

风载作用下坝水流固耦合体系的动力响应分析

陈亚南, 岑威钧

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 基于 VOF 方法, 对地震和风共同作用下坝水流固耦合体系的动力响应进行了分析。针对空库、坝水相互作用和坝-水-风相互作用三种工况, 计算分析了大坝在地震、风浪等作用下的动位移、绝对加速度及动水压力响应, 同时通过对自由液面的追踪, 验证了 VOF 方法追踪自由液面的优越性。结果表明: 水与坝之间的动力相互作用是一种复杂的非线性过程; 坝水相互作用能增大坝体振动的动位移和绝对加速度; 风对大坝的动位移和绝对加速度基本没有影响, 但风载荷对动水压力的影响极为显著。

关键词: 流固耦合; 风浪作用; VOF 方法

中图分类号: TV312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0085-04

Analysis of Dynamic Response of Fluid-Structure Interaction System Under Wind Load

CHEN Yanan, CEN Weijun

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

Abstract: The dynamic response of the dam structure interaction system under the action of earthquake and wind was analyzed based on VOF method. Under the three working conditions of empty reservoir, dam reservoir interaction, and dam water wind interaction, the dynamic displacement, absolute acceleration, and hydrodynamic response of the dam under the earthquake and wind load were calculated and analyzed. Meanwhile, the tracking of free surface based on VOF method verified its reliability and superiority. The results indicated that the interaction between the reservoir and dam is remarkably nonlinear. The dynamic displacement and absolute acceleration can be increased by the dam water interaction. Furthermore, wind had no impacts on the dynamic displacement and absolute acceleration of the dam, but significant impacts on hydrodynamic pressure.

Key words: fluid-structure interaction; wind wave; VOF method

水库修建后, 库区形成基本封闭的人工湖泊, 库区淹没面积增大, 季风吹程增加, 使风速带来的影响在水域上比陆域大得多^[1]。据统计, 在我国 241 座大型水库发生的 200 次水工建筑物或库岸破坏事故中, 由风浪导致的破坏达 126 次, 占到破坏总数的 64%^[2]。因而, 研究风浪载荷对于水库防洪安全和坝工建设具有重要意义。

近十几年来, 波浪研究的理论已日益成熟, 数值模型也相继出现, 但是关于波浪研究的数值模型多基于已有的海浪和海流模式。Wolf 等^[3]第一次进行了海浪和风暴潮相互作用的研究, 并阐述了研究波浪相互作用的可行性; Mastebroek 等对北海的风暴潮过程进行研究, 采用三种计算风应力的方法进行比较研究; Xie 基于 Davies and Lawrence 的研究, 考虑了依赖波浪状态的均匀风场, 相对较全面地研究了波浪相互作用。库区风浪研究大多是在海洋风浪研究基础

上进行的, 而海洋风浪与水库的实情并不完全一致^[4]。鉴于此, 本文采用基于两相界面追踪流体体积方法(volume of fluid, 简称 VOF) 进行坝-水-风三相耦合, 探讨地震与风同时作用时产生的库面涌浪对大坝的影响。

1 流固耦合系统基本控制方程

1.1 结构控制方程

在流固耦合系统中, 将流固耦合面上的压力载荷向量加入结构动力方程中, 得到流固耦合作用时结构的动力平衡方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_p + F \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 为结构相对地面的水平位移、速度和加速度列向量; F_p 为流固耦合交界面上的载荷向量; F 为 F_p 以外的其他外界激励。

收稿日期: 2013-12-19 修回日期: 2014-04-23 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51009055); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009B07514)

作者简介: 陈亚南(1988-), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事土石坝工程研究。E-mail: 352657478@qq.com

通讯作者: 岑威钧(1977-), 男, 浙江慈溪人, 副教授, 博士, 主要从事土石坝工程静动力分析及水工渗流分析与控制研究。E-mail: bhucwj@163.com

1.2 基于 ALE 描述的流固耦合方程

任意拉格朗日欧拉 (ALE) 描述中, 网格可以任意运动, 不完全固定在空间, 也不完全固定在节点上。有限元的划分是针对独立于结构和流体运动的参考坐标系进行的, 网格点即为参考点, 流体域和结构域的物理量可以通过 Jacobi 行列式映射到参考坐标系上, 从而可解决流固耦合面的协调问题^[5]。任意拉格朗日法中的 Navier Stokes 流体方程^[6-8]表示为:

$$\rho \cdot u = 0 \tag{2}$$

$$\rho \Delta u + \rho u \cdot \frac{u}{\Delta} - \tau = f - \frac{P}{\Delta} \tag{3}$$

