



有限元法在船闸闸首结构设计中的应用

苏 超¹, 陈 鹏¹, 邓西标²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230088)

摘要: 规范算法在应用于船闸闸首的结构分析中, 因未考虑地基材料非线性及三维结构的整体性对结构计算的影响, 不能较真实地模拟闸首地基整体受力变形情况, 进而影响到船闸结构设计。针对这些问题, 本文以某大型船闸下闸首为例, 建立闸首-地基三维有限元模型, 考虑地基的材料非线性, 地基模型采用邓肯-张的 $E-B$ 模型, 使用 ABAQUS 软件分析运行工况下闸首的应力分布规律及变形特点。结果表明, 规范算法在船闸设计中总体安全富余度较大, 但在闸门附近的边墩截面和边墩与底板交角处是偏不安全的。

关键词: 闸首; 三维有限元; 材料非线性; 应力; 变形; 轴力; 剪力; 弯矩

中图分类号: U 641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)11-0105-05

Application of FEM for structural design of lock head

SU Chao¹, CHEN Peng¹, DENG Xi-biao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230088, China)

Abstract: Specification algorithm applied in calculating the lock head does not consider the impact of nonlinear foundation material and 3-D structure’s integrity to the structural calculation of the lock head, so it can’t simulate the real stress and deformation of the whole lock head and foundation, thus affect the structural design of lock heads. To counter the above problems, we establish a 3-D finite element model of the lock head-foundation by taking a large ship’s lock heads for example. Considering the foundation’s material nonlinearity, the foundation material model uses the Duncan-Chang’s $E-B$ model. The large scale finite element analysis software ABAQUS is used to analyze the stress distribution and deformation characteristics under working conditions of the lock head. The results show that the canonical algorithm is generally conservative, but it is unsafe at the side pier’s cross-section near the gate and the edge of the pier and the bottom.

Keywords: lock head; finite element method; material nonlinearity; stress; deformation; axial force; shear force; bending moment

对闸首结构的准确计算是船闸能否正常运行的前提^[1]。目前船闸的结构计算方法一般有解析法和线弹性有限元法, 但是由于有限元法在船闸结果计算中普及程度不高, 故在船闸的实际设计中, 一般使用解析算法对其进行结构计算。该方法是

将复杂的三维结构转化成二维结构的静定计算, 该方法没有考虑船闸结构的整体性, 不能准确计算船闸的内力。即使是采用线弹性有限元法计算, 也仅仅是提高了计算准确度, 也没有解决闸首-地基整体结构的计算问题^[2-4]。而考虑地基材料非线性的船闸闸首三维有限元分析很好地弥补了这一缺陷^[5]。本文通过 CAD 建立船闸闸首的三

维模型,使用 HYPERMESH 和 ABAQUS 对其分别进行网格划分和非线性有限元分析,计算出闸首典型截面的内力数据,并将考虑材料非线性有限元算法所得的内力结果与解析算法所得的内力结果进行对比,分析解析算法在船闸结构计算中的不足。

1 工程概况

该船闸按Ⅱ级水工建筑物设计,下闸首总体布置为 24 m×29 m(长×宽),由底板及岸侧、河侧边墩组成(图 1)。其中,门前段 3.4 m,门库段与支持墙段长度分别为 8 m 和 12.6 m,此闸首规模大、结构复杂,边墩内有较多空箱,岸侧边墩和河侧边墩内各有 7 个空箱。

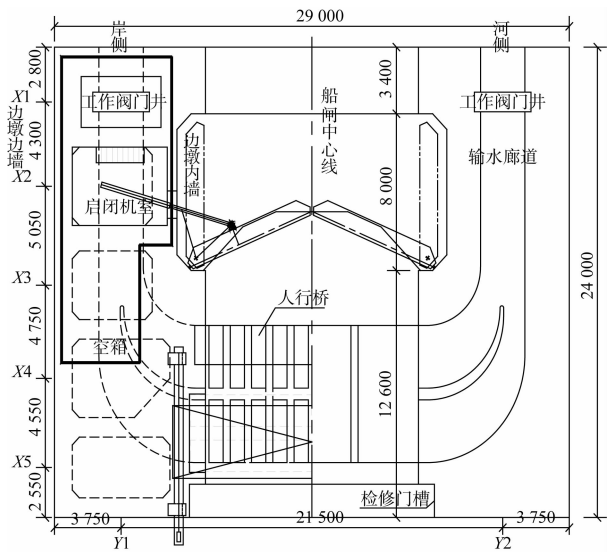


图 1 船闸俯视图(单位: mm)

