

水利技术

基于 ADINA 的重力坝流固耦合动力特性分析

赵 堃¹ 王春青² 张 旸¹ 张静远¹ 朱卫华^{1*} 朱 峰¹

(河海大学 大禹学院¹ 南京 210098; 哈尔滨市水利规划设计研究院有限公司², 哈尔滨 150028)

摘 要 主要探讨了固体与水体相互作用下的动力特性。首先进行纯固体结构的自重以及频域计算,其次结合 Westergaard 理论方法,采用 ADINA-FSI 方法完成重力坝的全流固耦合计算研究。探究了水体的存在下的坝体应力以及水体对结构的自振频率影响。计算结构表明:流固耦合模型计算结果,结构大部分位移较小,更能反映水体-固体相互作用的要求,从而得出一些有价值的成果供工程设计参考。

关键词 ADINA 动力特性 模态分析 重力坝
中图分类号 TV131.2; **文献标志码** A

我国的水资源总量约为 28 000 亿 m³,其中河川径流 27 000 亿 m³,位于世界第四位。但是我国人均水量只有 2 350 m³,只有世界人均值的 27%;降水的年际分布和区域分布极不均匀,所以修筑水利工程调节水资源的时间分布和空间分布成为势在必行的事宜。

重力坝是由砼或浆砌石修筑的大体积挡水建筑物,其基本剖面是直角三角形,整体是由若干坝段组成。重力坝在水压力及其他荷载作用下,主要依靠坝体自重产生的抗滑力来满足稳定要求;同时依靠坝体自重产生的压力来抵消由于水压力所引起的拉应力以满足强度要求。

众所周知,中国是一个多地震的国度,几乎各个省份都发生过破坏性的地震,可以说我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。重力坝一般建于江河的上游部分,这部分地区的地震烈度也较高,水利工程中的抗震问题也是十分突出的。

由于坝体所蓄水体质量大,具有可以自由晃动的液面,在振动荷载作用下,水体会产生较大的晃动甚至飞溅^[3]。当坝体较薄,在外荷载和水体晃动

的双重作用下往往产生较大变形,这种变形又反过来影响水体晃动,这样在力学上就形成了具有自由液面大晃动的多重非线性流固耦合问题。但是这种问题在我国的设计规范中并未提供设计原则和方法^[1,2],因此这项研究具有重要的现实意义。

1 附加质量 Westergaard 理论

在土木水利工程中,一般认为 Westergaard 是研究水坝耦合的创始人,他在 1931 年发表了动水压力附加质量问题的理论解答,基于以下五个假定:

- (1) 坝体位于有限深度的半无限液层中,
- (2) 水被认为是非黏性的不可压缩液体,
- (3) 自由液面上形成的波形不予以考虑,
- (4) 具有垂直承压面的刚性坝体作调和振动,
- (5) 假定体系只发生微小振动。

Westergaard 给出了刚性重力坝在水平地震荷载下的附加动水压力分布:

$$p_s = \frac{4\rho\ddot{u}_0}{\pi} \cos\omega t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)c_n} e^{-c_n x} \sin\lambda_n y。$$

