

考虑流固耦合效应的弧形钢闸门地震动力响应研究

刘丰¹, 王正中¹, 厉宽中², 徐超¹, 仵凡³, 张欢龙¹, 张学东¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 在地震高发的中国西南地区,地震激励对弧形钢闸门的安全持续稳定运行影响较大,有必要对弧形闸门在地震作用下的动力响应及安全性进行研究。以某工程表孔弧形钢闸门为例,通过建立考虑水体和结构耦合作用的三维数值模型,研究了弧形钢闸门地震动力响应,然后利用重力坝-库水流固耦合模型验证了计算方法的准确性和有效性,最后对弧形钢闸门进行动力时程响应分析,计算了弧门地震动水压力,并与规范方法进行对比。结果表明:本文提出的考虑流固耦合效应的动力响应分析方法适用于闸门地震动力响应计算;流固耦合效应对弧形钢闸门地震动力响应影响较大,考虑流固耦合效应的闸门动力响应计算结果比规范明显增大,两者最大比值达到2倍以上。闸门结构动位移响应峰值在闸门面板顶部中心,动应力响应峰值发生在下主横梁跨中;流固耦合的动力计算表明该闸门结构刚度满足规范要求,强度不能满足,上、下主横梁处为结构动力响应薄弱环节;对高水头采用规范法计算的地震动水压力偏大,对低水头动水压力计算结果偏小。考虑流固耦合的闸门结构动力响应分析研究能反映其真实力学特征,对于地震高发区弧形钢闸门的结构设计和安全评价具有参考意义。

关键词: 弧形钢闸门; 地震; 动水压力; 流固耦合; 地震动力响应

中图分类号:TV34

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)03-0158-09

Seismic dynamic responses of spillway radial steel gates considering fluid-solid coupling effects

LIU Feng¹, WANG Zhengzhong¹, LI Kuanzhong², XU Chao¹, WU Fan³,
ZHANG Huanlong¹, ZHANG Xuedong¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In the southwest area of China where earthquakes are frequent, the seismic excitation has a great impact on the safe, continuous and stable operation of radial steel gates. It is necessary to study the dynamic response of radial steel gates to the earthquakes and the effect of earthquakes on the safety of the gates. Here, a three-dimensional numerical model considering the coupling effect of water body and structure was constructed, and the seismic dynamic response of the gate was studied. According to the calculation results of the gravity dam-reservoir fluid-solid coupling model, this method was proved to be accurate and effective. Furthermore, the dynamic time history response of the gate was analyzed, and the hydrodynamic pressure of the gate was calculated and then compared with the standard method in the specification. The results show that the dynamic response analysis method proposed in this paper is suitable for the calculation of the seismic dynamic response of radial steel gates, the fluid-solid coupling effect has a great influence on the seismic response of radial steel gates. Considering the fluid-structure coupling effect, the calculation result of the dynamic response of the gate is significantly larger than that of the standard method in the specification, and the maximum value of the ratio is more than two times

收稿日期:2021-05-13; 修回日期:2021-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51179164); 国家自然科学基金青年基金项目(51505388); 国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02)。

作者简介:刘丰(1994-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为水工金属结构。

通讯作者:王正中(1963-),男,陕西彬县人,博士,教授,博士生导师,主要从事工程力学及水工程安全理论与技术研究。

larger. The dynamic displacement response peak of the gate structure is at the center of the gate top panel, and the dynamic stress response peak occurs in the middle of the lower main beam. The dynamic calculation of fluid – solid coupling shows that the rigidity of the gate structure meets the specification requirements, but the strength does not. The structural dynamic response of the upper and lower main beams are weak, the seismic water pressure calculated by the standard high-head method is rather large, whereas the calculation result of the low-head hydrodynamic pressure of the surface hole is too small. The dynamic response analysis of the gate structure considering the fluid – solid coupling can reflect the true mechanical characteristics of the gate, and has guiding value for the structural design and safety evaluation of radial gates in the earthquake-prone areas.

Key words: radial gate; earthquake; hydrodynamic pressure; fluid – solid coupling; seismic dynamic response

1 研究背景

近年来我国兴建了一大批高坝水库,金属结构制造水平逐步提升,弧形钢闸门朝着高水头、大孔口的方向发展,但作为水工枢纽的调节咽喉,考虑动力响应分析的结构设计理论方法仍亟待完善^[1]。西南地区属于地震高发带,在汶川地震中,许多闸门结构系统遭到严重破坏^[2]。闸门结构破坏和变形不仅影响闸门正常使用功能,严重时还会导致大坝丧失调蓄水流功能,进而引发溃坝等次生灾害发生,为此,亟需对弧形钢闸门在地震作用下的动力响应规律进行研究分析,建立弧形钢闸门在地震作用下的安全评价准则。

弧形钢闸门动力响应分析一般可采取实地原型监测、等效模型试验、仿真数值模拟等方法。原型监测需要实地考察研究,无法对闸门结构在地震等灾害下的安全性进行预测;模型试验方面,其制作结构复杂、难度高、代价大,周期长且尺寸效应明显,难以满足结构分析要求;有限单元法等数值模拟方法具有可操作性强、便捷的优点,然而精确化精细化数值模拟、大量的计算设备资源及时间成本是该方法面临的主要问题^[3-4]。随着计算机在数值计算速率瓶颈上的突破,数值模拟方法将成为工程应用中的主要设计分析方法。当前已有不少学者采用数值方法对该问题进行了研究,其中,孔剑等^[5]和李坤等^[6]基于 ANSYS 软件采用了振型分解反应谱法对闸门结构抗震效应及自振特性开展了研究,研究结果表明该方法能够反映闸门在地震荷载作用下的真实受力状态,该闸门结构满足抗震要求。吴一红等^[7]以伽辽金方法导出流体与结构的系统有限元方程,对一弧形闸门动力特性展开分析讨论。Brusewicz 等^[8]和李桑军等^[9]对弧形钢闸门进行干湿模态分析,认为在对闸门动力特性分析时有必要考虑流体

