

拱坝—库水动力流固耦合作用的有限元数值研究

曹宗杨, 张燎军

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对库水在拱坝结构动力响应分析中的重要影响, 采用大型有限元分析软件 ADINA 验证了势流体单元模拟坝体—库水间耦合分析方法的正确性, 并以西南某高拱坝为例, 分析了考虑库水压缩性及库水位高度等条件下的坝体动力特性, 获得了库水对拱坝动力特性的影响规律, 可为拱坝抗震设计提供参考。

关键词: 拱坝; 势流体; 流固耦合; 库水可压缩性; ADINA

中图分类号: TV312

文献标志码: A

拱坝作为高次超静定结构, 具有较好的自身调节能力, 坝体在地震作用下振动, 由于库水振动产生了附加动水压力, 动水压力又反作用于坝体, 改变坝体的动力特性和动力反应, 整个过程反映了强烈的流固耦合效应。考虑库水的可压缩性会使动水压力和扰动频率发生变化, 使问题的求解变得复杂, 因此坝体—库水相互耦合问题在拱坝动力特性分析中需特别关注。Westergaard H M^[1]提出用附加质量法来考虑水体的动水压力, 但 Westergaard 公式是假定在刚体垂直坝面上, 与实际情况有较大误差^[2]。因此, 在 Westergaard H M 研究的基础上, 在库水的可压缩性、库水自由表面波、库底吸收边界条件、库水水域长度、坝型条件等条件下做了大量研究^[2,3]。近年来, 又对水体划分网格来考虑结构与水体的耦合效应^[3~5]。鉴此, 本文在验证 ADINA 中的势流体模拟库水对坝体作用的前提下, 针对西南某高拱坝建立了三维有限元拱坝—库水—地基模型, 分析了在库水压缩性及库水位高度等条件下的坝体动力特性, 总结出坝体—库水耦合作用中的一些规律, 可为拱坝抗震设计提供参考。

1 坝库相互作用及势流体理论

1.1 Westergaard 附加质量法

对无限域不可压缩水域, 在考虑坝体刚性的前提下, Westergaard H M 提出坝体的动水压力计算公式^[1]为:

$$p = 7\rho a_n \sqrt{H_0 h} / 8 \quad (1)$$

式中, ρ 为水体密度; a_n 为坝面加速度; H_0 为库水深度; h 为计算点水深。

朱伯芳等^[6]针对水体对拱坝动力作用, 认为在初步计算中, 可按式(1)换算拱坝坝面单位面积上的径向附加质量:

$$\begin{cases} m_{px} = (7\rho \sqrt{Hh} \sin\theta) / 8 \\ m_{py} = (7\rho \sqrt{Hh} \cos\theta) / 8 \\ m_{pz} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, x, y, z 分别为横河向、顺河向、竖向整体坐标; θ 为拱冠至计算点的夹角。

1.2 ADINA 中的势流体理论

ADINA 软件中的势流体单元可用于模拟水体的自由表面与无限远的边界条件等, 可处理复杂的工程问题, 故本文采用 ADINA 势流体单元对水体进行模拟。势流体基于亚音速的速度公式所对应的流固耦合有限元方程^[7]为:

$$\begin{bmatrix} M_{SS} & 0 \\ 0 & -M_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\Delta u} \\ \ddot{\Delta \varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{UU} + C_{SS} & C_{UF} \\ C_{FU} & -[C_{FF} + (C_{FF})_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\Delta u} \\ \dot{\Delta \varphi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_{UU} + K_{SS} & K_{FU} \\ K_{UF} & -[K_{FF} + (K_{FF})_s] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{SS} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_U \\ F_F + (F_F)_s \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\Delta u, \Delta \varphi$ 分别为未知的位移矢量增量、势增量; $M_{SS}, C_{SS}, K_{SS}, F_{SS}$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和荷载矢量; M_{FF} 为流体质量矩阵; $C_{UU}, C_{FU}, C_{UF}, C_{FF}$ 分别为流固耦合界面上固体自身的、固体对流体造成的、流体对固体造成的、

