

奔牛枢纽上闸首结构有限元分析

徐 刚¹, 邵琳玉², 徐莉萍¹

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127;
2. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 针对奔牛枢纽船闸上闸首结构及受力复杂问题, 采用三维有限元 ABAQUS 软件, 分析研究闸首结构在不同的工况下的位移场及应力场。计算结果表明, 奔牛枢纽船闸上闸首各部件的水平位移和垂直位移均满足规范要求, 各工况下的结构底板拉应力超过混凝土允许拉应力。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

中图分类号: TV662 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2016) 03-0005-05

Analysis of finiter element on Benniu lock head structure

XU Gang¹, SHAO Linyu², XU Liping¹

(1. *Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resource Co., ltd, Yangzhou 225127, Jiangsu;*
2. *School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu*)

Abstract: Aimed at the complex problemes of Benniu lock head structure, the three-dimensional FEA software-ABAQUS is adopted to analyze the displacement field and stress field of lock head structure under different working conditions in this paper. The calculation result shows that the horizontal and vertical displacement all meets the specification requirement. Under different working conditions, the tensile stress of the structure floor is more than that of the concrete. The results of three-dimensional FMA can accurately and intuitively reflect the state of overall strength and displacement, which provide basis for evaluating the security state of structure.

Key words: lock heads; nonliner finiter element; displacement; stress; calculation model

1 工程简介

奔牛水利枢纽工程位于江苏省常州市奔牛镇新孟河与京杭运河交汇处, 枢纽由船闸、节制闸和穿京杭运河立交地涵组成, 船闸和节制闸并排布置于现状新孟河河口, 立交地涵位于现状新孟河河口东侧。枢纽总体布置见图 1。

船闸上闸首与节制闸闸室并列整体布置, 共用

一块底板, 均为开敞式水闸结构, 闸底板面高程(吴淞高程, 下同)为 -0.70 m, 底板厚 2.0 m, 底板顺水流向长度为 16.0 m, 船闸净宽 16.2 m, 节制闸净宽 12 m, 上闸首与节制闸之间的中墩为空箱结构, 空箱内设隔墙以增加结构整体性, 两侧边墩为实体墩墙。结构形式见图 2。