影响,动力特性分析对闸门安全评价有重要意义^[11-12]。Faridmehr 等^[10]在 ABAQUS/Explicit 中建立三维弧形闸门模型,考虑流固耦合作用对结构动力响应展开分析,发现与静力分析结果差距很大,闸门结构分析时流固耦合作用不可忽视,利用流固耦合数值方法对闸门结构动力响应进行研究有重要意义。Fenves 等^[13]和 Gogoi 等^[14]建立坝 – 水体耦合体系,对耦合体系材料特性展开参数分析,结果表明材料属性和水体可压缩性对耦合系统有重要影响。Buldgen 等^[15]结合数值模拟与模型试验对经典 Westergaard 地震动水压力求解公式展开研究,结果表明由于该公式假定结构完全刚性而忽略与流体域之间的耦合作用^[16],附加质量法求解结果比考虑流固耦合数值解更为保守。针对弧形闸门在地震动荷载作用下造成的结构破坏,现有理论分析方法难以反映真实振动耦合工况^[17-18]。当前,闸门结构设计还没有统一的设计标准^[19],需要借助各种科学技术手段对其展开研究。上述研究多关注于闸门结构计算,然而,对闸门在地震过程中与流体作用下动应力、位移等参数的分析均未涉及,均侧重于结构静态响应分析,但是地震荷载激励下作用在闸门迎水面的水体参与闸门运动的耦合过程不可忽略^[20-21],闸门结构的振动运动反作用于水体,使其流场发生改变,流场改变后的水体又影响闸门结构的阻尼力、弹性力、惯性力等动力特性,从而影响闸门结构的动力响应特性,但现有研究中缺少考虑地震激励引发水荷载作用下流体与固体闸门结构间闸门动力响应的分析^[22-23]。

为此,本文建立了闸门 – 水体三维耦合数值模型,在地震动荷载激励下考虑流固耦合效应,对地震动荷载修正,选用具有代表性的重力坝 – 库水模型验证了本文计算方法的有效性和准确性,从动力方面入手,对弧形钢闸门在地震激励下位移和应力的动

力响应以及时空分布特征进行分析研究,对弧门地震水压力计算分析,并与规范设计结果进行对比,以期对地震激励下弧形闸门结构设计提供指导。

2 资料与研究方法

2.1 弧形闸门概况

选用某工程表孔弧形钢闸门进行考虑流固耦合效应的地震动力响应分析,该闸门半径为 21 m,支铰距闸门底垂直距离为 8.97 m,面板宽为 12 m。弧形闸门是由门叶和支臂组成的空间薄壁结构体系,采用有限元分析软件 ANSYS 建立弧形钢闸门三维有限元模型,对弧形钢闸门在设计水位下的地震响应进行分析。门叶结构采用能反映空间应力的壳单元 shell93,材料为 Q345B;支臂截面为箱型截面,采用壳单元 shell181,钢材型号为 Q235B,有限元网格划分单元总数 14 922 个。图 1 为闸门有限元模型图,图中沿水流方向为 X 轴,闸门中轴线为 Y 轴,垂直水流方向为 Z 轴(主横梁轴向),其正方向按右手坐标系确定。在支铰处只释放 Z 方向的转动约束,面板底缘与门槽接触处施加 Y 方向位移约束,施加 Z 向的位移约束于面板两侧,设计工况运行水位为 16.6 m。

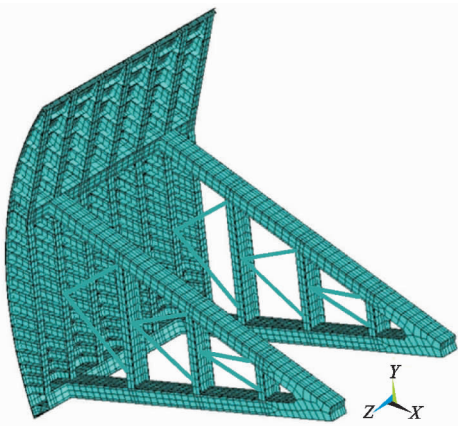


图 1 弧形钢闸门有限元模型

2.2 研究方法

闸门在运行过程中受到过闸水流动荷载,需要考虑水体域的可压缩性对流场的影响以及对闸门动力响应的影响,虽然针对实际求解时讨论的三元流动问题,为了简化求解,对流体假设为不可压缩的理想流体,但仍然在大多数的情况下不能得到解析解,只能采用数值求解的方法。闸门流固耦合的数值计算通过流体域控制方程提供压力,固体结构依据压力计算得到变形位移,流固耦合方程在二者之间完

成计算数值交换^[24]。

2.2.1 流固耦合有限元控制方程 在流固耦合有限元分析方法中,对流体控制方程假设流体为均匀、无粘性且无旋的理想流体,同时还仅限于对线性小变形的情况^[25-27],其流体有限元采用压力表达的控制方程为式(1):

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \ddot{u} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \ddot{v} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \ddot{w} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u, v, w 为各自方向的位移, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为动压力, kPa 。虽然可以列出物理控制表达方程,但是对于三维问题的微分方程的求解十分困难,采用 Galerkin 对整个流场域求解也是很困难,尤其是在流固耦合交界面求解,所以需要把流体域划分为流体元,然后集总整个流体域离散的运动方程,将每个流体元的求解结果 Gauss 数值积分加权集总,得到控制方程系数矩阵,进而求解得到整个流体域的运动方程(2):

$$H\mathbf{p} + A\dot{\mathbf{p}} + E\ddot{\mathbf{p}} + \rho B\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{q}_0 = 0 \quad (2)$$

