

库水可压缩性对重力坝动力响应影响的对比分析

陈文森 李嘉生 翟利军 邹红英

(工程设计院)

[摘要] 为研究库水可压缩性对重力坝动力响应的影响,以黄登混凝土重力坝12#坝段为例,基于两种库水模型,建立重力坝-地基-库水系统2D有限元模型进行数值仿真计算。结果表明,考虑库水可压缩性的流固耦合模型,重力坝系统对应各阶自振频率、坝顶加速度、坝顶和坝踵相对位移以及最大和最小主应力极值均要小于Westergaard附加质量模型。分析结果可为混凝土重力坝抗震分析提供一定参考。

[关键词] 2D有限元分析 Westergaard附加质量 流固耦合 库水可压缩性 动力响应

1 引言

目前,许多大坝在我国西南部等地区兴建,其中碾压混凝土重力坝是常用的坝型之一^[1]。建在地震多发,且地震烈度高的地区的大坝,易受地震灾害的影响。因此,对大坝进行抗震分析是非常必要的。抗震分析除进行动力模型试验^[2-3]之外,基于一定假定的数值仿真计算也是常用的手段之一。

在地震荷载的作用下,如何准确地考虑作用在重力坝迎水面的动水压力是坝体抗震分析的热点之一。1933年Westergaard基于库水不可压缩的假定,提出了著名的Westergaard附加质量公式,用以计算刚性直立坝面的动水压力^[4]。随后,研究人员对坝面动水压力及其影响因素进行了大量的研究。龚亚琦等^[5]应用势流模式和位移模式2种流体单元模拟库水,对一重力坝进行流固耦合分析,得出当坝体结构自振频率比较高时,库水压缩性对结构动力特性的影响较显著的结论;王毅等^[6]采用比例边界有限元方法对竖向地震动激励对坝面动水压力的影响进行了详细地分析;王铭明^[7]将泥沙淤积层作为粘性、可压缩及大密度流体考虑,得出柔性地基与淤积层都能够降低库坝系统的共振频率及反应幅值的结论;杜修力等^[8]提出一种计算直立坝面上地震动水压力的高精度时域公式,并将其应用于Koyuna重力坝地震反应分析中。

本文基于Westergaard附加质量模型和流固耦合模型,以黄登混凝土重力坝12#坝段为研究对象,建立重力坝-地基-库水系统2D有限元模型,依据计算结果,对比分析库水可压缩性对重力坝动力响应的影响。

2 库水模型

2.1 Westergaard附加质量模型

该模型的核心思想将坝面某点的动水压力等效为附加在坝面上该点处一定质量水体的惯性力,基于坝面刚性直立、地面运动为水平简谐运动等假定,进而得到Westergaard附加质量公式^[4]。由于该模型的假定条件限制了实际的使用,Clough在1982年推广了附加质量模型,使之适应于任意形状的坝面、河谷形状和各向地震加速度。推广后的附加质量公式^[9]:

$$M_i = \frac{7}{8} \rho A_i \sqrt{H_0 h_i} l_i^T l_i \quad (1)$$

式中: M_i 为坝面上计算点*i*的附加质量; ρ 为水体密度; A_i 为计算点*i*的影响面积; H_0 为坝前总水深; h_i 为*i*点处的水深; l_i 为计算点*i*的法向矢量。

《水工建筑物抗震设计标准》(GB51247-2018)规定拱坝坝面法向附加质量可按附加质量公式计算值的0.5取值^[9]。本文计算将Westergaard附加质量按折减系数0.5进行折减。

作者简介:陈文森(1992—),男,河南省郑州人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程结构设计工作。

2.2 流固耦合模型

假定库水为可压缩、无黏、无旋、小扰动的理想流体,则可确定以动水压力 P 为基本变量的二维波动方程^[10-11]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中, P 为动水压力; C 为水中声速, $C = \sqrt{K/\rho}$, K 为体积弹性模量。