此外,Westergaard 给出了坝面上各点动水压力幅值的简化计算方法。

$$p_{w(h)} = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{hy}。$$

坝体受动水压力分布见图 1。

因为动水压力起着阻碍结构运动的作用,坝体

2012 年 7 月 4 日收到

* 通信作者简介:朱卫华,男。E-mail: zfl99095@126.com。

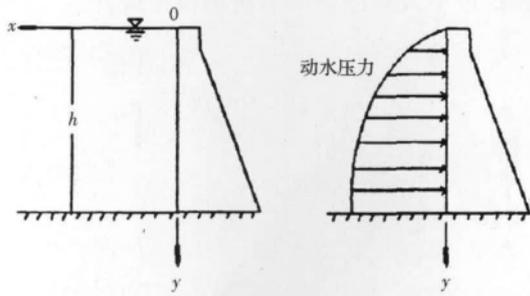


图 1 坝体挡水面动水压力分布

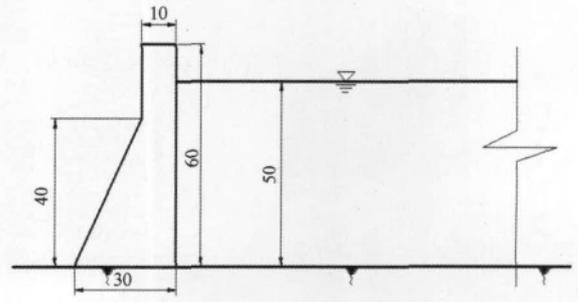


图 2 计算模型示意图

挡水面的法向加速越大,动水压力也越大,与惯性力的作用相似,所以,谁的存在相当于坝面各个节点质量加大,由此可以导出坝面上各点的动水压力附加质量矩阵 $[M_p]$ 。将动水压力附加矩阵 $[M_p]$ 加入质量矩阵 $[M]$,就可以得到考虑了动水压力的基本方程^[4]:

$$[K]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + ([M] + [M_p])\{\ddot{\delta}\} = -([M] + [M_p])\{\ddot{\delta}_g\}。$$

从上面可以看到:考虑水体与结构共同作用时,动力方程形式不变,只是在质量矩阵 $[M]$ 上附加了矩阵 $[M_p]$,因此可以采用无水时结构运动方程的求解方法来求解含水结构的自振特性和动力相应问题,此方法被设计规范广泛采用。

2 ADINA 实现

ADINA 作为动力非线性有限元软件^[5],除了求解线性问题以外还具备分析非线性问题的强大功能,包括除结构场以外的多场耦合问题。增量法是求解非线性物理问题的本质方法,ADINA 独特的流固耦合功能(FSI)可以在单一系统中模拟流体和非线性响应的结构之间完全耦合的物理现象^[6]。

本文为说明所蓄水位对坝体的影响,首先探究了坝体在无水状态下的自重应力状态以及其前四阶振型。

图 2 为本文计算所采用的重力坝及其水域的平面示意图,图中提供了模型各个部分的计算尺寸。

图 3 为本文所建立的重力坝有限元模型。由于重力坝在建造的过程中考虑了结构缝的设置,因此本文计算考虑了一段坝体(长 60 m)。有限元模型采用映射方式生成规则网格,网格的大体尺寸为边