2 闸室计算模型分析

收稿日期: 2016-02-16

作者简介: 徐刚(1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水工结构设计工作。

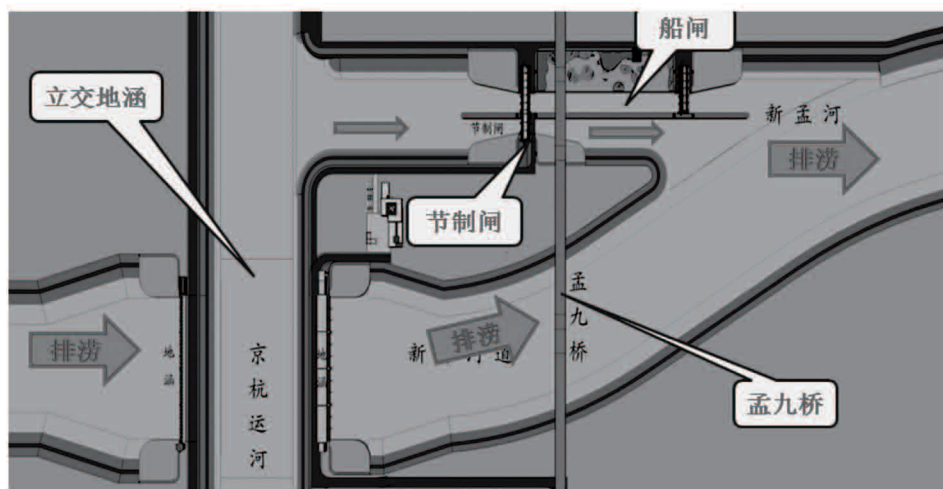


图1 奔牛枢纽工程布置图

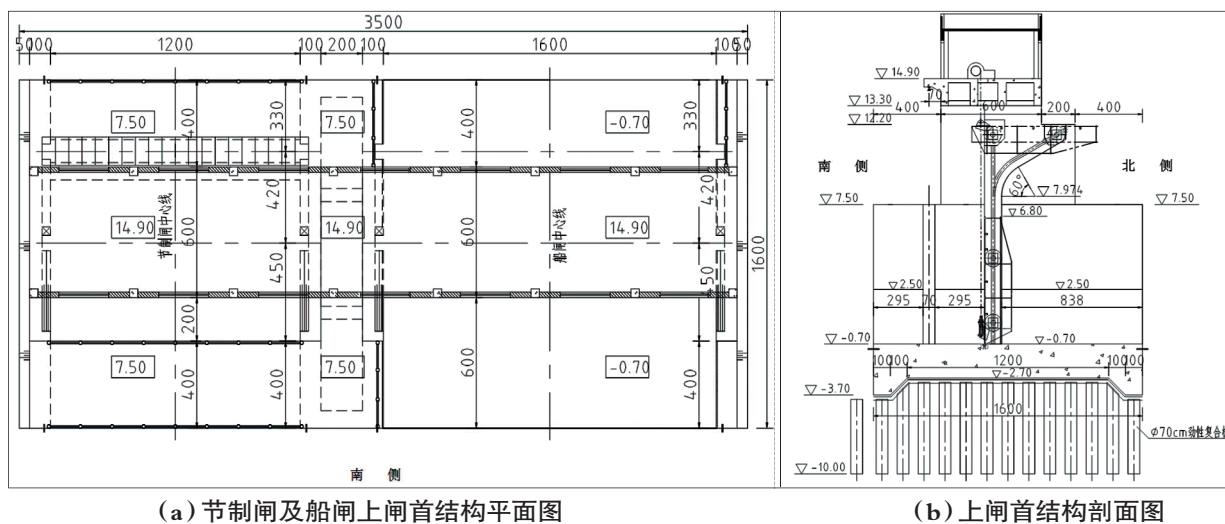


图2 节制闸及上闸首结构图

船闸运行过程中,上闸首和节制闸下游侧的水位将产生不一致的情况,这样导致整体式结构在顺水流方向产生扭矩。当复杂结构体中产生扭矩时,传统的计算方法很难对结构的稳定和内力进行计算,并且传统的计算方法基于一定假定,一般为将空间问题近似简化为平面问题进行计算分析,故增加了计算结果的不确定性。为了对闸首整体结构的位移和内力状态有一个比较全面的了解,有必要采用空间三维有限元软件对位移场和应力场进行研究分析,以评价其工作性能^[1]。

2.1 计算域的选取

由于船闸上闸首与节制闸闸室之间无沉降缝,故取船闸上闸首与节制闸闸室作为一个整体进行分析,分析此结构时,地基的影响很大,根据圣维南原理^[2],作用于弹性体某一小部分上自呈平衡的力系,只在荷载作用点附近产生局部应力,在距离稍远处其影响趋近于零,为此必须在计算域中

包括一块足够大的地基。为了较好地反应体系的相互作用,可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^[3]。本次计算的地基在长度方向取闸首长度的3倍,即105.6 m,宽度方向取闸首宽度的3倍,即48 m,深度取闸首高度的2倍,即高程-37.9 m。由于所取的地基模型范围比较大,因此地基的边界条件近似认为其与土体是固结的^[3]。

2.2 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。节制闸及船闸上闸首整体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四节点线性四面体减缩积分单元,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^[4]。其中闸首离散为 5422 个单元, 18318 个节点数, 土基离散为 50181 个单元, 9536 节点数。

2.3 材料参数及接触模拟

土的重度、内摩擦角和粘聚力根据工程地质钻探图土样试验资料确定。闸室的离散单元材料定义为 C25 混凝土。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^[5], 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^[6]: 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时, ABAQUS 认为接触面处于粘结状态。若摩擦力大于, 则接触面开始出现相对滑移变形, 称为滑移状态。

2.4 荷载条件

根据奔牛枢纽运行的实际情况, 作用于上闸首整体结构上的荷载包括: 结构、结构内部或上部填料的重力, 闸室两侧的土压力和水荷载。

结构、结构内部或上部填料的重力, 按其尺寸和材料重度计算。由于地基的自重所产生的应

力及变位是在建闸室前就存在的, 因此在分析结构建成后所产生的应力和变形时不应施加地基自重。

墩墙外侧土压力的计算参数根据地基性质、结构类型和回填土性质等因素按下列情况判别。回填土与墙背间的摩擦角 δ 根据回填土的性质、墙背型式和粗糙程度等规定采用, 该闸室模型近似为垂直的混凝土墙背, 可采用 $1/3 \sim 1/2$ 为回填土的内摩擦角^[7]。由于底板挠度引起墙身转动或墙本身的弹性变形, 在墙身高度不大时一般只能达到非常小的数值, 因此, 作用于墙上的土压力往往大于主动土压力, 可能接近静止土压力^[8]。针对整体式闸室的超静定结构特点, 为考虑安全, 从可能的最不利情况出发, 文章中计算土压力取静止土压力。静止土压力系数, 宜按主动土压力系数的 $1.25 \sim 1.5$ 倍采用^[9]。

