

基于有限元的船闸结构位移分析

曹邱林, 陈 敏

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对沐新河北船闸的工程实例,借助三维有限元分析软件 MSC.MARC 对船闸建立有限元模型,考虑船闸在运行期中的各种工况,对船闸结构位移情况进行分析,比较归纳船闸的各个组成部分的位移情况,并结合实际观测结果,分析研究船闸的安全状况。分析结果表明,三维有限元分析能适应各种复杂变形和受力特点,可以提高对工程问题的计算效率和计算精度,分析结果能较直观、精确反映建筑物整体位移状况,可为船闸的维护提供一定的依据。

关键词:船闸;有限元;位移分析;计算模型;沐新河北船闸

中图分类号:U641.2

文献标志码:A

文章编号:1006-764X(2012)S1-0056-04

随着我国内河水资源的不断开发利用,航运开发已成为内河开发中水资源的重要组成部分,作为十分重要的水工建筑物之一的船闸也逐渐进入快速发展阶段。船闸工程在施工及运行期间由于地基、结构、地下水位、闸室水位、墙后填土等各种因素的共同作用,产生不同程度的沉降和水平位移,因而可能造成船闸结构的沉降不均匀和构件间沉降缝错位。近年来,结构的沉降错位已成为船闸建筑物不可忽视的病害之一,直接影响船闸工程的安全运行。因此有必要对船闸结构的位移情况进行分析研究。

由于常规计算方法无法全面考虑到实际多种荷载的共同作用,因而有必要对其整体结构进行三维有限元分析。

1 计算原理和方法

为对船闸上下闸首、闸室整体结构的受力状态进行全面的分析,采用三维有限元软件对其进行研究分析,并对其安全性进行评价。有限元计算法是目前解决复杂空间结构力学问题最有效的数值方法之一^[1]。为了方便有限元分析,采用六面体单元模型。各种结构离散成八节点六面体等参单元,单元之间通过有限个点连接起来。

有限元的计算能适应各种复杂变形和受力特点,采用不同类型的单元进行离散,以提高对工程问

题的计算效率和计算精度,因而成为行之有效的工程分析手段。

由于混凝土底板、闸室墙底板、浆砌石闸墩、闸室墙所用材料的刚度比地基土体刚度大,通常对钢筋混凝土、浆砌石结构采用线弹性本构模型,即广义虎克定律。土的本构模型采用 Marc 提供的弹塑性模型,把总的变形分成弹性变形和塑性变形两部分,前者用虎克定律计算,后者用塑性理论求解。硬化规律采用各向同性的假定,流动法则采用相关联的流动法则(associated flow rule),屈服准则采用线性摩尔-库仑准则(linear Mohr-Coulomb law)。

根据船闸上下闸首的受力特点,对于上闸首结构,将地基、底板、闸墩和上部混凝土结构作为一个整体;对于闸室结构,将地基、底板、闸室墙作为一个整体;对于下闸首,将地基、底板、闸墩作为一个整体,考虑它们之间的相互作用,上下闸首底板和闸墩的材料不同,闸室墙底板和闸室墙的材料不同。对于不同材料间接触考虑,利用 Marc 有限元程序里黏合模型定义体系的接触表面,通过无相对滑动的 Glue 功能和施加很大的分搁力把地基、底板及闸墩结构粘连起来如一个整体,物体之间无相对滑动速度,接触表面变形满足连续条件^[2]。各种结构离散成八节点六面体等参单元,单元之间通过有限个点连接起来^[3]。所考虑的荷载按有关规范^[4]进行处理。

2 实例分析

本文结合沭新河北船闸实例进行有限元计算。

2.1 概况

沭新河北船闸位于沭阳县桑墟镇友谊闸东侧，闸首净宽 10 m，最低通航水深 2.5 m，闸室净宽 12 m，长 135 m。上闸首顶高程 8.5 m，闸底高程 3.0 m；下闸首顶高程 8.5 m，闸底高程 -0.5 m；闸室墙顶高程 8.5 m，闸室底高程 -0.5 m。上下闸首采用混凝土与砌石混合结构，部分使用钢筋混凝土，反拱底板分段浇注，以后封缝连成整体。墙身采用混凝土底板，衡重式浆砌块石结构。船闸输水利用上、下闸首两侧闸墙宽度，布置输水廊道，对冲消能。

