

弧形钢闸门的动力稳定性研究进展

⑦
27-28, 37

朱召泉 卓家寿

陶桂兰

TV312
TV663

(河海大学土木工程学院 南京 210098) (河海大学港口航道及海岸工程学院 南京 210098)

摘要 总结分析国内外某些低水头弧形闸门的失事破坏情况,并根据弧形闸门的结构特点,指出在振动荷载作用下弧形闸门的支臂丧失稳定性是大多数失事闸门因振动而破坏的主要原因;进而对弧形闸门的动力特性分析和动力稳定性研究现状进行综述,提出进行弧形闸门动力稳定性分析的思路和方法;应该考虑流体与固体结构的耦合作用,按照闸门振动的流体弹性理论进行有限元分析。

关键词 钢闸门;弧形闸门;动力稳定性;闸门振动

1 问题的提出

弧形钢闸门是水工建筑物中运用最广泛的门型之一。1949 年以来,通过长期的工程实践,我国在弧形闸门设计、制造及运行等方面都积累了不少经验,技术水平也有了很大提高,绝大多数闸门经过长期运行,经受了设计条件的考验,运行性能良好。但是,全国一些工程的低水头弧形闸门失事破坏的实例也不少,据不完全统计,已有 20 多起。在国外,这种大跨径轻型低水头弧形闸门失事的实例也时有发生,如日本和知坝堰顶弧形闸门、美国麦克莱伦-克尔阿肯河航运系统的弧形闸门等也遭到了破坏。

通过对国内外弧形闸门事故的调查分析^[1]发现,虽然失事原因是多方面的,诸如水工结构布置不当、制造安装要求不严、运行管理经验不足及闸门支臂刚度较差等等,但是,仔细研究这些事故后,也能找出一些规律性。尽管这些失事闸门的运行条件、结构尺寸、构造型式各不相同,破坏时的直接触发原因也多种多样,但从破坏特征来看,有两点共同特征值得注意:①从破坏内因分析,失事闸门全是因支臂丧失稳定,发生弯扭屈曲致使整扇闸门失去挡水能力而遭受破坏的;②从破坏外因分析,失事闸门均是在明显的振动荷载作用下发生破坏的。从闸门失事过程来看,许多闸门破坏时,往往发生强烈振动,即使一部分未被破坏尚在运行中的闸门,在闸门启闭过程中或小开度工作泄流时,也有振动现象。因此,振动问题以及由此引起的闸门动力反应及动力稳定问题是水工结构工程中急需解决的一个重要问题。在新的 DL/T5039—95《水利水电工程钢闸门设计规

范》的条款 2.2.9 中也专门指出了对于低水头弧形闸门,应特别注意支臂的动力稳定问题。但是由于闸门振动涉及水流条件、边界条件以及闸门自身结构特性等许多方面,问题比较复杂,在许多方面,目前理论上尚未完全弄清楚,也没有比较实用的方法供工程上采用。因此,迫切需要科研人员对闸门的振动及动力稳定性问题开展深入的理论和试验研究。

2 弧形钢闸门的动力特性

2.1 闸门的振动特性及破坏原因分析

泄流激起的闸门振动问题是一个涉及水流与结构两方面的复杂问题。以往虽然结合工程问题进行了大量的原型观测、模型试验及调查研究^[2-5],但有很多问题至今还未能解决,还需要进一步研究。水工弧形闸门本身是一个复杂的空间结构,一般由面板、梁格及支臂构成。分析弧门的振动时,可把面板与梁格作为一个部件(即面板梁格)来考虑。因而,可以认为闸门系统由启闭杆(绳)、支臂及面板梁格系统三大部件组成。根据闸门的结构特点,三大部件的刚度比为: $I_{杆} < I_{支臂} < I_{面板}$ 。严格地讲,弧门这样的空间结构的振型是相当复杂的。但从弧门的结构特征来看,启闭杆(绳)最易振动,支臂次之,两种易于激励的细长杆件可能产生的主要振型是横向弯曲振动。当启闭杆(绳)在弧门受切向水动力作用下产生明显的变形振动时,闸门绕支铰沿切向振动,而闸门其它部件变形很小,可视为刚体,可以认为闸门产生了整体振动。而对于闸门结构的变形振动,如前所述,大多数失事弧形闸门的振动或破坏是由于支臂丧失动力稳定所引起,因此,支臂即是弧门中易于产生变形振

动的构件.在低水头轻型弧形闸门中,闸门振动往往突出地表现在闸门系统中易振部件——支臂结构上.

