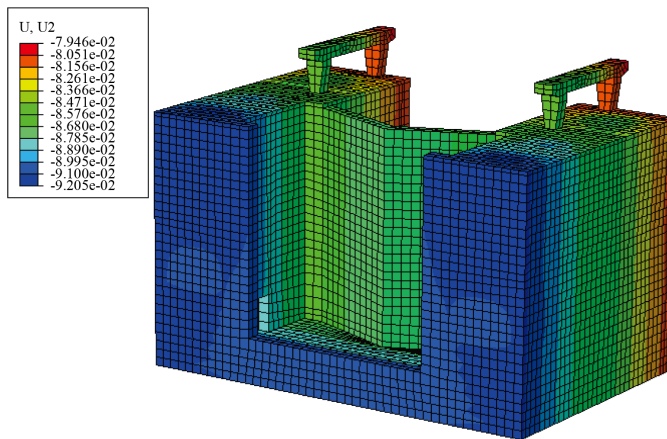


Figure 5. Vertical displacement (subsidence) distribution figure in check working condition (m)

图 5. 校核工况竖向位移(沉降)分布图(m)

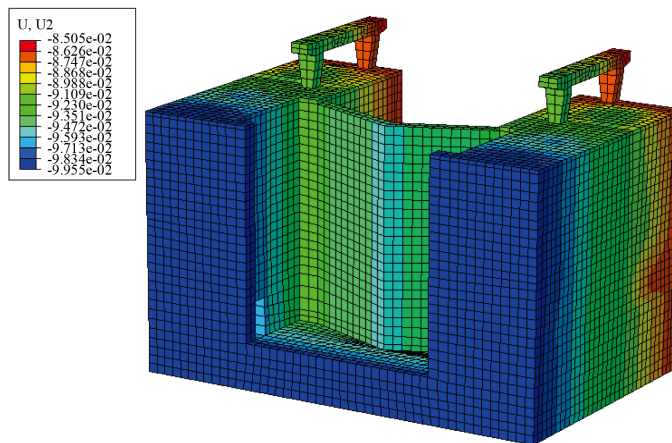


Figure 6. Vertical displacement (subsidence) distribution figure in earthquake working condition (m)

图 6. 地震工况竖向位移(沉降)分布图(m)

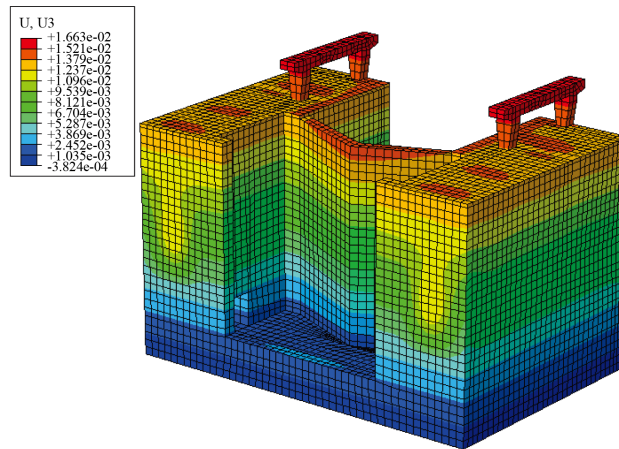


Figure 7. Horizontal displacement (along flow direction) distribution figure in repair working condition (m)

图 7. 检修工况水平位移(顺水流)分布图(m)

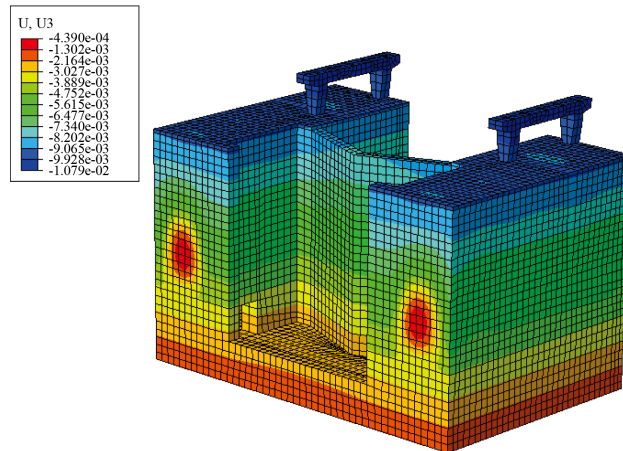


Figure 8. Horizontal displacement (along flow direction) distribution figure in design working condition (m)