2.2 计算模型及设计工况

a. 上闸首结构计算模型。上闸首底板为混凝土反拱底板，闸首墩墙采用浆砌块石圪工结构，沿上、下游方向 13 m。取上闸首整个底板、闸门槛、闸墩和一定范围内的地基（沿水平方向距底板两端取 24 m，沿深度方向取至 10 m）作为计算结构模型，剖分网格^[5]。闸顶以上房屋、启闭机等设备作为荷载作用在闸墩顶上，墙后填土作为土压力作用在墙背和底板上，周边填土作为边荷载作用在地基上，扬压力和多孔介质（土）上的渗透压力采用三角形荷载施加于闸底板底部。由于考虑到了地基模型尺寸范围的选择，故采用全约束^[6]。坐标系取为：零点设置在底板面和闸墩的接触处， x 轴垂直于水流方向指向右边， z 轴顺水流方向指向下游， y 轴垂直指向上方。图 1 为上闸首结构空间有限元网格，其中单元总数为 55 748 个，节点总数为 64 296 个。

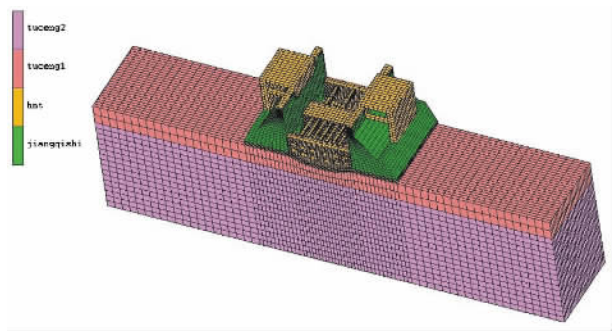


图 1 上闸首有限元计算模型

b. 闸室结构计算模型。闸室墙为衡重式挡土墙，其中闸室墙底板为 140 号混凝土结构，盖顶为 100 号混凝土结构，墙身为 100 号浆砌块石圪工结构，闸室墙底板分块长度为 22.98 m，每个分块中间设 2 mm 沉降缝。建模时沿上、下游方向取 23 m，取闸室地基、两边闸室墙和一定范围内的地基（沿水平方向距闸室墙底板两端取 16.4 m，沿深度方向取至 -13.5 m）作为计算结构模型，剖分网格。闸室墙自

重作为荷载作用在底板顶面上，墙前水位作为水压力荷载作用在闸室墙面，墙后填土作为土压力作用在墙背上，墙前后由水位差产生的浮托力作为荷载作用在闸室墙底板上，周边填土作为边荷载作用在地基上。由于考虑到了地基模型尺寸范围的选择，故采用全约束。坐标系取为：零点设置在闸室底面和闸室墙的接触处， x 轴垂直于水流方向指向右边， z 轴顺水流方向指向下游， y 轴垂直指向上方。图 2 为闸室结构空间有限元网格，其中单元总数为 16 680 个，节点总数为 20 848 个。

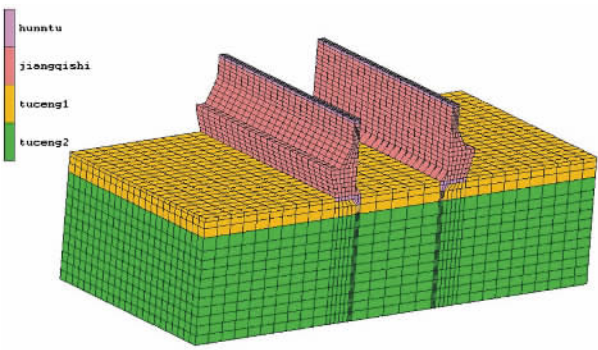


图 2 闸室有限元计算模型

c. 下闸首结构计算模型。下闸首底板为反拱底板，闸首墩墙除闸门门槽部位采用现浇钢筋混凝土结构外，其他部位均采用浆砌块石圪工结构，沿上、下游方向 10 m。取上闸首整个底板、闸门、闸墩和一定范围内的地基（沿水平方向距底板两端取 8 m，沿深度方向取至 -10.0 m）作为计算结构模型，剖分网格。闸顶以上排架、启闭机等设备作为荷载作用在闸墩顶上，拱内混凝土填料作为荷载作用在底板顶面上，墙后填土作为土压力作用在墙背和底板上，周边填土作为边荷载作用在地基上。由于考虑到了地基模型尺寸范围的选择，故采用全约束。坐标系取为：零点设置在底板面和闸墩的接触处， x 轴垂直于水流方向指向右边， y 轴垂直指向上方， z 轴顺水流方向指向下游。图 3 为下闸首结构空间有限元网格图，其中单元总数为 23 125 个，节点总数为 26 814 个。

