

文章编号:1002-5634(2011)01-0017-03

河流矩形冰盖结构的动力特性分析

孟闻远¹, 王璐¹, 许雷阁², 郭颖奎¹

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要:冰盖结构的动力特性属于流固耦合系统中的动力学问题。根据黄河凌汛的特点和现场破冰试验采集的数据,研究了冰盖前20阶振型、不同厚度下自振频率和阶次的关系、自振频率和水深的关系等。研究结果有助于提高定向爆破的效率。

关键词:凌汛;冰盖;流固耦合;自振频率;振型

河流凌汛灾害集中在我国北方地区,通常采用轰炸机投掷炸弹或人工安放炸药的方法进行爆破破冰^[1-2],而利用冰盖动力特性进行定向破冰在国内尚属少见。鉴于此,课题组于2010年3月上旬专赴内蒙古包头市磴口黄河冰封河段进行破冰试验,主要研究内容有:①通过控制人工波的频率来控制冰体的破碎尺寸;②分析振型的波峰和波谷,在最大位移处做切割处理试验,进而总结冰体破裂的规律,以达到铲除冰坝、疏通河道的目的。

1 冰盖结构动力特性研究方法

1.1 振动微分方程理论分析

当浮冰与河水混合流动时,冰盖的结构动力响应很大,其显著特点是固体和流体的变形相互影响,可视其结构动力特性为流固耦合系统的动力学问题^[3]。虽然动力学控制方程中未知变量无法由固体域和流体域单独求解,但利用有限元法^[4]和ANSYS分析软件可有效解决此难题。

考虑水的影响,必须建立水体单元,根据纳维-斯托克斯方程可得出方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0, \quad (1)$$

式中:c为液体介质中的声速, $c = \sqrt{k/\rho_0}$;k为液体的体积弹性系数; ρ_0 为液体的平均密度;p为流体压

力;t为时间; ∇^2 为拉普拉斯算子。

经过运算,空间压力和位移变化用有限元的形函数近似表示为

$$P = N^T P_e, \quad X = N'^T X_e, \quad (2)$$

式中:N,N'分别为单元体的压力与位移形函数; P_e , X_e 分别为节点的压力与位移向量。

为了完整地描述流固耦合问题,作用在界面上的流体压力载荷矢量 F_e^p 必须考虑在内,则固液耦合振动微分方程可写为

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx - F_e^p = F, \quad (3)$$

式中: $F_e^p = \int_S N' P n ds = p_e \int_S N' N^T n ds$, n 为流体边界向量; M , C 和 K 分别为流体的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; x , \dot{x} 和 \ddot{x} 为位移,速度和加速度; F 为流固耦合界面的荷载向量。

1.2 结构模型

根据文献[5-6],冰的密度为900 kg/m³,弹性模量为 3.0×10^8 Pa,泊松比为0.33,声波速度为1460 m/s。对以水为介质的冰体进行模型分析时采用的假设条件为:①耦合作用仅发在两相界面上;②流体是无粘性的理想液体。

以矩形冰盖为研究对象,长宽尺寸固定为100 m×50 m,厚度分别为40,50,60,70,80,90,100 cm,分析的内容包括3部分:①水深一定的条件下,计算

收稿日期:2012-12-20

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0611010700)。

作者简介:孟闻远(1965—),男,河南郾城人,教授,博士,主要从事数值计算新方法、结构静动态分析及稳定性分析等方面的研究。

冰盖厚度为 50 cm 时的自振频率,并绘制前 20 阶振型图;② 厚度不同的冰盖在空气和水中的自振频率与阶次的关系;③ 冰盖厚度为 70 cm 时,各阶自振频率和水深的关系。

2 冰盖结构动力计算

2.1 冰盖的振型情况

通过计算分析可知:尺寸相同的冰体,无论处于

空气或水介质中,各阶振型均相同;冰体厚度与其平面相比很小,所以厚度变化对各阶振型的影响可以忽略不计。主要研究水深为 5 m 时,厚度为 50 cm 的冰盖前 20 阶自振频率变化趋势,列出 9 阶振型如图 1 所示。由图 1 可知:① 当冰盖厚度一定时,自振频率与阶次数成正比例关系;② 由于冰盖有限元模型的几何形状和材料性质具有对称性,所以结构的各阶振型也呈现出对称性。