图 8. 设计工况水平位移(顺水流)分布图(m)

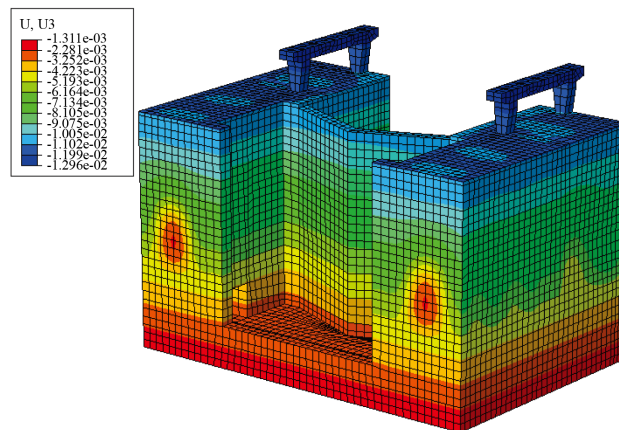


Figure 9. Horizontal displacement (along flow direction) distribution figure in check working condition (m)

图 9. 校核工况水平位移(顺水流)分布图(m)

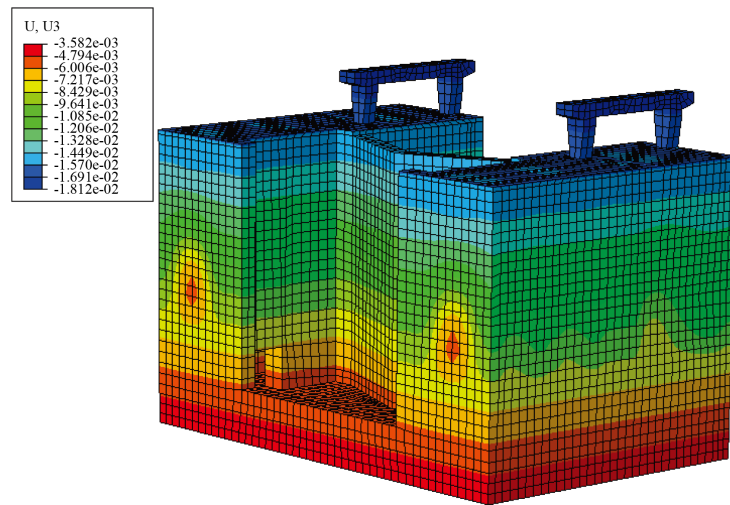


Figure 10. Horizontal displacement (along flow direction) distribution figure in earthquake working condition (m)

图 10. 地震工况水平位移(顺水流)分布图(m)

Table 1. Calculation results of vertical displacement (subsidence) of Huaishu lock head

表 1. 淮沭船闸闸首竖向位移(沉降)计算结果

计算工况	部位	竖向位移(沉降) (cm)			最大值/最小值
		最大值	最小值	沉降差	
检修	底板底面	8.94	7.36	1.58	1.21
	边墩顶面	9.17	7.36	1.81	1.24
设计	底板底面	8.96	7.98	0.98	1.12
	边墩顶面	9.05	8.06	0.99	1.12
校核	底板底面	8.99	7.96	1.03	1.23
	边墩顶面	9.20	8.11	1.09	1.13
地震	底板底面	9.96	8.51	1.45	1.17
	边墩顶面	9.96	8.62	1.34	1.16

Table 2. Calculation results of horizontal displacement (along river direction) of Huaishu lock head

表 2. 淮沭船闸闸首水平位移(顺水流方向)计算结果

计算工况	闸室水平位移(mm)		
	底板	空箱	桥墩
检修	0.30	0.99	1.08
设计	0.32	1.01	1.29
校核	0.24	1.38	1.66
地震	0.60	1.45	1.81

