

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.010

# 不同库水模型对高拱坝动力特性的影响

赵兰浩, 李同春, 牛志伟

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 给出了 3 种模型及不同情况下高拱坝动力特性的数值求解方案, 并结合实际工程分析了不同库水模型对高拱坝动力特性所产生的影响. 计算和分析结果表明: 不同库水模型对坝体的自振频率、振型参与系数和振型等动力特性的影响程度相差较大, 可压缩库水模型最能真实地反映库水的特性和库水对坝体动力特性的影响, 可采用可压缩库水模型来求解高拱坝的动力特性.

关键词: 库水模型; 可压缩性; 高拱坝; 动力特性

中图分类号: TV312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2009)01-0048-04

1933 年, Westergaard<sup>[1]</sup>对坝面动水压力以及坝面动水压力对坝体地震反应的影响进行了开创性研究. 之后, 许多研究者都对该问题进行了研究. 由于计算工具和计算方法的局限性, 初期研究一般都采用简化模型. 随着计算机性能的不断提高, 多种数值方法开始应用于坝面动水压力分析, 计算模型也不断得到完善. 目前, 有些计算模型已考虑了坝体和库水的动力相互作用、库水可压缩性等因素. 然而, 一些简化模型由于计算过程简单, 至今仍广泛应用于实际工程, 其中应用最广的是韦斯特伽特附加质量模型. 该模型虽然计算过程简单, 但过分夸大了坝面动水压力对坝体的影响. 从拱坝-库水相互作用的试验研究结果来看, 附加质量可以折半取用<sup>[2]</sup>, 但缺乏理论依据. 而对于给定的坝体-库水-基岩系统, 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, 不同学者<sup>[3-4]</sup>得到的结论不尽相同. 20 世纪 80 年代开展的中美科技合作项目“拱坝地震反应的相互作用”<sup>[5]</sup>, 对响洪甸、泉水、Monticello、东江、龙羊峡等拱坝进行了一系列现场激振试验, 取得了重要进展, 但遗憾的是并未获得是否应该考虑库水可压缩性以及如何考虑的明确结论.

近年来, 对拱坝和库水相互作用问题的很多研究是在时域内开展的, 研究的主要内容是动水压力影响下坝体的动力反应. 如: 陈和群等<sup>[6]</sup>用水体位移元求解了坝体与库水的动力耦合问题; 杜修力等<sup>[7]</sup>提出了拱坝-可压缩库水-地基地震波动反应分析方法; 石建军等<sup>[8]</sup>考察了不同库水模型对拱坝动力反应的影响. 实际上, 高拱坝动力特性的研究同样是拱坝设计中非常重要的一个方面. 目前, 拱坝设计规范推荐的计算拱坝动力反应的反应谱法也正是基于拱坝系统动力特性的. 迟世春等<sup>[9]</sup>给出了一种求解考虑库水可压缩性的坝体动力特性的方法, 但由于计算需要迭代, 求解效率不高.

为了探讨不同库水模型对高拱坝动力特性的影响, 本文首先给出了韦氏附加质量、不可压缩库水、可压缩库水 3 种库水模型及 3 种情况下高拱坝动力特性的数值求解方案, 然后结合溪洛渡水电站, 用 3 种库水模型进行了坝体-库水系统的动力特性分析.

## 1 库水模型及其数值求解方案

### 1.1 广义韦斯特伽特附加质量公式

1982 年, Clough<sup>[10]</sup>推广了韦斯特伽特附加质量公式, 即

$$M_p = \frac{7}{8} \rho A_i \sqrt{h y} I_i^T I_i \quad (1)$$

式中:  $M_p$ ——附加质量矩阵;  $I_i$ ——坝面上某点  $i$  的法线矢量;  $A_i$ ——该点在坝面上的隶属面积;  $\rho$ ——水体

密度  $\rho$ ;  $h$ ——坝前总水深;  $y_i$ ——水面至点  $i$  的距离.

推广后的韦斯特伽特附加质量公式(1), 不仅适用于任意形状的坝面和任意的河谷形状, 而且可以考虑任意方向的地震加速度.

### 1.2 不可压缩库水模型

对于区域  $\Omega$  上的均匀、无黏、无旋、线性小扰动理想流体, 其控制方程为下列以动水压力  $P$  为唯一基本未知量的波动方程:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \ddot{P} = 0 \quad (2)$$

式中:  $c$ ——水中声波波速;  $\ddot{P}$ ——动水压力向量  $P$  对时间的二阶导数.