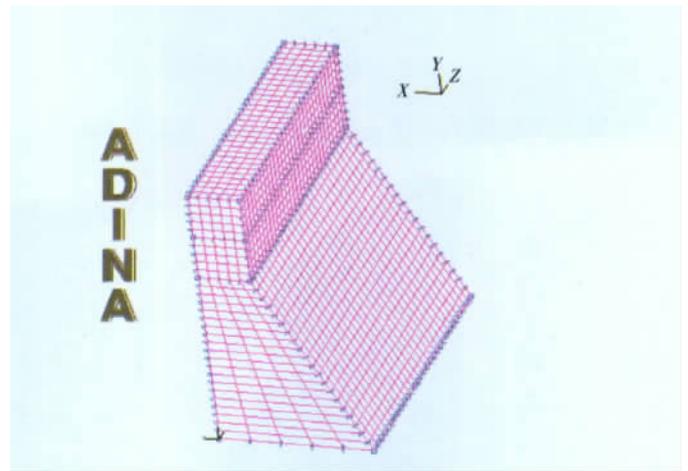


图 3 有限元型示意图

长 2 m。

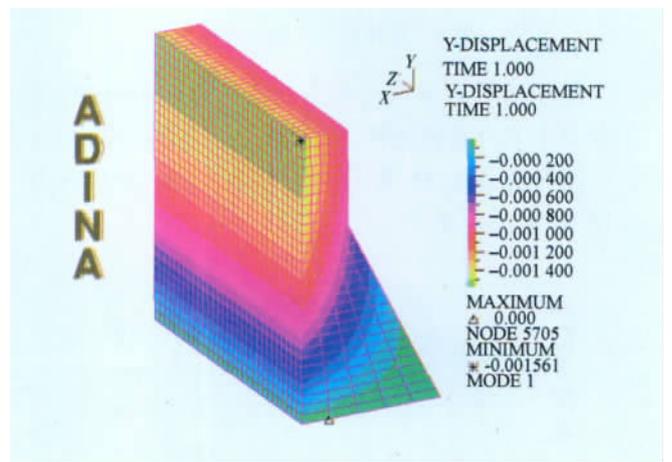


图 4 坝体竖向位移云图

图 4 为重力坝在无水工况下所产生的竖向位移,竖向位移为判断大坝沉降的一个主要依据。图上显示:坝体竖向位移最大 1.56 mm;图 5 为重力坝在无水工况下所产生的水平位移,水平向位移为判