式中: H, A, E, B 分别为矩阵函数系数; \mathbf{r} 为位移量, \mathbf{m} ; \mathbf{q}_0 为激励矢量, N 。同样也需要对固体结构进行有限元离散,固体结构离散后的运动方程见式(3):

$$M_s\ddot{\mathbf{r}} + C_s\dot{\mathbf{r}} + K_s\mathbf{r} + \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_o = 0 \quad (3)$$

式中: M_s, C_s, K_s 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{f}_p 为交界面处的流体作用力, N ; \mathbf{f}_o 为除 \mathbf{f}_p 外的其他外界激励矢量, N 。公式(3)代入各流体元贡献集总 \mathbf{f}_p 得到公式(4)与流体接触结构运动方程:

$$M_s\ddot{\mathbf{r}} + C_s\dot{\mathbf{r}} + K_s\mathbf{r} - B^T\mathbf{p} + \mathbf{f}_o = 0 \quad (4)$$

公式(2)与(4)即为流固耦合系统的运动控制方程。对于时域求解,上式可以归并为公式(5):

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho B & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -B^T \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{f}_o \\ -\mathbf{q}_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 考虑流固耦合效应的动力响应分析方法

流固耦合计算分析需要首先在几何模型软件中生成结构模型和流场模型,利用 ANSYS APDL 编程建立弧形闸门力学模型,在 Workbench 中快速生成外部流场,导入计算平台生成有限元模型。然后设置闸门与水体接触面为流固耦合交界面,随后输入外部激励荷载,以驱动模型耦合迭代。FLUENT 中流体

域在外部激励的作用下产生压力传递给固体, ANSYS 中固体将受到的压力以边界形变反馈给流体域, 如此往复迭代直至达到计算收敛条件为一个计算子步, 此间动网格技术对流体域网格更新修正以保证模型网格不发生畸变。经完成设定计算时长, 固体、流体计算模块输出计算结果, 流固耦合系统迭代计算流程如图 2。

3 流固耦合模型动水压力验证

3.1 地震输入动荷载修正

地震动荷载输入有加速度输入模型和位移输入模型, 其中位移输入模型更适用于动力响应空间效应明显的结构, 而弧形钢闸门正是多点支撑的空间薄壁结构, 因此, 首先需要将地震加速度时程曲线积分转换成位移曲线, 然后再加载至闸门结构。图 3 为地震加速度历时曲线, 地震响应分析场地为 II 类场地, 地震波类型为 EI 波。地震波作用时间子步长 0.02 s, 作用时间总共 10 s, 设计最大地震加速度为 0.2 g, 对应抗震设防烈度为 8 度, 地震作用荷载方向为顺水流方向。地震波在实际采集中, 受到各种人为误差的影响会造成通过加速度积分得到的位移

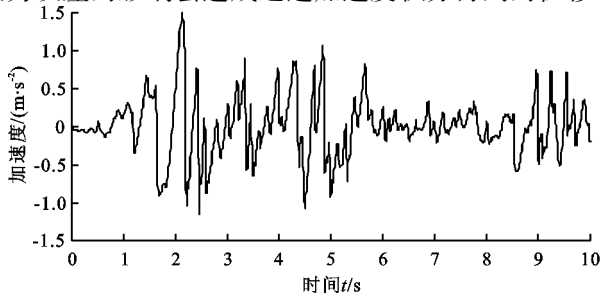


图 3 地震波加速度时程曲线

曲线出现漂移的现象, 所以其位移时程曲线需要先经过基线法校正^[28]。图 4 为经校正后的地震波位移时程曲线, 由图 4 可知, 整个历时中位移数值围绕在基准值 0 上下波动, 没有漂移现象出现。