2 计算模型与计算条件

2.1 有限元计算模型

下闸首-地基计算模型采用整体的三维有限元仿真模型。模型的高程均为真实高程,Y轴方向为逆水流方向,Z轴方向为竖直向上,X轴方向为河侧。地基所取范围为由中心点向左岸、右岸取 2 倍闸首高度,沿建基面向下延伸 1.5 倍闸首高度^[6-7],左右岸各延伸 36 m,向下延伸 36 m,上下游各延伸 5 m。整体结构共 250 047 个节点,225 165个单元。有限元计算网格见图 2。

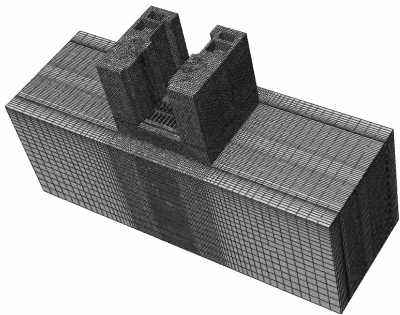


图 2 船闸三维网格模型

2.2 材料参数与边界条件

该船闸的地质为砂砾卵石,深度为 40 m 左右,闸首材料为 C25 混凝土,地基采用邓肯-张的 E-B 模型来模拟砂卵石材料^[8-10]。材料参数见表 1 及表 2。

表 1 材料物理力学参数

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	μ
混凝土	2 450	28 000	0.167
砂砾石	1 850	45	0.300

表 2 地基 E-B 模型参数

材料	K	n	R_f	C/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	K_b	m	K_{ur}	P/kPa
砂砾石	1 545	0.49	0.85	60	48.5	0	816	0.2	1 800	100

模型边界约束条件为:地基上下游截断边界沿河向位移约束,地基左右侧截断边界处横河向位移约束,底部截断边界处竖河向位移约束^[7]。

2.3 计算工况

参考《船闸水工建筑物荷载设计规范》^[11]等规范及相关设计资料,文中计算的工况及水位见表 3。

表 3 运行工况水位 m

工况	上游水位	下游水位	墙后水位(陆侧/河侧)
运行工况	18.0	6.25	6.25/6.25

3 有限元计算结果分析

3.1 位移

地基采用 E-B 模型对下闸首运行工况进行计算,横河向、顺河向、竖向位移极值分别为 -5.62、4.6、49 mm。横河向位移极值发生在岸侧边墩上部,地基左右的不均匀沉降使岸侧横河向位移大于河侧横河向位移。顺河向位移极值发生在边墩上部,这是由上游较大水压力造成的。竖向位移基本呈对角对称趋势,极值发生在岸侧边墩下游

角点处,这是由于岸侧填土形成了较大的边荷载作用在边墩上。

3.2 应力

图 3 给出下闸首主拉应力、主压应力分布云图。由图 3 可以看出,在正向水头下闸门关的工况下,结构总体处于受压状态,最大主拉应力为 4.04 MPa,位于闸室闸门槽与边墩的交角处,受到边墩自重及闸室内外较大水位差在闸门前形成的水压力影响。闸首的最大主压应力发生在闸首边墩底板下表面,大小为 5.82 MPa,由结构约束造成,在闸首的结构突变处也有应力集中现象,整体主压应力较小,满足混凝土材料强度要求^[12-13]。下闸首横河向的最大拉应力产生在闸首下游侧的底板上的格栅消能室的上表面及门库前后段,最大值为 2.95 MPa,主要是因边墩的自重大于底板自重,在底边产生负弯矩,再加之闸首两边的边荷载使中底板产生的负弯矩造成的。

