

重力坝坝体-库水-气幕相互作用的振动台试验

隆文非 张帆 舒仲英 刘浩吾

(四川大学水利水电学院 四川 成都 610065)

摘要 结合某碾压混凝土重力坝工程,模拟了坝体-库水-气幕的动力相互作用,振动台模型试验中测试了大坝自振频率、坝面动水压力、坝面加速度和上、下游坝面动应力响应、坝顶位移等,研究了气幕对坝面动水压力、加速度、位移等的影响,并将库水有限元模型的计算结果与模型试验成果进行比较。结果表明,气幕对坝面动水压力及其动力特性均有影响,坝前气幕的良好压缩性能对地震效应有很大的缓冲作用,能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 重力坝 振动台动力模型试验 气幕隔震 动水压力

中图分类号:TV642.3 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2006)05-0010-04

Vibration table model tests on dam body-reservoir water-air curtain interaction of a gravity dam/LONG Wen-fei, ZHANG Fan, SHU Zhong-ying, LIU Hao-wu (College of Hydraulic and Hydro-electric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In combination with a roller compacted concrete gravity dam project, model tests were performed to measure the self-vibration frequency of the dam body, hydrodynamic pressure and acceleration of the dam surface, dynamic stress response of the upper and lower dam surface, displacement at the top of the dam, etc. The influences of the air curtain on the hydrodynamic pressure, acceleration, and displacement of the dam surface are analyzed, and a comparison is carried out between the test data and calculated result by the finite element model for reservoir water. The result shows that the air curtain is of certain influences on the hydrodynamic pressure and dynamic behavior of the dam surface. The good compression performance of the air curtain in front of the dam has obvious cushioning effect on earthquakes, and it is helpful to decrease the hydrodynamic pressure and dynamic stress of the dam body. Therefore, the aseismic performance of the dam body is greatly improved.

Key words: gravity dam; vibration table dynamic model test; earthquake isolation by air curtain; hydrodynamic pressure

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、运输以及船舶工业中都有大量气体被用于减震隔震的例子^[1-5]。在国家“九五”科技攻关中,大连理工大学提出了在拱坝结构缝中设置消能减震装置^[6]。研究表明,气幕对结构的强迫振动响应有较大的抑制作用^[7]。1992年,李立^[8]首次用势流理论和波意尔理论,分析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且具有铅直上游面,采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的钢板模拟坝体,利用有机玻璃气室加气实现气幕,进行初位移激振试验。试验结果表明气幕使模拟坝的动水压力减小了70%,使系统的振动频率有所增加,初步验证了气幕的减震作用。

本文结合某碾压混凝土重力坝进行了振动台动力模型试验,模拟坝体-库水-气幕的动力相互作用,测得坝面动水压力、加速度、位移及应变等,同时应用有限元模型进行数值分析。试验结果与计算成果的对比,验证了气幕隔震对坝体动水压力、加速度、位移等均有一定的影响。

1 重力坝坝体-库水-气幕相互作用系统的数值模拟

在重力坝坝体-库水-气幕相互作用系统中,坝体和库水单元是线弹性的,气幕单元具有非线性。对于整个系统,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对于气幕而言仅计入气幕的刚度矩阵。为简化方程,与地基-坝

体有限元系统中无质量地基模型对地基的处理一样,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:

$$\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{u}_s, \boldsymbol{u}_i, \boldsymbol{u}_a)^T \quad (1)$$