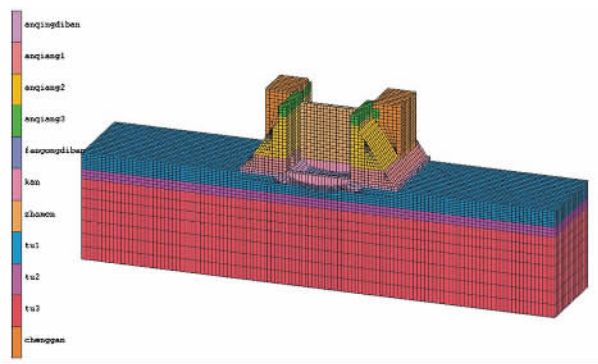


图 3 下闸首有限元计算模型

对于上下闸首及闸室计算模型取以下 4 种荷载

组合的工况进行计算:①固定荷载+回填土荷载+设计水位+浪压力;②固定荷载+回填土荷载+校核水位;③固定荷载+回填土荷载+正常水位+地震荷载(顺水流向水平地震);④固定荷载+回填土荷载+正常水位+地震荷载(垂直水流向水平地震)。分别对上、下闸首、闸室结构的4种工况进行了空间有限元计算,求出了各种工况下结构在荷载作用下的各点位移,并由此分析闸室位移变化规律。

2.3 计算结果

上闸首在4种工况下的空间位移如图4和图5所示。

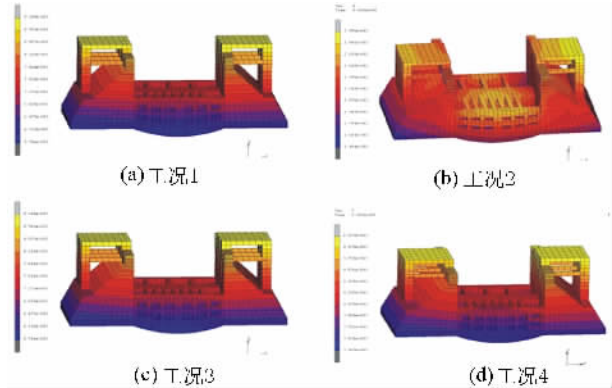


图4 上闸首各工况顺水流位移分布

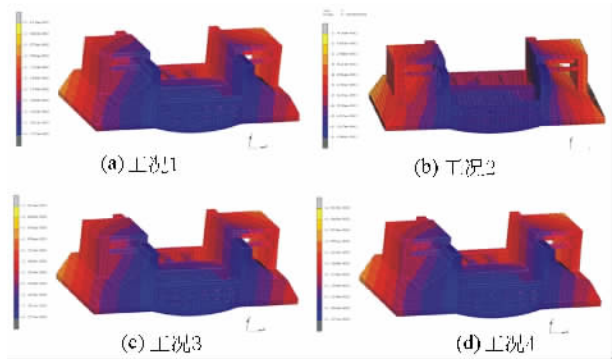


图5 上闸首各工况竖直位移分布

由图4和图5可以看出:上闸首在4种工况作用下,沿顺水流方向均发生向左水平位移,最大位移均发生在下游闸墩顶部,位移值 $U_{zmax}=0.18\text{ cm}$;沿铅直方向整个上闸首结构发生向下的位移,最大位移发生在闸墩顶上游端,位移值 $U_{ymax}=8.50\text{ cm}$ 。

闸室在4种工况下的最大主应力如图6和图7所示。

由图6和图7可以看出,闸室在4种工况作用下,沿顺水流方向闸室墙从外侧向内侧发生位移,最大位移发生在闸室墙顶端, $U_{zmax}=0.27\text{ m}$;沿铅直方向整个上闸室结构发生向下的位移,最大位移发生在闸室墙内侧顶端, $U_{ymax}=9.77\text{ cm}$ 。