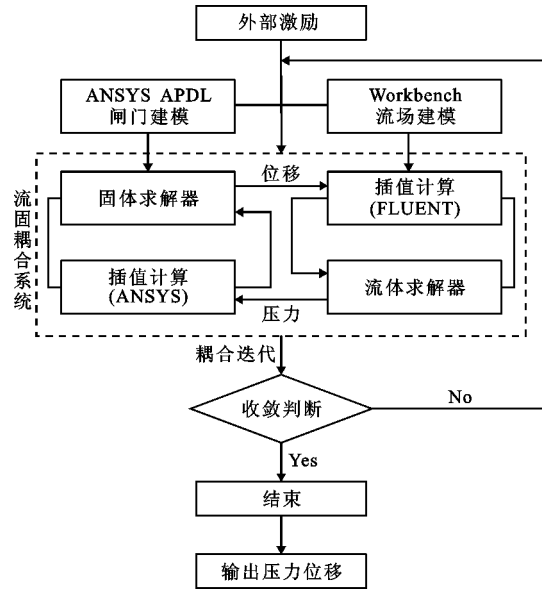


图 2 弧形钢闸门流固耦合系统迭代计算流程

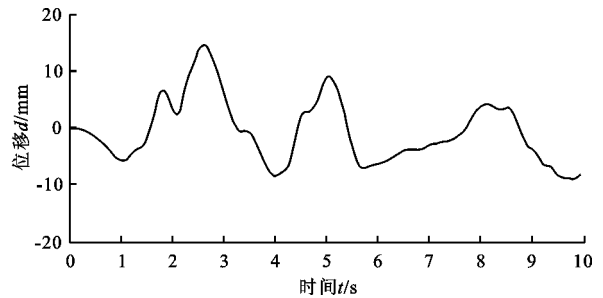


图 4 地震波位移时程修正曲线

3.2 地震动水压力验证

有限单元法较之有限体积法在数值模拟计算中得益于连续性和小变形使其计算精度更高, 计算结果也更为可信, 流固耦合计算涉及流体计算和固体结构计算, 且固体结构计算结果受到流域计算结果的影响, 两个计算域之间相较于常规分析有数据之间的传递, 数据的多次传递误差也会加大, 因此有必要对流体计算结果验证以保证闸门计算结果的准确性。本文选用经典的重力坝模型用以验证数值模拟水动力结果, 数值计算模型以文献[29]中的重力坝-库水地震试验为参照, 图 5 为对应的数值模型, 图中水体高度 $H = 95$ m, 长度 $L = 300$ m, 流体域上表面为开放边界, 不可压缩, 坝体与水体接触边界设置为流固耦合边界, 流体域其余壁面为固壁边界。

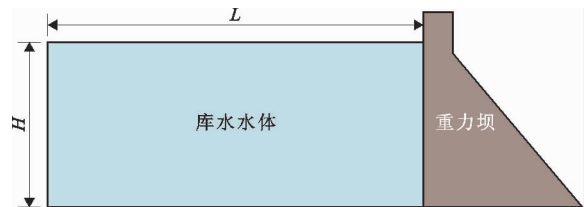


图 5 重力坝-库水数值模型

在 Workbench 设置流固耦合数值分析模块, 通过对水体-重力坝双向流固耦合迭代耦合求解, 得到地震动水压力沿坝高分布结果。文中设置 11 个控制点于坝体, 在深水处加密。图 6 为流固耦合数值解与文献[29]结果以及规范^[19]结果的对比, 流固耦合数值解与实验结果基本吻合, 其平均误差不超过 3%, 说明本文数值模型有较高的精度和准确度, 能用于后续相关分析研究。

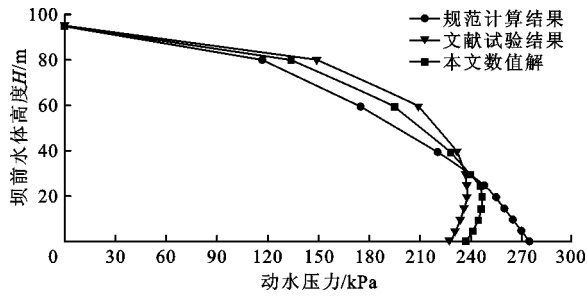


图6 重力坝动水压力分布图

4 弧形钢闸门地震响应分析

4.1 弧形钢闸门流固耦合模型

闸门-水体系统地震动力响应分析与场地地震分析的本质类似,就是考虑流固耦合效应的外源系统波动效应^[30],因此在选取计算域时需要截取有效计算区域。图7为闸门-水体耦合模型,计算模型按设计工况分析计算,图中 H 为设计水位高程16.6 m,计算水体长度 L 选取大于3倍水体的高度,为60 m,设置水体-结构接触面为流固耦合面,水体顶部为开放区域,其余壁面均为固壁边界。为查看闸门不同位置的动参数响应情况,选取9个闸门关键构件予以监测,分别为闸门顶部面板M1、面板中下部M5,上主横梁翼缘M4、下主横梁翼缘M6、上主横梁腹板M7、纵梁腹板M8、下主横梁腹板M9以及上支臂M2和下支臂M3。

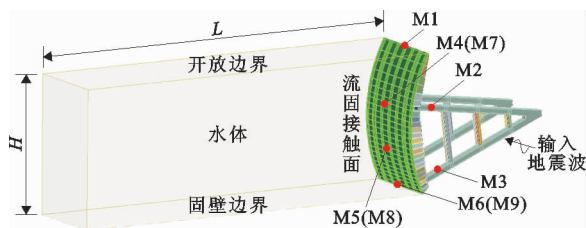


图7 闸门-水体耦合模型

4.2 动位移响应

图8显示了最终时刻闸门考虑流固耦合效应的地震动位移响应云图。图8显示,弧形闸门门叶位移主要发生在下半部,位移最大值集中于门叶中下部,受到约束的支铰端位移最小。结构位移最大值为17.32 mm,规范^[19]设计允许值为 $1/600 = 19685/600 = 32.81$ mm,满足刚度要求。而且,闸门结构动位移响应区域主要集中在闸门顶部以及上下主梁之间。

图9展示的是闸门在地震荷载作用下整体最大位移点位移时历曲线。由图9分析可知在地震动荷

载作用下闸门整体历时位移响应在0.16 s时达到峰值27.5 mm,随后闸门结构动位移响应振幅减小,最终达到稳定17.3 mm,与云图位移数值一致,地震动位移响应峰值与稳定值之间振动幅度数值相差37.1%。从而说明闸门动位移响应峰值与云图显示结果有差异。

图10为闸门结构板、梁、柱构件在地震动荷载作用下的位移时程曲线,纵轴为位移 d (m),横轴为时间 t (s),其中点M5、M8和点M4、M7以及点M6、M9两点之间位移基本一致,故位移曲线绘于同一张图上。图8显示位移云图中最大位移17.3 mm,位于上下主横梁之间,与总位移历时曲线峰值27.5 mm不符,由图10通过对各构件的位移分析可知,闸门在地震动荷载作用的过程中最大动位移响应发生在面板顶部M1处,数值为27.5 mm,发生的时间为0.16 s前后0.02秒的子步时间范围内,与动位移响应峰值相对应;面板顶部M1位移波动幅值为各监测构件最大,在 ± 10 mm数值范围内波动,其次为面板中部M5和纵梁腹板M8,上支臂M2和下支臂M3径向位移波动最小。由此可知位移响应云图并不能反映闸门在动力响应历时过程中的真实力学特征,结构响应极值有可能发生在响应历时的某一时刻;面板顶部M1出现结构动位移响应峰值,说明面板顶部区域为动力响应薄弱环节。

