

基于不同碰撞模型的流冰—输水隧洞 碰撞动态响应研究

王鸿^{1,2}, 贡力^{1,2}, 王忠慧¹, 杜强业¹, 张秉宗¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 调水工程及输水安全研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 位于西北寒区的输水隧洞在流冰期输水时会受到流冰不同程度的撞击作用。由于流冰与隧洞衬砌撞击时水介质会对其撞击结果产生一定的扰动性,因此,为了研究水介质对于中小型流冰撞击结果的影响作用,以引大入秦工程盘道岭37#隧洞为研究对象,分别建立基于附加质量法以及流固耦合法的流冰—输水隧洞碰撞模型,结合有限元软件LS-DYNA,对流冰撞击输水隧洞衬砌的动态响应进行研究。研究表明:由于水介质的作用,两种碰撞模型中隧洞衬砌高应力区存在着一定的差异性;在模拟流冰撞击输水隧洞时,附加质量模型的计算结果普遍偏大,但其具有建模简单且计算时间较短的优点;流固耦合模型由于将碰撞过程中动水作用以及流冰与输水隧洞逼近时产生的“水垫效应”考虑在内,使其能够更真实地模拟流冰与输水隧洞的真实碰撞状况。

关键词: 水介质; 流冰; 输水隧洞; 碰撞动态响应; 附加质量法; 流固耦合法

中图分类号:TV672

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)01-0164-08

Dynamic response of drift ice – water tunnel collision based on different collision models

WANG Hong^{1,2}, GONG Li^{1,2}, WANG Zhonghui¹, DU Qiangye¹, ZHANG Bingzong¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Water Diversion Engineering and Security of Water Transferring, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Water conveyance tunnels located in the northwest cold region are impacted by the drift ice to different degrees during the drift ice period; however, the water in the tunnel as a medium has an inhibitory effect on the collisions between the drift ice and the tunnel lining. Therefore, in order to study this effect of small and medium drift ice, we chose No. 37 Pandaoling Tunnel of the Datong River to Qinwangchuan Region Water Transfer Project as the research subject. Drift ice – water conveyance tunnel collision models based on the additional mass method and fluid – structure coupling algorithm were established to study the dynamic response of the water conveyance tunnel lining to the collisions caused by drift ice, combined with the finite element software LS – DYNA. The research show that the high stress zones of the tunnel lining in two collision models are different to some extent due to the action of water medium. When using the additional mass model to simulate the impact of drift ice on the water tunnel, the calculation results are generally larger, but it has the advantages of simple modeling and short analysis time. As for the fluid – structure coupling model, which takes into account the dynamic water action in the collision process and the “water cushion effect” generated when the ice approaches the water tunnel, it can better simulate the actual collision scenarios between the drift ice and the water tunnel.

Key words: water medium; drift ice; water tunnel; dynamic response of collision; additional mass method; fluid – structure coupling method

收稿日期:2020-05-22; 修回日期:2020-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51969011、51669010)

作者简介:王鸿(1995-),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事长距离输水安全方面的研究。

通讯作者:贡力(1977-),男,江苏丹阳人,博士,教授,硕士生导师,主要从事输水工程安全方面的研究。

1 研究背景

我国寒旱地区冬季气候寒冷,冰期长,位于该地区的输水隧洞在冬季流冰期输水时容易受到水介质中流冰的撞击,造成输水隧洞衬砌产生龟裂或者表层剥落等现象。所以,处于该地域的输水隧洞在设计 and 运行过程中除了要保证输水隧洞的输水能力以外,还要兼顾输水隧洞的抗碰撞性、抗冻融性以及抗侵蚀性等特殊的工况要求。目前在流冰与水工建筑物碰撞的研究方面,大多数学者集中于流冰与水工建筑物的相互作用上,而很少考虑流冰以及水工建筑物周围水介质所扮演的重要角色^[1]。