给定库水模型的库水表面条件,库水-坝体接触边界、库水-地基接触边界,辐射条件的边界条件后,可求得上述方程的解^[12]。

3 工程算例

3.1 2D 有限元模型

黄登混凝土重力坝 12#坝段,坝顶高程 1625 m,坝基面高程 1422 m,最大坝高 203 m,坝顶宽 16 m,正常蓄水位 1619 m。

选取上述坝段,在 ABAQUS 中进行建模计算。坝体采用平面应力单元 CPS4 模拟,容重 24 KN/m³,动态弹性模量取为 37.5 Gpa,泊松比取为 0.167,阻尼比 5%。采用无质量地基模型,地基从坝趾往下游、深度均延伸 1.0 倍坝高,从坝踵往上游延伸 3 倍坝高,采用平面应变单元 CPE4 模拟,弹性模量取为 15 Gpa,泊松比取为 0.24。附加质量采用 Mass 质量单元模拟,可压缩库水采用声学介质模拟,库水密度 1000 kg/m³,压缩波速 1440 m/s。有限元离散网格尺寸均取 2 m,地基两侧施加法向约束,地基地部施加全约束。

库水表面设置为自由表面,库水远端设置吸收边界。将 ABAQUS 中的 Tie 约束施加在库水-坝体接触界面和库水-地基的接触界面,用来模拟声学介质-结构相互作用^[12]。

重力坝-地基-库水系统 2D 有限元模型如图 1 所示。

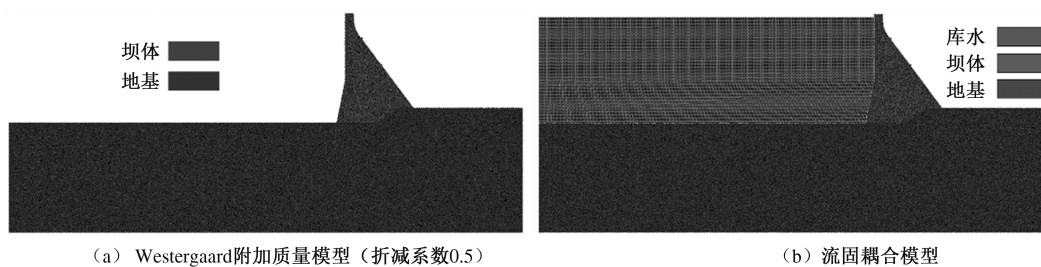


图 1 2D 有限元计算模型

3.2 时程反应分析

采用时程反应分析法,考虑水平和竖向地震作用,地震时程为 Koyana 坝 1976 年地震记录,如图 2

所示,水平向地震峰值加速度为 0.474 g,竖向地震峰值加速度为 0.312 g^[13]。

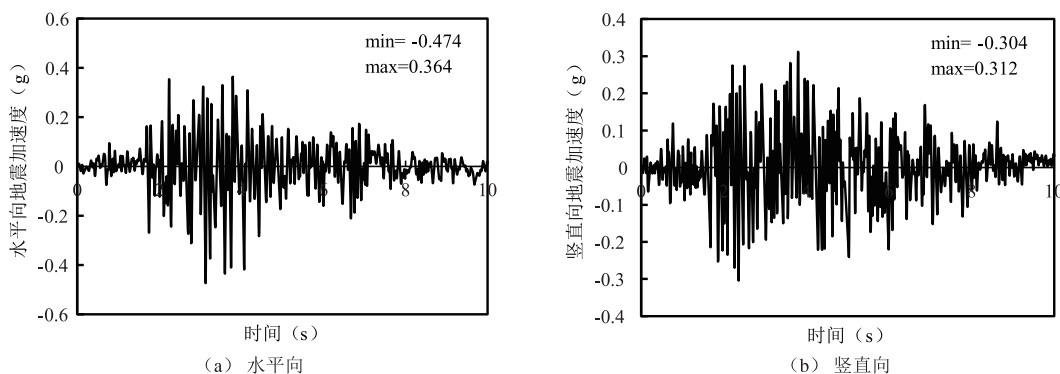


图 2 Koyana 坝地震加速度时程 ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

3.3 计算结果和分析

上述两种库水模型下,坝体自振频率如表 1 所示。由表 1 可知,流固耦合模型的各阶重力坝系统自振频率均要小于 Westergaard 附加质量模型(折减系数 0.5)的,且随着阶数的增加,差值愈加明显。