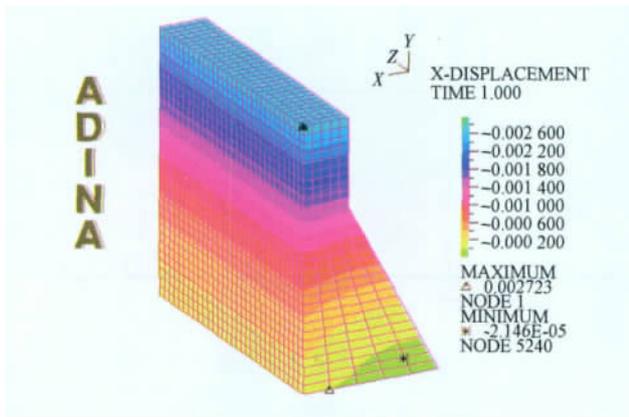


图5 坝体水平向位移云图

断大坝稳定的一个主要依据,其值为 2.7 mm。

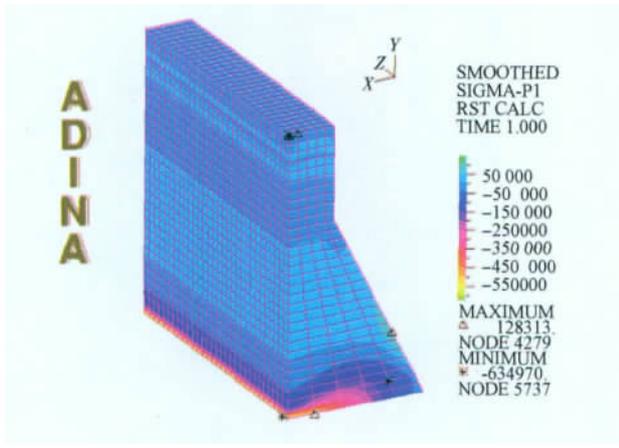


图6 坝体第一主应力云图

图6为重力坝在自重下的第一主应力分布,由于混凝土不具有抗拉性,所以第一主应力值得检验。

图6显示在自重工况下坝体最大拉应力为 0.13 MPa,满足要求。

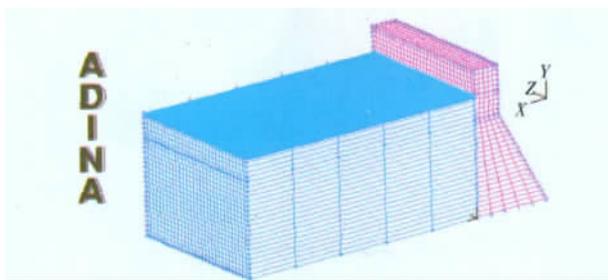


图7 含水坝体的有限元模型

图7为加入了相应水体以后的坝-水有限元模型,为了对比考虑水和不考虑水的工况下坝体的不

同特点,以下计算围绕图7所示模型展开。

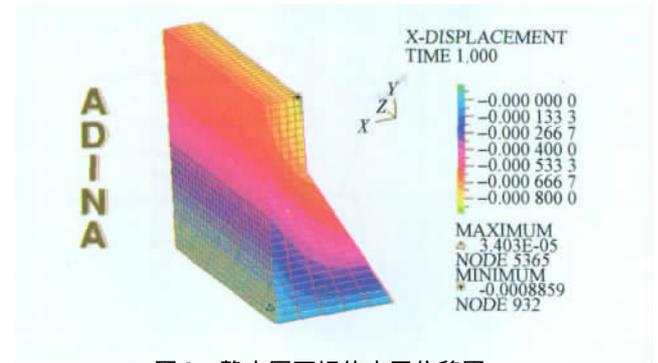


图8 静水压下坝体水平位移图

静水压是水平方向作用,所以坝体水平位移变化是最有对比价值。对比图5和图8可以知道:在未蓄水状态下,坝体水平位移 2.7mm;正常蓄水以后水平向位移 0.034mm,所蓄水位的静水压对坝体变形起缓和作用。

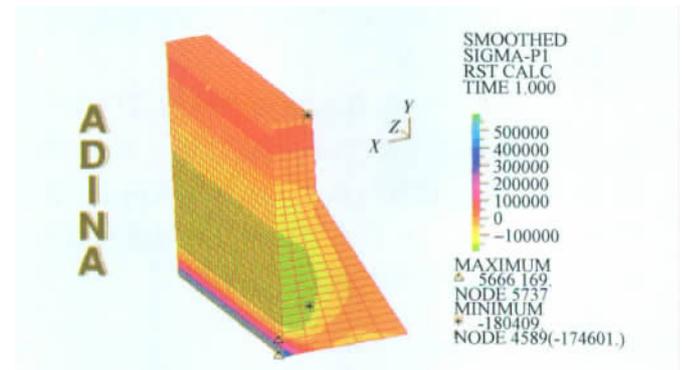


图9 静水压作用下第一主应力云图

从图9中也可以明显看出:在静水压力作用下,坝体的第一主应力明显增大。对比图6可以知道:第一主应力由不蓄水时的 0.13 MPa 变为蓄水工况底下的 0.57 MPa,对大坝安全不利,因此坝体需要适当进行配筋处理。

图10为无水振型和含水振型的对比,左边一列为无水工况下的坝体前四阶振型,右边一列为正常蓄水状态下的坝体前四阶振型。对比发现,对应的相同阶数的振动变形形态并不一致,其原因是由于在不同水深处坝体的附加质量不同,使得整个坝体的质量分布上面相对更小,从而使得振型改变。

表1列出了重力坝在无水 and 蓄水两种工况下的四阶自振频率的对比关系。从对比中可以看到:坝体所蓄水位对自振频率有明显的影响,使得所有阶



图 10 前四阶模态对比图

数的频率比无水工况下的情况有所降低,且当阶数越高降低的比例越大: 第一阶降低 7.5%, 第二阶降低 1.9%, 第三阶降低 36.4%, 第四阶降低 36.6%。由此可见: 重力坝所蓄水体对高阶频率的影响更为显著。

计算考虑了自由液面的基本振型,如图 11 所示。

表 1 对应阶数的振动频率(Hz)

振动频率	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
无水工况	4.337	7.541	12.89	16.63
蓄水工况	4.011	7.401	8.099	10.58

