

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.03.011

涌潮荷载作用下大型桁架式平面闸门动力响应仿真分析

严根华,陈发展

(南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要 通过三维有限元数值模型进行涌潮荷载作用下大型桁架式平面闸门动力响应仿真分析,研究大型桁架式平面闸门的结构动力特性,得出流固耦合条件下闸门结构的振动频率变化特征。在此基础上,通过涌潮荷载作用模拟对结构的动力响应进行仿真计算,得出闸门动位移和动应力值。采用水弹性振动模型对闸门结构的涌潮动力响应进行试验验证。验证结果表明,仿真计算结果与试验结果基本一致,仿真计算结果合理。最后,针对局部应力集中现象对闸门结构进行修改优化,并提出抗振优化方案。

关键词 桁架式平面闸门 流固耦合动力特性 动力响应 仿真计算 试验验证 曹娥江大闸

中图分类号 :TV663 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)03-0042-05

Simulation of dynamic responses of large truss-plane gates under tidal surge loads//YAN Gen-hua, CHEN Fa-zhan (Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract :The dynamic responses of large truss-plane gates under tidal surge loads were simulated by means of three-dimensional finite element numerical models. The structural dynamic characteristics of the large truss-plane gates were studied. The variation characteristics of the vibration frequency of the gates under fluid-solid coupling conditions were obtained. On such a basis, the structural dynamic responses were calculated through the simulation of tidal surge loads, and the dynamic displacement and stress of the gates were obtained. The dynamic responses of the gates under tidal surge loads were verified by means of hydro-elastic vibration models. The test results show that the numerical simulations agree with the experimental results, indicating the numerical simulations are rational. Finally, for the local stress concentration phenomenon, the gate structure was modified and relevant optimization scheme was proposed.

Key words :truss-plane gate ;fluid-solid coupling dynamic characteristic ;dynamic response ;simulation calculation ;experimental verification ;Caoe River Sluce

曹娥江大闸枢纽工程位于钱塘江下游右岸主要支流曹娥江河口,枢纽主要由挡潮泄洪闸、堵坝、导流堤、连接坝段以及管理区等组成,具有防洪(潮)、治涝、水资源开发利用、航运、改善水环境条件等多目标综合效益。曹娥江校核洪水位为 6.52 m,设计洪水位为 6.22 m,正常蓄水位为 3.90 m,最低水位为 3.00 m。挡潮泄洪闸闸孔总净宽为 560 m,设计流量约为 11 340 m³/s,共设 28 个孔,单孔宽度为 20 m,底板高程为 -0.50 m(黄海基面)。挡潮泄洪闸工作闸门采用潜孔式平面滑动闸门,胸墙底高程为 4.00 m,孔口尺寸为 20.0 m×4.5 m(宽×高)。闸门跨度大,宽高比达 4.4,闸门梁系采用空间桁架体系,结构布置见图 1~2。

按照该枢纽的基本运行要求,挡潮泄洪闸需满足双向挡水要求,对闸门的运行安全性提出了更高

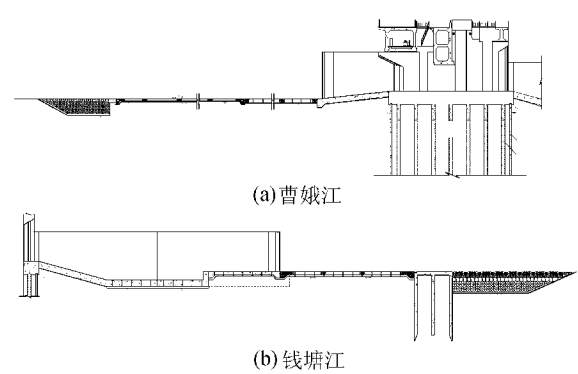


图 1 水闸结构布置

的要求。该水闸结构具有如下特点:①工作闸门采用平面桁架结构,宽高比悬殊,其体形系国内外先例;②闸门需局部开启运行;③闸门的许多运行工况为淹没出流;④工作闸门受钱塘江涌潮冲击,闸门将承受很大的涌潮荷载,其动荷载作用是造成闸门强