2) 应力分析

根据计算结果的应力云图进行分析，具体计算的各工况下的闸首最大主拉应力云图见图 11、图 12、图 13，图 14。

闸首结构应力计算结果见表 3、结构配筋计算结果见表 4。

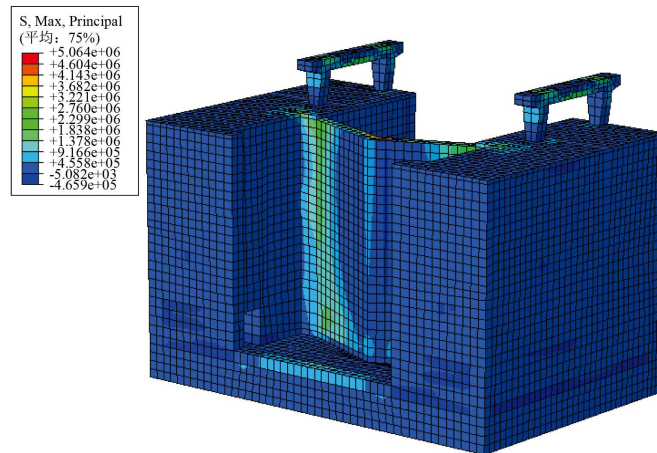


Figure 11. Distribution figure of maximum principle tensile stress in repair working condition (Pa)
图 11. 检修工况最大主拉应力分布图(Pa)

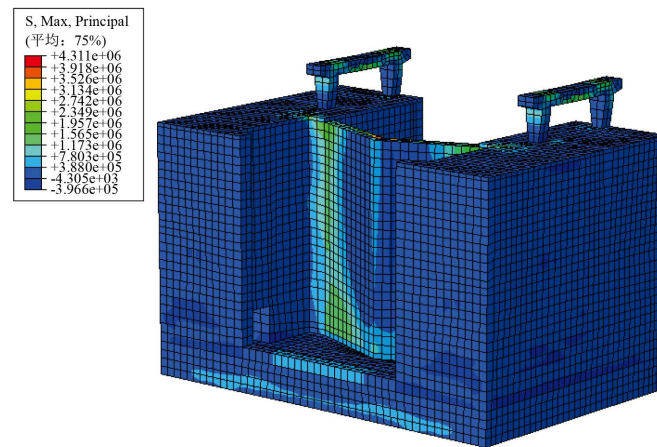


Figure 12. Distribution figure of maximum principle tensile stress in design working condition (Pa)
图 12. 设计工况最大主拉应力分布图(Pa)

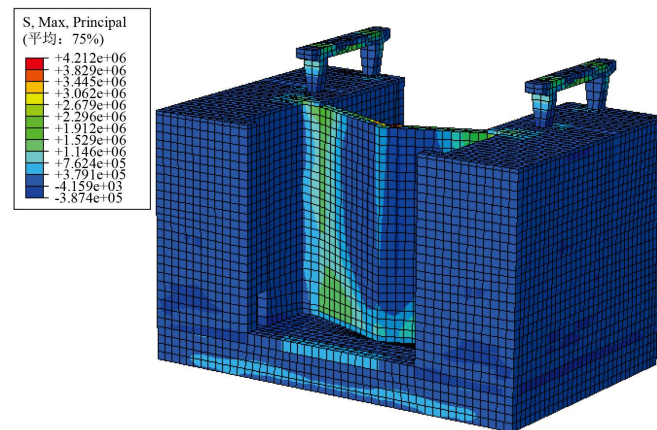


Figure 13. Distribution figure of maximum principle tensile stress in check working condition (Pa)
图 13. 校核工况最大主拉应力分布图(Pa)