流冰与输水隧洞的碰撞是在水介质中发生的,目前国内外的研究方法大多是忽略水介质的影响或者将水介质以附加质量的形式施加于水工建筑物或冰体上来考虑其作用。张宿峰^[2]在忽略水介质影响的条件下,对流冰与桥墩的撞击破坏进行了数值模拟分析;Kim 等^[3]在忽略水介质影响的条件下,通过试验及数值模拟研究了冰锥撞击在平面上的破碎情况;贡力等^[4]在忽略水介质影响的条件下,对线弹性流冰模型与输水隧洞撞击作用进行了相应的研究;李明伟等^[5]在忽略水介质影响的条件下,模拟分析了冰荷载作用对护岸结构的撞击影响;杨亮等^[6]采用流固耦合算法对船舶与海洋平台碰撞进行了分析与研究;Kim 等^[7]采用流固耦合合法利用有限元软件分析了破碎冰对船舶的撞击影响;张健等^[8]采用附加质量法与流固耦合合法对水介质中船—冰碰撞结构响应进行了数值模拟分析。综上所述,国内外学者在采用流固耦合合法分析水介质中流冰对输水隧洞撞击作用方面的研究较少,且采用流固耦合合法以及附加质量法对于小型流冰撞击输水隧洞方面的分析研究也较少。

因此,为了分析水介质对流冰与输水隧洞碰撞的影响作用,本文采用理论分析结合数值模拟的方法,运用 LS-DYNA 有限元软件对比分析不同碰撞模型下流冰对隧洞衬砌的撞击影响结果,探求适用于小型流冰撞击输水隧洞衬砌较为优化的碰撞模型,为寒旱区输水工程冰期输水安全提供技术参考。

2 流冰—隧洞衬砌碰撞仿真基本理论

2.1 显式时间积分法

在水介质中流冰—输水隧洞衬砌碰撞的整个过程涉及到流冰—水—空气—隧洞衬砌,即脆性固体、液体、气体、弹塑性固体四相物质,且属于强非线性

问题,因此需要利用显式时间积分法对此类问题进行研究与分析^[9]。

流冰与输水隧洞的碰撞属于动力学范畴,因此流冰与隧洞衬砌碰撞过程中的动力学方程如公式(1)所示^[10]:

$$M\ddot{x}(t) = P(t) - F(t) + H(t) - C\dot{x}(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; $\ddot{x}(t)$ 为节点的加速度向量; $P(t)$ 、 $F(t)$ 和 $H(t)$ 分别为外荷载、内力以及沙漏阻尼; C 为阻尼矩阵; $\dot{x}(t)$ 为节点的速度向量。

对于加速度、速度和位移计算,可通过采用中心差分法进行递推,递推的基本格式如公式(2)所示^[10]:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t_n) = M^{-1}[P(t_n) - F(t_n) + H(t_n) - C\dot{x}(t_{(n-1)/2})] \\ \dot{x}(t_{(n+1)/2}) = \dot{x}(t_{(n-1)/2}) + \ddot{x}(t_n)(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n)/2 \\ x(t_{n+1}) = x(t_n) + \dot{x}(t_{(n+1)/2})\Delta t_n \end{cases} \quad (2)$$

在有限元分析软件 LS-DYNA 中,质量矩阵 M 为集中质量矩阵,因此通过其得到的动力学方程是解耦的,无需再经过计算和平衡迭代得到总体矩阵,但是该方法并不是在任何条件下都是稳定的,为了保证最终数值计算结果的稳定性,需采用变步长的计算方法,由当前时刻的稳定性条件对后续每一时刻的积分步长进行控制,每一时刻的积分步长必须保证在小于某一临界值时才能继续进行计算分析,临界时间步长由公式(3)确定^[10]:

$$\Delta t^e = \alpha(l^e/c) \quad (3)$$

式中: Δt^e 为单元 e 的临界时间步长; α 为时间步长因子; l^e 为单元 e 的特征尺寸; c 为纵波波速。

2.2 附加质量法

附加质量法的原理是在建模时忽略水介质模型,而将水介质的动力作用以附加质量的形式附加到流冰上,在减少建模时间及提高计算效率的同时提高模拟结果的计算精度。目前附加质量法在船舶—船舶碰撞以及冰排—船舶碰撞方面研究较多,本文附加质量模型参考船舶碰撞相关的参数及计算公式进行流冰附加质量的计算。Motora 发现撞击运动船体的附加质量 m 与船体质量 m_0 相比很小,只占船体质量的 2%~7%,由于碰撞时间越长,则附加质量越大,而流冰撞击输水隧洞衬砌的时间非常短^[11-12],所以附加质量系数 m_{xx} 选择为 0.02 来进行流冰附加质量 Δm 的计算。在仿真模拟中需要调节流冰密度参数来改变单位体积流冰质量,因而通过公式(4)^[11]完成附加质量的转换计算。

$$\rho = (1 + m_{xx})\rho_0 \quad (4)$$

式中: ρ 为经过附加质量后的流冰密度, kg/m^3 ; m_{xx} 为附加质量系数; ρ_0 为初始流冰密度, kg/m^3 。

2.3 流固耦合

LS-DYNA 在计算固体力学中常用 Lagrange 算法进行计算分析,其结构与单元网格是重合的,网格会随着结构的变形而产生变形。而在计算流体力学时需要 Euler 算法来进行计算。但是,对于流固耦合问题,流动的材料会使有限元网格产生较为严重的变形,造成数值计算结果的不收敛,最终导致数值仿真过程无法正常完成。为了解决此类问题,通常采用 LS-DYNA 程序中的第 3 种算法,即 ALE (arbitrary Lagrange-Euler) 算法来解决。

本文模拟的碰撞过程中隧洞边壁有水介质存在,所以在碰撞过程中不仅存在流冰与隧洞衬砌结构之间的相互作用,流冰和隧洞衬砌结构与周围水介质也存在复杂的相互作用。水介质的运动会引起流冰的运动,继而使得流冰对隧洞衬砌产生冲击作用,因此进行流冰-水-空气-隧洞衬砌的耦合分析时,采用 ALE 算法将会大大提高数值模拟的准确性。模拟中流冰与隧洞衬砌采用拉格朗日网格,水介质与空气介质采用欧拉网格,最后将流体和结构耦合在一起,定义流固耦合关系,实现拉格朗日网格与欧拉网格的相互作用,其相互作用力通过耦合面进行转换与传递。

3 碰撞模型与碰撞方案

3.1 材料模型

3.1.1 流冰材料模型 本文选取引大入秦工程盘道岭 37# 隧洞进行有限元仿真模拟,利用 ANSYS 建立基于附加质量法的流冰-输水隧洞碰撞模型以及流固耦合的流冰-水-空气-输水隧洞耦合碰撞模型。其中在材料模型选取方面,本文所采用的流冰材料参考了杨亮等^[6]的研究数据,基于流冰碰撞时产生的破碎情况,选取了 LS-DYNA 材料库中的第 13 号材料模型,即含有破碎效果的各向同性弹塑性断裂材料作为数值模拟的流冰材料模型。流冰材料模型参数如表 1 所示^[4,6]。

表 1 流冰材料模型参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模 量/GPa	屈服应 力/MPa	塑性模 量/GPa	体积模 量/GPa	塑性失 效应变	截断压 力/MPa
910(928)	2.2	2.12	4.26	5.26	0.35	-4

注:928 kg/m^3 为经过附加质量计算后的流冰密度 ρ 。

3.1.2 隧洞衬砌材料模型 隧洞衬砌混凝土材料模型采用 CSCM-CONCRETE 模型,该模型主要考虑了材料的损伤、率相关性以及硬化等参数,目前在混凝土材料低速冲击方面应用较为广泛。具体材料参数如表 2 所示^[13]。