水荷载包括闸室内的静水压力、墙后的地下水压力, 扬压力。水荷载应根据不同的水位组合情况进行计算。根据奔牛枢纽设计水位情况, 选取检修期以及运行工况下 8 组水位进行加载计算, 水位组合情况如表 1。

3 计算结果分析与比较

按照上述计算模型和参数, 根据三维有限元计算结果, 从位移及应力角度对船闸上闸首结构进行分析并作出安全评价。

3.1 位移结果分析

根据计算结果的位移云图进行分析, 各工况下的船闸上闸首和节制闸整体结构的竖向位移(沉降)

表 1 计算工况及水位

工况	水位				备注	
	船闸水位		节制闸水位			
	南侧	北侧	南侧	北侧	船闸工况	节制闸工况
工况1	2.75	4.41	2.37	4.41	最低通航水位	引水反向挡水
工况2	3.54	4.41	3.83	5.24	常水位	排涝反向挡水
工况3	3.54	4.41	3.54	4.41	地震期	地震期
工况4	3.54	4.41	3.54	4.41	常水位	常水位
工况5	0.00	0.00	0.00	0.00	完建期	完建期
工况6	5.63	2.80	5.63	3.54	最高通航水位	引水正向挡水
工况7	6.29	3.54	6.29	3.83	设计洪水位	排涝正向挡水
工况8	3.54	0.00	3.54	4.41	检修期	检修期

注: 完建期、检修期闸室内按无水计算。

见云图见图3, 水平位移(顺流方向)云图见图4。

根据求得的上闸首和节制闸整体结构在各种工况下的位移分布图, 选取典型点绘制出其分布曲线, 结构的竖向位移(沉降)及水平位移(顺水流方向)随着水位差的变化趋势见图5。

根据计算结果, 结构在各工况下, 竖向沉降比较均匀, 但因结构非对称及部分工况上闸首及节制闸侧水位不一致的情况, 结构各部位的沉降并非完全一致, 沉降极值基本出现在节制闸侧边墩处及其附近。工况5为完建期, 上下游及闸室内均无水, 基底扬压力较其他工况偏小, 该工况出现了最大沉降, 沉降量为59.2 mm。根据规范^[10], 最大沉

降量不宜超过15.0 cm, 故结构沉降满足规范要求。

各种工况荷载作用下, 结构在水平方向的位移都比较小, 结构的抗滑稳定满足要求。因结构和受力均非对称, 结构各部位顺水流向水平位移并非完全一致, 部分工况受节制闸及上闸首两侧上下游水位差不一致的影响, 底板的位移出现一定的扭转趋势。工况7为洪水期, 节制闸及上闸首的水位差均出现最大值, 该工况顺水流向位移出现最大值, 位移量为16.8 mm。