根据失事闸门的破坏情况,如果剔除原因非常特殊的破坏实例,弧门在动力作用下引起的破坏大致可分为以下三类:第一类是由于弧门前胸墙有过长的外悬平段,闸前水面又有很长的吹程,在临界水位时的风浪袭击下,水面封闭了胸墙底部和门顶的死角,空气高度压缩形成气锤,由于风浪以一定频率给弧门以冲击作用,使支臂产生横向振动导致失稳破坏.如广东鹤地水库弧门及浙江马山闸弧门等的破坏.第二类是由于门顶溢流和门底射流同时作用引起闸门振动,从而引起支臂失稳而引发闸门破坏.如广西龙山水库弧门、海南万宁水库弧门等.第三类是当闸门在部分开启泄流条件下,闸门达到某一开度范围时,闸门产生强烈振动引起支臂动力失稳而导致破坏.如湖北富水电站弧门、甘溪水库弧门、陕西宝鸡峡冲刷闸弧门等,“临界开度”是第三类振动的主要特征.尤其对于第三种破坏情况,还需要进行进一步的研究分析.因为闸门部分开启泄流的情况在闸门运行中相当普遍,究竟在什么情况下会发生振动,支臂动力失稳的机理如何,均应进行深入的理论分析和试验研究.

一些轻型闸门在一定开度范围内容易发生强烈振动,当开度改变后,振动又随之消失,即“临界开度”现象在闸门实际运行中虽然早就存在着,但是其动力学性质直到现在仍没有得到清楚和深入的研究,因为临界开度随着闸门上、下游的水力条件、闸下流速等水力特性而改变.另外,闸门结构的刚度和质量的分布、门体布置、制造安装精度、运行管理情况也对闸门的振动产生程度不同的影响.

2.2 弧形闸门的固有振动特性分析

闸门振动的外因虽有不同的解释,但闸门的自振频率实际上标志着闸门振动的内因.闸门结构在水中的振动属于流体弹性理论范畴,闸门的振动是弹性系统和流体相互作用相互影响的过程,应该用弹性结构与流体的耦联振动理论分析闸门结构的特性.但是考虑到该问题的复杂性,以往大多数研究常用理论分析计算闸门在空气中的自振频率,再由水力学试验测定振动扰力,即水流总脉动压力的幅值和频率,以检验闸门共振的可能性.对于闸门在水中的自振频率计算,大多采用“附加质量”法来考虑水体与闸门结构的相互作用.文献[6~8]运用流体弹性理论分析了闸门振动系统.考虑闸门结构与水流的相互作用及相互影响,在闸门振动分析中出现了与流体的流动条件有关的各种因子,如“附加惯性”、“附加阻尼”和“附加弹性”项,可以把这些附加

项出现的力学作用分别称为流体和弹性系统的惯性、阻尼和弹性的“耦联”.研究分析表明,流固的惯性耦合不仅使弧形闸门的各阶自振频率显著降低,而且对相应的振型也有显著影响.而用单纯“附加质量”法计算弧形闸门这样一种复杂结构的自振特性,一般只能对基频和基本振型有效.因此,采用流固耦合理论对包括弧形闸门在内的水工闸门结构进行动力特性分析是十分必要的.但考虑流速场的存在,出现了结构与水流的阻尼和刚度的耦合,使动力分析复杂化,有些问题仍有待进一步研究.

对于闸门自振频率的研究,除理论计算方法外,以往对产生强烈振动的闸门也进行了大量的原型观测和模型试验.模型试验方法是经常采用的传统的冲击法,即用外加激励源来测量闸门的自振频率.对于这种方法,根据响应信号一般只能取得闸门结构的第一自振频率,取得的资料不太完整,精度也不太高.文献[2~4]采用实验模态分析技术,研究了弧形闸门各主要部件的动态特性,成功地取得了弧形闸门空间结构的完整资料.研究结果表明,建立在现代试验技术、计算机及计算技术基础上的实验模态分析方法,研究像弧形闸门这样复杂空间结构的动态特性是行之有效的.