收稿日期: 2012-11-09, 修回日期: 2012-12-31

作者简介: 曹宗杨(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构抗震安全, E-mail: demon20cool@126.com

通讯作者: 张燎军(1962-), 男, 教授、博导, 研究方向为水工结构抗震安全, E-mail: ljzhang@hhu.edu.cn

流体自身的阻尼矩阵; K_{UU} 、 K_{FU} 、 K_{UF} 、 K_{FF} 分别为流固耦合界面上固体自身的、固体对流体造成的、流体对固体造成的、流体自身的刚度矩阵; F_U 、 F_F 、 $(F_F)_S$ 分别为结构边界所受的流体压力、流体连续性方程对应的体积分与面积分。

1.3 势流体模拟坝体—库水相互作用正确性的验证

实际的坝体应视为弹性体,不能作为刚性结构考虑,对库水和挡水建筑物相互作用的研究大多基于理论数值计算,实测资料较少,Westergaard 公式等计算的数值解大多基于结构刚性假设,因此动水压力下部偏大、上部偏小。宫必宁^[8]指出因坝体是弹性体,坝体上部相对位移较大,与水作用时所测动水压力最大值在距水面 1/3 处(从水面位置算起)。据此,拟定一坝高 120 m 重力坝,高宽比 1.0 : 0.7,刚性地基,库蓄水位高 115 m,坝体混凝土动弹模 30 GPa,泊松比 0.2,密度 2 400 kg/m³,水体密度均为 1 000 kg/m³,采用 El-Centro 波输入,加速度调整为 0.2g。二维有限元计算模型及输入波见图 1、图 2。

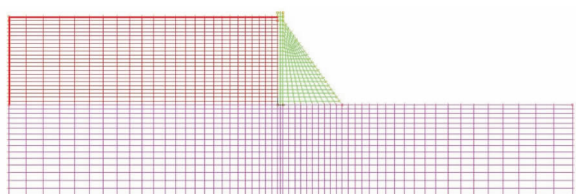


图 1 重力坝二维有限元计算模型

Fig. 1 2D finite element model of gravity dam

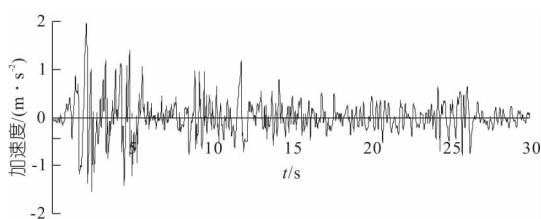


图 2 调整后 El-Centro 波加速度时程

Fig. 2 Adjusted acceleration time-history of El-Centro wave

图 3 为坝面最大动水压力值。由图可看出,使用势流体计算时,当坝体为刚性体时动水压力最大值在坝踵部位,这与 Westergaard 公式的解

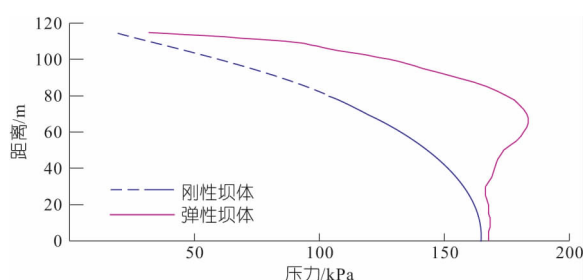


图 3 坝面最大动水压力值

Fig. 3 The Maximum dynamic water pressure on dam face

相接近;而当坝体为弹性体时动水压力最大值约位于坝面迎水面距水面 1/3 处(从水面位置算起),坝面动水压力分布形态与试验结果一致,且当考虑结构体弹性时,动水压力数值也较结构刚性时大。可见,势流体单元能很好地反映库水与结构之间的相互作用。

2 考虑库水作用的拱坝结构动力特性

西南某拱坝工程的最大坝高为 130 m,顶拱中心线弧长 250.25 m,最大中心角 92.48°,厚高比 0.238,大坝体积 38.3 × 10⁴ m³。正常蓄水位为 1 866.0 m,死水位为 1 825.0 m,总库容 0.18 × 10⁸ m³。水库两岸基本由岩质边坡构成,地层走向与坡向呈大角度相交,两岸山体浑厚,稳定性好。