作者简介 严根华(1956—),男,上海人,教授级高级工程师,从事水工水力学及结构流激振动研究。E-mail :ghyan@nhri.cn

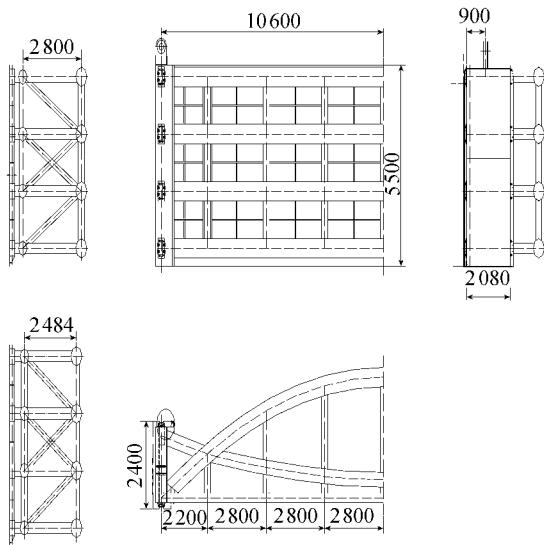


图2 闸门结构布置(单位: mm)

烈振动的振源之一。这种强涌潮对工作闸门产生很大的冲击荷载,是造成闸门强烈振动的又一控制性振源。一旦水动力荷载的作用力特性和闸门结构的固有特征产生不利组合作用,就会造成闸门的危害性破坏。迄今为止,对这种涌潮作用下的结构动力问题研究很少,对涌潮水动力作用机理没有进行过专门研究,更没有结构动力响应及优化设计方面的研究报道。

曹娥江大坝是我国目前规模最大的挡潮闸,结构面临复杂的水动力荷载作用,动力安全问题十分严峻。因此对挡潮泄洪闸涌潮冲击荷载和流激振动特征需要进行深入研究,揭示存在问题,提出抗振安全措施,从而确保挡潮泄洪闸的安全乃至整个大坝的运行安全。笔者通过三维有限元数学模型对闸门结构的动力响应进行仿真分析,并与试验结果进行比较,验证仿真分析结果的合理性和可靠性,为闸门结构安全设计提供依据。

1 闸门结构有限元模型

曹娥江大坝闸门结构的数学模型采用三维有限元法建立,分析软件采用 ANSYS10.0。按质量、刚度变化将闸门结构离散为具有 1 900 个管单元、3 436 个板单元、21 285 个实体单元,合计 41 764 个节点,约有 20 万个自由度的空间结构体系。计算中采用 PIPE20 管单元、SHELL63 板壳单元和 SOLID95 体单元,其中,管单元用于桁架结构,板壳单元用于面板、加强肋板和上下弦的连接处,体单元用于矩形管和方管梁结构,闸门有限元模型见图 3。板单元质量为 22.6 t,体单元质量为 32.08 t,管单元质量为 43.65 t,门体总质量为 98.3 t。

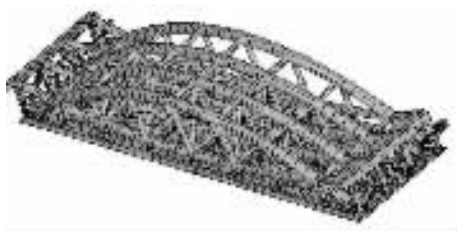


图3 闸门结构有限元模型

2 闸门结构的动力特性

闸门结构的动力特性主要包含结构固有频率、振型等参数,考虑到工程实际运行时闸门受到动水作用而振动,流场对结构固有特性将起到显著影响,因此动力分析时必须考虑水介质对结构动力特性的影响。

2.1 闸门流固耦合振动模态特性分析

在水动力荷载作用下,闸门结构的运动可用以下方程表示^[1-2]:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = P(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; δ 为结点位移向量; $\dot{\delta}$ 为节点速度向量; $\ddot{\delta}$ 为节点加速度向量; $P(t)$ 为动力荷载。