式中: Δ 为哈密顿算子; P 为水压力; f 为体力; ρ 为流体密度; τ 为黏性应力张量。

1.3 流固耦合边界控制条件

流固耦合边界控制条件只与所求解的问题有关, 与所使用的描述方式无关, 因此, 无论是 Euler 描述中的边界条件还是 Lagrange 描述中的边界条件都可以用于 ALE 描述中^[9]。耦合边界的处理方式是离散的流体方程和结构方程耦合的关键。在耦合面上必须满足力的平衡条件以及位移和速度的协调条件^[10]。耦合面上力的平衡条件为沿耦合面的法线方向, 流体应力和结构应力须相等, 即:

$$n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \tag{4}$$

式中: n 是流固耦合面处的法线方向; τ_f 、 τ_s 为流固耦合面上的流体应力和结构应力。

$$d_f = d_s \tag{5}$$

式中: d_f 为耦合面上的流体位移; d_s 为耦合面上的固体位移。

2 流体体积法 (VOF 方法)

VOF 方法是一种可以在固定的欧拉网格下进行表面追踪的方法, 它可以处理任意的自由表面。在 VOF 模型中, 所有流体共用一套动量方程, 计算时在每个计算单元内都记录下各流体组分所占有的体积率, 通过追踪流体体积所占网格单元体积份额的途径来描述自由表面的变化。即 VOF 方法是利用计算网格单元中流体体积量的变化和网格单元本身体积的比值函数 F 来确定自由面的位置和形状^[11]。变量 $F = 0$, 则单元为空; $F = 1$, 单元被流体占满; F 的值在 0 和 1 之间, 单元内存在自由表面或含有比单元尺度小的气泡。基于 F 的局部值, 适当的属性和变量在一定范围内被分配给每一个控制体积。

VOF 方法追踪的是网格单元中流体体积的变化, 而不是自由液面流体质点的运动, 这与 Harlow 和 Welch^[12] 提出的 MAC 方法不同。相对于其他几种方法, VOF 方法可以处理自由面重入等强非线性现象, 可以对气液二相流中空气作用的影响以及气液的相互作用进行较精细的数值模拟^[13], 所需时间更短, 存储量更少, 且更具有有效性和稳健性, 因此是目前处理自由液面问题的有效方法。作为一种比较成熟的流场液面追踪方法, 它在流体力学研究和实际工程领域得到广泛应用。VOF 模型的应用实例包括液体中大气泡的流动、水坝决堤时的水流等。本文采用 VOF 方法追踪气液二相流中的自由液面运动。

在气液二相流模型中, 需要同时计算气体和液体的运

动。对于不相容流体, 密度和黏性系数沿着颗粒轨迹是常数, 并且通过流体速度进行平流输送。因而应满足:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + u_j \frac{\partial \mu}{\partial x_j} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = 0 \tag{7}$$

引入 VOF 方程:

$$F = \frac{\rho - \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \tag{8}$$

上式变为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \tag{9}$$

3 算例及成果分析

3.1 计算模型的建立

某混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 158 m, 坝底高程 25 m, 坝高 133 m。覆盖层厚 25 m。动力计算中坝体等均采用线弹性材料。水体的体积模量为 2.1 GPa, 风的体积模量为 1 MPa。

模型采用等参 4 节点平面有限单元。坝体采用二维实体单元模拟, 水体和风体采用二维流体单元模拟。坝体有限元网格见图 1, 网格节点总数 2 899 个, 单元总数 2 740 个。各剖面计算范围为: 上、下游范围地基及水库长度均取 1 倍坝底宽, 地基深度取 1 倍坝高。边界约束为: 地基周围为法向链杆约束。流体网格见图 2。流体网格节点总数 6 165 个, 单元总数 5 968 个。水和坝体、风与坝体之间均采用流固耦合边界条件。风区入口处风速取 10 m/s (8 级风)。流体采用 VOF 方法追踪自由表面。