2.1 考虑库水可压缩性的拱坝结构动力特性

2.1.1 模型建立

根据工程资料,建立能够反映工程实际的拱坝—库水—地基三维有限元计算模型。为考虑水体作用,模型延长了坝前水域及岩体的计算长度(图 4)。为更加合理地考虑坝体在水体作用下的动力特性,先根据相关资料提供的静水压力、淤沙压力、温度及自重荷载数据进行静力计算,在静力基础上计算动力。

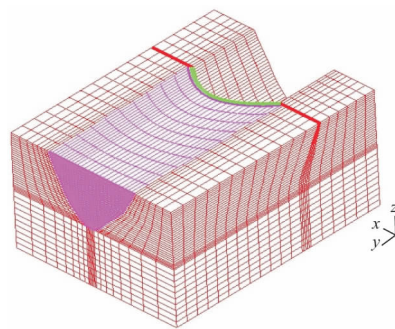


图 4 拱坝—库水—地基三维有限元计算模型

Fig. 4 3D finite element model of arch dam-reservoir-foundation

2.1.2 计算工况及边界条件

4 种计算工况:①工况 1。满库可压缩水体单元;②工况 2。满库不可压缩水体单元;③工况 3。动水压力考虑为式(2)附加质量结果;④工况 4。不考虑坝前水体作用,即空库。

混凝土坝体采用三维均质单元,在静力特性下弹性模量 $E=18$ GPa,泊松比 $\gamma=0.167$,重度 $\rho=2\,400$ kg/m³,热膨胀系数 $\alpha=1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;岩体地基采用三维均质无质量单元,弹性模量 $E=17.5$ GPa,泊松比 $\gamma=0.2$;水体采用势流体单元,在考虑水体可压缩性时水体的体积模量 $K=2$

GPa, 当不考虑水体可压缩性时水体体积模量设为无限大, 水体密度均为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 。动力特性下混凝土坝体单元材料弹性模量提高 30%。地基四周均采用法向链杆约束, 底部采用全约束; 水体上游面采用无限远边界, 上表面采用不波动零势边界, 水体与坝体及结构体相接触的部位为流固耦合边界。

2.1.3 结果与分析

水体的可压缩性对坝体的振型影响不大, 无论是否考虑库水水体的可压缩性, 拱坝的结构前几阶振型基本一致, 对结构振型的影响主要是振型大小程度不同, 工况 1 中坝体及地基前 5 阶振型见图 5, 四种工况的前 10 阶频率计算结果见表 1。由表可看出, 在有库水作用时, 结构各阶的频

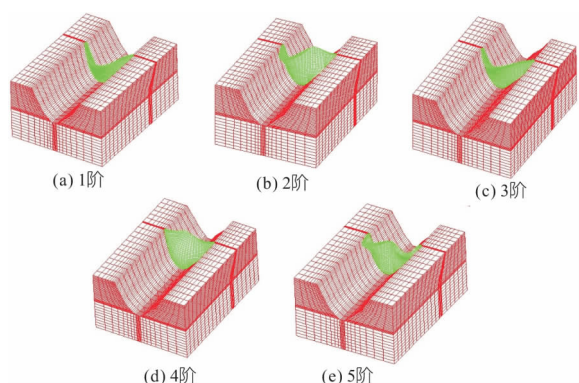


图 5 工况 1 坝体及地基前 5 阶振型

Fig. 5 The first five vibration modes of dam and foundation in condition one

表 1 四种工况前 10 阶拱坝自振频率

Tab. 1 The first 10 vibration frequencies of arch dam in four conditions

阶数	水体 可压缩	水体 不可压缩	采用式(2) 附加质量	空库
1	2.744	2.930	2.559	3.684
2	3.294	3.372	2.939	4.032
3	3.776	5.083	4.266	5.871
4	4.456	5.649	4.757	6.950
5	5.026	7.173	5.861	7.736
6	5.614	7.676	6.481	7.954
7	6.447	7.735	6.514	8.304
8	6.798	8.241	7.249	9.205
9	7.243	9.364	7.547	10.659
10	7.347	10.137	7.969	10.937