表 2 混凝土材料模型参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	计算控制 参数	计算控制 参数	率效应 开关	预损伤	侵蚀系数	系数恢复 参数	盖帽选项	抗压强度/ MPa	骨料粒 径/m	单位制
2500	0	0	1	0	1.1	10	0	29	0.02	4

关于表 2 中的部分参数说明如下:(1)率效应开关为控制速度效应模型是否参与计算分析的开关。速率效应公式被用来模拟随着应变速率的增加而增加的强度;(2)预损伤为材料预先存在的损伤;(3)系数恢复参数:当 recover 等于 0(默认值)时,将在压缩过程中恢复系数,当 recover 等于 1 时,系数保持在脆性损伤水平。对 recover 在 0 到 1 之间的值进行部分系数恢复。输入一个 10 到 11 之间的值,恢复是基于压力和体积应变的信号;(4)盖帽选项:该模型是一个剪切屈服面与硬化帽光滑相交的盖帽模型,初始损伤面与屈服面重合。当盖帽选项为 0 时,表示盖帽不收缩,当盖帽选项为 1 时,表示盖帽收缩。

3.1.3 水介质与空气介质材料模型 在本文所建立的仿真模型中包括两种流体材料,即水介质和空气介质。为了使得仿真模拟时两种介质可以产生交换,将二者之间的节点定义为共节点。在材料模型方面,水介质及空气介质均采用 Null 材料模型,状态方程方面两者的区别是,水介质的状态方程采用 Gruneisen 状态方程,空气介质则采用 Polynomial 状态方程来描述。具体参数见表 3~5。

表 3 水介质与空气介质材料模型参数

流体介质	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	截断压力/Pa
水介质	1000	-10×10^5
空气介质	1.1845	-10

表 4 水介质状态方程参数

常数 C	常数 S_1	常数 S_2	常数 γ_0	初始内能 E_0/J	初始相对 体积 V_0
1647	1.921	-0.096	0.35	2.895×10^5	1.0

表 5 空气介质状态方程参数

系数 C_4	系数 C_5	初始内能 E_0/J	初始相对体积 V_0
0.4	0.4	2.53×10^5	1.0

设置材料属性后,建立碰撞模型。引入入秦工程盘道岭 37# 隧洞全长 15.723 km,设计流量为 $32 \text{ m}^3/\text{s}$,加大流量为 $36 \text{ m}^3/\text{s}$,设计水深为 2.92 m,加大水深为 3.37 m,纵坡比为 1:1 000。该隧洞的结构为反拱底板式断面以及圆拱直墙形结构,隧洞的净高为 4.40 m,净宽为 4.20 m,半圆形拱顶,拱顶半径为 2.10 m^[14]。本文选取 4 m 长的隧洞段分别建立基于附加质量法的流冰—输水隧洞碰撞模型以及流固耦合法的流冰—水—空气—输水隧洞耦合碰撞模型,如图 1 所示。

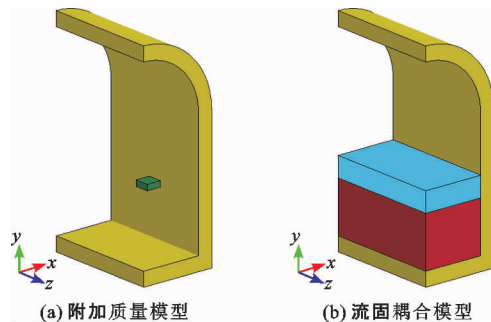


图 1 不同碰撞模型示意图

图 1 中黄色部分为隧洞模型,绿色部分为流冰模型,红色部分为水域模型,蓝色部分为空气域模型。本文选取 $4 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 的空气域模型和 $4 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 2.25 \text{ m}$ 的水域模型。空气域未选择全域而选取厚度为 0.75 m 的一层进行计算分析是因为通过观察自然界流冰,漂浮的流冰大部分是浸泡在水介质中的,只有很小一部分处于空气介质中,而本文研究的是中小型的流冰对输水隧洞的碰撞影响,因此空气域对流冰的影响较小,又基于本文采用的流固耦合法进行计算分析,如果欧拉网格过多,则会造成流固耦合计算时间大大增加。因此本文在保证碰撞结果精确性的条件下选取大约 4 倍流冰厚度的空气域进行整个模型的计算分析。另外,考虑到本文研究的流冰碰撞只作用于隧洞一边,为了节约计算时间,在确保计算结果精度的条件下,选