3 弧形钢闸门的动力稳定性分析

3.1 弧形闸门的动力稳定分析简介

如前所述,弧形钢闸门的动力失稳往往是由于支臂在动力荷载作用下丧失稳定所致.支臂是弧形闸门中控制闸门安全的主导构件,它不直接与水流接触,激振力由门叶传来,这种由纵向干扰力激起的支臂杆件的横向振动属于参数振动的一种形式.支臂的参数振动特征是当激振频率与杆件自振频率之间存在某种特定关系时,就可能激起参数共振,使支臂丧失动力稳定.对于弧形闸门支臂杆,其振动可能会存在两种形式:一种是由支臂和主梁所组成的主框架的整体振动;另一种则是支臂杆和主梁各自以单独杆件出现的振动形式.由于弧形闸门支臂杆的刚度远小于和门叶连成一体的主梁的刚度,闸门原型实测结果表明,只要激振的能量不是很大,则不易出现整体框架的振动,首先可能发生的是支臂单独振动.从国内外一些弧形闸门的振动实测资料中也可得出如下结论:闸门的自振主频率基本上与单根支臂杆计算所得的自振频率相一致,而按整体主框架计算求得的自振频率则远远大于实测自振频率.这说明闸门结构整体的自振频率,有时可以由个别构件的自振频率来表达.

对于结构稳定问题而言,以往对各类构件及组

合结构的静力稳定性分析已做过大量的研究工作,但是对于复杂结构的动力稳定分析,尤其是弧形闸门这样复杂的空间结构,由于其动力稳定分析在理论及计算上的复杂性,对其进行深入广泛的研究分析还有一定困难。在国内外的文献中,还未见到有关此类板、梁、杆组合结构的动力稳定性分析的报道。文献[9]曾对单个构件如杆、梁、板及框架等的动力稳定性分析的解析方法作了详细介绍,文献[10~13]采用有限元法对轴心压杆或框架的动力稳定性作了简单分析,章继光等^①在调查我国低水头弧形闸门失事报告中也曾对支臂杆的动力稳定性进行过简单计算。报告中把支臂作为两端铰接的轴心压杆,所施加的轴向干扰力为 $P(t) = P_0 + P_t \cos \theta t$, 经过解析分析得出结论:当激振干扰力 P_t 的频率 θ 等于支臂杆的横向振动固有频率 Ω 的 2 倍,即 $\theta = 2\Omega$ 时,杆件将发生参数共振,即丧失稳定。虽然该分析也揭示了支臂杆动力失事的某些特征,但计算过于简化,不能完全反映弧形闸门动力失稳的真实规律特征,因此,还应开展更进一步的分析研究。作为初步研究,也可作一适当的简化,如把主梁和面板一起等效为一横梁,然后与支臂杆组成框架结构,通过分析支臂杆及该框架的动力稳定性,来对弧形闸门在动水荷载作用下的稳定性作出判断,从而为整个弧形闸门结构按空间组合结构进行动力稳定分析的深入研究打下基础。

3.2 弧形闸门主框架的动力稳定分析方法

工程界在 100 多年前就认识到结构设计需要考虑静力屈曲。而结构动力屈曲问题自本世纪四五十年代后才引起广泛注意,60 年代后期开始,结构动力屈曲问题已成为固体力学中十分活跃的研究领域。近 20 多年来,该问题主要集中在两类问题上,一类相应于结构承受周期性变化的压缩加载,另一类相应于结构承受冲击加载。对于弧形闸门,在一定开度下,闸门泄流产生的动力荷载,可转化为周期性变化的动水荷载。对于弧形闸门主框架,如果其周期荷载形式为 $P(t) = P_0 + P_t \Phi(t)$ ($\Phi(t)$ 为周期函数,通常取 $\Phi(t) = \cos \theta t$), 那么,对于所研究的框架及杆件,参数 P_0, P_t, θ 和 λ 的某些组合,将会使杆件产生很大振幅的横向振动(即动力屈曲),而另一些组合,杆件则不会呈现强烈的横向振动。因此,在 P_0, P_t, θ 和 λ 的参数空间中,将形成动力稳定区和动力失稳区,两个区域的边界构成杆件或框架的临界荷载区。这类动力屈曲现象即所谓的参数共振。