库水可压缩性对重力坝系统的自振频率影响很大。

图 3~图 6 为上述两种库水模型下,水平向、竖向坝顶加速度以及坝顶和坝踵的相对位移结果。由图 3 和图 4 可知,流固耦合模型的水平向和竖向坝顶加速度均要小于 Westergaard 附加质量模型

表1 重力坝系统自振频率(单位:Hz)

模型	重力坝系统自振频率									
	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶	第5阶	第6阶	第7阶	第8阶	第9阶	第10阶
Westergaard 附加质量 (折减系数 0.5)	1.44	3.20	3.36	5.55	8.87	10.96	12.81	14.46	15.34	16.39
流固耦合	1.32	1.68	2.02	2.66	3.29	3.45	3.85	4.75	4.95	5.11

(折减系数 0.5)的,但两种模型对应的加速度极值均要大于输入的地震时程加速度。在坝顶处,水平向和竖直向的加速度相较于输入的地震时程加速度存在一定的放大现象。由图 5 和图 6 可知,坝顶和

坝踵的水平向和竖直向的相对位移,流固耦合模型的数值相对 Westergaard 附加质量模型(折减系数 0.5)要小很多。

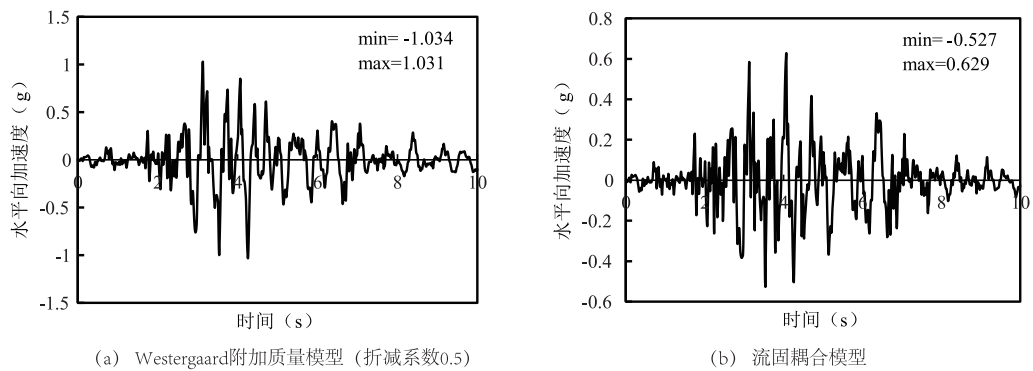


图3 水平向坝顶加速度时程

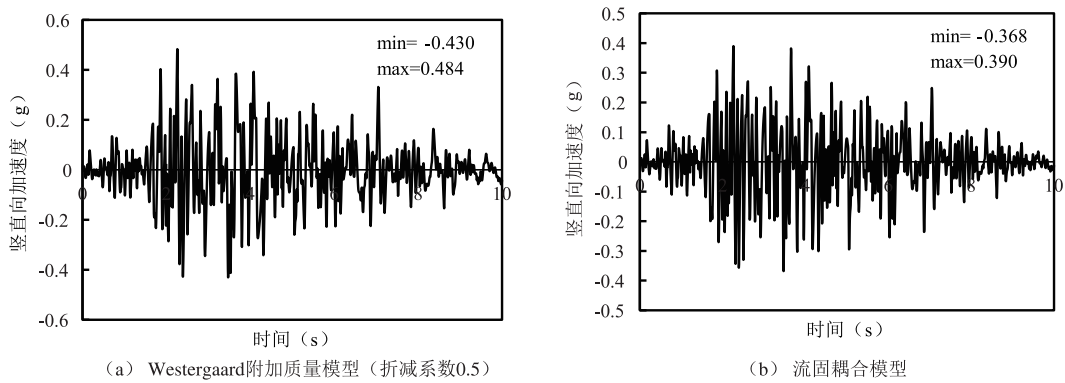


图4 竖直向坝顶加速度时程

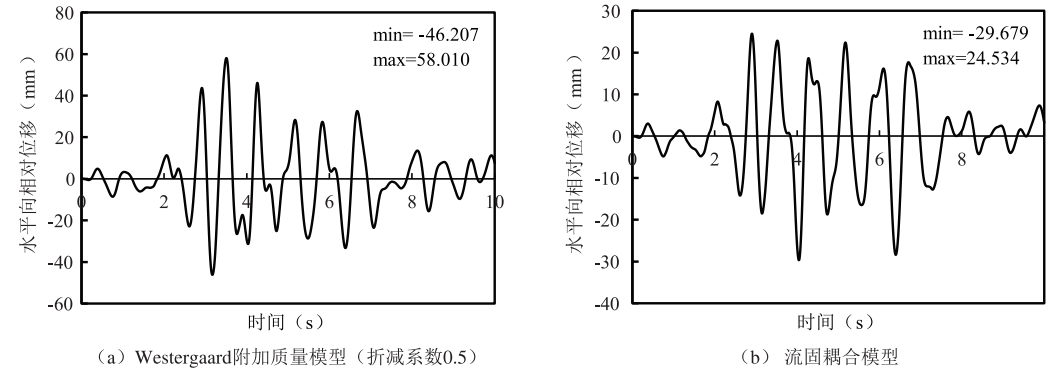


图5 水平向坝顶坝踵相对位移时程

图 7 和图 8 为上述两种库水模型下,坝体最大和最小应力包络云图。由图 7 和图 8 可知,流固耦

合模型对应的最大和最小应力极值均小于 Westergaard 附加质量模型(折减系数 0.5)的。

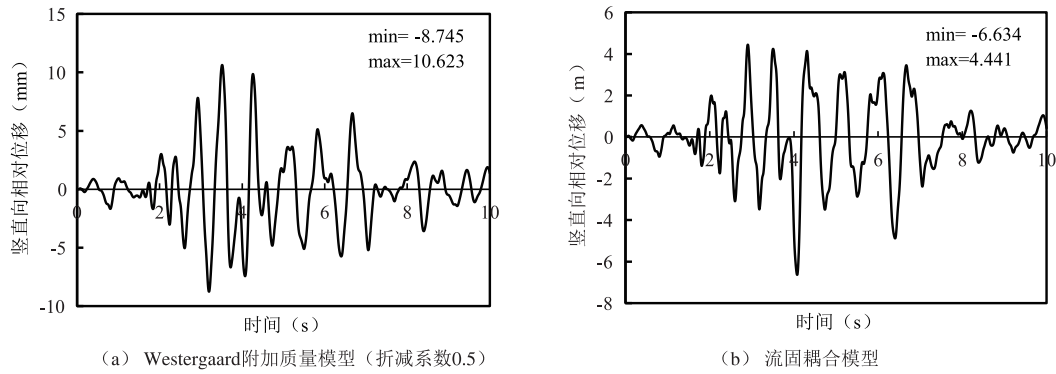


图6 竖直向坝顶坝踵相对位移时程

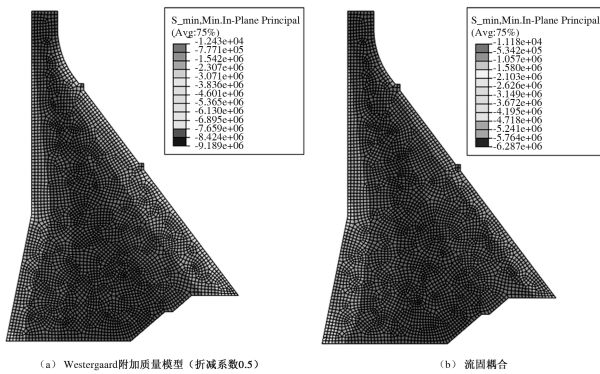


图7 坝体最小主应力包络云图(单位:Pa)

