

气幕隔震技术在水利水电工程中的运用初探

隆文非,刘浩吾,舒仲英

(四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要:论述了气幕隔震技术在水利水电工程中的应用现状,对气幕在拱坝中的隔震效能进行了简单的计算分析,结果表明,坝前气幕的良好压缩性能对地震效应有很大的缓冲作用,从而能极大地降低动水压力和坝体的动应力,改善和提高坝体的抗震性能。

关键词:气幕隔震;拱坝;动水压力

中图分类号:TV352.1 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2004)07-0010-03

1 气幕隔震在水利水电工程中的研究及应用现状

由于气体具有很大的压缩性,所以气体被广泛地用作减振材料。机械、运输以及在船舶工业中都有大量气体被用于减震隔震的例子^[1~7]。在“九五”攻关项目中,大连理工大学提出在拱坝结构缝中设置消能减震装置^[8]。研究表明,气幕对结构的强迫振动响应有较大的抑制作用^[9]。早在五六十年代,前苏联和法国就开始研究大坝气幕隔震技术^[10~16]。早期形成气幕的方案是气泡式的^[11],高压的气体预先存储在储气室或高压气球中。当建筑物远处的传感器采集到地震信息时,使储气室的自动活门开启,通过多孔管向水中放气泡(见图1),使地震波到达时上游坝面能为一层气幕所遮盖。

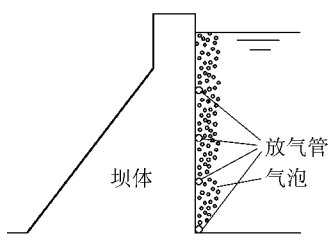


图1 气泡式气幕

为解决供气的困难和提高系统的可靠性,转而于1980年提出了钟罩形气幕(形同扣放的玻璃杯,见图2),使气幕常年置于坝前^[11]。实验研究,特别是原型实验^[10]研究也在进行,而且在克里沃波罗格水电站的重力坝上,用水库中爆炸的方式产生动水压力,对比有气幕坝段和无气幕坝段上动水压力的差别。

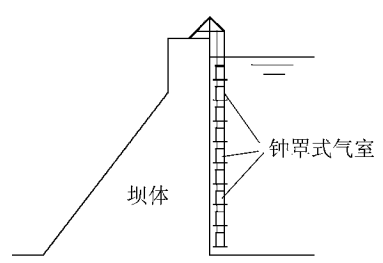


图2 钟罩式气幕

研究表明气幕使动水压力降低了 $2/3 \sim 6/7$ 。实验为将气幕应用于大坝工程提供了依据。1986年首次将气幕用于契尔克拱坝(坝高232m)^[12],气罐用钢筋混凝土圆筒,重19.15t,可容气 11 m^3 ,按设计共用1100个,总气量 1.21 万 m^3 ,气罐用浮桥悬吊。第二个气幕坝是米阿特林拱坝(坝高86m)^[12],气罐改用钢圆筒(直径1220mm,高5.5m,体积 25 m^3),共布置200个,总气量 5 000 m^3 ,气罐直接挂靠在上游坝面上。另一种可能实现的气幕是在坝体上游面附设混凝土气室^[11](图3),从而在坝面形成一系列的空气弹簧。这种气幕施工安装简便,同时由于混凝土的可

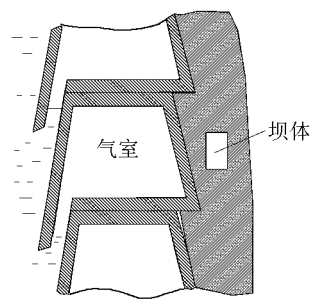


图3 六角形混凝土气室

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50379029)

作者简介:隆文非(1969—),女,四川内江人,高级工程师,博士研究生,从事工程监测与数字模拟研究。

靠性和耐久性,具有运行可靠、维护方便、经济低廉等特点,在工程中容易得到应用和推广.研究表明,使用这种气幕的重力坝比普通坝型可节省混凝土量约 9%,降低大坝造价 15%;即使在最坏的情况下,气室中每年损失的气量约 5%.在计算方面,1992 年李立^[10]首次用势流理论和波意尔理论,求解了理想状态下,二维重力坝的气幕隔震性能.计算中坝体是刚性的,具有铅直上游面,分别用不同频率的简谐波激振,结果表明气幕对减小动水压力极为有效,激振频率越高,气幕厚度越大,减震效果越好.在试验方面,2002 年四川大学首次利用宽 40 cm、高 75 cm、厚 1 cm 的钢板模拟坝,气室由有机玻璃做成,形状类似于图 3,用气枪向气室中加气实现气幕,采用初位移激振.试验结果表明:气幕减小了动水压力 70%,有气幕时系统的振动频率增加,初步验证了气幕的减震作用.目前笔者正在进行高坝气幕隔震的模型试验.

