

文章编号: 1000-7709(2011)08-0100-03

# 基于 ADINA 的塔体内外动水压力分布规律研究

谭聪睿<sup>1</sup>, 张燎军<sup>1</sup>, 龚存燕<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳水务规划设计院, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 基于 ADINA 软件提供的流固耦合模块, 采用软件中的势流体单元模拟水体, 构建了简化的塔体—地基—水体有限元动力分析二维模型, 并对其施加人工地震波分析了塔体内外的动水压力分布规律, 比较了塔内外最大动水压力计算值与理论值。结果表明, 该方法对高耸塔体结构的抗震设计有一定参考作用。

**关键词:** 动水压力; 进水塔; 流固耦合; ADINA; 势流体单元

中图分类号: TV222.2

文献标志码: A

水库进水塔一般高度较高、横截面相对较小, 属于高耸建筑物, 地震时动力响应较大。目前, 进水塔动水压力的计算一般采用 Westergaard、矩形有限水体的两种附加质量公式<sup>[1,2]</sup>, 仅考虑了水体对结构的影响, 将水体转换为附加质量施加于结构上, 但未体现动力作用下水体与结构的耦合作用。鉴此, 本文利用 ADINA 软件中的势流体单元模拟水体, 针对简化模型建立水体网格, 考虑结构—水体的耦合作用, 分析了塔体结构在不同工况下塔体内外动水压力的分布规律, 并将计算的最大动水压力值与理论值进行比较。

## 1 ADINA 势流体流固耦合的基本理论

ADINA 软件对水体的模拟可采用 ADINA 的势流体单元和 ADINA-F 计算模块两种单元。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各种条件, 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<sup>[3,4]</sup>。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为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} M_{SS} & 0 \\ 0 & M_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\Delta u} \\ \ddot{\Delta \phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{UU} + C_{SS} & C_{UF} \\ C_{FU} & - (C_{FF} + (C_{FF})_S) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\Delta u} \\ \dot{\Delta \phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{UU} + K_{SS} & K_{FU} \\ K_{UF} & - (K_{FF} + (K_{FF})_S) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_U \\ F_F + (F_F)_S \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{SS} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_U \\ F_F + (F_F)_S \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\Delta u$ 、 $\Delta \phi$  分别为未知的位移矢量增量、势增量;  $F_U$ 、 $F_F$ 、 $(F_F)_S$  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, 具体计算公式可参见文献<sup>[3, 5]</sup>;  $M_{SS}$ 、 $C_{SS}$ 、 $K_{SS}$ 、 $F_{SS}$  分别为结构的质量、阻尼、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、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。

## 2 计算模型与计算参数

### 2.1 计算模型

Westergaard 附加质量公式及矩形有限水域公式均由二维模型所推导, 为便于比较, 本文亦建立二维进水塔—水体—地基有限元模型。

(1) 选取范围。某二维塔体结构横截面尺寸及水深见图 1。地基宽度沿塔体分别向外侧取 3 倍塔宽, 高度取 1/2 塔体高度; 塔外两侧水体宽度各取 3 倍塔宽。

(2) 边界条件。①固体边界条件。将地基底部固定约束, 地基两侧边界法向链杆约束。②水体表面边界条件。考虑水体表面波动及表面不波动两种情况, 前者在 ADINA 中通过在模型上施

收稿日期: 2011-02-17, 修回日期: 2011-04-15

作者简介: 谭聪睿(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水灾害与水安全, E-mail: tcrxc@hotmail.com

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

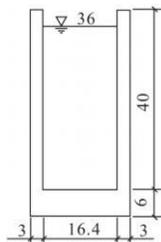


图 1 二维塔体横截面尺寸及水深示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic of cross-section and water depth of 2D tower

加 free-surface 的形式实现,后者通过施加水面固定约束的形式实现。③水体与塔体交界面。将水体与塔体接触面设置为流固耦合边界。

(3) 模型网格。为了解塔体内外动水压力的分布规律,考虑塔外有水+塔内无水(工况 1)、塔外无水+塔内有水(工况 2)、塔外有水+塔内有水(工况 3) 三种工况。塔体内外均有水时的模型网格图见图 2。

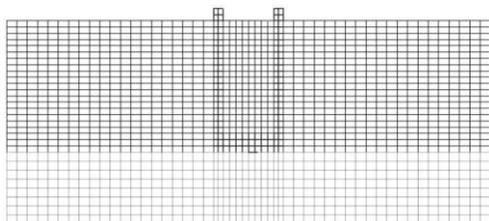


图 2 塔外有水+塔内有水(工况 3) 网格图

Fig. 2 Element grid for water inside and outside intake tower

### 2.2 计算参数

(1) 二维塔体。取 C30 混凝土,弹性模量  $E=30 \text{ GPa}$ ; 当考虑塔体材料为刚性时,将其弹性模量设为  $E=1 \times 10^{11} \text{ GPa}$ ,混凝土材料密度  $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比  $\nu=0.167$ 。