对于承受周期性轴向压缩荷载的杆件,考虑非

线性因素影响后,其动力屈曲方程的一般形式为^[11]

$$C\ddot{f} + (I - \alpha A - \beta \Phi(t)B)f + \Psi(f, \dot{f}, \ddot{f}) = 0 \quad (1)$$

式中: A, B, C 是与杆的动力屈曲模态有关的常数矩阵; I 是单位矩阵, f 是广义坐标列阵; $\Phi(t)$ 是周期函数; α, β 是荷载参数。

方程(1)是齐次方程,也是非线性摄动方程,如果略去方程中的非线性项 Ψ , 并取 $\Phi(t) = \cos \theta t$, 可得线性摄动方程如下:

$$C\ddot{f} + (I - \alpha A - \beta \cos \theta t B)f = 0 \quad (2)$$

由于方程(2)左边第二项的系数是周期函数,而 C 是常系数,因此方程(2)是一个周期性系数方程,其解有如下特点:对于 α, β, θ 的某些组合,方程(2)有随时间呈指数增长的解,而另一些组合,方程(2)有单调下降的解并最后趋于零。 α, β, θ 的前一类组合形成了杆的不稳定区域,而后一类组合则形成了杆的动力稳定区域。在两类区域的边界上,方程(2)具有常振幅的振荡周期解。因此,周期解的存在性提供了确定杆件临界条件的计算方法。

利用方程(2)在稳定区域和不稳定区域边界上存在周期解的特性,函数 f 可展开成富里埃级数

$$f = \sum_{k=1,3}^{\infty} \left(a_k \sin \frac{k\theta t}{2} + b_k \cos \frac{k\theta t}{2} \right) \quad (3)$$

$$\text{和 } f = d_0 + \sum_{k=2,4}^{\infty} \left(d_k \sin \frac{k\theta t}{2} + e_k \cos \frac{k\theta t}{2} \right) \quad (4)$$

式(3)表示的是周期为 $2T$ 的解,式(4)表示的是周期为 T 的解。根据文献[11],第 1,3,5 等奇数不稳定区域由周期为 $2T$ 的解包围着;第 2,4 等偶数不稳定区域由周期为 T 的解包围着;而周期为 T 的解与周期为 $2T$ 的解之间为稳定区域,即周期相同的解包围着不稳定区域,周期不同的解包围着稳定区域。

把式(3)或(4)代入方程(2),并利用 $f \neq 0$ 条件,可以得到确定各个不稳定区域边界的代数方程组,求解代数方程组,即可求得边界条件 α, β, θ 的关系,从而判断出杆件的动力稳定性。

4 结 语

a. 低水头弧形闸门在动水压力荷载作用下的失事往往由支臂杆的动力失稳引起,应该特别注意弧形闸门支臂杆的动力稳定性问题。

b. 弧形闸门结构的动力分析应该考虑流体与固体结构的耦合作用,按照闸门振动的流体弹性理论进行有限元分析。

(下转第 37 页)

^①章继光等.我国低水头弧形闸门失事调查及原因初探.陕西机械学院科研处科技情报室,1983

骤降时,考虑 MgO 混凝土的自生体积变形所计算的最大温度拉应力为最小,不考虑自生体积变形的普通混凝土的拉应力最大.也就是说,外掺 MgO 混凝土抵御寒潮袭击的能力强于不掺 MgO 混凝土.

3 结 论

a. 试验研究结果表明,温度对 MgO 混凝土自生体积变形的膨胀速率和膨胀量的影响较大,其膨胀规律是随着温度的增高而增大.高温的自生体积膨胀变形比常温的要大几倍,但其比值是随龄期的延长而减小的.高温膨胀快,故变形稳定时间较常温提前较多.常温下水化愈慢的方镁石,温度对其水化速度的影响就愈大.

b. 试验温度每增减 10℃时,MgO 混凝土的自生体积变形可增减 1.5 倍,其膨胀变形量可增减 $(30 \sim 35) \times 10^{-6}$.自生体积变形的经验公式(1)可在 MgO 混凝土的温度应力分析中使用.如果有 20℃的自生体积变形资料,也可根据表 4 中的参数,估算不同温

(上接第 29 页)

c. 弧形闸门的动力稳定性是关系到闸门安全运行的重要问题,除从结构设计及构造上采取措施外,还应注意保养维护和按章操作,并对弧形闸门的动力稳定性开展深入的研究分析.