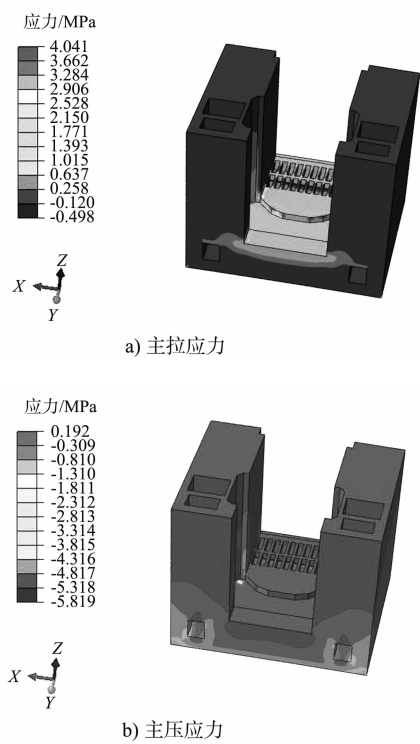


图 3 应力云图

4 有限元应力结果的内力计算及与规范算法的对比分析

选取底板、边墩空箱中几个较危险的截面,利用计算程序求出节点力,将之与规范算法对比。通过

计算结果分析可知,空箱中 X3、X4 截面应力值较大,故选择 X3、X4 截面来进行分析是合理的,以岸侧截面为例,计算控制点见图 4,岸侧 X3、X4 截面的内力图及提取的底板内力极值见图 5、6 及表 4。

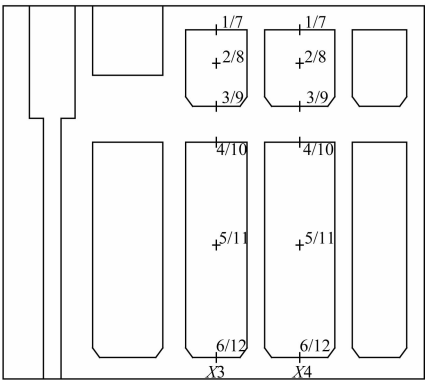


图 4 岸侧边墩边墙/内墙内力控制点

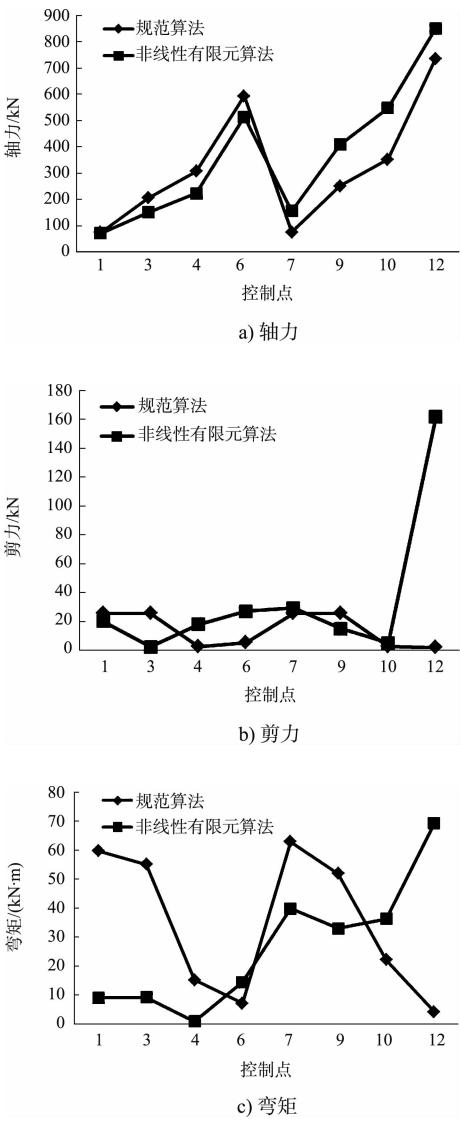


图 5 X3 截面部分控制点内力值对比

表 4 底板内力极值及位置对比

方法	轴力/kN		剪力/kN		弯矩/(kN·m)	
	N 值	位置	Q 值	位置	M 值	位置
规范算法	1 262.8	消能室段岸侧边墩边墙处	3 211.0	门库前岸侧边墩内墙处	18 251.8	消能室段底板中轴线处
非线性有限元法	750.0	门库段岸侧边墩边墙处	1 228.1	检修门槽段岸侧边墩内墙处	7 398.2	检修门槽段中轴线处
K/%	68		161		147	

