

坝—水相互作用中水的压缩性影响研究

高瑞强¹, 官必宁¹, 郭建平²

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 胜利油田胜利工程建设有限责任公司, 山东 东营 257011)

摘要: 利用有限元软件ADINA, 通过对几个坝水耦合的例子进行具体的分析, 得出库水压缩性在坝—水相互作用中对坝体自振频率、振型和坝面动水压力的影响。

关键词: 水的压缩性; 自振频率; 振型; 动水压力

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2008)01—0106—03

Study on Effects of Compressibility of Water in Dam-water Interaction

GAO Rui-qiang¹, GONG Bi-ning¹, GUO Jian-ping²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Shengli Oilfield Shengli Engineering Construction Co. Ltd., Dongying, Shandong 257011, China)

Abstract: Through analyzing several examples of dam-water coupling specifically, the effects of the compressibility of water upon the frequency of natural vibration, vibration mode and the hydrodynamic pressure in dam-water interaction are obtained by using the FEM software ADINA.

Keywords: compressibility of water; frequency of natural vibration; vibration mode; hydrodynamic pressure

0 引言

在坝水相互作用过程中, 是否可以忽略库水可压缩性影响一直是一个有争议的问题。与不考虑库水可压缩性相比, 考虑库水可压缩性时的分析要复杂的多。考虑库水可压缩性的影响之后, 将使得原来所需求解的拉普拉斯方程转为相应的波动方程, 在求解方面增加了很大的难度, 但在最近几年的研究当中, 尤其是在单纯考察动水压力大小时, 很多学者都考虑了水的可压缩性。本文就库水压缩性在坝—水相互作用中的具体影响作进一步的探讨。

本文利用在流固耦合求解方面有卓越表现的有限元软件ADINA作为分析工具, 分析坝—水相互作用中库水压缩性对坝体自振频率、振型和坝面动水压力的影响。

1 分析方法

对于线性流固耦合系统(线弹性结构和理想可压缩流体)的有限元动力分析, 通常采用的有限元格式有两类, 一类是结构和流体均以位移矢量为场变量的位移—位移格式^[1]; 另一类是以结构位移矢量和流体标量为场变量的混合型格式, 如: 位移—压力格式^[1]、位移—位移势格式^[2]和位移—速度势格式^[3]。对于位移—位移格式, 其有限元方程与结构动力学方程一样, 但是, 这一格式除了流体节点自由度多这一不利因素之外, 还由于流体位移模式无法保证流体运动无旋, 使得流体刚度矩阵奇异, 频域分析时会出现大量伪模态^[4,5], 从而给实际应用带来困难; 对于混合型格式, 由于流

体场变量已满足运动无旋的条件, 因而不会出现流体矩阵奇异的问题, 此外, 流体节点自由度也只有位移—位移格式的1/3。但是, 系统有限元方程的性质发生了变化, 其中位移—压力型和位移—位移势型有限元方程是非对称的, 频域分析将涉及非对称特征值问题, 这不利于实际应用。而位移—速度势型有限元方程则可表成对称形式, 但包含耦合效应产生的一阶导数项。本文使用的分析工具ADINA采用的是位移—速度势格式。下面就位移—速度势有限元格式作一具体分析。

1.1 流体运动方程与边界条件

在直角坐标系中, 理想流体小扰动的的基本方程表示为:

$$\text{运动方程: } \nabla^2 \varphi = \frac{1}{C^2} \psi \quad (\text{流体可压缩}) \quad x \in V_f \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (\text{流体不可压缩}) \quad (2)$$

$$\text{本构关系: } P = -\rho_f \left(\varphi + U_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\text{边界条件: 固壁条件 } \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad x \in S_B \quad (4)$$

$$\text{自由表面条件 } \varphi = 0 \quad x \in S_f \quad (5)$$

$$\text{无穷远条件 } \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{c} \varphi = 0 \quad (r \rightarrow \infty) \quad (6)$$

上列各式中 φ 为速度势; P 、 ρ_f 为流体压力和密度; U_i 为时均流速的三个分量。流体声速 $C = \sqrt{K/\rho_f}$, K 为流体体积弹性模量。

1.2 流固耦合系统的基本方程

对结构流体组成的耦合系统, 在流固交界面上应保持速

收稿日期: 2007-08-10

修回日期: 2007-09-14

作者简介: 高瑞强(1980—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 主要从事水工结构方面的研究。

度和应力的连续条件,对理想流体,要求法向速度和面力在交界面上是连续的,而切向速度则允许间断,即:

$$u_{nf}^s = \frac{\partial \varphi}{\partial n} + U_{\tau_a} \frac{\partial (u_{\tau_i}^s n_i)}{\partial \tau_a} \quad x \in S_c \quad (7)$$

$$\sigma_{ij}^s n_j = \rho_f (\varphi + U_{\tau_a} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_a}) n_i \quad x \in S_c \quad (8)$$

式中: $U_{\tau_a} \partial \varphi / \partial \tau_a (\alpha = 1, 2)$ 分别为时均流速和扰动速度沿结构表面的两个主切线方向的分量。