式中:下角标_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

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_{ss} & \boldsymbol{m}_{si} & 0 \\ \boldsymbol{m}_{si}^T & \boldsymbol{m}_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{u}}_s \\ \ddot{\boldsymbol{u}}_i \\ \ddot{\boldsymbol{u}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_{ss} & \boldsymbol{c}_{si} & 0 \\ \boldsymbol{c}_{si}^T & \boldsymbol{c}_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{u}}_s \\ \dot{\boldsymbol{u}}_i \\ \dot{\boldsymbol{u}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{k}_{ss} & \boldsymbol{k}_{si} & 0 \\ \boldsymbol{k}_{si}^T & \boldsymbol{k}_{ii} + \tilde{\boldsymbol{k}}_{ii} & \boldsymbol{k}_{ia} \\ 0 & \boldsymbol{k}_{ai} & \boldsymbol{k}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_s \\ \boldsymbol{u}_i \\ \boldsymbol{u}_a \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_{ss} & \boldsymbol{m}_{si} & 0 \\ \boldsymbol{m}_{si}^T & \boldsymbol{m}_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\tilde{\boldsymbol{u}}}_s \\ \ddot{\tilde{\boldsymbol{u}}}_i \\ \ddot{\tilde{\boldsymbol{u}}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \boldsymbol{p}_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{l}$ 为气幕上游面与水的相互耦合作用矩阵; $\boldsymbol{p}_a$ 为一组作用在气幕上游面的动水压力值。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:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_{ss} & \boldsymbol{m}_{si} \\ \boldsymbol{m}_{si}^T & \boldsymbol{m}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{u}}_s \\ \ddot{\boldsymbol{u}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_{ss} & \boldsymbol{c}_{si} \\ \boldsymbol{c}_{si}^T & \boldsymbol{c}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{u}}_s \\ \dot{\boldsymbol{u}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{k}_{ss} & \boldsymbol{k}_{si} \\ \boldsymbol{k}_{si}^T & \boldsymbol{k}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_s \\ \boldsymbol{u}_i \end{bmatrix} + [\tilde{\boldsymbol{k}}_{ii} \quad \boldsymbol{k}_{ia}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_i \\ \boldsymbol{u}_a \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_{ss} & \boldsymbol{m}_{si} \\ \boldsymbol{m}_{si}^T & \boldsymbol{m}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\tilde{\boldsymbol{u}}}_s \\ \ddot{\tilde{\boldsymbol{u}}}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{和} \quad \boldsymbol{k}_{ai} \boldsymbol{u}_i + \boldsymbol{k}_{aa} \boldsymbol{u}_a = \boldsymbol{l} \boldsymbol{p}_a \quad (4)$$

由式(4)可以得到:

$$\boldsymbol{u}_a = \boldsymbol{k}_{aa}^{-1} \boldsymbol{l} \boldsymbol{p}_a - \boldsymbol{k}_{aa}^{-1} \boldsymbol{k}_{ai} \boldsymbol{u}_i \quad (5)$$

$$\text{则} \quad \boldsymbol{M} \ddot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{C} \dot{\boldsymbol{U}} + [\boldsymbol{K} + \boldsymbol{K}_1] \boldsymbol{U} = \boldsymbol{L} \boldsymbol{P} - \boldsymbol{M} \ddot{\tilde{\boldsymbol{U}}} \quad (6)$$

式(6)为在气幕隔震条件下的坝体动力平衡方程,其中: $\boldsymbol{M}$ 、 $\boldsymbol{C}$ 、 $\boldsymbol{K}$ 分别为由坝体结构自由度(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, $\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\boldsymbol{k}_{ai} \boldsymbol{k}_{aa}^{-1} \boldsymbol{l} \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{P}$ 为动水压力产生的附加荷载,

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{p}_a \end{bmatrix}; \boldsymbol{K}_1 \text{ 为隔震气幕对坝体结构产生的耦合刚度矩阵,它反映了隔震气幕在坝体与水之间的隔震效果} \boldsymbol{K}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\boldsymbol{k}}_{ii} + \tilde{\boldsymbol{k}}_1 \end{bmatrix}, \text{其中} \tilde{\boldsymbol{k}}_1 = -\boldsymbol{k}_{ai}^T \boldsymbol{k}_{aa}^{-1} \boldsymbol{k}_{ai}, \text{对气幕刚度有} \boldsymbol{k}_{ia} = \boldsymbol{k}_{ai}^T.$$