下闸首在4种工况下的空间位移如图8和图9所示。

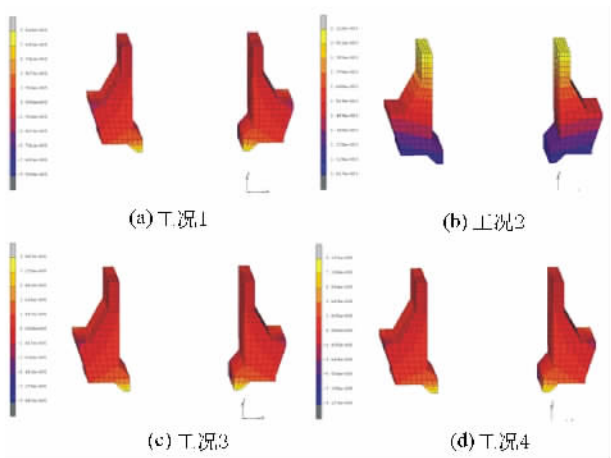


图6 闸室各工况顺水流位移分布

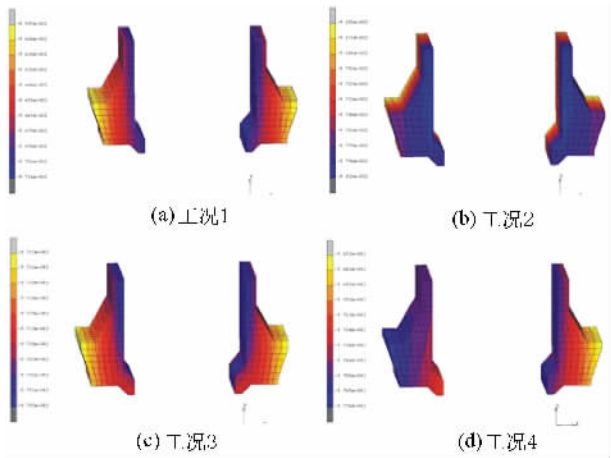


图7 闸室各工况竖直位移分布

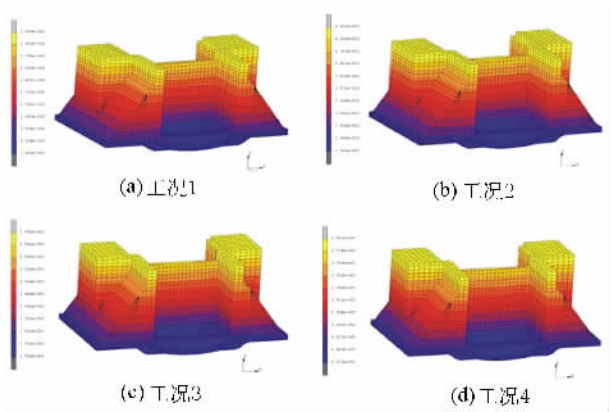


图8 下闸首各工况顺水流位移分布

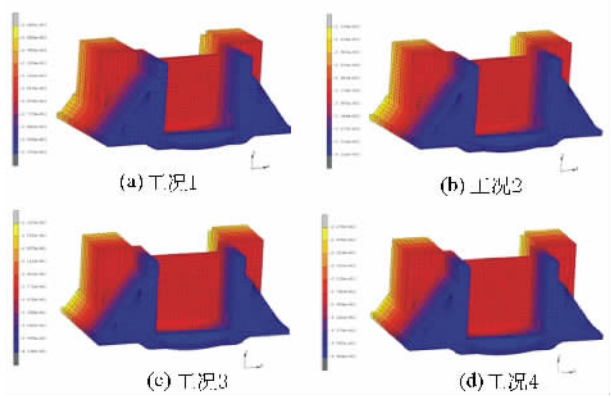


图9 下闸首各工况竖直位移分布

由图 8 和图 9 可以看出 :下闸首结构在 4 种工况作用下 ,沿垂直水流方向闸墩从外侧向内侧发生位移 ,最大位移发生在闸顶下游端 , $U_{z\max} = 0.19\text{ cm}$,沿铅直方向整个上闸首结构发生向下的位移 ,最大值发生在整个下游端 , $U_{y\max} = 5.29\text{ cm}$ 。