3.2 闸室应力结构分析

根据计算结果的应力云图进行分析, 各工况下的船闸上闸首和节制闸最大主拉应力云图见图6。

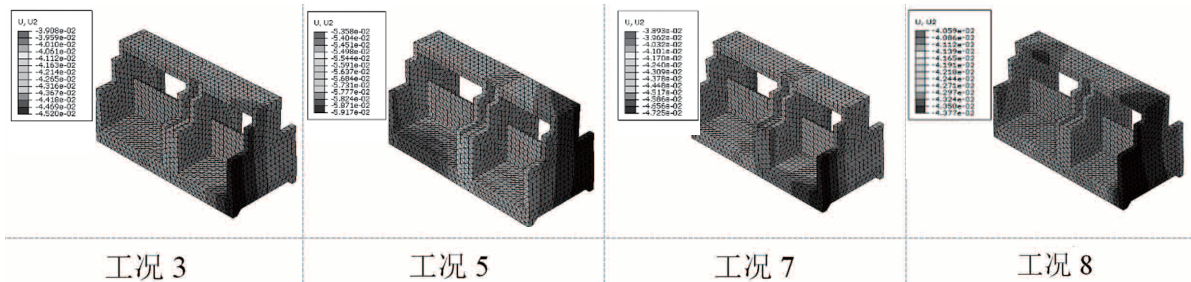


图3 船闸上闸首与节制闸结构竖向位移(沉降)分布图

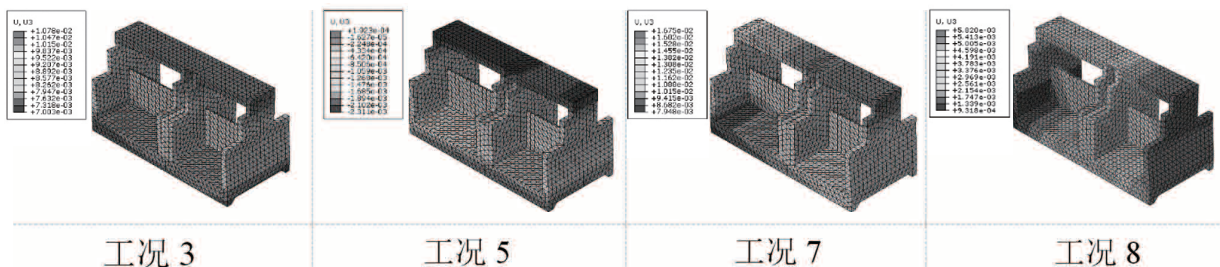


图4 船闸上闸首与节制闸结构水平位移(顺水流方向)分布图

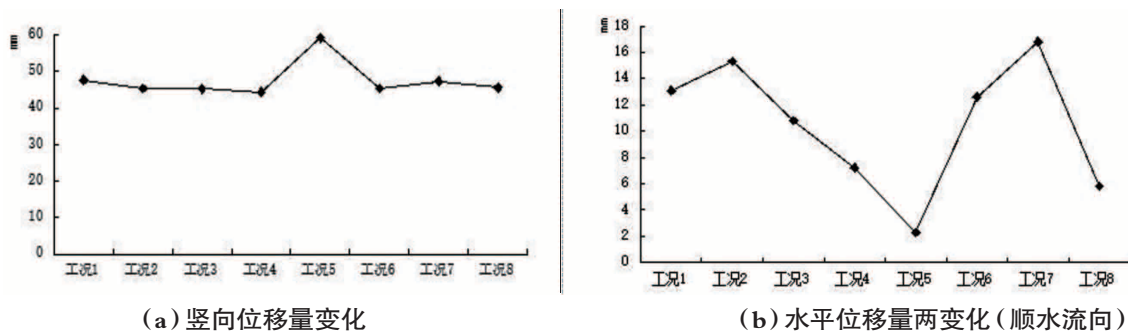


图5 位移变化趋势图

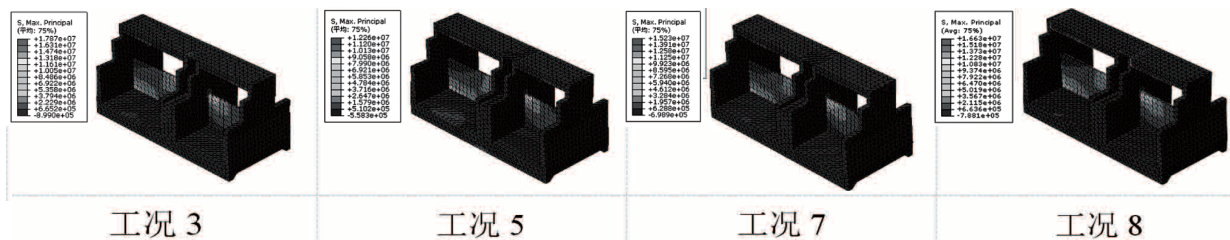
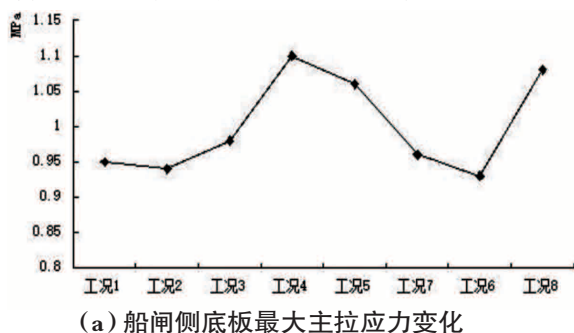


