

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^{pr} 必须考虑在内, 则固液耦合振动微分方程可写为

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

式中: $F_e^{pr} = \int_s N' P n ds = p_e \int_s N' N^T n ds$, 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/m^3 , 弹性模量为 $3.0 \times 10^8 \text{ Pa}$, 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 $100 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 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.

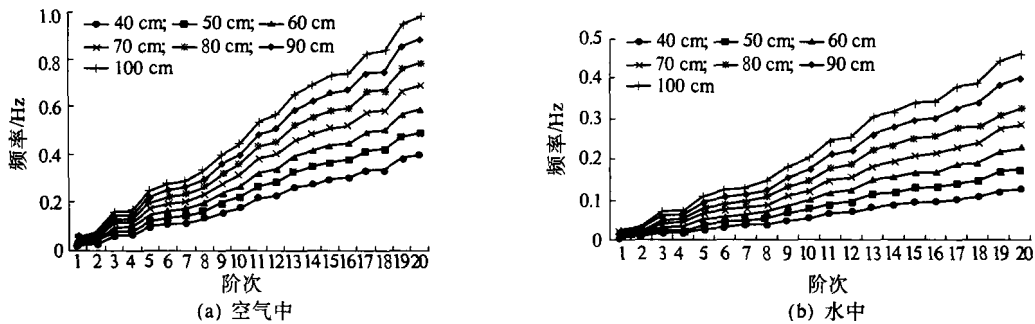


图 2 不同厚度冰盖的自振频率与阶次的关系

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

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.

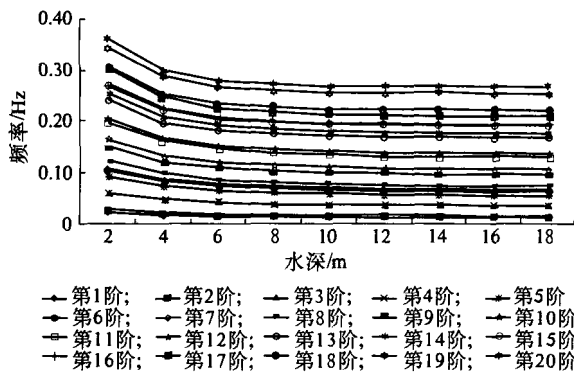


图 3 冰盖前 20 阶自振频率与水深的关系

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

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] 王勖成. 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:中国人民公安大学出版社,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)