闸门振动必然引起流场压力的波动,水体压力波动又反过来影响闸门结构的振动,是典型的液体和弹性体的流固耦合振动问题。耦合系统自振控制方程可利用第 2 类 Lagrange 方程得到,以 p 表示水作用于流体作用面有关节点的动水压力向量,可得流固耦合自振特性方程:

$$M\ddot{\delta} + K\delta = -p \quad (2)$$

其中 p 满足以下无黏性不可压缩的微幅流体运动拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

经推导可得闸门流固耦合自由振动方程为

$$(M + M_p)\ddot{\delta} + K\delta = 0 \quad (4)$$

其中

$$M_p = SDT$$

式中: M_p 为附加质量阵; S 、 T 为转换矩阵; D 为方阵。

将式(4)转化为如下形式的特征值方程:

$$K\Phi_i = \lambda_i M_p \Phi_i \quad (5)$$

式中: Φ_i 为第 i 阶的振型矩阵; λ_i 为特征值。

此处 M_p 是非对称矩阵,因此不能将其转化为标准特征值问题。用于求解非对称特征值问题的方法是 Lanczos 法。

2.2 计算结果

当闸门处于无水状态,门叶两侧和启闭杆约束下的闸门振动模态分析结果表明,在该约束边界下,

闸门的1阶基频为13.6 Hz,为整体扭转振型;2阶频率为17.56 Hz,为整体弯曲振型;3阶频率为17.8 Hz。实际运行时,闸门结构将受到上下游水介质的影响,结构的固有振动特性出现一定程度的变化,尤其是结构的固有频率会有较大下降。计算时流场范围取10倍闸门高,图4为闸门开启状态下考虑水体影响的第1~6阶模态振型示意图。计算结果表明,考虑流固耦合作用时,闸门结构的1阶固有频率为6.6 Hz,为面板1阶弯曲振型;2阶振型为面板2阶弯曲,相应频率为7.7 Hz;3阶固有频率为10.4 Hz,为面板与桁架空间组合变形振动。显然,闸门结构的1阶基频较不考虑水体影响时下降了51%。由此可知,流场对结构的动力特性影响非常显著,不能忽视。

3 闸门结构的静力特性

闸门结构的静力特性是安全性评价应当掌握的重要评估资料。工程结构的破坏除动力作用破坏外,静力失效也是常见现象。因此,在对水闸进行动力分析的同时,开展闸门结构的静力特性研究亦是

十分必要的。通过对闸门结构的位移和应力分布研究可为结构的体形设计提供科学依据。

闸门处于挡水工况,水位为校核洪水位时,总水压力(反力)为5 003.9 kN。此时闸门最大位移为13.579 mm,发生在面板底缘中心位置。闸门结构的最大应力出现在桁架结构 $\varnothing 530$ mm圆管末端,最大应力值达到267 MPa,图5~6给出了闸门整体位移及应力分布。挡潮工况下闸门结构的应力与位移量略小。当下游水位为8 m、上游水位为3.3 m时,闸门总水压力为4 704.6 kN。此时闸门最大位移为10.36 mm,出现在闸门中断面的底缘部位,最大应力为203 MPa,位于桁架结构 $\varnothing 530$ mm圆管末端;桁架管系弓形管外侧节点应力为59 MPa。该工程闸门采用Q345钢,容许应力为220 MPa,校核工况下闸门出现最大应力集中区,需要局部修改和优化。