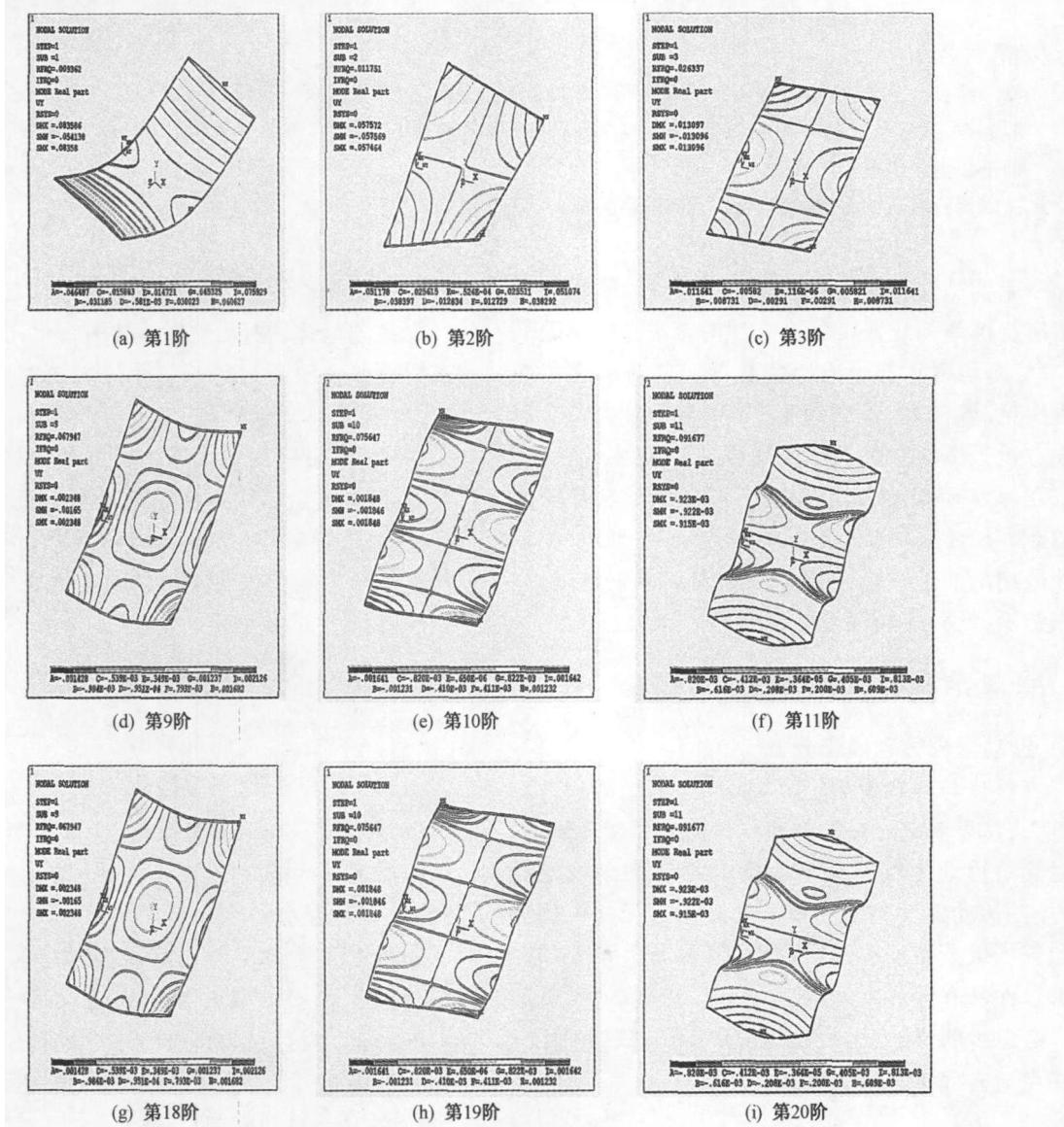


图 1 矩形冰盖振型图

2.2 自振频率与阶次的关系

由结构动力学理论可知,自振频率与其材料的质量和刚度有关。冰盖在流固耦合场作用下相当于增加了自身重量,而结构的刚度没有发生变化,因此结构的自振频率会减小。而当冰盖处于某一介质中时,其厚度对自振频率和阶次也会产生影响,由图 2 分析可知:① 无论冰盖处于空气或水介质中,其自振频率均随阶次的提高而增大,但在相同阶次下,结

构在空气中的自振频率高于水中近一倍;② 在流固耦合作用下,冰盖越厚,结构的弯曲刚度越大,因此自振频率随阶次的提高而加速增大,即刚斜率变大;③ 由于矩形冰盖的最小边长为 50 m,而其厚度最大为 1 m,所以结构动力特性及其影响因素可用薄板理论进行解释,当某一阶振型确定之后,结构的自振频率与厚度成一次线性关系,即阶次越高受厚度的影响越明显。