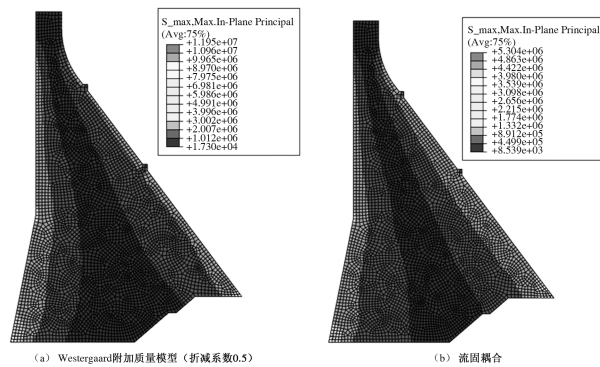


图8 坝体最大主应力包络云图(单位:Pa)

4 结论

(1)以黄登混凝土重力坝12#坝段为例,基于Westergaard附加质量模型(折减系数0.5)和流固耦合模型,依托ABAQUS有限元软件,建立重力坝-地基-库水系统2D有限元模型,研究库水可压缩性对重力坝动力响应的影响。

(2)上述两种库水模型下,对于重力坝系统的自振频率,流固耦合模型对应的各阶自振频率均要小于Westergaard附加质量模型(折减系数0.5)的,且随着阶数的增大,差值也随之增大。

(3)流固耦合模型对应的水平向、竖直向坝顶加速度均要小于Westergaard附加质量模型(折减系数0.5),但两种模型对应的加速度极值均要大于输

入的地震时程加速度极值。在坝顶处,水平向和竖直向的加速度相较于输入的地震时程加速度存在一定的放大现象;

(4)流固耦合模型对应的水平向、竖直向坝顶和坝踵的相对位移、最大和最小应力极值均要小于Westergaard附加质量模型(折减系数0.5)。

参考文献

- [1] 纪杰杰,徐昊,岳书旭.高地震烈度下碾压混凝土重力坝静动力特性研究[J].中国水运:下半月,2016(16):214.
- [2] 陈雯,李昕,周晶.混凝土重力坝整体动力特性研究[J].世界地震工程:2006,22(4):63-69.
- [3] 朱彤,王忠阳,周晶.满足相似条件的混凝土重力坝振动台试验方法研究[J].水力发电学报,2017(10):19-26.
- [4] WESTERGAARD H M. Water Pressures on Dams During Earthquakes[J]. Trans. ASCE, 1933, 98(2): 418-432.
- [5] 龚奕琦,苏海东,崔建华.坝体与库水的流固耦合分析[J].长江科学院院报,2011(06):63-66.
- [6] 王毅,林皋,胡志强.考虑库水特性的重力坝动水压力求解[J].沈阳工业大学学报,2014,36(001):114-120.
- [7] 王铭明,武亮,陈健云,等.坝体-库水-淤积层-地基系统地震动分析[J].水利水电技术,2015(01):34-37+41.
- [8] 杜修力,王璞如,赵密,等.地震作用下重力坝动水压力的高精度时域公式[J].水力发电学报,2015(03):113-123.
- [9] GB51247-2018.水工建筑物抗震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [10] 李渤,辛全才.考虑库水可压缩性的重力坝地震动力响应分析[J].人民黄河,2018,40(08):120-123.
- [11] 宋力,周志宇,王怀亮.考虑库水可压缩性的重力坝地震响应分析[J].水电能源科学,2015,033(003):50-53.
- [12] 邱奕翔,魏楚函,武志刚,等.库水模拟对拱坝动力特性的影响分析[J].水力发电学报,2020(6):109-120.
- [13] 潘坚文.ABAQUS水利工程应用实例教程[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [14] CLOUGH H M. Reservoir Interaction Effects on the Dynamic Response of Arch Dam[J]. Proceedings of China-US Bilateral Workshop on Earthquake Engineering, 1982: 58-84.