4 涌潮荷载作用下闸门结构瞬态响应分析

4.1 流激振动响应仿真计算基本理论

考虑闸门结构流固耦合相互作用,水动力荷载作用下的闸门结构振动可用离散化线性微分方程表

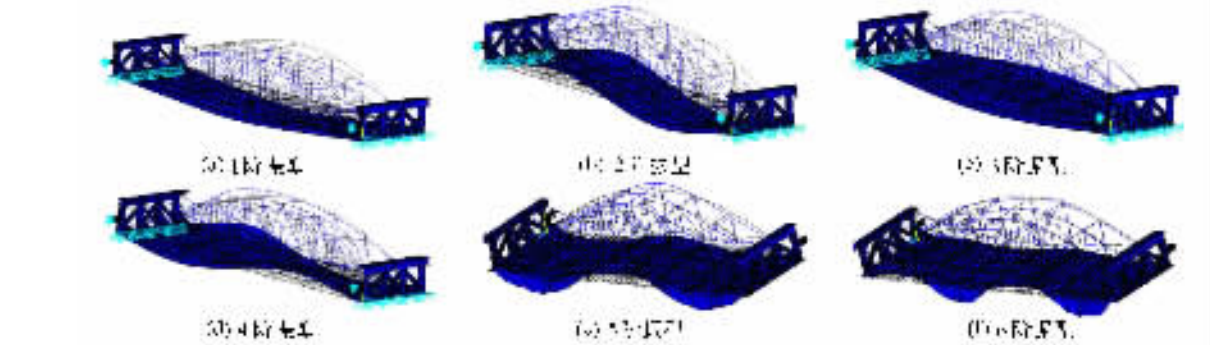


图4 流固耦合状态下闸门结构低阶模态振型

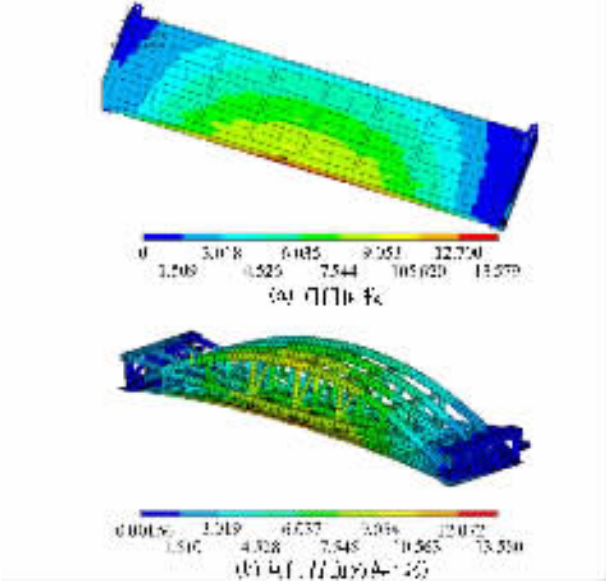


图5 校核水位闸门整体位移(单位:mm)

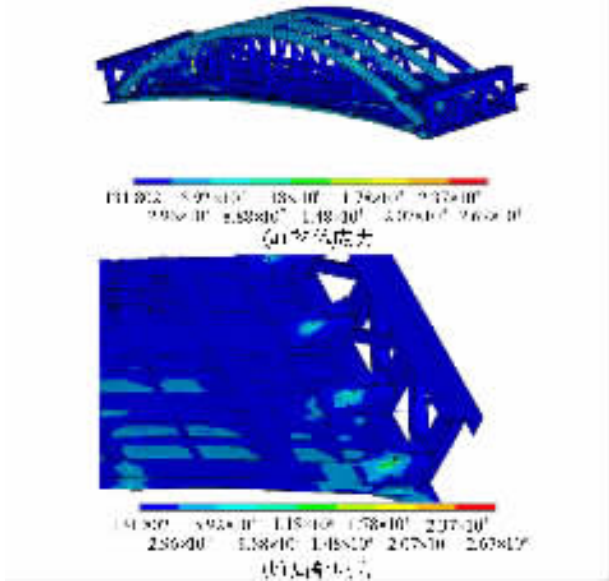


图6 校核水位闸门整体应力及局部应力(单位:Pa)