图6 船闸上闸首与节制闸结构应力分布图(Pa)

根据求得的船闸上闸首和节制闸结构在各种工况下的最大主拉应力分布图,对底板所受最大拉应力进行统计,绘制出其分布曲线,船闸上闸首及节制闸底板最大主拉应力变化趋势见图7。



(3) 上闸首及节制闸整体结构的沉降满足规范要求,水流向水平位移受上、下游水位差影响,随水位差减小而减小。

(4) 上闸首和节制闸底板部位的最大应力均

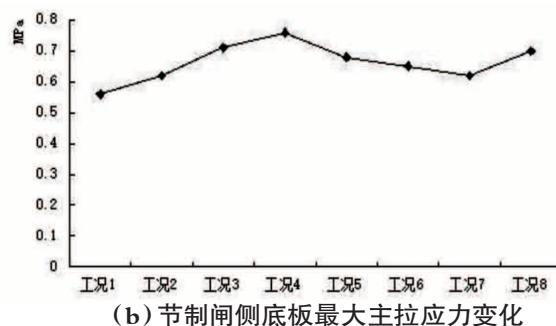


图7 底板最大主拉应力变化趋势图

根据计算结果,各工况主拉应力最大值出现部位基本一致,均出现在上闸首及节制闸顺水流向中心线附近区域的面层部位。因结构非对称,上闸首底板跨度较节制闸大,同工况下上闸首底板部位的主拉应力值亦大于节制闸侧。上闸首底板及节制闸底板部位的主拉应力均在工况4出现了极值,上闸首底板主拉应力数值为1.10 mPa,节制闸底板主拉应力极值为0.76 mPa。底板的最大主拉应力均超过了规范^[11]中C25混凝土的抗拉强度设计值,需要进行配筋设计。

大部分工况下,上闸首和节制闸的上、下游侧的水位不一致,会在结构顺水流方向产生扭矩,在中墩部位产生剪力,这导致在顺水流向的应力分析较为复杂。但通过三维有限元分析计算结果表明,除检修期外,奔牛枢纽上闸首与节制闸两侧上下游水位差的差异并不是很大,顺水流向的扭矩和剪力并没有产生较大的应力。由此佐证,该结构形式垂直水流向两侧结构水位差的差值不是很大时,空间结构体系可以简化为平面的杆件框架体系结构进行计算,适当的增加纵向构造钢筋,以抵消结构的顺水流向的剪力和扭矩。但当两侧结构的水位差较大时,应该考虑空间体系的整体作用,利用三维有限元分析计算。

4 结论

(1) 利用三维有限元对结构进行计算分析,可以较直观、可靠地得出结构位移场和应力场,可为结构安全状态的评价提供依据。

(2) 针对复杂结构及复杂受力工况下,有限元软件计算分析较传统计算方法更为快捷、便利。

超过规范混凝土抗拉强度设计值,需要进行配筋计算。

(5) 受篇幅限制,文章仅对应力场进行了计算分析,但依据规范进行配筋设计的过程中,需根据内力进行包络设计,实际设计过程中应对典型截面进行内力计算。

参考文献:

- [1] HELLER V, HAGER W H, MINOR H E. Ski jump Hydraulic Engineering, 2005, [3](5): 347-355.
- [2] 王元汉,李丽娟著.有限元法基础与程序设计[M].广州:华南理工大学出版社,2001.
- [3] 萨布尼斯(Sabnis, G.M.).结构模型和试验技术[M].北京:中国铁道出版社,1989.
- [4] 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.
- [5] 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,2010.1.
- [6] 郑颖人,沈珠江,龚晓南.广义塑性力学—岩土塑性力学原理[M].北京:建筑工业出版社,2002.
- [7] 关淑萍,张燎军,王大胜,王海青.边荷载对水闸地基沉降与底板内力的影响研究[J].水电能源科学,2006(24).
- [8] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1995,4.
- [9] 江苏省水利勘测设计研究院.SL265-2001:水闸设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [10] 水利部长江水利委员会长江勘测规划设计院.SL191-2008:水工混凝土结构设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

(责任编辑:王宏伟)