取对称隧洞的一半进行模型建立与求解分析。

3.2 初始条件及边界条件

利用有限元仿真模拟碰撞问题时,接触问题选择的精确性决定着仿真结果的准确性。LS-DYNA 有动态约束法、罚函数法以及分布参数法 3 种类型的接触算法,且其主要算法为罚函数法。其基本原理为在计算过程中检查主面是否在每个时间步被从节点穿透,如果发现从节点穿透主面,则会在该穿透面与从节点之间引入一个界面接触力,接触力的大小与穿透深度以及主面刚度成正比^[15]。现实情况中的流冰是由水流带动下向隧洞衬砌进行冲击,因此为了较为精确地模拟现实情况中流冰对输水隧洞的冲击,本文在流固耦合模型仿真模拟中将 x 方向的初速度赋予水体,且将流冰与输水隧洞之间的距离保持为 0.005 m,以确保水流推动流冰运动过程中能量损失尽可能的降低。同时考虑水流与流冰之间的相对位移与相对速度,由于漂浮在水面的流冰处于竖向平衡状态,所以在仿真模拟时忽略流冰所受的竖向荷载,从而忽略了流冰在运动过程中的沉浮,只考虑水流拖动流冰运动的水平荷载^[16]。对于附加质量模型,因为该模型中并不存在水体的实体建模,因此该模型中流冰 x 方向的初速度定义首先需要通过流固耦合模型进行计算,然后在计算结果中查询水体赋予流冰 x 方向的最大初速度,最后将该初速度定义为附加质量模型中流冰 x 方向的初速度,将不同碰撞模型中流冰运动的初速度保持一致,以完成后续不同碰撞模型计算结果的对比分析。

在流固耦合方面,LS-DYNA 程序中通过定义流固耦合相关的关键字来实现 Lagrange-Euler 耦合算法,从而实现结构体与流体的耦合计算分析。在定义流固耦合时,首先需要定义多物质单元,在 LS-DYNA 中定义多物质单元的关键字为 *ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP,该关键字将允许空气介质及水介质两种物质同时存在于流体网格中;对于流固耦合问题,在 LS-DYNA 中通常使用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来实现,该关键字是将流体与固体进行耦合,为流固耦合定义中较为核心的部分。边界条件方面,在前处理过程中,隧洞衬砌底板及边壁均进行全约束,流固耦合模型中欧拉单元的边界条件在 xoy 平面的单元均采用无反射边界条件,模拟真实水流在隧洞中流动边界;而 yoZ 平面内的流体由于受到隧洞边界的约束,因此对该平面内的流体单元只进行 x 方向的约束;对于 xoz 平面内的空气层单元,也定义为无反

射边界条件。无反射边界(non-reflecting boundary)通常被应用于 SOLID164 单元上,其原理是通过吸收传至边界的人工应力波,而防止其重新反射进入模型,从而模拟无限域的影响^[17]。

3.3 碰撞方案

流冰与隧洞衬砌的碰撞过程是一个较为复杂的冰与结构之间相互碰撞的问题,影响碰撞的因素主要包括流冰初速度、流冰体积、碰撞面积、流冰厚度以及水介质作用等^[18-19]。为了探究水介质在流冰与输水隧洞衬砌碰撞中的影响,本文根据引大入秦工程的隧洞设计流速及最大流速建立了流速分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 m/s 5 种工况下的流冰与隧洞衬砌碰撞方案,选取基于附加质量法的流冰-输水隧洞碰撞模型以及流固耦合法的流冰-水-空气-输水隧洞碰撞模型,进行碰撞模拟分析。根据引大入秦工程的隧洞运行设计水深及最大水深,选取模型控制水深为 2.25 m。