2 重力坝坝体-库水-气幕系统的振动台动力模型试验

进行试验的某碾压混凝土重力坝,最大坝高190.5 m,正常蓄水位时的坝前库水深度为185.2 m,坝体动态弹性模量为26 GPa。重力坝坝体-库水-气幕相互作用系统见图1。气幕细部结构见图2。

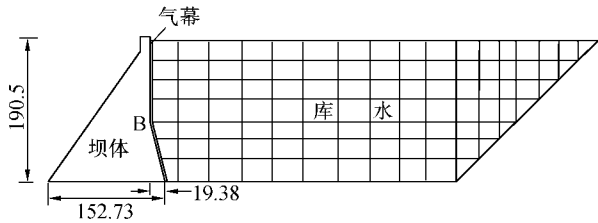


图1 某重力坝坝体-库水-气幕相互作用系统(单位:m)

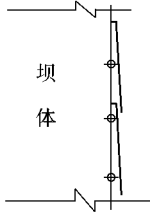


图2 气室结构细部

试验在中国核动力研究设计院的大型三向六自由度振动台上进行,该振动台的主要性能指标为:台面尺寸6 m×6 m,最大加载600 kN,最大水平加速度3g,最大垂直加速度3g。工作频段正弦0.1~50 Hz,随机频段0.1~80 Hz。

根据试验要求,对重力坝坝体-库水-气幕相互作用系统进行相似分析,经过比较,最终选择模型试验的几何比尺 $C_l = 180$ 。根据几何比尺及相似分析,研制相应的重力坝模型仿真材料,模型采用专门研制的合成脆性材料,按1:180的比尺浇筑、雕刻而成。模型材料以重晶石粉、重晶砂、膨胀珍珠岩、矿物油等按一定配比、工艺制作。该材料性能稳定,物理力学性能能分别在线弹性段和塑性段与混凝土材料相似^[11-12]。

按相似理论,主要模拟相似常数为弹性模量比尺 $C_E = 93.6$ 。根据试验只能在常重力场下进行以及库水液体用天然水模拟的实际情况,加速度比尺 C_a 和密度比尺 C_ρ 均为1。根据动力模型试验相似率要求,求得频率比尺 C_f 、应力(动水压力)比尺 C_σ 分别为0.0545和180。

水库库体由钢制水槽模拟,水槽顶长3.2 m、底长

2m,宽 0.5m。坝段与水槽壁空出约 2mm 空隙,用柔性材料止水,尽可能减小槽体振动对结构的影响。

试验在大型地震模拟振动台上进行,模型的关键部位布置了动水压力计、加速度传感器和应变片,分别测量动水压力、加速度及坝体应力的变化情况,另外还设置了电涡流位移传感器,测坝顶的相对位移^[13-14]。

施加于大坝-库水-气幕相互作用系统的地震波分别为 Koyna 地震波和 Elcentro 地震波等。为测定大坝自振频率,在空库、低水位和满库(正常高水位)条件下,分别输入了幅值 0.1g 和 0.3g、持续时间 130s 的白噪声,经模态识别可得大坝自振频率。在有、无气幕情况下分别进行试验。

3 试验结果及分析

试验测定了大坝自振频率、坝面动水压力、坝面加速度和上、下游坝面动应力响应、坝顶位移等。计算分析中以三维有限元离散坝体,分别计算了与模型试验相同条件下的自振频率、坝面动水压力和上下游坝面动应力、坝面加速度和坝顶位移^[15-16]。由于本文的主要目的在于探讨气幕对坝体的隔震影响,因此文中只列出了相应成果进行讨论。

3.1 自振特性

表 1 列出了坝体自振频率的试验值与计算值。库水对重力坝自振频率的影响是十分显著的,气幕对库水的自振频率也有一定的影响,试验成果和库水有限元计算结果十分接近。1 阶和 2 阶均为以水平振动为主的振型,满库和空库的前 4 阶振型很相似,从试验结果得到的阻尼比为 0.04,将此结果对模型进行模态分析。但模型试验没有考虑坝基的影响,而且水库库体是采用钢质材料制作的。