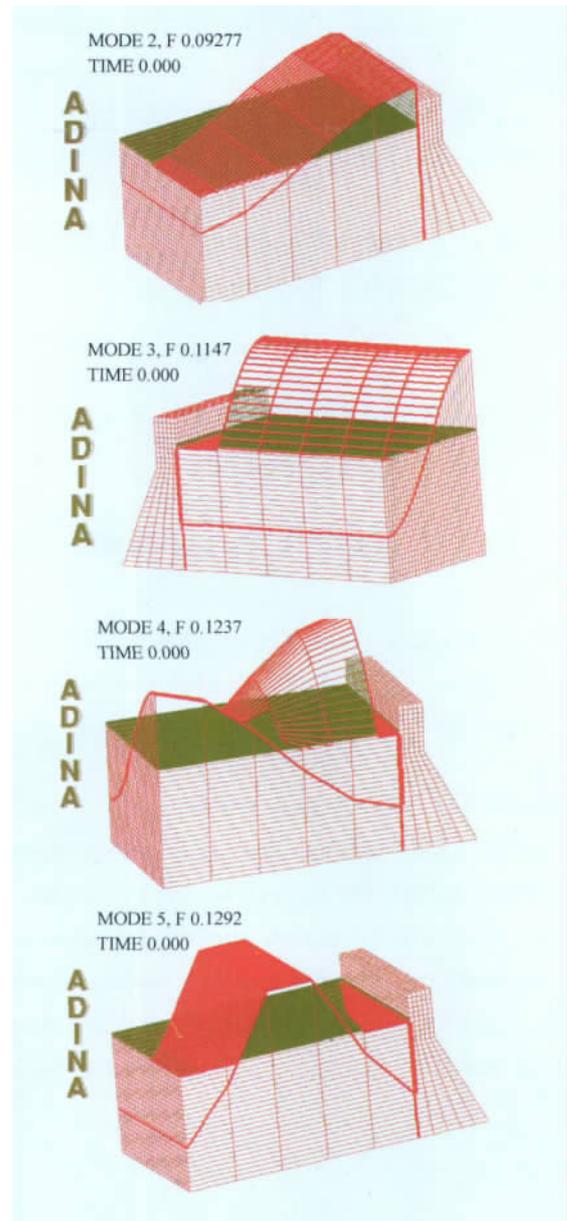


图 11 自由液面的前四阶振型

液面振型接近液面自由晃动的最基本运动形式,其频率约为 0.1 Hz,周期在 10 s 左右,与一般的波浪一致。

3 结论

本文结合 ADINA 的 FSI 功能实现了重力坝在不蓄水和正常蓄水位两种工况下的静力计算和频域计算。计算得到如下结论:

- (1) ADINA 程序计算的无水以及正常蓄水状态

下的坝体位移符合工程实际,且应力校核也满足要求。

(2) 蓄水状态下的自振频率相比无水状态下的频率要低;且自振阶数越大,自振频率相对降低越多。

(3) 自由液面的自振形态接近液面的自由晃动形态。频率约为 0.1 Hz 与波浪的频率一致。

参 考 文 献

1 DL5073—2000. 水工建筑物抗震设计规范. 北京: 中国电力出版

社 2001

2 SLJ10—78. 水工建筑物抗震设计规范. 北京: 水利电力部, 1978

3 王建军, 李其汉, 朱梓根, 等. 自由液面大晃动的流固耦合数值分析方法研究进展. 力学季刊, 2001; 22(4): 447—454

4 王伟华, 张燎军. 基于 ADINA 的重力坝地震响应分析. 水电能源科学, 2008; (26): 162—169

5 马 野, 袁志丹, 等. ADINA 有限元经典实例分析. 北京: 机械工业出版社, 2012

6 宫必宁. 重力坝地震动水压力试验研究. 河海大学学报, 1997; (14): 98—102

FSI Dynamic Characteristics Analysis of Gravity Dam Based on ADINA

ZHAO Kun¹, WANG Qing-chun², ZHANG Yang¹, ZHANG Jing-yuan¹, ZHU Wei-hua^{1*}, ZHU Fang

(College DaYu, Hohai university¹, Nanjing 210098, P. R. China;

Harbin City Water Planning and Design Institute Co., Ltd.², Harbin, 150028, P. R. China)

[Abstract] The dynamic characteristics of the solids and water-body interaction is focused. Firstly, the weight of the pure solid structure and the frequency domain are researched, followed by combined Westergarrd theoretical methods. ADINA-FSI method is used to complete the full flow structure coupling calculation of the gravity dam. Study explores the dam body stress and water structure affect the vibration frequency at the presence of water. The result shows that: the flow structure coupling model can caused displacement smaller and better reflects the body of water-solid interaction requirements, and thus draw some valuable results for engineering design.

[Key words] ADINA dynamic characteristics modal analysis gravity dam