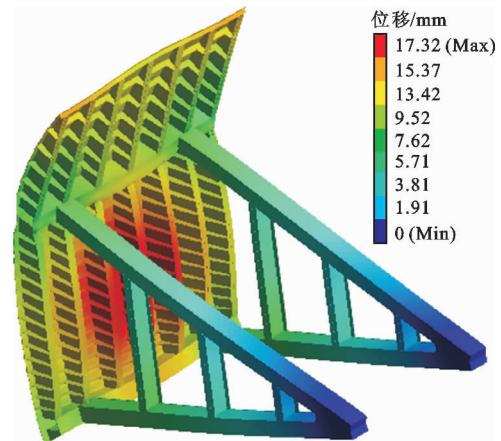


图8 闸门整体位移云图

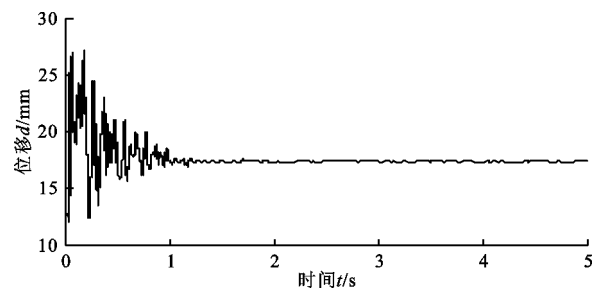


图9 闸门整体最大位移点位移时程曲线

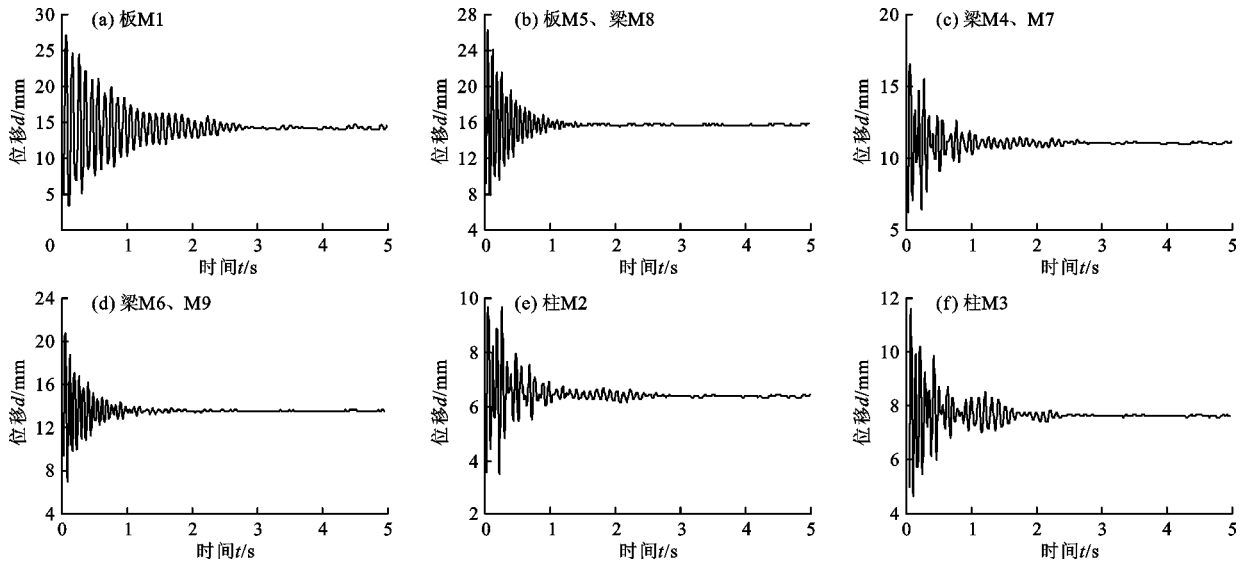


图 10 闸门各构件位移时程曲线

分析面板顶部 M1、面板中部 M5 以及梁构件 M4 ~ M9 位移历时曲线可以发现,最大动位移响应发生在闸门面板顶部,随后减小,在上主横梁处达到极小值,越过上主横梁极值点处后动位移数值又开始逐渐增大,随后动位移数值在面板中部出现极值,然后动位移数值开始慢慢减小又在下主横梁处达到极小值,其中下主横梁处极值大于上主横梁处达到的极值,闸门面板顶部的极值大于面板中部出现的极值。闸门面板位移数值沿门高方向分布呈正弦曲线分布。

4.3 动应力响应

图 11 为闸门最终时刻整体应力云图。由图 11 可知,总体应力响应最大值为 483.72 MPa,位于支臂与下主横梁翼缘与支臂连接区域,有应力集中点,应当予以剔除。对闸门主要位置构件进行强度验算时,取用 1.5 的构件验算安全系数。弧形闸门应力分布空间效应强,所以对其应力验算时以第 4 强度理论进行验算,数值计算结果为 Mises 应力,闸门构

件验算结果如表 1 所示。由表 1 可知,闸门下主横梁翼缘 M6 验算空间应力数值最大,即闸门下主横梁为结构强度控制的主要受力构件,但数值均在安全容许设计值范围之内,因此仅就最终计算结果判定该闸门强度满足设计要求。