有了连接条件(7)、(8),综合流体基本方程(1)~(6)和结构基本方程就是流固耦合系统的基本方程。

1.3 流固耦合系统的有限元格式

用伽辽金法把流固耦合系统的基本方程转化成等效积分的弱形式^[6],将空间域离散为有限个单元体,在单元内进行插值,整理后可得到下面的式子:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Q \\ Q^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \varphi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & Q_1 \\ Q_2 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中: $[M_s]$ 、 $[K_s]$ 、 $[F_s]$ 为与结构有关的质量、刚度和载荷矩阵; $[M_f]$ 、 $[K_f]$ 为与流体有关的质量、刚度矩阵,它们都可用标准的有限元方法得到; $[Q]$ 为流固交界面上的耦合矩阵; $[Q_1]$ 、 $[Q_2]$ 为与流体流速有关的耦合矩阵,可沿流固交界面积分集成得到^[7]。

式(9)即是流固耦合在一般情况下的位移—速度势格式有限元方程,它体现了流体作用使结构产生位移和变形,结构的位移和变形又影响流体运动这样一个耦合事实。

2 库水压缩性影响分析

2.1 库水压缩性对坝体自振频率和振型的影响

取一重力坝,坝高 $H=105\text{ m}$,坝顶宽 10 m ,坝底宽 80 m ,上游坝面竖直,下游坝坡 $10/7$,沿坝轴线方向截取 100 m 。坝体混凝土弹模 $E=1.96\times 10^{10}\text{ N/m}^2$,密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.2 ,水体密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$,水中纵波传播速度 $c=1\,440\text{ m/s}$,水深 100 m ,水域长度取 500 m 。不考虑库水表面重力波和坝基的影响。坝体和水体均采用空间 8 结点等参单元离散,如图 1 所示。

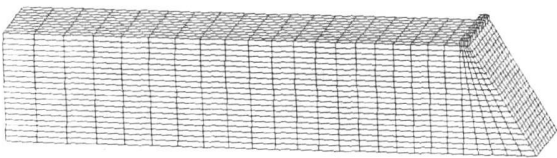


图 1 重力坝—库水耦合有限元模型

计算得到各种情况见表 1。由表中数据可知空库时坝体自振频率最高,当水库蓄水时,不考虑库水压缩性的坝体自振频率较考虑库水压缩性时高。考虑库水的压缩性时随着阶数的增加自振频率满库比空库下降的比例有增大的趋势,但不是单调递增而是波动的;当不考虑库水的压缩性时相对比较稳定。库水对坝体的自振频率的影响还与库水的深度有关,坝前水位越高库水对坝体自振频率的影响就越大。

表 1 100 m 水深坝水系统频率 rad/s

阶数	1	2	3	4	5
空库	20.884	25.835	31.177	50.698	57.450
库水可压缩	17.796	23.001	25.701	25.712	28.128
库水不可压缩	18.187	25.721	28.362	46.052	55.383
库水可压缩时满库比空库下降的比例/%	14.8	11.0	17.6	49.3	51.0
库水不可压缩时满库比空库下降的比例/%	12.9	0.4	9.0	9.2	3.6

图 2~4 给出了不同情况下的坝体前五阶振型。可以发现当考虑库水的压缩性时,坝体振型与空库时的相差较大,而库水不可压缩时坝体振型和空库时的坝体振型基本上是一致的,只有第一阶略有不同。按文献[8]的观点,用坝体无水时的振型代替库水不可压缩时的振型是合理的。

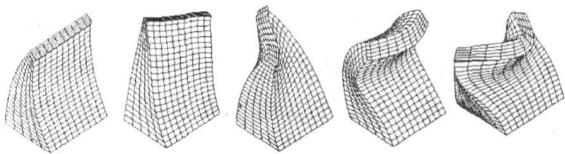


图 2 空库坝体振型

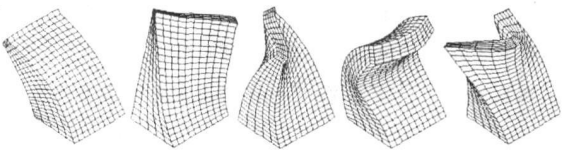


图 3 库水不可压缩时坝体振型

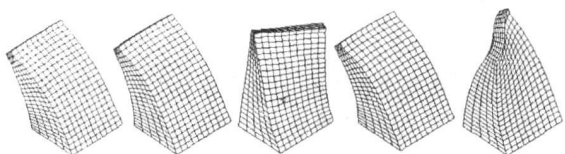


图 4 库水可压缩时坝体振型

2.2 库水压缩性对坝面动水压力的影响

按照畑野正的实验说明,动水压力和地震输入频率是紧密相关的,而库水不可压缩的有限元模型中,动水压力与地震干扰频率是无关的。下面就具体的算例分析动水压力与地震输入频率的关系,分析忽略库水压缩性后会对坝面动水压力产生多大的影响。