示为

$$M''\ddot{u} + C'\dot{u} + K'u = F(t) \quad (6)$$

其中

$$M' = M_S + M_P$$

$$C' = C_S + C_P$$

$$K' = K_S + K_P$$

式中： M_S, C_S 和 K_S 分别为流体耦合附加质量、附加阻尼和附加刚度矩阵； M_P, C_P 和 K_P 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵； $\ddot{u}, \dot{u}$ 和 u 分别为结构振动加速度、速度和位移列阵； $F(t)$ 为外荷载列阵。

经推导,可得任一节点 k 的位移响应历程为

$$u_k(t) = \sum_{j=1}^q \varphi_{kj} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \int_0^t h_j(t-\theta) p_i(\theta) d\theta \quad (7)$$

式中： q 为模态阶数； n 为结构自由度数； $\varphi_{kj}, \varphi_{ij}$ 为振型系数； h 为脉冲响应系数； $t-\theta$ 为时间增量； $p_i(\theta)$ 为节点 i 所受的力。

k 点的位移自相关函数 R_{u_k} 可表示为

$$R_{u_k} = E[u_k(t) u_k(t+\tau)] = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^q \sum_{m=1}^n \varphi_{kj} \varphi_{ij} \varphi_{kl} \varphi_{ml} \cdot \int_0^t R_p(t-\theta_1-\theta_2) h_i(\theta) h_l(\theta) d\theta \quad (8)$$

式中： E 为方差； $u_k(t)$ 和 $u_k(t+\tau)$ 分别为 t 时刻和 $t+\tau$ 时刻节点 k 的位移； R_p 为作用力自相关函数。

对式(8)进行 Fourier 变换,可得节点 k 的位移谱密度为

$$S_{u_k}(\omega) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^q \sum_{m=1}^n \varphi_{kj} \varphi_{ij} \varphi_{kl} \varphi_{ml} S_{P_{im}}(\omega) \cdot H_j(\omega) H_l^*(\omega) \quad (9)$$

其中 $H_j(\omega) = \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\zeta_j\omega\omega_j) M_j}$

式中： $S_{P_{im}}(\omega)$ 为节点荷载； $H_j(\omega)$ 为 j 点的复频响应函数； $H_l^*(\omega)$ 与 $H_j(\omega)$ 共轭； ω 为频率； ζ_j 为第 j 阶模态阻尼； M_j 为第 j 阶模态质量。

位移响应均方根 u_k 为

$$u_k = \sqrt{\int S_{u_k}(\omega) d\omega} \quad (10)$$

4.2 仿真计算结果

涌潮荷载作用下闸门结构的瞬态响应分析主要考查在钱塘江涌潮作用下闸门结构的动应力和动位移变化情况,评价闸门结构的动力安全状况。根据历史涌潮过程确定最大涌潮压强为 90 kPa。

按闸门关闭状态考虑,鉴于涌潮作用力具有典型冲击特征,因此将涌潮作用力用脉冲荷载进行模拟,幅值为 90 kPa,作用力范围覆盖闸门整个面板。图 7 给出了闸门结构在关闭状态受到冲击荷载作用