实际输水工程中的流冰大多数属于形状不规则的板类结构,几何尺寸大小与当地气候条件密切相关,综合考虑到大通河冰情和盘道岭 37# 隧洞所处地理位置以及参照徐国宾等^[20]、陈云飞^[21]在流冰方面的研究成果,本文在模拟仿真时流冰几何形状采用 0.5 m × 0.5 m × 0.2 m 的长方体板型结构模型。图 2 为不同碰撞模型的网格划分图,其中流冰与隧洞初砌定义为拉格朗日网格,水介质与空气介质定义为欧拉网格。为了提高计算结果的精确性,隧洞网格采用分区划分的原则,对隧洞受碰撞区网格进行加密处理^[22]。其中流冰模型有限元单元数为 50,节点数为 108;隧洞模型有限元单元数为 9 804,节点数为 13 036;水介质模型有限元单元数为 19 320,节点数为 21 648;空气介质模型有限元单元数为 6 720,节点数为 8 118。为了更好地展现流冰与水体的接触情况,对流固耦合模型中空气介质的网格进行了隐藏(图 2(b))。

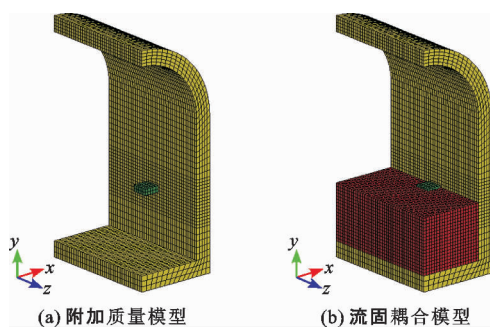


图 2 不同碰撞模型的网格划分

4 结果与分析

4.1 流场状态分析

由于附加质量模型中不存在流体,因此本部分只对流固耦合模型中的流体进行分析。图 3 为流固耦合模型计算过程中不同时刻的流体密度等值线图,图中红色及渐变色部分为水介质,分析中水体没有考虑复杂流态的影响,绿色部分为流冰,为了更好地观察流体密度的变化情况,图 3 中将空气部分及隧洞部分进行隐藏。图 4 为水体推动流冰向隧洞衬砌产生冲击时,水体状态所产生的变化图,蓝色部分为水体,绿色部分为流冰。

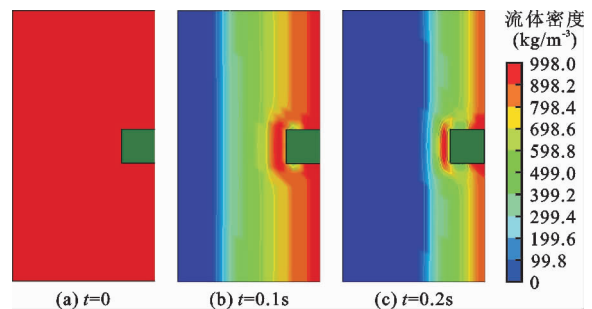


图 3 流冰碰撞隧洞衬砌过程中不同时刻流体密度等值线图

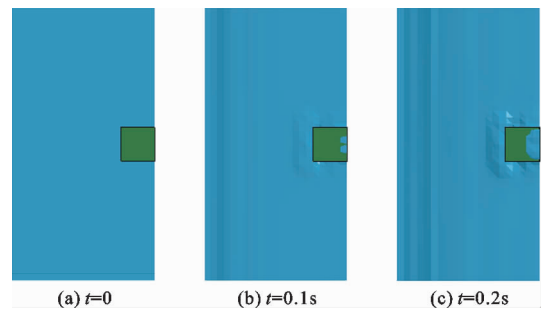


图 4 流冰碰撞隧洞衬砌过程中不同时刻水体状态图

由图 3 可知,给定了初速度的水体在推动流冰对隧洞衬砌产生冲击的过程中,流冰周围的水体会相应地受到挤压,因此其密度会发生轻微的变化,流冰周围受挤压水体主要产生于流冰的头部及尾部,两侧水体受挤压程度不是很明显。而靠近隧洞衬砌的水体由于向隧洞方向流动的影响,也会受到相应的挤压,促使该部位水体密度发生轻微变化。