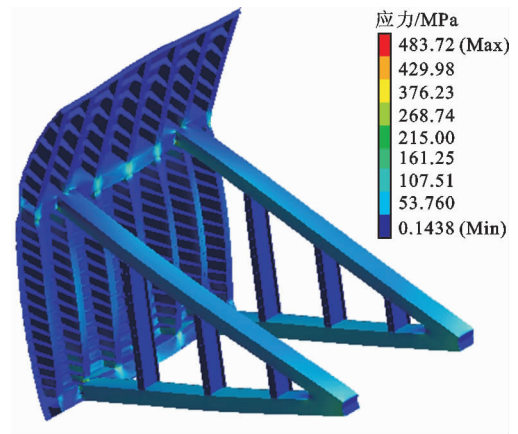


图 11 闸门整体应力分布云图

表 1 闸门主要构件强度评判

构件编号	构件位置	最大工作应力 σ_{max} /MPa	材料抗力 $[\sigma]$ /MPa	评判准则	结论
M1	面板顶部	14.3	337.5	$\sigma \leq [\sigma]$	安全
M5	面板中下部	72.9			安全
M4	上主横梁翼缘	128.5	230.0	$\sigma \leq [\sigma]$	安全
M6	下主横梁翼缘	162.3			安全
M7	上主横梁腹板	110.5			安全
M8	纵梁腹板	59.5	156.0	$\sigma \leq [\sigma]$	安全
M9	下主横梁腹板	114.8			安全
M2	左上支臂	73.3			安全
M3	左下支臂	89.1			安全

图12为闸门动力响应板、梁、柱构件应力历时曲线。分析图11、12可知,闸门应力云图显示应力最大值主要集中在上、下主横梁区域,其次为支臂应力数值较大,面板上部应力数值较小;各构件的动应力时程曲线结果显示在地震作用开始的1 s时域内动应力振幅值较大,伴随着地震作用衰减其动应力响应逐渐趋于平稳;对闸门应力强度校核时所使用的数值为闸门动应力响应终点时刻数值,然而在构件M4、M6动应力时程曲线变化过程中,上主横梁翼缘M4在0.06 s时数值达到222.1 MPa,下主横梁翼缘M6在

0.02 s时数值达到258 MPa。从而说明闸门结构动力响应主要集中在初始响应1 s时域内的闸门上、下主横梁区域;在该时域内,构件M6动应力数值已经超过考虑安全系数的材料容许应力,有强度破坏的可能,结合应力分布云图不难看出,上下主横梁翼缘与支臂交接处为动力响应薄弱区域,应当采取有效构造措施进行加固处理,增强局部强度。