2 气幕隔震对动水压力、坝体动应力的影响

在坝体-气幕-库水体系中,坝体和库水单元是线弹性的,气幕单元具有非线性.对于整个体系,气幕单元只是一个局部非线性问题.由于气幕的主要组成部分是气体,其质量与坝体质量相比可以忽略不计,同时由气体产生的阻尼也可以忽略.因此在体系的动力平衡方程中只有气幕的刚度矩阵.为了简化处理,与地基-坝体有限元系统中无质量地基模型中对地基的处理一样,可以从总的动力平衡方程中消去气幕部分的自由度,保持结构方程阶数不变.将坝体与气幕体系的自由度进行分块:

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_s & u_i & u_a \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中:下标 s 表示坝体结构; i 表示气幕单元与坝体的接触面; a 表示气幕单元的自由度.同样,根据自由度的分块对动力平衡方程中各系数矩阵进行分块.故系统的动力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{si} & 0 \\ m_{si}^T & m_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{si} & 0 \\ c_{si}^T & c_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_i \\ \dot{u}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{si} & 0 \\ k_{si}^T & k_{ii} + \tilde{k}_{ii} & k_{ia} \\ 0 & k_{ai} & k_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_i \\ u_a \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{ss} & m_{si} & 0 \\ m_{si}^T & m_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\tilde{u}}_s \\ \ddot{\tilde{u}}_i \\ \ddot{\tilde{u}}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_a \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: I 为气幕上游面与水的相互耦合作用矩阵; p_a

为作用在气幕上游面的动水压力.由于气幕的质量及阻尼都很小可以忽略,因此方程中质量及阻尼矩阵的相应项为零.

将式(2)展开得到两个方程:

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{si} \\ m_{si}^T & m_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{si} \\ c_{si}^T & c_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{si} \\ k_{si}^T & k_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{k}_{ii} & k_{ia} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_a \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{ss} & m_{si} \\ m_{si}^T & m_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\tilde{u}}_s \\ \ddot{\tilde{u}}_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$k_{ai}u_i + k_{aa}u_a = I p_a \quad (4)$$

由式(4)可以得到:

$$u_a = k_{aa}^{-1}I p_a - k_{aa}^{-1}k_{ai}u_i \quad (5)$$

可以得到在气幕隔震条件下的坝体动力平衡方程:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{U}} + [\boldsymbol{K} + \boldsymbol{K}_I]\boldsymbol{U} = \boldsymbol{L}\boldsymbol{P} - \boldsymbol{M}\ddot{\tilde{\boldsymbol{U}}} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 、 $\boldsymbol{C}$ 、 $\boldsymbol{K}$ 分别代表坝体结构自由度(含接触自由度)质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\boldsymbol{U}$ 为相应的位移向量; $\boldsymbol{L}$ 相当于流固耦合矩阵; $\boldsymbol{P}$ 为动水压力产生的附加荷载.其矩阵形式分别为

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -k_{ai}k_{aa}^{-1}I \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{P} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_a \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$\boldsymbol{K}_I$ 的矩阵形式(注意对气幕刚度有 $k_{ia} = k_{ai}^T$)为

$$\boldsymbol{K}_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tilde{k}_{ii} + \tilde{k}_I \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\tilde{k}_I = -k_{ai}^T k_{aa}^{-1} k_{ai}$$

式(8)为隔震气幕对坝体结构产生的耦合刚度矩阵,它反应了隔震气幕在坝体与水之间的隔震效果.

根据上述分析以及李立^[10]对气幕的处理方法并进行适当改进,对某双曲拱坝考虑气幕隔震进行计算,该拱坝最大坝高 278 m,厚高比 0.248,弧高比 2.50,顶拱中心角 89.11°.计算中坝址基岩的动弹性模量取 4.5 GPa,泊松比 0.25,地基采用无质量地基模型,混凝土动弹性模量 3.3 GPa,泊松比 0.167,容重 24 kN/m³,计算水深 275 m,水的密度 1.0 t/m³,水中声波速度 1440 m/s.计算以下 3 种工况:①库水不可压缩;②库水可压缩、库底采用全反射边界条件;③库水可压缩、库底采用全反射边界条件,坝体和库水之间具有 1 m 厚的气幕.最大动水压力计算结果见表 1.

表 1 最大动水压力

工况	不同地震波时最大动水压力/kPa				
	水平分量		竖向分量		
	人工波	Koyna	El. Centro	人工波	Koyna
1	352	280	432	213	140
2	539	373	1007	540	240
2	193	144	328	222	115

在气幕隔震作用下,地震中坝面动水压力显著降低.在表 1 中,水平地震分量作用下,相对水可压

缩时的动水压力降低幅度达 64.2%(人工波)、61.4%(Koyna)和 67%(El. Centro),竖向分量时降幅达 58.9%(人工波)和 52.1%(Koyna)。这说明水工气幕具有良好的隔震性能。动水压力的计算结果还表明:在水工气幕隔震下,动水压力不仅在数值上有了大幅度降低,而且其分布也更有利于拱坝抗震。最大动水压力并未出现在坝底,而是出现于坝体上部,离坝顶约 1/3 坝高处。在水平分布上,坝肩处的动水压力已降至非常低的水平,仅在拱圈中部约一半的范围内有较大动水压力。