由图 4 可知,给定了初速度的水体在推动流冰对隧洞衬砌产生冲击的过程中,流冰周围的水体表面会相应地产生起伏变化,流冰的头部及尾部的水面起伏程度较为明显,且由于受到流冰与衬砌冲击时的压力,流冰头部与隧洞衬砌之间的部分水体会跃上流冰表面。而两侧水体并未受到明显的挤压,所以两侧水体表面的起伏程度不是很明显。

4.2 流冰冲击响应分析

对不同碰撞模型中的流冰速度和位移时程曲线进行汇总,得到不同流速工况流冰 x 方向速度时程曲线图以及不同流速工况流冰 x 方向位移时程曲线图,如图 5~8 所示。由图 5、6 可知,两种不同碰撞模型中流冰的速度变化曲线是不同的,在流固耦合模型中,由于水体的作用,流冰速度会随着时间出现较大的波动,且会在短时间内较为迅速地出现逐渐归零的状态(图 5);而在附加质量模型中,流冰冲击隧洞衬砌后速度瞬间变为负值,即流冰被迅速的弹开,且由于没有水介质的作用,流冰被弹开后速度在短时间内几乎保持不变(图 6)。流固耦合模型中随

着水体流速的增大,流冰速度也相应增大,但流冰与水体的相对速度差却也出现逐渐增大的趋势。

由图 7、8 可知,两种不同碰撞模型中流冰的位移变化是不同的,在流固耦合模型中,由于水体的作用,流冰在经过反弹后位移在短时间内并不是按照线性的方式运动,而是出现波动式变化;而在附加质量模型中,流冰在经过反弹后位移在短时间内是按照线性的方式运动,且未出现波动情况。