考虑到坝体与库水交界面  $\Gamma$  上的流固耦合边界条件, 采用标准的 Galerkin 加权余量法对流体域控制方程(2)进行有限元离散, 结合无阻尼固体域有限元动力方程, 可以得到坝体-库水流固耦合系统的有限元动力方程组<sup>[11]</sup>

$$M\ddot{u} + Ku - \frac{1}{\rho} S^T P = 0 \quad (3)$$

$$G\ddot{P} + QP + S\ddot{u} = 0 \quad (4)$$

其中  $G = \frac{1}{c^2} \int N_f^T N_f d\Omega$      $Q = \int \nabla N_f^T \nabla N_f d\Omega$      $S = \rho \int N_f^T L N_s d\Gamma$

式中:  $u, \ddot{u}$ ——位移向量和加速度向量;  $M, K$ ——质量矩阵和刚度矩阵;  $N_f, N_s$ ——流体和固体的插值函数矩阵;  $L$ ——坝面的方向向量, 以指向坝体内为正向.

当不考虑水体的可压缩性时, 由式(4)可直接解出动水压力  $P$ , 代入式(3), 可得

$$(M + M_p)\ddot{u} + Ku = 0 \quad (5)$$

其中  $M_p = \frac{1}{\rho} S^T Q^{-1} S$ , 反映了流体对固体的作用, 称之为有限元附加质量矩阵. 采用常用的滤频法等即可求解坝体无阻尼自由振动方程(5), 得到不考虑水体可压缩性的结构动力特性.

### 1.3 可压缩库水模型

当考虑水体的可压缩性时, 以固体位移和流体压力组成混合未知量, 式(3)(4)可改写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho S & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -S^T \\ 0 & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ P \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

可以发现, 式(6)的系数矩阵非对称. 为了求解方便, 对其进行对称化处理<sup>[12]</sup>. 从第 2 式中解出  $P$ , 得  $P = -Q^{-1} \rho S \ddot{u} - Q^{-1} G \ddot{P}$ , 代入第 1 式, 整理可得

$$\bar{M} \ddot{\delta} + \bar{K} \delta = 0 \quad (7)$$

其中  $\bar{M} = \begin{bmatrix} M + \rho S^T Q^{-1} S & S^T Q^{-1} G \\ G Q^{-1} S & G Q^{-1} G / \rho \end{bmatrix}$      $\bar{K} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & G / \rho \end{bmatrix}$      $\delta = \begin{bmatrix} u \\ P \end{bmatrix}$

利用滤频法求解式(7)时, 不必显式地写出矩阵  $\bar{M}$ . 与求解一般结构动力特性的不同之处是向量  $\bar{M} \delta$  的求解. 其求解方法如下:

$$\bar{M} \delta = \begin{bmatrix} Mu + S^T r_2 \\ G r_1 / \rho \end{bmatrix} \quad r_2 = Q^{-1} r_1 \quad r_1 = \rho Su + GP \quad (8)$$

实际计算时, 总体刚度矩阵  $\bar{K}$  需要组装并分解, 而其他系数矩阵不需要组装, 只需要在单元层次上依次计算过渡向量  $r_1, r_2$ , 然后按自由度累加计算成整体向量  $\bar{M} \delta$ . 这与不考虑水体可压缩性的流固耦合有限元法相比, 计算格式相同, 计算工作量稍有增加. 而从总体刚度矩阵  $\bar{K}$  的性质来看, 虽然坝体位移向量  $u$  与动水压力向量  $P$  属于不同性质的物理量,  $\bar{K}$  的元素在数值上可能相差较大, 但  $\bar{K}$  可看作主对角由独立的子矩阵  $K$  和  $G/\rho$  构成而其他为零元素的矩阵, 故在方程求解时不会出现由矩阵病态造成的收敛困难问题.

## 2 工程应用

以溪洛渡水电站为例, 用本文给出的几种库水模型进行坝体库水系统的动力特性分析.