表 2 给出了坝面的最大动应力。其中 Koyna 水平地震波的作用下上游拱的拉应力降低了 35.1%,而下游拱的拉应力降低了 31.7%;对竖向分量则分别为 9.3%和 9.0%。在人工地震水平分量的作用下上游拱的拉应力降低了 20.6%,而下游拱的拉应力降低了 18.7%;对竖向分量则分别为 29.9%和 30.6%。

表 2 气幕隔震时坝面的最大动应力

地震波	最大动应力/kPa							
	上游面				下游面			
	拱应力		梁应力		拱应力		梁应力	
	拉	压	拉	压	拉	压	拉	压
人工波(水平)	4 382	-4 453	2 732	-2 978	4 370	-4 293	3 006	-3 418
Koyna 波(水平)	3 761	-4 227	3 522	-3 319	3 917	-3 817	3 656	-3 597
人工波(竖向)	2 267	-2 722	2 521	-2 233	2 191	-2 712	2 499	-2 247
Koyna 波(竖向)	2 480	-2 995	2 539	-2 698	2 596	-2 927	2 554	-2 599
人工波(组合)	4 933	-5 219	3 717	-3 722	4 888	-5 077	3 909	-4 090

3 结 语

本文计算了某双曲拱坝在地震作用下,气幕隔震时坝库相互作用系统的动力反应,并且研究了气幕隔震的性能。计算结果显示,气幕隔震对动水压力、坝体应力的分布都具有显著的影响。气幕具有良好的隔震性能,对坝体在地震中的强迫振动响应有较大的抑制作用,对提高拱坝特别是高拱坝的抗震能力具有极大的工程价值。

参考文献:

[1] 朱德库,刘晓杰,马平. 空气弹簧及其控制系统[M]. 济南:山东科学技术出版社,1989.

[2] 易作刚. 宽频多维减振器的设计[J]. 激光与红外,1994,23(4):43~46.

[3] Mraz E S J. It's all in the springs[J]. Machine Design,1998,(7):80~86.

[4] 董文才,郭日修. 气幕减阻研究进展[J]. 船舶力学,1998,2(5):73~78.

[5] 朱云翔,郭日修. 气幕对弹性球壳振动影响的探讨[J]. 振动工程学报,1996,9(3):237~243.

[6] 赵洪伦,张广世. 高速客车空气弹簧非线性横向刚度特性研究[J]. 铁道学报,1999,21(6):30~33.

[7] 张文华,强杰. 空气弹簧在钻井液振动筛上的使用性能浅析[J]. 石油机械,1995(23):39~42.

[8] 林皋. 混凝土大坝的抗震安全评价与地震作用的控制技术[A]. 《高拱坝设计与计算分析》高级研讨班论文集(二)[C]. 北京:水利电力出版社,2000.

[9] 朱云翔,郭日修. 气液两相流理论与气幕降噪[J]. 力学与进展,1994,16(6):1~7.

[10] Lee Li. A seismic isolation measure for dams[A]. Proceeding of Earthquake Engineering Tenth World Conference[C]. Balkema, Rotterdam, 1992. 2247~2250.

[11] 包亚尔斯基 B M,科尼克 B B. 契尔克依和米阿特林电站拱坝气幕的设计[J]. 水工建设,1992(10):6~9.

[12] 科尼克 B B,包亚尔斯基 B M. 米阿特林水电站拱坝试验性气幕的施工安装[J]. 水工建设,1992(10):9~10.

[13] 包亚尔斯基 B M,格勒利斯 B K. 克里沃波罗什电站大坝试验性气幕的构造[J]. 水工建设,1992(10):11~13.

[14] 萨维诺夫. 带空气帷幕的水工建筑物抗震性数学模拟和理论研究[J]. 水工建设,1992(10):16~18.

[15] 阿西科夫 B N. 带气幕的水工建筑物与水介质相互作用现象的物理模拟试验[J]. 水工建设,1992(10):18~24.

[16] 格勒利斯 B K,包亚尔斯基 B M. 克里沃波罗什电站大坝的试验性气幕的原型试验[J]. 水工建设,1992(10):25~28.

(收稿日期 2004-10-26 编辑 熊水斌)

· 简讯 ·

《全国大中型水利工程闸门及启闭机更新改造规划报告》通过验收

2004 年 11 月 22 日,由设在河海大学的水利部水工金属结构安全监测中心编制完成的《全国大中型水利工程闸门及启闭机更新改造规划报告》在北京召开了课题验收会议。验收专家组由水利部规划计划司、建设与管理司、综合事业局、水利水电规划设计总院、海河水利委员会、淮河水利委员会、水利部水工金属结构质量检验检测中心、江苏省水利厅、辽宁省水利厅、河海大学等单位的 12 名专家组成。专家组认真听取了课题组的汇报,详细查询了规划项目的主要内容,并观看了“全国大中型水利工程闸门及启闭机信息管理系统”的演示,对规划报告的编制工作给予了充分的肯定,对规划报告成果给予了高度评价,认为《全国大中型水利工程闸门及启闭机更新改造规划报告》成果符合项目任务书的要求,同意通过验收。(编辑部供稿)