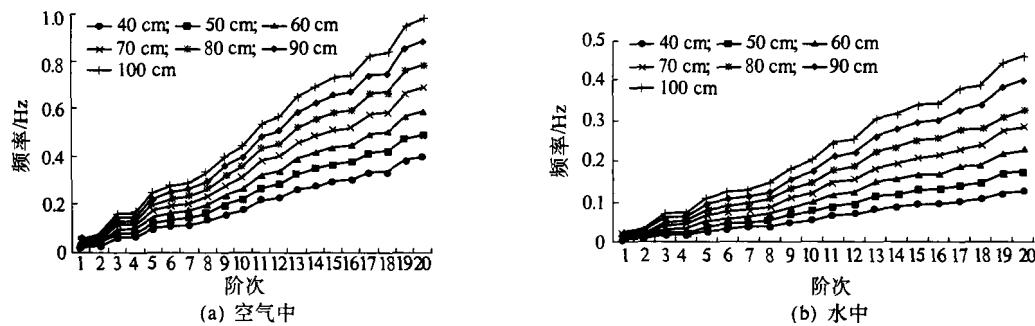


图2 不同厚度冰盖的自振频率与阶次的关系

2.3 自振频率与水深的关系

以厚度为70 cm的冰体为对象,分别计算了水深为2,4,6,8,10,12,14,16,18 m时结构面的前20阶自振频率,并绘制出相关曲线如图3所示。当水深小于8 m时,冰盖前20阶自振频率受水深影响较大,随着水深的继续增加,自振频率变化一般不大于10%;当水深超过12 m后,自振频率受水深的影响就可以忽略。因此,在对冰盖进行定向爆破时,准确测量水深可在一定程度上提高破冰效率。

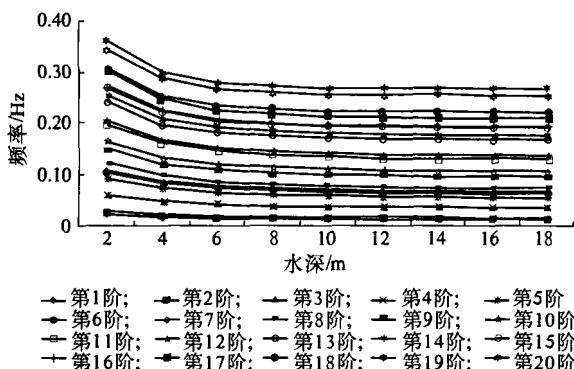


图3 冰盖前20阶自振频率与水深的关系

3 结语

a. 无论冰盖处于空气或水中,自振频率和阶次均近似服从线性关系,但结构在空气中的自振频率

要明显大于在水中的自振频率。

- b. 冰盖各阶振型对称,通过振型图所确定的波长,将有效提升定向爆破的技术水平。
- c. 冰盖结构自振频率的阶次越高受厚度的影响越明显。采用有限元法对流固耦合系统的动力学问题进行求解具有高效、准确的优点。
- d. 冰盖结构的自振频率受浅水的影响明显,因此正确评价水体的影响范围将极大提高定向爆破的效率。

参 考 文 献

- [1] 佟铮,马万珍,王宁.黄河内蒙古河段凌汛期爆炸破冰的基本方法[J].人民黄河,2003,25(12):8-9.
- [2] 冯国华.黄河内蒙古段冰凌特征分析及冰情信息模拟预报模型研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [3] 徐刚,任文敏.三维浮式结构的流固耦合动力特性分析[J].应用数学和力学,2004,25(3):305-312.
- [4] 王勘成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [5] 佟铮,马万珍,曹玉生.爆炸与爆破技术[M].北京:中国公安大学出版社,2001.
- [6] G W Timco, W F Weeks. A review of the engineering properties of sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2):107-129.

Analysis on the Dynamic Characteristic of Rectangular Ice-cover Structures in River

MENG Wen-yuan¹, WANG Lu¹, XU Lei-ge², GUO Ying-kui¹

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The dynamic characteristic of ice-cover structure was the dynamics problem in the fluid-solid-interaction system. On the basis of Yellow River ice flood's feature and data collected in field breaking-ice test, the paper analyzed twenty-order shake models prior to ice-cover, the relation of natural frequency and order, and the relation of natural frequency and water depth. The research results will help improve efficiency of directional blasting.

Key words: ice flood; ice-cover; fluid-solid-interaction; natural frequency; model of vibration

(责任编辑:陈海涛)