2.4 结果分析

根据以上计算结果汇总如表 1 和表 2 所示。

表 1 上下闸首、闸室水平位移值

部 位		水平位移值/cm		相邻构件 差值/cm
		最大值	平均值	
工况 1	上闸首闸墩	0.15	0.08	
	闸室墙	0.27	0.15	0.07
	下闸首闸墩	0.19	0.10	0.05
工况 2	上闸首闸墩	0.10	0.05	
	闸室墙	0.06	0.02	0.03
	下闸首闸墩	0.03	0.03	0.01
工况 3	上闸首闸墩	0.17	0.10	
	闸室墙	0.06	0.02	0.08
	下闸首闸墩	0.15	0.09	0.07
工况 4	上闸首闸墩	0.18	0.11	
	闸室墙	0.27	0.17	0.06
	下闸首闸墩	0.15	0.09	0.08

表 2 上下闸首、闸室沉降值

部 位		沉降值/cm		相邻构件 差值/cm
		最大值	平均值	
工况 1	上闸首闸墩	3.92	3.55	
	闸室墙	9.70	9.60	6.05
	下闸首闸墩	5.21	4.63	4.97
工况 2	上闸首闸墩	8.50	7.40	
	闸室墙	9.72	9.60	2.20
	下闸首闸墩	4.19	3.76	5.84
工况 3	上闸首闸墩	4.73	3.54	
	闸室墙	9.70	9.60	6.06
	下闸首闸墩	5.29	4.61	4.99
工况 4	上闸首闸墩	4.33	3.70	
	闸室墙	9.77	9.73	6.03
	下闸首闸墩	5.29	4.76	4.97

由表 1 可知 ,在各种工况下 ,上下闸首闸墩、闸室墙的水平位移值均较小 ,不影响构件正常工作 ;上下闸首闸墩与闸室墙间水平位移差均小于 0.1 cm ,不会引起构件之间水平向错位。

天然土质地基上的水闸地基最大沉降量不宜超过 15 cm ,最大沉降差不宜超过 5 cm^[7]。由表 2 可知 ,在各种工况下 ,上下闸首闸墩、闸室墙的沉降量均小于 15 cm ,所以上下闸首闸墩、闸室墙的沉降均满足规范要求 ;上闸首与闸室墙之间沉降量相差较大 ,在正常通航情况下沉降差均大于 5cm ,不满足规

范要求 ;下闸首与闸室墙之间沉降量差值在正常通航情况均小于 5 cm ,满足规范要求。

现场检测资料表明上闸首闸墩与闸室墙接缝错位较为严重 ,最大高差 5.8 cm ,实测值与计算值较为接近。

3 结 语

有限元计算法是目前解决复杂空间结构力学问题最有效的数值方法之一 ,它可以方便地处理各种复杂的几何条件、物理条件和荷载条件。对于实际工程问题 ,可以根据变形和受力特点的不同 ,采用不同类型的单元进行离散 ,以提高对工程问题的计算效率和计算精度。

沐新河北船闸上下闸首、闸室在各种工况下的水平位移都很小 ,对船闸的结构的影响不是很大 ,结构均能正常工作 ;上闸首闸墩与闸室墙之间的的沉降相差较大 ,造成了两构件之间接缝错位严重 ,计算值与实测值均较为接近 ,说明模型较为合理。

参考文献 :

[1] 许荣昌 ,孙会朝 .有限元仿真技术的发展及应用[J]. 莱钢科技 ,2008 ,13(4) :13-16.
[2] 张宝生 .高度非线性有限元分析软件 Marc 及在接触分析中的应用[J].应用科技 ,2001 ,28(12) :36-39.
[3] 傅永华 .有限元分析基础[M]. 武昌 :武汉大学出版社 ,2003 :4-6.
[4] DL5077—1997 水工建筑物荷载设计规范[S].
[5] SABNIS G M. Structural modeling and experimental techniques [M].[S.1.] Prentice-Hall ,2003 :11-12.
[6] 李君 ,郑彬 ,姜一青 .基于 MARC 的水槽地基有限元静动力分析[J].水利与建筑工程学报 ,2008 ,4(2) :100-102.
[7] SL265—2001 水闸设计规范[S].

(收稿日期 2011-06-28 编辑 熊水斌)