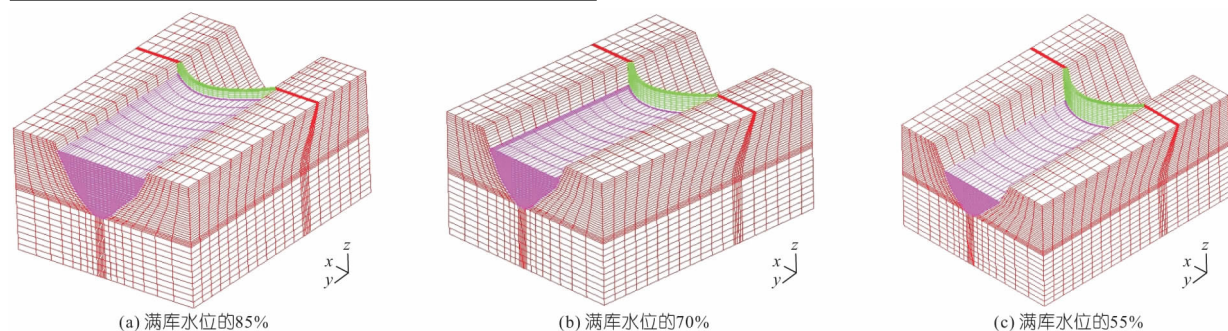


图 7 不同库水位拱坝—库水—地基三维有限元模型

Fig. 7 3D finite element model of arch dam-reservoir-foundation in different reservoir levels

率均较空库状态有明显减小, 水体可压缩计算的结构各阶频率都要比水体不可压缩时小, 因此水体的可压缩性对结构的影响不可忽略。该拱坝的基频在 3 Hz 以下, 其中使用附加质量进行计算的拱坝基频最小, 说明 Westergaard 公式受动水压力影响较大。

图 6 为前 10 阶水体可压缩、水体不可压缩及空库下结构各阶频率减小比例。其中考虑水体可压缩结构基频较空库减小约 25.5%, 前 10 阶频率减小约在 20%~30% 之间; 水体不可压缩结构基频较空库减小约 25.5%, 前 10 阶频率减小约在 10%~20% 之间。说明库水作用对拱坝振动特性影响显著, 必须考虑; 而水体可压缩性也对坝体结构有相应影响, 不应忽略。因此, 采用可压缩库水—坝体耦合模型可更好地反映坝体结构与水的共同作用。

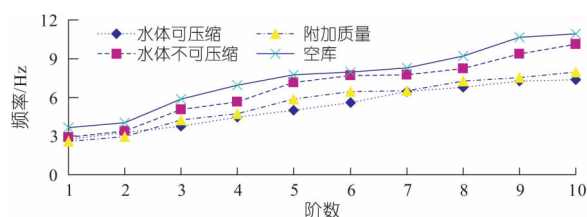


图 6 各工况前 10 阶拱坝自振频率

Fig. 6 The first 10 natural frequencies of arch dam in various conditions

2.2 考虑坝前库水高度的拱坝结构动力特性

2.2.1 计算模型

在分析库水高度影响的计算模型中, 结构和地基同前, 水体可压缩, 坝前水位分别为满库水位的 85%、70%、55% 进行计算。三种计算工况的三维有限元模型见图 7。

2.2.2 结果与分析

四种不同库水位影响下的频率计算结果见表 2。不同库水位与空库前 3 阶频率比值见图 8。由表 2、图 8 可看出, 坝前水位对拱坝结构影响明显, 且水体深度对结构的影响随坝前水位的增高而增大, 深度的影响主要体现在拱坝结构的低阶

表 2 不同库水位影响下拱坝自振频率
Tab. 2 Natural frequency of arch dam influenced by different reservoir levels Hz