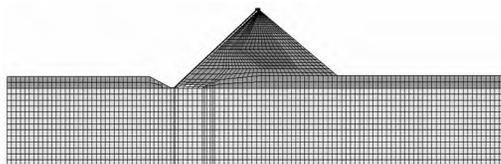


图 1 大坝有限元网格及分区

Fig. 1 The finite element mesh and partition of the dam

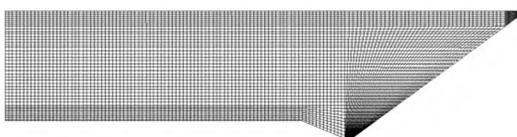


图 2 流体有限元网格

Fig. 2 The finite element mesh of the fluid

El Centro 地震波按顺河向、竖向输入, 顺河向峰值加速度为 3.147 m/s², 竖向峰值加速度为 2.101 m/s²。地震动历时 20 s。地震波时程曲线见图 3、图 4。

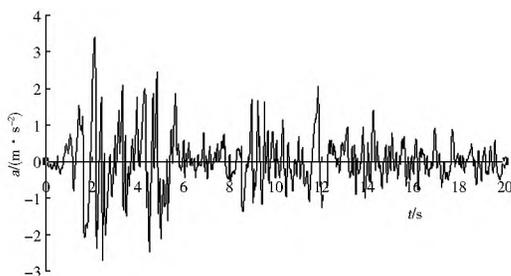


图 3 Y 向地震加速度

Fig. 3 The seismic acceleration at Y direction

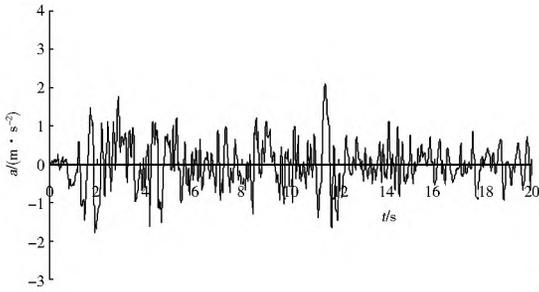


图4 Z向地震加速度

Fig. 4 The seismic acceleration at Z direction

3.2 动力响应分析

3.2.1 动水压力分析

对于坝水相互作用和 10 m/s 风速作用的情况, 分别取水深 25 m 且与坝接触的点为特征点, 制作动水压力时程曲线, 见图 5。坝水相互作用时, 动水压力最大值为 110 187 kPa; 10 m/s 的风作用于水面时, 动水压力最大值为 202 837 kPa, 较无风时增大了 84.08%。结果表明, 当有 10 m/s 的风作用于水面时, 动水压力显著增大; 二者峰值出现位置基本相同, 但有风作用时动水压力的波动幅度大且剧烈。由动水压力时程曲线可以看出, 水与坝体的相互作用是复杂的非线性过程, 因而其动力分析是十分必要的。

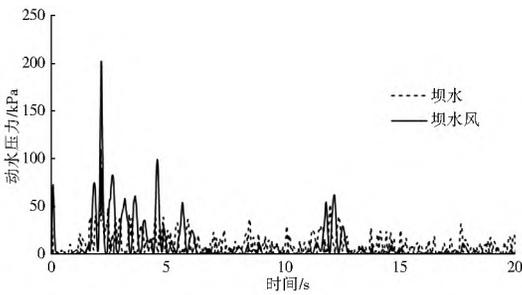


图5 坝水作用时动水压力

Fig. 5 The dam water hydrodynamic pressure

3.2.2 动位移分析

取上游面坝顶点为特征点, 分别制作动位移时程曲线, 见图 6、图 7, 表 1 列出了各工况坝顶点的动位移峰值。由图 6、图 7 和表 1 可知, 各工况下坝顶点动位移响应的时程规律基本一致, 且空库时坝体的动位移响应峰值最小, 坝水相互作用增大了坝体的动位移响应峰值; 顺河向峰值较空库时增大了 1.16%, 竖向峰值较空库时增大了 6.5%; 坝水相互作用对竖向峰值的影响较为显著, 而风对大坝的动位移基本没有影响。

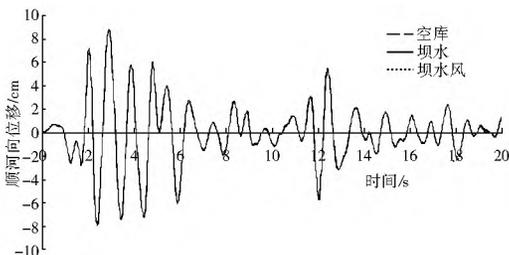


图6 坝顶点顺河向动位移

Fig. 6 The horizontal dynamic displacement of dam crest point

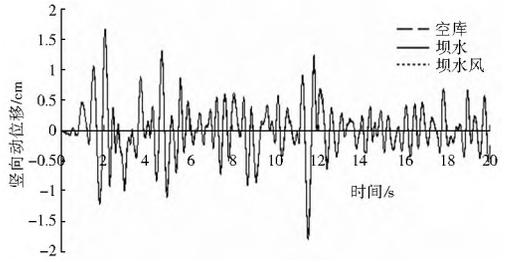


图7 坝顶点竖向动位移

Fig. 7 The vertical dynamic displacement of dam crest point

表1 坝体上游面顶点动位移峰值

Table 1 The dynamic displacement peak of dam crest point (unit: cm)