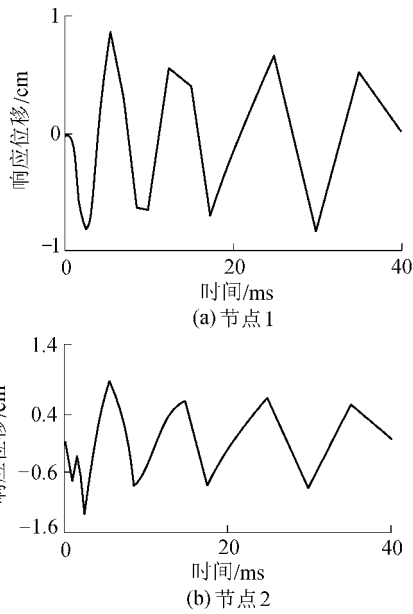


图 7 闸门后桁架下部上弦管典型中间节点的位移响应过程线

下第 20 ms 时闸门后桁架下部上弦管典型中间节点的位移响应过程线。闸门结构的应力分布显示,在受到涌潮冲击 20 ms 后,闸门最大应力值位于桁架结构 $\varnothing 530$ mm 圆管末端,最大应力值为 620 MPa,桁架管系弓形管外侧节点应力为 160 MPa。图 8 给出了冲击荷载作用下第 25 ms 时的闸门整体应力(迎水面)分布云图。闸门最大位移为 20.37 mm,位于闸门中断面处。当闸门受到涌潮冲击 52 ms 时,闸门最大应力为 455 MPa,仍然位于桁架结构 $\varnothing 530$ mm 圆管末端,桁架管系弓形管外侧节点应力为 194 MPa；闸门最大位移为 22.4 mm。图 9 为闸门在冲击荷载作用下第 50 ms 的整体位移(迎水面)。闸门结构的应力分布显示,在目前的模拟涌潮冲击荷载作用下,在受涌潮冲击 52 ms 时,桁架结构 $\varnothing 530$ mm 圆管末端的最大应力小于冲击时间为 20 ms 时的应力,但桁架

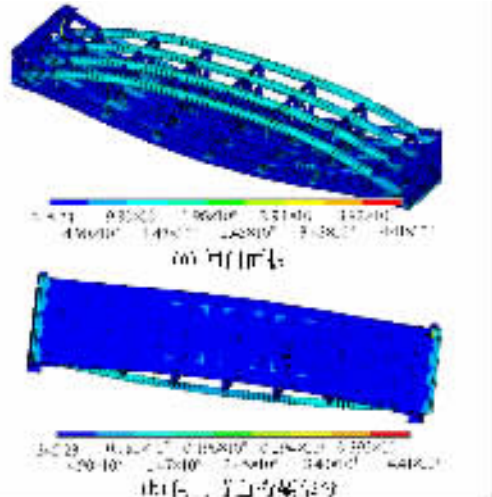


图 8 闸门结构在冲击荷载作用下第 25 ms 时的整体应力(迎水面)(单位: Pa)

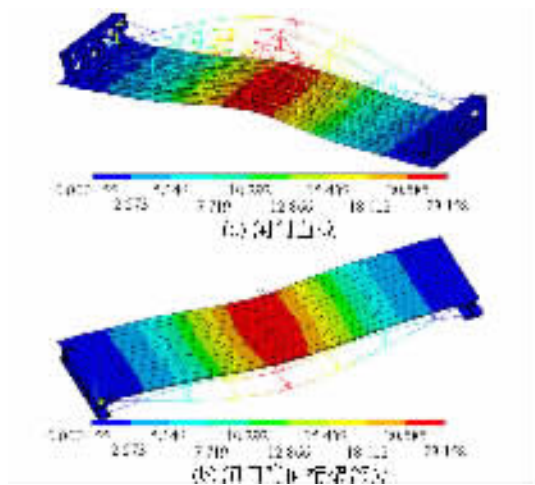


图9 闸门在冲击荷载下第 50 ms 时的
整体位移(迎水面)(单位: mm)

管系弓形管外侧节点应力大于冲击时间为 20 ms 时的应力。说明结构部位不同,出现最大位移和应力的时间也有相应变化。动力响应数据显示,在设计冲击荷载作用下,门体的应力分布出现应力集中现象,并远超过闸门的容许应力,需要采取适当措施。应当指出,因仿真计算采用线性模型,导致计算值超过 600 MPa,此时闸门结构已进入非线性区,并超过材料的屈服应力点。