溪洛渡水电站是金沙江下游河段梯级开发规划的第3个梯级水电站,枢纽工程的拦河大坝为上下游为抛物线型的双曲混凝土拱坝,最大坝高278 m,水库正常蓄水位600 m.计算模拟范围为:上游面水体和地基4倍坝高,下游面地基2倍坝高,左右岸及自坝底向下均为1.5倍坝高.为计算方便,采用简化的均质、无质量地基模型,有限元模型如图1所示.材料参数:坝体弹性模量24 GPa,密度 $2400 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比0.167.基岩弹性模量15.34 GPa,泊松比0.22.水体密度 $1000 \text{ kg/m}^3$ .考虑可压缩性时水中声速 $c = 1430 \text{ m/s}$ .

表1给出了空库、韦氏附加质量、韦氏附加质量折半作用、不可压缩库水、可压缩库水5种情况下的前5阶自振频率,其中有水情况库水位均为正常蓄水位.从表1可以看出,无论哪种库水模型,库水的作用对坝体自振频率的影响都比较显著,坝体与库水的相互作用使得坝体的自振频率均有不同程度的降低.从1阶频率来看,相对于空库情况下的坝体自振频率,韦氏附加质量模型降幅最大,达31.5%,而不可压缩水体模型降幅最小,为14.7%,二者相差1倍以上;韦氏附加质量折半使用时与可压缩库水模型得到的坝体1阶自振频率基本相当,但高阶频率仍有较大不同.

从图2来看,不同库水模型得到的各阶振型参与系数也存在较大差异.这必然导致不同库水模型计算得到的坝体动力反应也不尽相同.

不同库水模型不但对坝体自振频率和各阶振型参与系数的影响不同,也同样对各阶振型有着不同程度的影响.图3给出了不同情况下坝轴线的第1阶和第3阶振型.从第1阶振型图来看,除可压缩库水模型外,其他几种库水模型得到的振型基本相同,为明显的反对称振型.而考虑水体的可压缩效应之后,坝体振动特性发生了较大变化,有向对称振型过渡的趋势.从第3阶开始,不同库水模型得到的振型之间均存在较大差别.

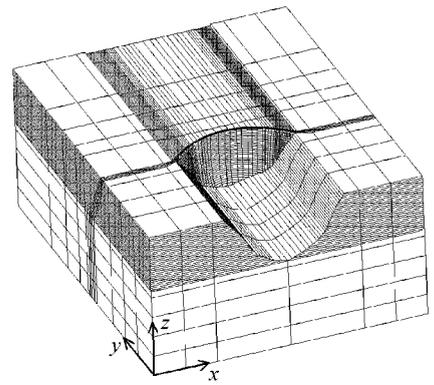


图1 溪洛渡拱坝坝-库耦合系统有限元模型

Fig. 1 FEM model for the coupled dam-water system of Xiluodu Arch Dam

表1 不同库水模型下坝体前5阶自振频率

Table 1 First five-order inherent frequencies by different reservoir models

阶数	空库	韦氏附加质量	韦氏附加质量折半	不可压缩库水	可压缩库水
1	1.43	0.98	1.14	1.22	1.19
2	1.55	1.02	1.21	1.27	1.21
3	2.13	1.49	1.73	1.86	1.53
4	2.78	1.90	2.25	2.37	1.74
5	2.95	1.94	2.28	2.67	1.84