参考文献

- 1 黄廷璞,危盼.我国低水头弧形闸门失事调查和初步分析.金属结构,1986(5):23~41
- 2 阎诗武.皎口水库底孔闸门振动的原型观测研究.水利水运科学,1985(1):33~48
- 3 阎诗武.应用实验模态分析技术识别弧形闸门的模态参数.水利学报,1987(5):46~51
- 4 阎诗武.水工弧形闸门的振动.金属结构,1985(5):21~33
- 5 章继光.我国闸门振动研究情况综述.水力发电,1985(1):36~42
- 6 谢省宗.闸门振动的流体弹性理论.水利学报,1962,4(8):35~49
- 7 吴一红,谢省宗.水工闸门流固耦合动力特性分析.金属结构.1993,(2):1~12
- 8 汪德耀.闸门水下自振频率的分析与计算.河海大学学报,1987,15(3):60~69
- 9 符华,鲍洛金.弹性体系的动力稳定性.北京:高等教育出版社.1960
- 10 殷学纲,李宾.刚架结构的动力稳定分析.工程力学,1994(增刊):970~974
- 11 Brown J E, Hutt J M, Salama A E. Finite element solution to dynamic stability of bars. AIAA J, 1986, 6(7):1423~1425
- 12 Shastri B P, Rao G V. Dynamic stability of bars considering

度条件下的自生体积变形.

c. 试验研究结果表明,在气温骤降情况下,外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀变形是稳定的不可逆的,也不会产生收缩现象.另外,外掺 MgO 混凝土在较低温度条件下也能够产生膨胀,但其膨胀变形速度确实是非常缓慢的.

d. 实践证明,MgO 混凝土在不同温度的自生体积变形对温度应力的影响是巨大的.因此,在 MgO 混凝土的温度应力分析中,既要考虑自生体积变形的重大作用,又必须考虑温度对自生体积变形的影响,才能求得真实的温度应力.最终达到既避免温控措施的目的,又有可能获得显著的技术经济效益.

参考文献

- 1 丁宝瑛,岳耀真,朱绛.掺 MgO 膨胀混凝土的温度徐变应力分析.见:丁宝瑛主编.大体积混凝土结构的温度应力与温度控制论文集.北京:兵器工业出版社,1991.382~390
- 2 李承木.氧化镁微膨胀混凝土的变形特性研究.水电站设计,1990(2):1~8 (收稿日期:1999-03-17 编辑:熊水斌)

shear deformation and rotatory inertia. Computers & Structures, 1984, 19(5):823~827

- 13 Shigematsu T, Hara T, Ohga M. Dynamic stability analysis by matrix fuction. J of Engineering Mechanics, 1987, 113(7):1085~1100 (收稿日期:1998-04-15 编辑:熊水斌)

(上接第 32 页)

4 结 语

长江中下游具有许多大支流和大湖,也有众多挟带沙卵石的小支流,支流洪水组合,泥沙砾卵石淤积,情况极为复杂多变,与一般大中河流有很大区别,需要更广泛深入的探讨.

1998 年洪水是本世纪以来,水位最高,高水位历时最长的一次洪水,但洪峰流量并不很高;是洪量大体与 1931,1954 年相当的一次特大洪水.推测只是由于河床淤积,特别是河床粗化和砾卵石淤积才使水位异常壅高,达到百年来最高水位.

中下游设防水,宜考虑有一定可能的水情不利组合,同时适当考虑可能的不利沙情.据此确定设防水流量和水位,相应设置堤防.

从可持续发展战略出发,堤防不能愈筑愈高,出路只能是适当地疏浚河道.以现代技术水平,每年开采 300~400 万 t 砾卵石和 1000~2000 万 t 粗沙,既供城乡建设需要,又使粉细沙和其余沙砾卵石能随水流入海,为防汛安全提供一个长治久安之策.

(收稿日期:1999-04-27 编辑:熊水斌)