4.3 闸门动力响应模型试验验证

结构动力响应计算获得了涌潮荷载作用下的结构应力和位移响应数据,以及结构动力安全评价资料。为验证计算结果的正确性,采用水弹性模型进行试验验证。水弹性振动模型严格按照水弹性相似原理要求采用特种材料制作,其中质量密度 ρ_r 和材料弹性模量 E_r 分别满足

$$\rho_r = 1 \quad E_r = L_r$$

式中: L_r 为模型几何比尺。

闸门水弹性振动试验结果表明,工作闸门在涌潮荷载冲击下出现瞬间最大冲击振动位移,随后出现低频振荡衰减^[3]。从振动位移量看,门体跨中的动力响应比两侧的大。例如,在涌潮高度为 3.6 m、潮头流速为 4.95 m/s 的涌潮冲击下,门体跨中部顺水流向测点的最大振动位移为 21.33 mm,横河向最大振动位移为 3.23 mm。门体跨中下部顺水流向测点的最大振动位移为 26.96 mm,垂向最大振动位移为 4.58 mm。在闸门 1/4 宽度处的下部 1 号测点处,顺水流向测点的最大振动位移为 17.86 mm,横河向测点的最大振动位移为 7.27 mm。

当涌潮高度为 5.0 m 时,门体顺水流向最大振动位移为 23.24 mm,横河向最大振动位移为 7.98 mm,垂向最大振动位移为 5.39 mm。其他水位、涌潮高度、潮速组合条件下的闸门振动位移响应值

一般在 22 ~ 26 mm 之间。通过与试验数据的对比分析可知,有限元计算得到的涌潮冲击位移量与模型试验值基本一致,说明计算结果是合理的。

5 闸门结构的优化修改

由前述计算成果可知,在正常挡水或挡潮工况下,最大位移量为 13.58 mm,出现在闸门中断面的底缘部位;闸门结构的最大应力出现在桁架结构 $\varnothing 530$ mm 圆管末端,为 267 MPa。从刚度角度看,闸门的位移量满足规范要求^[4]。

涌潮荷载作用下闸门结构瞬态响应分析结果表明,在设计给定的荷载作用下,闸门结构在受到涌潮冲击初期,闸门出现最大冲击应力为 620 MPa,位于桁架结构 $\varnothing 530$ mm 圆管末端,桁架管系弓形管外侧节点应力为 160 MPa,闸门最大位移为 20.37 mm,位于闸门中断面处。随后出现衰减振荡,桁架结构圆管末端应力下降为 455 MPa,弓形管外侧节点应力为 194 MPa,闸门最大位移值为 22.4 mm。结构的应力分布显示,在设计冲击荷载作用下,闸门应力分布出现严重的应力集中现象,需要采取适当措施。

根据原方案闸门结构受力情况分析,闸门结构的应力控制工况是涌潮作用工况,因此对涌潮冲击荷载作用下的结构做如下修改:把桁架 $\varnothing 530$ mm 圆管末端连接板的厚度由 25 mm 加大为 40 mm,加大弓形圆管末端连接板的厚度,其中底肋板、立肋板、斜肋板及其余支撑肋板的厚度由 25 mm 分别改为 40 mm、50 mm 及 60 mm;所有矩形管 xb1 和方管 xb2 的连接处增加加强斜肋板,其尺寸为 200 mm $\times$ 111.8 mm $\times$ 25 mm。

通过上述修改,闸门结构在涌潮作用下(最大瞬态冲击压强为 0.09 MPa)的瞬态响应约束反力为 9 793.5 kN。闸门结构的最大位移为 24.0 mm,最大涌潮冲击应力为 156 MPa。显然闸门结构修改后的应力已经下降至容许应力范围,取得了满意的抗振效果。

6 结 语

对相位差不很突出的冲击荷载作用而言,通过构建数学模型,可以进行结构动力响应参数的预测和分析。本文研究获得以下几点结论:

a. 对该工程闸门而言,流场对闸门固有特性产生显著影响,最大频率下降率达 51%,动力响应计算时必须加以考虑。

b. 对于桁架式结构来说,涌潮冲击荷载作用下力的传递由闸门中部的桁架杆系向二侧拱脚传递,应力集中点出现在弓形圆管末端,(下转第 57 页)

[2] SCHLEISS A J. Design of pervious pressure tunnels [J]. Water Power and Dam Construction, 1986, 38(5) 21-26.

[3] SCHLEISS A. Design criteria for pervious and unlined pressure tunnels[R]. Oslo :Underground Hydropower Plants, 1987 22-25.