(2) 地基。作为刚性地基考虑,取其弹性模量  $E=1 \times 10^{11} \text{ GPa}$ 。

(3) 水体。体积模量为  $2 \text{ GPa}$ ,密度  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ; 当考虑水体不可压时,ADINA 中水体不可压缩默认的体积模量为  $1 \times 10^{11} \text{ GPa}$ 。

### 2.3 地震动输入

为研究塔体动水压力的分布规律,对塔体施加人工地震波荷载。已知某地震波加速度  $a=0.382g$ ,地震特征周期  $T_g=0.4 \text{ s}$ 。按规范<sup>[6]</sup>反应谱拟合 10 s 人工地震波加速度时程曲线见图 3。时程分析阻尼比  $\xi_r=0.05$ ,采用 Rayleigh 阻尼假设,阻尼系数采用对应的前两阶频率计算。在计算动水压力时,地面运动可仅考虑水平分量而忽略其竖向分量<sup>[6]</sup>,所以仅考虑水平地震波的影响,地震波从地基基础底部输入。计算时采用时

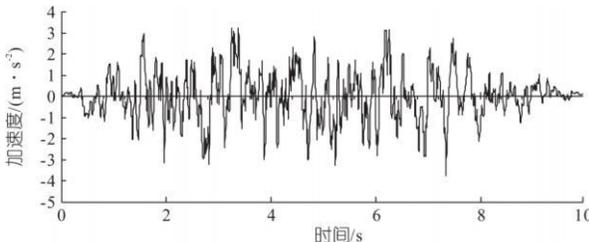


图 3  $a=0.382g$  时的人工拟合地震波加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time histories curve of  $a=0.382g$  间步数为 1000 步,时间步长为 0.01 s。模型整体不考虑重力影响。为方便分析,整个过程中不考虑动弹性模量提高对动水压力值的影响。

## 3 塔体内外动水压力分布规律研究

### 3.1 塔外

输入地震波计算后可得塔外最大动水压力沿水深的分布,见图 4。由图可看出:①塔外最大动水压力的计算值与 Westergaard 理论值较接近,尤其当塔体为刚性材料、水体不可压时吻合最佳。②当塔体为弹性材料、塔内有水时,塔外最大动水压力的计算值在中间部位稍增大,在塔底及塔顶附近稍减小;当塔体为刚性材料、水体不可压时,塔内是否有水对塔外最大动水压力无影响。③塔内无水时,水体的压缩性对塔外所受的最大动水压力有一定影响。当塔体为弹性材料时,可压水体计算所得的塔外最大动水压力值大于不可压水体对应值。④塔内无水时,塔体结构的弹性对塔外

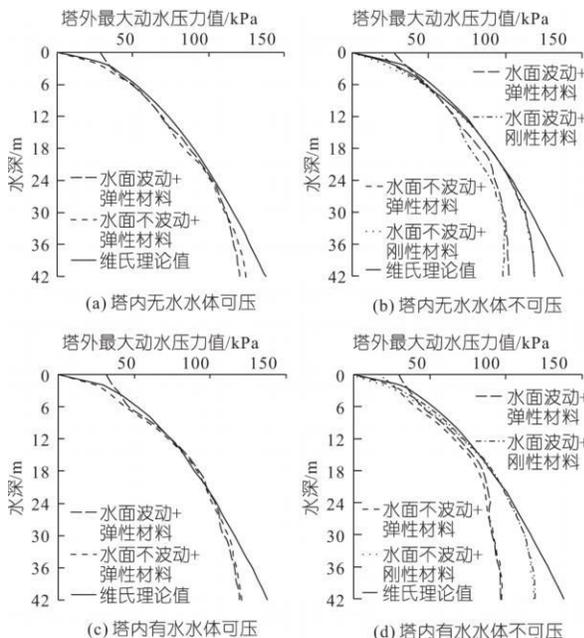


图 4 塔外最大动水压力沿水深的分布

Fig. 4 Distribution of the maximum hydrodynamic pressure along depth outside intake tower