取一重力坝,坝高 $H=175\text{ m}$,坝顶宽 15 m ,坝底宽 120 m ,上游坝面竖直,下游坝坡 $1:0.75$ 。坝体混凝土弹模 $E=2.352\times 10^{10}\text{ N/m}^2$,密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.17 ,水体密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$,水中纵波传播速度 $c=1\,440\text{ m/s}$,水深 160 m ,水域长度取 480 m 。假设地基是刚性的,不考虑库水表面自由波的影响,由于地震波作用产生水平激振加速度 $\ddot{u} = \cos 2\pi f t$,其中 f 取 1.2 Hz , 1.85 Hz , 2.55 Hz ,计算的各种情况见表 2。

表 2 坝体底部动水压力		M P a	
频 率/H z	1. 2	1. 85	2. 55
库水可压缩	0. 165	3. 01	0. 100
库水不可压缩	0. 150	1. 27	0. 108

表中数据表明:地震波激振频率和库水一阶频率(1.85 Hz) 相接近时,考虑库水压缩性与不考虑库水压缩性坝体底部动水压力值差别较大,考虑库水的压缩性时的值明显偏大;当激振频率小于库水一阶频率时,两种情况得到的值相差不大。这就说明当地震激振频率接近库水频率时水的压缩性不能忽略。可是地震波是一个随机波,不可能以某一固定频率运动,所以在计算坝面动水压力时必须考虑水的压缩性影响。

3 结 语

本文通过分析两个具体的实例来探讨库水压缩性对坝体自振频率、振型和坝面动水压力的影响,初步得出以下结论:(1) 考虑库水压缩性时坝体自振频率的下降值大于不考虑库水压缩性;(2) 不考虑库水压缩性时的坝体振型和空库坝体振型大致相同;(3) 当地震激振频率接近库水共振频率时不可忽略库水的压缩性。

坝—水相互作用过程中影响坝面动水压力的因素很多,本文只是对库水压缩性进行了初步的探讨,且在考虑库水的压缩性时有诸多因素也是不能忽略的,如文[9]中提到的,库底及岸坡淤积的吸能效应;邻近坝体的水库岸坡实际地形的

不规则反射影响;坝体本身的动态变形等。这些都有待进一步的研究。

参考文献:

[1] Zienkiewicz O C, Bettess P. Fluid-structure dynamic interaction and wave force. Introduction to numerical treatment[J]. Int. J Num Meth Engng, 1978, 13: 1-16.

[2] Zienkiewicz O C, Bettess P. Fluid-structure dynamic interaction and some unifind approximation processes[J]. Proc fifth Int on unification of finite element, finite difference and calculus of variables, univ. of connecticut, 1980: 119-145.

[3] 戴大农. 流固耦合系统动力分析的若干基本问题与数值方法[D]. 清华大学博士论文, 1988.

[4] Handi M A, Oussent Y, Verchery G A. Displacement method for analysis of vibration of coupled fluid-structure systems[J]. Int. J Num Emgng, 1978, 13(1): 139-150.

[5] 刑京堂. 流固耦合振动分析的有限元与子结构—子区域方法的理论及数值计算研究[D]. 清华大学博士论文, 1984.

[6] 王勖成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[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, 26(1): 27-34.

[8] 迟世春, 顾淦臣. 考虑水体压缩性与不考虑水体压缩性坝系统基频及振型的比较[J]. 华北水利水电学院学报, 1995, 16(1).

[9] 陈厚群, 候顺载, 杨大伟. 地震条件下拱坝库水相互作用的试验研究[J]. 水利学报, 1989, 20(7): 29-39.

(上接第 100 页)

(4) 建立生态水利体系, 促进人与自然的和谐发展

生态水利^[11]是人类发展进入更高阶段的目标,是在工程水利、资源水利、环境水利等基础上发展起来的,更能体现人与自然和谐的一种新型水利发展模式。研究生态水利的内涵,改变传统水利建设观念,进行生态水利建设,才能提供人与自然和谐发展的环境,有效保障流域生态系统与社会经济系统的协调,是全面建设和谐社会的重要基础。

参考文献:

[1] 汪恕诚. 水环境承载能力分析与调度[R]. 2001.

[2] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[3] 王顺久, 侯 玉. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 9-11.

[4] 何俊仕, 尉成海, 王教河. 流域与区域相结合水资源管理理论与

实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[5] 王 浩. 水利建设边际成本与边际效益评价[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[6] 左其亭, 吴泽宁. 可持续水资源管理量化研究的关键问题[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(3): 1-4.

[7] 汪恕诚. 资源水利[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.

[8] 张 范. 从产权角度看水资源优化配置[J]. 中国水利, 2001(6): 38-39.

[9] Mark W. Rosegrant and Hans P. Binswanger, Markets in Tradeable Water Right: Potential for Efficiency Gains in Developing Country Water Resource Allocation, World Development, 1994, 22(11).

[10] 乔世珊, 万育生, 姜广斌. 坚持科学发展观, 推进建设项目水资源论证工作[J]. 中国水利, 2005, (1): 45-47.

[11] 李 戡, 刘静玲, 杨志峰. 生态水利与城市水资源科学配置[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 8-10.