[4] 曹克明, 刘世明. 高内水压力作用下隧洞钢筋混凝土衬砌设计理论的探讨[J]. 华东水电技术, 1991(3) 1-13.

[5] 彭守拙. 水电站设计的新进展[M]. 北京 中国水利水电出版社, 2007 259-284.

[6] SCHLEISS A J. Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts[J]. Hydropower and Dams, 1997, 4

(3) 88-94.

[7] 彭守拙. 压力隧洞透水衬砌裂缝宽度计算的探讨[J]. 水利水电科技进步, 2009, 29(3) 46-48.

[8] 刘秀珍. 关于圆形有压水工隧洞衬砌裂缝计算的探讨[J]. 水力发电学报, 1983(3) 91-101.

[9] 张有天, 张武功, 王镭. 再论隧洞水荷载的静力计算[J]. 水利学报, 1985(3) 22-31.

[10] 潘家铮. 水工隧洞和调压室(水工隧洞部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

(收稿日期 2009-07-29 编辑 骆超)

(上接第 46 页)

应力量级远超过材料的屈服极限, 需要对结构进行局部修改优化。

c. 涌潮冲击响应模型试验取得了闸门关键部位的位移和应力分布数据, 其结果与仿真计算值基本一致, 验证了仿真计算结果的合理性。

d. 优化修改后的闸门结构动力响应仿真计算结果显示, 在相同涌潮荷载作用下, 推荐方案最大应力集中区消失, 最大应力由 620 MPa 下降为 150 MPa, 取得了满意的抗振效果。

(上接第 49 页)

参考文献:

[1] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京 科学出版社, 1987.

[2] 陈树容. 布置于凸岸的江边村拦河闸电站引水防沙试验研究[J]. 人民珠江, 2005(4) 29-30.

[3] 张海光. 多孔拦河闸坝泄洪方案水力特性研究[J]. 水利科技, 2007(3) 37-39.

[4] 徐国宾. 弯道式引水枢纽中弯道的优化设计[J]. 泥沙研究, 1992(3) 65-69.

[5] 马有国, 周素真. 弯道环流在取水防沙中的作用[J]. 农田水利与水电, 1993(2) 34-38.

参考文献:

[1] 古华, 严根华. 水工闸门流固耦合自振特性数值分析[J]. 振动测试与诊断, 2008, 9(3) 242-246.

[2] YAN Gen-hua. Study of design techniques for dynamic safety of radial gates in hydraulic engineering [C]//Structure Engineering World Wide. San Francis Elsevier Science Ltd., 1998.

[3] 严根华, 陈发展. 曹娥江大闸枢纽工程闸门流激振动试验研究[R]. 南京 南京水利科学研究院, 2006.

[4] DL/L5039—95 水利水电工程钢闸门设计规范[S].

(收稿日期 2009-07-13 编辑 骆超)

[6] 郭维东, 周阳, 张云清, 等. 丁坝对弯道水流影响的分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4) 666-668.

[7] 周阳. 丁坝对弯道水流流态影响的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.

[8] FAZLI M, GHODSIAN M, NEYSHABOURI S A S. Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(1) 56-68.

[9] JIA Ya-fei, STEVE S, XU Yi-chun, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of flows around a submerged weir in channel bendway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2005, 131(8) 682-693.

[10] 徐桂英. 闸前弯道水流特性的试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3) 338-341.

(收稿日期 2009-03-01 编辑 高建群)

· 简讯 ·

全国第八届水文泥沙学术讨论会将在长沙召开

由中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会主办、中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院承办的全国第八届水文泥沙学术讨论会将于 2010 年 10 月中旬在湖南省长沙市召开。会议主要议题包括: ①水文、泥沙学术交流、工程技术经验总结; ②水文泥沙数学模型的研制与应用; ③水文、泥沙与环境影响; ④工程设计、运行中有关水文泥沙方面需帮助咨询的技术问题。 <http://www.hydropower.org.cn/info/shownews.asp?newsid=1829>。

(本刊编辑部供稿)