表 1 模型坝体自振频率 Hz

工 况	顺河向第 1 阶	顺河向第 2 阶	竖向第 1 阶
空库(计算)	50.55	86.59	111.27
空库(试验)	55.45	97.89	131.73
满库(计算)	35.06	64.68	95.17
满库(试验)	38.80	67.50	100.71
满库+气幕(计算)	39.50	69.89	104.01
满库+气幕(试验)	41.28	72.38	109.23

3.2 动水压力响应

本试验在重力坝上游坝段不同高程布置了 10 个动水压力计。试验中对空库、低水位、满库情况输入 Koyna 和 Elcentro 地震波。从试验结果来看,两种地震波作用下,动水压力反应相差不大,并且总的趋势比较一致。

图 3 给出了同时输入顺河向、竖向 Koyna 地震波时(顺河向、竖向地震波幅值分别为 0.341g 和 0.227g),满库水位在有、无气幕隔震情况下的坝面

动水压力分布,并与计算结果进行了比较。结果表明:有气幕时的动水压力试验值较无气幕时平均减少 66.87%,动水压力计算值平均减少 70.71%。分析计算值与试验值的差异,认为试验时其影响因素较多,如地震波的输入、边界条件的影响以及气室的模拟等,尽管存在一定的差异,但动水压力总的分布趋势是一致的。

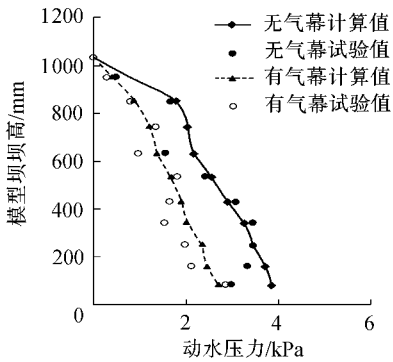


图 3 坝面动水压力分布

从其他工况来看,总体趋势是同时输入顺河向、竖向 Koyna 地震波对动水压力的影响强于同时输入顺河向、竖向 Elcentro 地震波。当输入相同幅值的顺河向地震波时,Elcentro 地震波对动水压力的影响强于 Koyna 地震波。不论是 Koyna 地震波还是 Elcentro 地震波,随着地震波振幅的加大,对动水压力的影响越大。在有气幕作用下,Koyna 地震波的作用较 Elcentro 地震波更明显,原因在于 Koyna 地震波的高频成分多。

3.3 加速度响应

试验中对空库、低水位、满库情况下按设计试验工况进行了测试。分析各种工况下加速度反应的测试结果,试验结果表明:加速度反应只有在同时输入顺河向和竖向地震波时反应比较大,在输入顺河向地震波时,随着输入幅值的增大,加速度反应的变化很小。但无论是在哪种工况下,加速度反应的趋势是基本一致的。图 4 给出了同时输入顺河向、竖向 Koyna 地震波时(幅值分别为 0.341g 和 0.227g),满

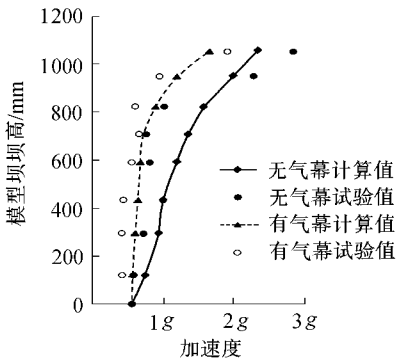


图 4 坝面加速度分布

库水位在有、无气幕情况下的坝面加速度分布。结果表明:有气幕时的坝面加速度较无气幕时的小,试验平均值与计算平均值存在一定的误差。

3.4 位移响应

试验中,为方便安装,将电涡流位移传感器布设在坝顶的下游侧,因此分析坝顶下游侧的位移变化情况。从各种试验工况所得的位移结果来看,蓄水工况较空库工况下产生的位移更大,满库时较低水位时大。输入地震强度越高,位移越大;其他条件相同时,Koyna地震波较Elcentro地震波对位移的影响更大。气幕隔震工况下,不论输入Koyna地震波还是Elcentro地震波,位移都明显下降,表明气幕隔震对坝体位移有一定的作用。从总体来看,无论哪种工况,试验所得的位移幅值均较小,均不超过1 mm,但较计算值略大。