阶数	满库	85%满库 水位	70%满库 水位	55%满库 水位	空库
1	2.744	3.153	3.512	3.650	3.684
2	3.294	3.713	3.943	4.013	4.032
3	3.776	4.176	4.713	5.519	5.871
4	4.456	4.777	5.347	5.999	6.950
5	5.026	5.623	5.883	6.451	7.736
6	5.614	5.936	6.381	7.095	7.954
7	6.447	6.731	7.256	7.706	8.304
8	6.798	7.020	7.350	7.859	9.205
9	7.243	7.699	7.758	7.927	10.659
10	7.347	8.056	8.161	8.262	10.937

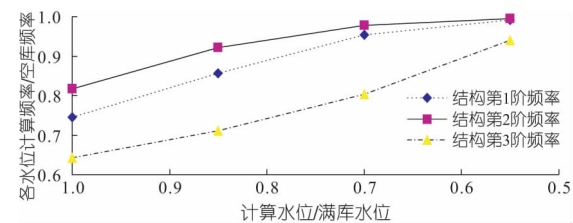


图 8 不同库水位与空库前 3 阶频率比值
Fig. 8 Frequency ratio of the first three frequencies between different water levels and empty reservoir

频率上。在低于 50% 满库水位,水体对拱坝结构的较低阶频率影响已不明显,尤其是结构前 2 阶频率;在满库 70% 水位时,与空库频率相差在 5% 以内,已很接近;而在 55% 满库水位以下结构频率前 2 阶频率已与空库频率接近一致。表明水位的降低使拱坝结构的低阶频率迅速增高,与空库接近。原因在于拱坝刚度小的位置常在拱坝的上部,低水头对于刚度小的位置影响不大;此外,拱坝修建的位置大多位于深山峡谷中,河谷较狭窄,以岩石地基为主,覆盖层小。拱坝的河谷从形状上可大致分为 V 型与 U 型,特别是 V 型河谷,较低高程水位时坝前库水宽度及库水量远小于较高水头情况,可见水位降低,库水对拱坝结构的作用会大幅减小,且不随高程发生线性变化。

Finite Element Numerical Research of Dynamic Fluid Solid Coupling Function between Arch Dam and Water

CAO Zongyang,ZHANG Liaojun

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

Abstract: Water is a very important factor in the dynamic response analysis of arch dam. Finite element analysis software ADINA is adopted to verify the correctness of applying potential flow element to simulate fluid solid coupling analytical method. Taking a high arch dam in southwest area for an example, the dynamic properties of dam body is analyzed by considering the conditions of water compression and water level height. And then the influence laws of water on the dynamic properties of arch dam are obtained. Thus, it provides reference for seismic design of the arch dam.

Key words: arch dam; potential flow; fluid solid coupling; reservoir water compression; ADINA

3 结语

a. 验证了势流体单元模拟坝体—库水耦合作用的正确性。

b. 实例应用表明,水体对结构的频率和振型的影响显著,可压缩与不可压缩水体相比降低了水体的各阶频率,在拱坝计算中不应忽略;拱坝库水位高程也对结构影响显著,且随水位降低,迅速减小。

c. 在传统的 Westergaard 公式基础上,采用有限元水体网格及流固耦合技术的适应性较好,具有较大优势,但拱坝的流固耦合计算等还有待于深入研究。

参考文献:

[1] Westergaard H M. Water Pressures on Dams During Earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1933,98(2):418-433.
[2] 刘云贺,俞茂宏,王克成. 流体—固体瞬态动力耦合有限元分析研究[J]. 水利学报,2002(2):85-89.
[3] 程恒,张燎军. 强震作用下高拱坝损伤开裂研究[J]. 水力发电学报,2011,30(6):143-147.
[4] 谭聪睿,张燎军,龚存燕. 基于 ADINA 的塔体内外动水压力分布规律研究[J]. 水电能源科学,2011,29(8):100-102.
[5] 吴佐国,张燎军,叶尚芳,等. 威远江泄洪洞独立进水塔结构抗震分析[A]. 现代水利水电工程抗震防灾研究与进展[C]. 中国水力发电工程学会,2009.
[6] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
[7] ADINA R&D. Inc. ADINA Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA Solid & Structures[M]. Watertown:ADINA,2005.
[8] 宫必宁. 重力坝地震动水压力试验研究[J]. 河海大学学报,1997,25(1):98-102.