表2为考虑流固耦合效应的闸门各构件地震动力响应分析的最大计算数值结果与规范^[19]计算结果的比较。

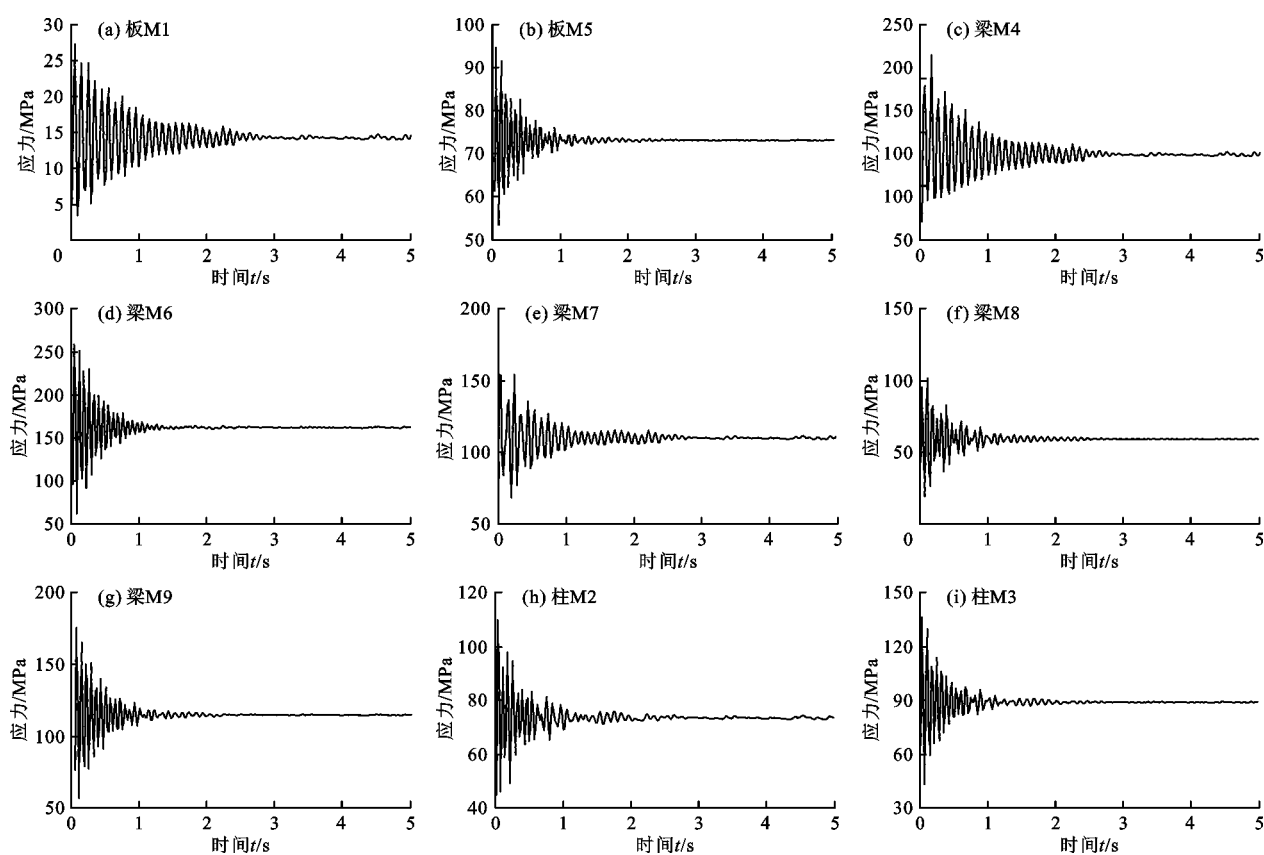


图12 闸门各构件 Mises 应力时程曲线

表2 闸门各构件位移及应力的规范计算结果与动力数值结果对比

构件	构件编号	位移/mm		允许值	比值	应力/MPa		允许值	比值
		规范	数值解			规范	数值解		
板	M1	12.57	27.52		2.19	16.7	27.2	337.5	1.63
	M5	18.11	25.77		1.42	38.7	94.6		2.44
	M4	13.18	16.23		1.42	169.3	222.1		1.31
	M6	14.81	20.77		1.42	198.7	258.0		1.30
梁	M7	11.47	16.45	32.81	1.43	88.9	155.3	230.0	1.75
	M8	18.12	25.78		1.42	66.4	102.4		1.54
	M9	14.53	21.01		1.45	94.1	175.9		1.87
柱	M2	6.56	9.58		1.46	78.1	109.7	156.0	1.40
	M3	7.95	11.57		1.46	95.1	136.7		1.44

由表 2 可以看出,考虑流固耦合作用的弧形钢闸门动力响应与规范结果计算差值较大,其中面板顶部 M1 处动位移与静位移比值为 2.19,面板中部区域 M5 应力比值达到 2.44,结构响应两者比值均值为 1.52,表中比值数值整体上部区域大于下部,闸门底部区域结构响应增幅较小。由此可见静动力位移差异最大点在门顶面板中点处,静动力应力差异最大点在门叶中部

为了进一步分析地震激励下弧形钢闸门地震动水压力,分别以考虑流固耦合和规范^[19]方法计算不同水深地震动水压力,结果见表 3 和图 13。其中规范中动水压力采用 Westergaard 动力法计算,该方法用于计算作用垂直刚性坝面于无限长流体的动水压力,公式如下:

$$P_h = \frac{7}{8} a_g \rho_w \sqrt{Hh} \quad (6)$$

式中: P_h 为水深 h 所对应的动水压力,kPa; a_g 为地震加速度, m/s^2 ; ρ_w 为水体密度, kg/m^3 ; H 为总水深,m; h 计算水深,m。

表 3 流固耦合方法与规范方法计算的不同水体高度闸门动水压力比较

水体高度 H/m	流固耦合 法/kPa	规范法/ kPa	比值
1	24.47	22.84	1.07
2	24.04	22.08	1.09
3	23.64	21.26	1.11
4	23.13	20.43	1.13
5	21.04	19.56	1.08

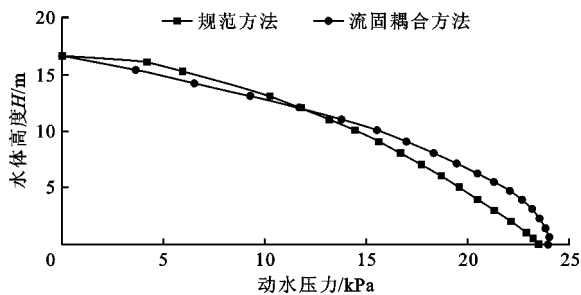


图 13 流固耦合方法与规范方法计算的不同水体高度闸门动水压力曲线

Westergaard 公式多用于垂直刚性面,对于弧门根据闸门规范^[19]倾斜迎水面需要考虑折减系数 $k(k = \theta/90, \theta$ 为倾斜面与迎水面夹角),算例中闸门面板和水面之间的夹角 $\theta = 75.9^\circ$ 。图 13 中数值模拟结果与考虑折减系数后的 Westergaard 解沿弧形

闸门高度的分布规律呈抛物线趋势,计算结果显示随水深增大动水压力增加速率加大,且数值模拟数值增加幅度大于公式计算值,结合表 3 可知在水深 12.6 m 处两者比值达到最大 1.13,数值计算最大地震动水压力占静水压力比值为 14.74%,结合文献[31]、[19],对比分析图 6 与 13 可以发现,弧形闸门地震动水压力分布曲线较竖直壁面情况向左移动。不难看出,与规范计算结构响应相比较,流固耦合作用下闸门结构应力、位移响应增加明显,耦合作用对结构响应影响显著;现行规范计算结果难以真实反映地震动水压力在弧门的空间分布特征,更不能展现地震荷载于弧门的历时特性。

由上述分析可知,有必要考虑流固耦合作用对闸门安全的评价,且从图 10 与图 12 分析结果可以得知,结构动力响应最大值会出现在响应时域上某一时刻,且数值超过了设计安全容许值,所以有必要通过动力响应时程分析对闸门结构的安全性进行分析评价和研究。

5 结 论

在考虑地震激励下的弧形钢闸门结构设计中,结构动力分析显得尤为重要。本文中对考虑流固耦合响应的弧形钢闸门地震动力响应分析进行研究,得到的主要结论如下:

(1)所建流固耦合模型对水动力的计算求解计算结果与实验结果对比显示其最大误差不超过 3%,说明本文的流固耦合模型流体域动水压力计算能够达到较高的精度,可以应用于弧门结构动力响应研究。

(2)通过流固耦合数值模型对该弧形钢闸门各构件进行动力响应监测,得到闸门结构最大动位移发生在门顶面板中心,为 27.5 mm,小于现行规范容许值 32.81 mm,满足刚度要求;最大动应力发生在下主横梁跨中区域,为 258 MPa,不满足取用安全系数强度要求应力值 230 MPa;而规范法计算的最大动位移位于竖梁腹板,为 18.12 mm,最大应力位于下主横梁翼缘,为 198.7 MPa,均满足强度和刚度要求,表明现行规范计算结果偏危险。