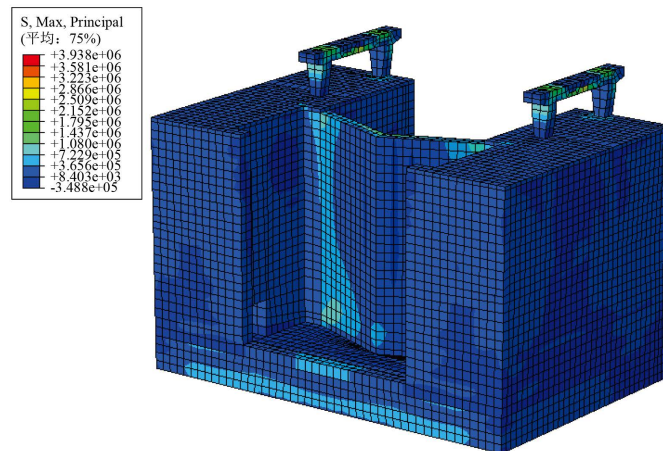


Figure 14. Distribution figure of maximum principle tensile stress in earthquake working condition (Pa)

图 14. 地震工况最大主拉应力分布图(Pa)

Table 3. Calculation results of structural stress of Huaishu lock head

表 3. 淮沭船闸闸首结构应力计算结果

计算工况	最大主拉应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	空箱底板	空箱顶板
检修	1.87	2.76	0.52	1.36
设计	1.56	2.74	0.60	1.56
校核	1.64	2.55	0.63	1.64
地震	1.44	2.50	0.50	1.08

Table 4. Calculation results of structural reinforcement of Huaishu lock head

表 4. 淮沭船闸闸首结构配筋计算结果

计算工况	项目	单位	底板		空箱	
			面层	底层	底层	面层
检修	应力	MPa	1.87	2.76	0.52	1.36
	计算配筋	mm ²	4436	5035	269	323
	实际配筋		8A30	5A30 + 5A25	A12@30	A10@30 + A8@30
设计	实际配筋面积	mm ²	5680	6004	377	430
	应力	MPa	1.56	2.74	0.60	1.56
	计算配筋	mm ²	3745	4997	310	372
校核	实际配筋面积	mm ²	5680	6004	377	430
	应力	MPa	1.64	2.55	0.63	1.64
	计算配筋	mm ²	3942	4636	326	392
地震	实际配筋	mm ²	5680	6004	377	430
	应力	MPa	1.44	2.50	0.50	1.08
	计算配筋	mm ²	3450	4541	258	49
	实际配筋	mm ²	5680	6004	377	430

由应力云图、表 3 和表 4 可知,在各工况下底板面层的最大主拉应力主要分布在下游段槛中部,最大值为 1.87 MPa;底板底层的最大主拉应力主要分布在门槛底部,最大值为 2.76 MPa;空箱底板的最大主拉应力主要分布在第三空箱底部,最大值为 0.63 MPa;空箱顶板的最大主拉应力主要分布在门槽附近,最大值为 1.64 MPa。闸首各结构的最大主拉应力均大于混凝土允许拉应力,但经配筋验算后闸首各构件承载力满足要求。

5. 结论

1) 闸首结构的位移均满足要求,各混凝土构件拉应力均超过混凝土允许拉应力,各构件都配有钢筋,经承载力分析计算,各构件承载能力满足设计要求。

2) 本文利用 ABAQUS 三维有限元计算淮沭船闸闸首结构,可以直观可靠地得出结构位移场和应力场,可为评价结构安全状态提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 王丽君. 船闸结构内力的分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [2] 冯大江. 应用 Biot 固结理论的船闸闸首结构非线性有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.
- [3] 周清华, 边立明, 徐泽中. 墩底分浇式船闸闸首底板算法研究[J]. 水运工程, 2003(1): 43-46.
- [4] 冯夏庭, 张治强, 盛谦, 等. 三峡工程永久船闸三闸首区开挖变形特征的智能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 633-637.
- [5] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [6] 王慎平, 刘北英. ABAQUS 中非线性模拟[J]. 机械制造与研究, 2006, 35(2): 20-22.
- [7] 李文涛. 基于土与结构接触效应的动力相互作用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [8] 曹邱林, 孟怡凯. 桩基础泵站结构非线性有限元分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 57-60, 72.
- [9] 孔庆阳, 曹邱林. 基于有限元的反拱底板结构应力分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 46-49.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org