注：表中轴力极值只取轴拉力极值，剪力和弯矩极值取绝对值最大值；K 值为(规范算法结果-非线性有限元结果)/非线性有限元结果×100%。

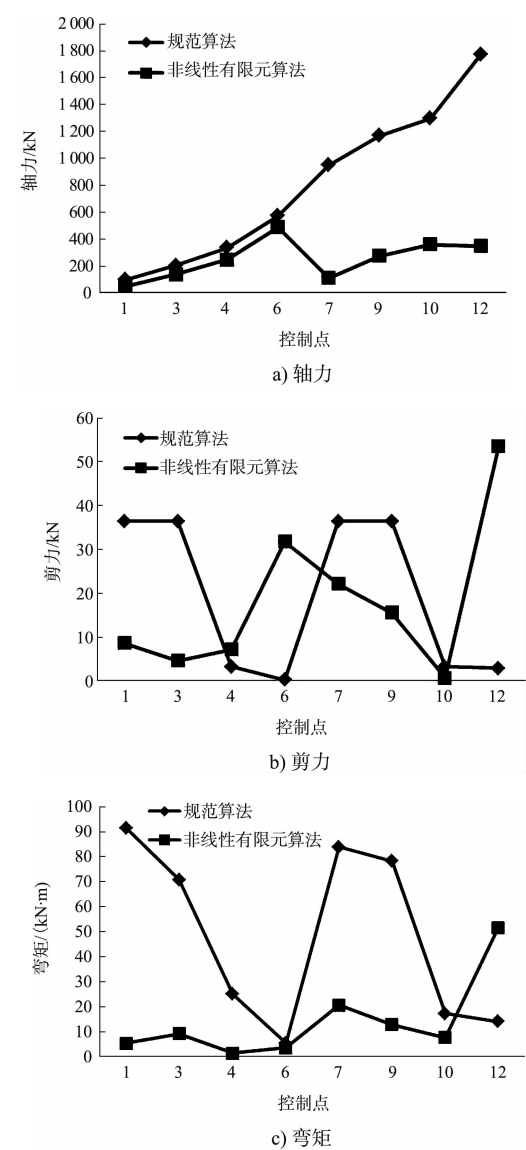


图 6 X4 截面部分控制点内力值对比

4.1 X3 截面内力对比

图 5、6 为部分控制点的内力对比。在不影响分析问题的情况下考虑作图方便，图 5、6 中的内力值都取原内力的绝对值。

由图 5 知，X3 截面边墩边墙的轴力计算结果规范算法比非线性有限元计算大了 5% ~ 37%。边墙上半部分剪力的结果规范算法比非线性有限元

计算大了 100% 左右，而下半部分却小了 80% 左右。边墙弯矩的结果规范算法比非线性有限元计算大了超过 150%，但是边墙底部却小了 50%。X3 截面边墩内墙的轴力计算结果规范算法比非线性有限元计算小了 13% ~ 51%。7、9 控制点的剪力和弯矩两种方法的计算结果之间的差异有所减小，而 10、12 控制点的剪力和弯矩两种方法的计算结果之间的差异较边墙有所增大。