最大动水压力分布有一定影响。当水体不可压时,增大塔体弹性模量将使塔外最大动水压力增大。

⑤水体表面的波动性对塔外最大动水压力影响不大。

### 3.2 塔内

塔内最大动水压力沿水深的分布见图 5。由图可看出:①塔内最大动水压力的计算值与矩形有限水域理论值均较接近;当水体不可压、塔体为刚性材料时吻合最佳。②当塔外无水、塔体为弹性材料时,塔内最大动水压力的计算值在水深小于 18 m 时比矩形有限水域理论值稍大;当水深大于 18 m 时比理论值稍小。③当塔体为弹性材料、水体可压时,塔外水体对塔内最大动水压力的分布影响较大,塔外水体将使塔内最大动水压力增大。④塔外无水时,水体的压缩性对塔内最大

动水压力有一定影响。当塔体为弹性材料时,可压水体计算所得的塔内最大动水压力大于不可压水体对应值,但增大较小。⑤塔外无水时,塔体材料的弹性对塔内最大动水压力有一定影响。水体不可压时,刚性材料的塔体将使水深大于 18 m 处的塔内最大动水压力增大。⑥水体表面是否波动对塔内最大动水压力的影响较小。

## 4 结 语

为计算考虑结构-水体耦合作用下高耸进水塔的塔体内外动水压力,采用 ADINA 软件的势流体单元进行模拟,并将计算值与 Westergaard 理论值及矩形有限水域理论值进行比较,获得了塔体分别为刚性、弹性,水体可压、不可压情况下的塔内外动水压力沿水深的分布情况,可为类似工程提供参考。

### 参考文献:

- [1] 张子明,杜成斌,江泉. 结构动力学[M]. 南京:河海大学出版社,2001.
- [2] 张燎军. 闸涵结构的抗震分析与设计[J]. 世界地震工程,2003,19(2): 67-71.
- [3] ADINA R & D. Inc. ADINA Theory and Modeling Guide-Volume I: ADINA Solid & Structures[M]. USA: ADINA, 2005.
- [4] 刘金云,陈健云. 势流体与 N-S 流体的应用及比较研究[J]. 人民长江,2009,40(20): 27-31.
- [5] 龚存燕. 基于 ADINA 流固耦合的高耸进水塔地震反应分析[D]. 南京:河海大学,2010.
- [6] 中国水利水电科学研究院,电力工业部昆明勘测设计研究院,电力工业部西北勘测设计研究院,等. 水工建筑物抗震设计规范(DL5073-2000)[S]. 北京:中国电力出版社,2000.

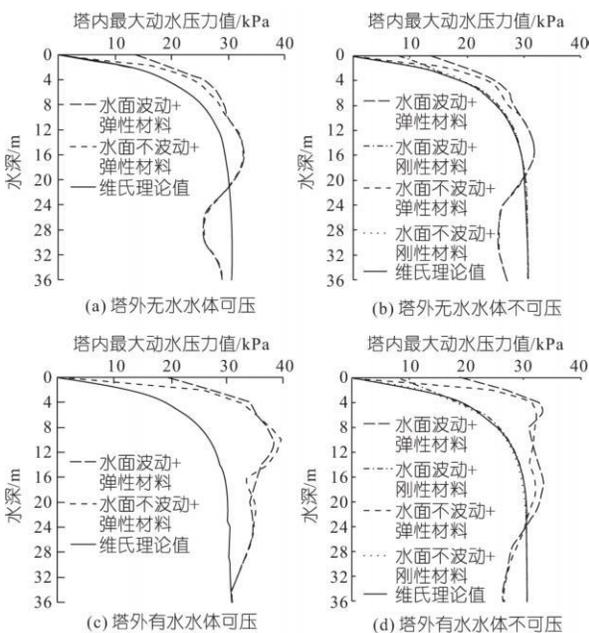


图 5 塔内最大动水压力沿水深的分布

Fig. 5 Distribution of the maximum hydrodynamic pressure along depth inside intake tower

## Application of ADINA to Distribution of Hydrodynamic Pressure Inside and Outside of Intake Tower

TAN Congrui<sup>1</sup>, ZHANG Liaojun<sup>1</sup>, GONG Cunyan<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shenzhen Water Planning and Design Institute, Shenzhen 518001, China)

**Abstract:** Based on the fluid-solid coupling module of ADINA, the tower-foundation-water body finite element dynamic analysis model is established by using potential fluid element in ADINA to simulate water body. The distribution of hydrodynamic pressure inside and outside of the intake tower is studied with exerting artificial seismic wave. Then the maximum calculated value of hydrodynamic pressure is compared with the theoretical value. The results show that the method provides reference for aseismic design of high-rise tower body structure.

**Key words:** hydrodynamic pressure; intake tower; fluid-solid coupling; ADINA; potential fluid element