工况	顺河向峰值	竖向峰值
空库	8.64	1.69
坝水相互作用	8.74	1.80
坝水风相互作用	8.74	1.79

3.2.3 绝对加速度分析

表 2 列出了上游面坝顶点的绝对加速度峰值, 图 8、图 9 为各工况下坝顶点绝对加速度时程曲线。可以看出, 各工况下绝对加速度分布规律基本一致。空库大坝自振的绝对加速度峰值最小, 坝水相互作用的顺河向绝对加速度峰值较空库自振增大了 22.7%, 竖向绝对加速度峰值增大了 0.2%。可见, 坝水相互作用加大了大坝的振动, 并且对顺河向加速度的影响较为显著。坝水风相互作用的绝对加速度峰值与坝水相互作用的峰值基本相同, 风对大坝的绝对加速度基本没有影响。

表2 坝体上游面顶点绝对加速度峰值

Table 2 The absolute acceleration peak of dam crest point
m/s²

工况	顺河向峰值	竖向峰值
空库	4.58	4.04
坝水相互作用	5.62	4.05
坝水风相互作用	4.90	4.03

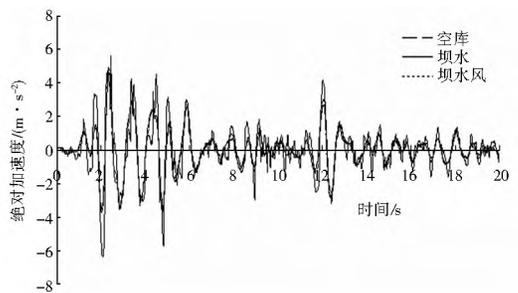


图8 坝顶点顺河向绝对加速度

Fig. 8 The horizontal absolute acceleration of dam crest point

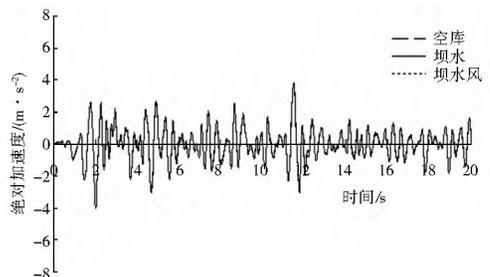


图9 坝顶点竖向绝对加速度

Fig. 9 The vertical absolute acceleration of dam crest point

3.2.4 VOF 自由液面分布图

图 10 给出了不同时刻 VOF 的流场自由液面分布图及 20 s 时速场的速度矢量图,可以看出,在地震和风的共同作用下,水体表面最初产生微小扰动,随着时间的增加,靠近坝体的水面壅高显著增加,能明显看到波浪的产生、水流的反弹及水花飞溅、融合现象;从速度矢量场可以看出,在近坝区的库底地形变化处,水流速度较快,会形成一个大的涡,说明空气对水流的影响不可忽视。上述结果证明了 VOF 方法追踪自由液面的优越性和可靠性,前人也对 VOF 方法追踪气液二相流自由液面的优越性进行过研究和验证。