(3)考虑流固耦合作用对闸门结构动力响应、弧门地震动水压力分布特征进行分析,结果表明,考虑流固耦合的动力计算结果是规范最大位移计算结果的 2.19 倍,最大应力的 2.44 倍,且在下主梁应力响应处动力响应结果已超出规范设计容许值;规范法对于高水头地震动水压力的计算结果偏大,对表

孔低水头的计算结果又偏小,难以真实地反映地震动水压力于闸门面板的分布特征。闸门结构耦合时程分析更有利于结构安全评价与研究,因此考虑流固耦合作用对于闸门结构的分析研究有重要意义,能为闸门动力设计问题提供可借鉴的数值模型。

参考文献:

- [1] 王正中,张雪才,刘计良.大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J].水力发电学报,2017,36(10):1-18.
- [2] 宋胜武,蒋峰,陈万涛.汶川地震灾区大中型水电工程震损特征初步分析[J].四川水力发电,2009,28(2):1-7+22.
- [3] 张友林. MPS-FEM方法在流固耦合问题中的应用[D].上海:上海交通大学,2018.
- [4] LEE S O, SEONG H, KANG J W. Flow-induced vibration of a radial gate at various opening heights[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 567-583.
- [5] 孔剑,朱召泉,董顾春.基于ANSYS的钢闸门地震反应谱分析[J].四川建筑科学研究,2014,40(2):206-208.
- [6] 李坤,田兴运,苏雷,等.基于ANSYS的支撑框架结构地震反应谱分析[J].四川建筑科学研究,2012,38(3):193-197.
- [7] 吴一红,谢省宗.水工结构流固耦合动力特性分析[J].水利学报,1995,5(1):27-34.
- [8] BRUSEWICZ K, STERPEJKOWICZ - WERSOCKI W, JANKOWSKI R. Modal analysis of a steel radial gate exposed to different water levels[J]. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 2017,64(1):34-47.
- [9] 李桑军,秦战生.基于ANSYS的流固耦合弧形闸门振动特性研究[J].水力发电,2018,44(1):64-67.
- [10] FARIDMEHR I, NEJAD A F, BAGHBAN M H, et al. Numerical and physical analysis on the response of a dam's radial gate to extreme loading performance[J]. Water, 2020,12(9):2425.
- [11] 张凡,巫世晶,孟凡刚,等.基于CEL理论的弧形闸门流固耦合的数值模拟[J].水电能源科学,2016,34(3):189-191+27.
- [12] 张启灵,李端有,周武.水下爆破荷载作用下弧形闸门的塑性变形和位移[J].水力发电学报,2012,31(4):194-200.
- [13] FENVES G, CHOPRA A K. Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1984,12(5):663-680.
- [14] GOGOI I, MAITY D. Seismic safety of aged concrete gravity dams considering fluid-structure interaction[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005,9(5):637-656.
- [15] BULDGEN L, CAPRACE J D, RIGO P, et al. Investigation of the added mass method for seismic design of lock gates[J]. Engineering Structures, 2016,131(15):380-393.
- [16] BULDGEN L, RIGO P, LE SOURNE H. A simplified analytical method to evaluate the seismic pressure on plane lock gates[J]. Engineering Structures, 2015,100:522-534.
- [17] 尚丽峰,吴永昂,胡学苏,等.表孔弧形闸门横向地震振动控制研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(8):84-88.
- [18] 陈灯红,谢京辉,杨乃鑫.基于增量动力分析的混凝土重力坝抗震性能分析[J].水利水运工程学报,2018(5):48-55.
- [19] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钢闸门设计规范:SL74-2019[S].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [20] HU Youan, WANG Meng, WANG Miaomiao, et al. Hydraulic calculation and dynamic analysis of columnar reversing gate[J]. Water Science & Engineering, 2011,4(3):294-304.
- [21] 韩彰,苏怀智,陈健,等.水工弧形空腔闸门动力特性数值分析[J].水利水运工程学报,2018(2):26-34.
- [22] 赵勇,郑圣义,蔡卫江,等.基于流固耦合的闸下淹没出流流场瞬态分析[J].水力发电,2019,45(5):86-90+117.
- [23] 赵佳耀,黄丹,徐业鹏,等.考虑动水压力和流固耦合的库水-坝体-地基系统建模与动力分析[J].计算力学学报,2020,37(5):524-529.
- [24] 陈磊,贾慧铭,王革,等.基于双向流固耦合方法的柔性变结构喷管性能分析[J].推进技术,2021,42(3):513-521.
- [25] 张阿漫,戴绍仕.流固耦合动力学[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [26] ZHANG Aman, NI Baoyu. Three-dimensional boundary integral simulations of motion and deformation of bubbles with viscous effects[J]. Computers & Fluids, 2014,92:22-33.
- [27] 李子如,李广辉,何朋朋,等.复合材料螺旋桨非定常流固耦合特性数值分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(9):7-13.
- [28] 惠迎新,王克海.基于多点激励位移输入模型的跨断层桥梁地震动输入方法[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(3):557-562.
- [29] 王铭明.高重力坝抗震措施及坝体-库水-地基系统动力相互作用研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- [30] 宝鑫,刘晶波,王东洋,等.局部成层的海域岛礁场地地震反应分析[J].振动与冲击,2020,39(21):55-64.
- [31] 王铭明,陈健云,徐强,等.不同高度重力坝动水压力分析及Westergaard修正公式研究[J].工程力学,2013,30(12):65-70+84.