4.2 X4 截面内力对比

由图 6 知，X4 截面内力的计算结果，除固端约束处外，规范算法普遍比非线性有限元计算结果大，且内墙的盈余度超过了边墙的盈余度。

4.3 底板内力对比

由表 4 知，底板轴力极值规范算法结果比非线性有限元计算结果大了 68%，剪力和弯矩分别大了 161% 和 147%。

4.4 结构内力对比结果分析

结合图 5 和图 6 可以看出：对于 X3 截面和 X4 截面底部的内力计算结果，规范算法普遍比非线性有限元计算的结果小，这是由于规范算法没有考虑底板的内力变形对截面底部的影响，即规范算法简化模型的缺陷，得出的内力计算结果在设计中是不可以采用的。X3 截面内墙与边墙的两种方法结果对比差异较大，是由于 X3 截面内墙靠近闸门轴，规范算法没有考虑闸门前的水对门轴的作用力对 X3 截面内墙受力变形的影响，从而导致 X3 截面内墙规范算法结果偏低，此处应予以重视。X4 截面内墙与边墙的两种方法的结果对比差异较大，是由于采用规范算法计算 X4 截面内墙时，门机及人行桥荷载是采用点荷载的方式计算的，而有限元则是采用均布力的方式计算的，得到的结果是规范算法偏大于实际值。结合表 4 知：由于采用规范算法计算底板时没有考虑边墩和底板作为一个整体共同承担外部荷载对底板内力变

形的影响, 所以得出的结果是偏保守的。

5 结语

从有限单元法分析入手, 建立了闸首-地基整体的三维有限元模型, 根据地基材料的实际情况, 采用邓肯-张的 $E-B$ 模型模拟其力学特性, 并使用 ABAQUS 分析运行工况下闸首的应力和变形的分布规律及特点。将分析结果与规范算法结果进行对比, 得出结论: 规范算法大体偏于安全, 但是当边墩截面附近有较大的侧向力作用时和在边墩截面固端约束处, 由于规范算法没有考虑结构的整体性, 因此得出的结果是偏不安全的^[14-15], 在工程设计中应予以重视。

参考文献:

- [1] 苏超, 李劲松, 崔潇菡. 三维有限单元法在大型船闸闸首设计中的应用[J]. 水运工程, 2014 (5): 112-116.
- [2] 王丽英, 杨斌. 船闸闸首部位结构内力的非线性有限元分析[J]. 港工技术, 2011, 48(6): 28-31.
- [3] 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.
- [4] 杨斌, 朱旭. 船闸闸首非线性有限元分析[J]. 水道港口, 2010, 31 (5): 37-42.
- [5] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

- [6] 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.
- [7] 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] 江守燕, 谢庆明, 杜成斌. 基于 ABAQUS 平台的邓肯-张 $E-B$ 和 $E-V$ 模型开发[J]. 南京: 河海大学学报, 2011, 39(1): 61-65.
- [8] 费康. 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] 庄茁. ABAQUS 非线性有限元分析玉实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 王慎平, 刘北英. ABAQUS 中的非线性模拟[J]. 机械制造与研究, 2006 (2): 20-22.
- [11] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].
- [12] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
- [13] 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
- [14] 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.
- [15] 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.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 97 页)

4 结语^[2]

通过此次改造, 码头靠泊等级和装卸船机的能力得以提高: 1[#]泊位靠泊等级由原来的 1 万吨级提高到 3.5 万吨级; 2[#]泊位增加装船机, 增加直取装船功能; 3[#]泊位新增了桥式抓斗卸船机; 同时 2[#]泊位、3[#]泊位达到了靠泊 10 万吨级船舶能力, 使现有码头泊位等级与船型配置相适应; 对陆域堆场进行改造, 增加堆取料作业线。但由于受各种条件制约, 改造后仍存在 2[#]泊位靠泊 10 万吨级以上船舶时, 3[#]泊位不能同时进行装船作业的工况。根据船型组合分析计算, 3[#]泊位卸船在 2[#]泊位直取及无船或 2[#]泊位堆场取装情况下, 泊位年通过能力为 830 万 t, 2[#]泊位装船能力为 290 万 t, 1[#]泊位装船能力为 530 万 t, 码头总吞吐能力提升

到 1 650 万 t。

改造后, 码头等级得以提高, 装卸工艺流程更加合理, 码头装卸船能力和堆场能力进一步相适应, 大大提高了码头的通过能力, 改造后通过能力比改造前翻了 1 倍, 适应了当前国际航运、货运市场的发展趋势。

参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司宁波光明通用泊位工程初步设计说明书[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2008.
- [2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 宁波光明码头整体改造工程初步设计说明书[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2013.
- [3] JTS 165—2013 海港总体设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)