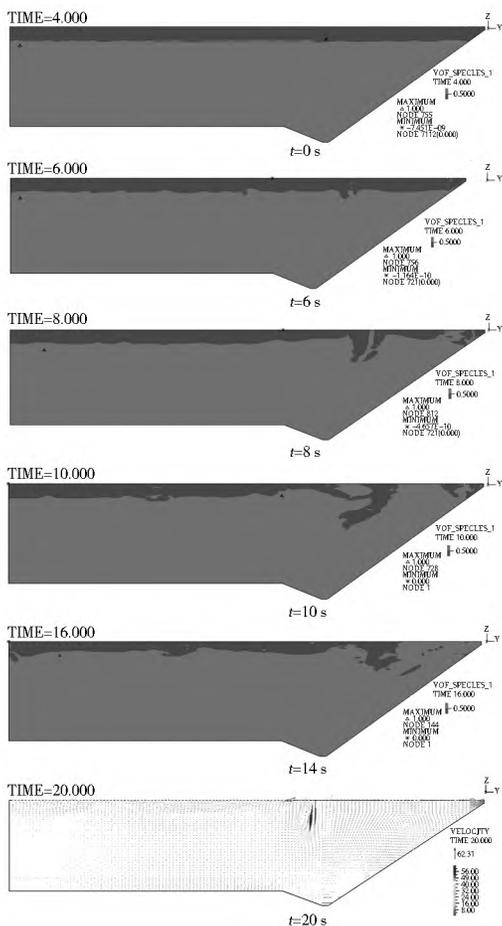


图 10 各时刻流场自由液面分布及流场矢量

Fig. 10 Free surface distribution and flow field vector at different times

4 结论

(1) 在风荷载的作用下,动水压力的峰值较无风时显著增大,且动水压力的变化规律与坝水相互作用时基本相同,呈现出强非线性。

(2) 坝水相互作用能增大坝体振动的动位移和绝对加速度响应,空库时坝体动位移和绝对加速度最小,水库有水时动位移和绝对加速度均增大。风载对坝体的绝对加速度基本没有影响。

(3) 耦合计算的可视化结果表明,VOF 方法模拟风吹水面得到的结果与实际情况较符合。也说明了 VOF 方法追踪自由液面的优越性和可靠性。

参考文献(References):

[1] 程昌华,邓伯强.库区风浪对水库港码头建设的影响[J].重庆交通学院学报,2001,20(3):112-115.(CHENG Changhua, DENG Boqiang. Investigation of the Characteristics of Multi-phase Rupture Destructive Action Emulation on the Regulating Structures at Mountain Ous Rivers[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(3): 112-115. (in Chinese))

[2] 沈浩,韩时琳,赵利平.风成波浪与堤岸相互作用的综述[J].水运工程,2004,364(5):12-15.(SHEN Hao, HAN Shilin, ZHAO Liping. Interaction Between Wind Wave and Bank[J]. Port & Waterway Engineering, 2004, 364(5): 12-15. (in Chinese))

[3] Wolf J, Prandh D. Some observations of wave current interaction[J]. Coastal Engineering, 1999, 37: 471-485.

[4] 王万生,薛文兵,贺存放.三门峡库区护岸工程浪高及风浪爬高的计算与验证[J].山西水利科技,1995,108(4):26-28.(WANG Wan sheng, XU Wen bing, HE Cun fang. The Calculation and Verification of Sanmenxia Reservoir Bank Engineering Wave Height and Wave Climb. Shanxi Hydrotechnics, 1995, 108(4): 26-28. (in Chinese))

[5] 刘亮,张华.U形渡槽三维流固耦合体风振响应分析[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(4):421-425.(LIU Liang, ZHANG Hua. Fluid Structure Interaction System for U-shaped Aqueduct[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(4): 421-425. (in Chinese))

[6] SHIN S, LEE W I. Finite element analysis of incompressible viscous flow with moving free surface by selective volume of fluid method[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000(21): 197-206.

[7] FILIPOVIC N, MIJAILOVIC S, TSUDA A, et al. An implicit algorithm within the arbitrary Lagrangian Eulerian formulation for solving incompressible fluid flow with large boundary motions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195: 6347-6361.

[8] SOULI M, ZOLESIO J P. Arbitrary Lagrangian Eulerian and free surface methods in fluid mechanics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 191: 451-466.

[9] 李俊晓.考虑流固耦合的高耸钢结构抗风数值模拟[D].济南:山东大学,2011.(LI Jun xiao. Numerical Simulation of Fluid Structure Interaction for Wind induced Response of High rise Steel Structures[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese))

[10] Bathe K J, Zhang H, Ji S. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions[J]. Computers and Structures, 1999, 72(1-3): 1-16.

[11] 钟小彦.基于多孔介质模型和VOF法的渗流场数值模拟[D].西安:西安理工大学,2010.(ZHONG Xiao yan. Numerical Simulation of Seepage Field Based on Porous Media Model and Vof Method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))

[12] Harlow F. H., Welch J. E. Numerical calculation of time dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface[J]. Physics of Fluids, 1965, 8(12): 21-32.

[13] 张薇.基于VOF方法和浸入边界法的粘性二相流的数值模拟[D].广州:华南理工大学,2012.(ZHANG Wei. Numerical Simulation of the Viscous Two-Phase Flow Based on VOF and IBM[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))