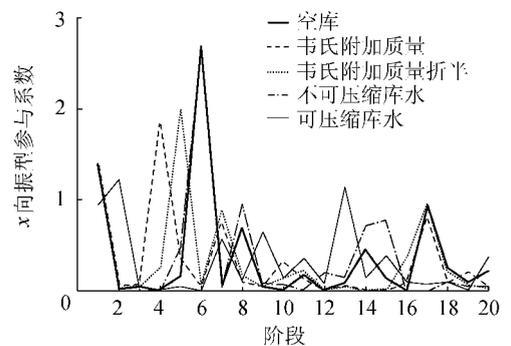


图2 横河向振型参与系数

Fig. 2 Participation coefficients of transverse vibration modes

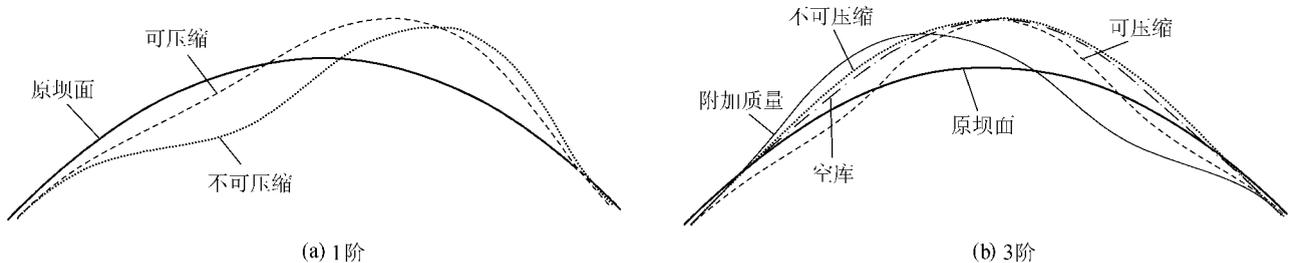


图3 坝轴线振型

Fig. 3 Vibration modes for dam axis

### 3 结 论

a. 坝前库水对坝体的动力特性有较为显著的影响.不同的库水模型对坝体的自振频率、振型参与系数

和振型等动力特性的影响程度相差较大,也必然导致由此计算出的动力反应的不同。

b. 没有现场试验资料做支撑,仅从数值计算结果很难得出哪种库水模型一定合理的结论,且已有有限的现场实验得出的结论也不尽相同。但从库水的物理特性来看,可压缩库水模型最能真实地反映库水的特性,也最能反映库水对坝体动力特性的影响。此外,本文给出的考虑库水可压缩性的坝体动力特性的求解方法,在计算实现难度上与不可压缩库水模型基本相当。因此,应采用可压缩库水模型来求解高拱坝动力特性,因为可压缩库水模型可以更好地考虑库水与坝体之间的相互作用。虽然本文的结论仅基于 1 座高拱坝的计算分析结果,还缺乏一般性,但与文献 [7] 对小湾拱坝进行分析得到的结论一致。

#### 参考文献:

- [ 1 ] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[ J]. Transactions , ASCE , 1933 98 :418-472.
- [ 2 ] 陈厚群,侯顺载,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( 7 ) 29-39.
- [ 3 ] 杜修力,王进廷.动水压力及其对坝体地震反应影响的研究进展[ J].水利学报,2001( 7 ) :13-22.
- [ 4 ] 刘浩吾.混凝土坝动水压力与库水可压缩性效应[ J].水利水电科技进展,2002,22( 2 ) :10-13.
- [ 5 ] CLOUGH R W , CHANG K T , CHEN He-qun , et al. Dynamic interaction effects in arch dams :Earthquake Engineering Research Center Report , No. UCB/EERC-85/11 [ R ]. Berkeley :University of California , 1985.
- [ 6 ] 陈和群,何学春.水体位移元求解坝体与库水的动力耦合问题[ J].河海大学学报:自然科学版,1996,24( 2 ) :14-20.
- [ 7 ] 杜修力,王进廷.拱坝-可压缩库水-地基地震波动反应分析方法[ J].水利学报,2002( 6 ) :83-90.
- [ 8 ] 石建军,孙冰,周元德,等.不同横缝接触与库水模型对拱坝动力反应的影响[ J].水力发电学报,2005,24( 3 ) :34-38.
- [ 9 ] 迟世春,林皋.混凝土面板堆石坝与库水动力相互作用研究[ J].大连理工大学学报,1998,38( 6 ) :718-723.
- [ 10 ] CLOUGH R W. Reservoir interaction effects on the dynamic response of arch dam[ C ]//Proceeding of China-US Bilateral Workshop on Earthquake Engineering. Beijing :Water Resource and Hydropower Press of China ,1982 :58-84.
- [ 11 ] 赵兰浩.考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[ D].南京:河海大学,2006.
- [ 12 ] 王勖成.有限单元法[ M].北京:清华大学出版社,2003.

## Effects of reservoir models on dynamic characteristics of high arch dams

ZHAO Lan-hao , LI Tong-chun , NIU Zhi-wei

( College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China )

**Abstract :** Three reservoir models and numerical schemes were given for the dynamic characteristics of high arch dams. Based on the practical projects , the effects of different reservoir models on the dynamic characteristics of high arch dams were analyzed. The computed and analytic results show that the dynamic characteristics , such as the natural frequency , the participation coefficients of vibration modes and the mode shapes , obtained by different reservoir models are quite different. The compressible reservoir model can truly reflect the effects of reservoir characteristics and water on the dynamic characteristics of high arch dams. Therefore , the compressible model is proposed to solve the dynamic characteristics of high arch dams.

**Key words :** reservoir model ; compressibility ; high arch dam ; dynamic characteristic