3.5 结果分析

动水压力、加速度、位移等的试验结果与计算结果均存在不同程度的差异,其原因在于试验中库水采用自来水,气室采用有机玻璃,气室中气体介质采用空气,坝与库体采用柔性材料连接。在数值模拟时由于所采用的有机玻璃相当薄,忽略了气室本身的材料,没有考虑坝体与库体之间的柔性连接。这些原因造成了试验值与计算值存在一定的误差,但从动水压力、加速度、位移等的分布情况来看,是满足一般规律的。

4 结 语

本文在大型振动台上测试了重力坝坝段在各种地震工况下的动水压力、加速度、位移等,并在有、无气幕的情况下进行了讨论。研究结果表明,动水压力分布规律的数值模拟结果和模型试验结果是基本吻合的。试验还表明,气幕对动水压力和加速度的影响显著,特别是动水压力在有气幕的情况下可减少65%左右,气幕具有良好的隔震性能,且对坝体在地震时的强迫振动响应有较大的抑制作用,对提高坝的抗震能力具有很大的工程推广价值。在今后的试验中需要对气幕进行改进,尤其是气室材料和形状。

参考文献:

[1] MRAZ ED S J. It's all in the springs[J]. Machine Design, 1998 (7): 80-86.
[2] 董文才,郭日修.气幕减阻研究进展[J]. 船舶力学, 1998 (5): 73-78.
[3] 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 (3): 237-243.

[4] 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.
[5] 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(3): 39-42.
[6] 林皋.混凝土大坝的抗震安全评价与地震作用的控制技术[C]//清华大学高坝大型结构国家专业实验室.《高拱坝设计与计算分析》高级研讨班论文集(二).北京:清华大学, 2000.
[7] 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.
[8] Li Lee. A seismic isolation measure for dams[C]//Proceeding of Earthquake Engineering Tenth World Conference. Rotterdam: Balkema, 1992 2247-2250.
[9] 隆文非,刘浩吾.大坝气幕隔震效果的数值模拟分析[J].四川大学学报:工程科学版, 2005 37(2): 38-42.
[10] 张晓丽,刘浩吾.坝减震气幕实验研究[J].中国安全科学学报, 2004 14(11): 104-108.
[11] 李德玉,张伯艳,王海波,等.重力坝坝体-库水相互作用振动台试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报, 2003 1(3): 216-220.
[12] 宫必宁.重力坝地震动水压力试验研究[J].河海大学学报:自然科学版, 1997 25(1): 98-102.
[13] 李德玉,王海波,涂劲,等.拱坝坝体-地基动力相互作用的振动台动力模型试验研究[J].水利学报, 2003(7): 30-35.
[14] 隆文非,刘浩吾,舒仲英.气幕隔震技术在水利水电工程中的运用初探[J].水利水电科技进展, 2004 24(增刊): 10-12.
[15] 窦兴旺,林义兴,夏颂佑,等.盖层上高堆石坝振动台试验与动力数值分析验证研究[J].水利水电科技进展, 2000 20(6): 19-22.
[16] 林义兴.紧水滩拱坝动力特性及地震响应研究[J].水利水电科技进展, 1996 16(3): 42-46.

(收稿日期 2005-09-10 编辑 骆超)

《水利水电科技进展》征订启事

《水利水电科技进展》由河海大学主办,主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

本刊由邮局发行,邮发代号 28-244,2007 年每期定价 8 元,全年 6 期共 48 元。可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号《水利水电科技进展》编辑部。联系电话:025-83786335, E-mail: jz@hhu.edu.cn, http://kkb.hhu.edu.cn