4.3 隧洞衬砌压力云图分析

当流冰与隧洞衬砌碰撞速度分别为 0.686、2.000、3.250 m/s 时,不同碰撞模型隧洞衬砌的应力云图如图 9、10 所示。

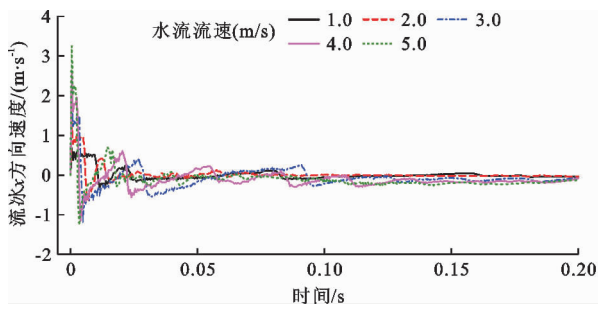


图 5 流固耦合模型不同流速工况流冰 x 方向速度时程曲线

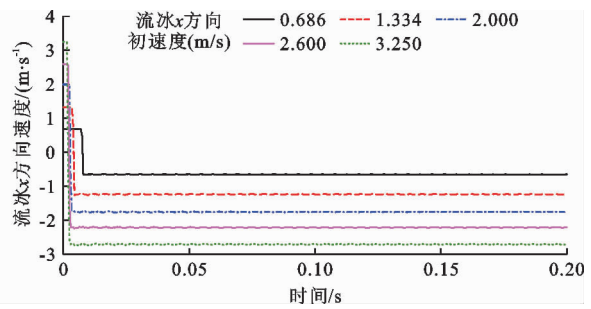


图 6 附加质量模型不同初速度流冰 x 方向速度时程曲线

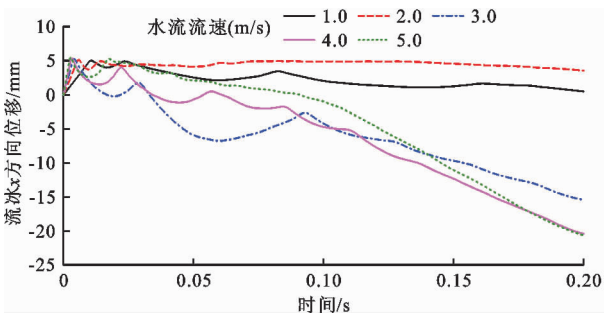


图 7 流固耦合模型不同流速工况流冰 x 方向位移时程曲线

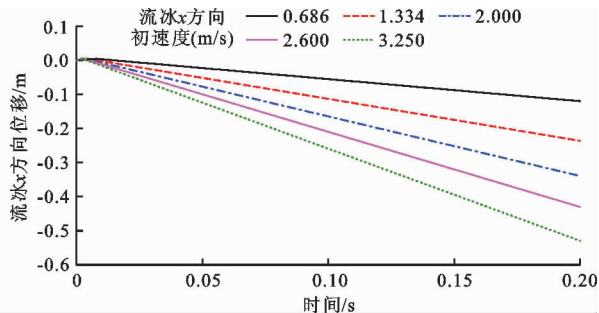


图 8 附加质量模型不同初速度流冰 x 方向位移时程曲线

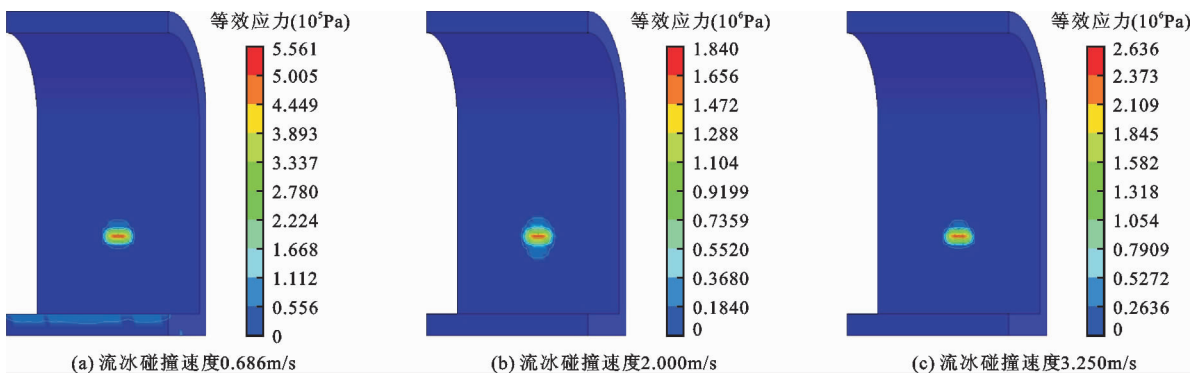


图 9 流冰与隧洞衬砌不同碰撞速度下流固耦合模型隧洞衬砌应力云图

由图 9、10 可知,通过流固耦合模型和附加质量模型模拟分析得到的隧洞衬砌应力云图之间存在着一定的差异。流固耦合模型中隧洞衬砌高应力区与

流冰撞击部分面积吻合性较低,其高应力区较附加质量模型得到的高应力区要小,且出现明显的不规则形状(图 9),造成这种情况的原因是因为流固耦

合模型在建模时将水介质在碰撞模型中建立,流冰在与隧洞衬砌进行撞击时,中间存在着“水垫效应”的影响,所以流固耦合模型中隧洞受撞击会出现高应力区域较小且不规则的情况;而附加质量模型中,由于没有“水垫效应”的直接影响,所以在同种工况

条件下,隧洞衬砌高应力区面积较大、形状规整,且面积几乎与流冰撞击部分面积相吻合(图10)。

4.4 撞击压力相关曲线分析

对两种计算模型的不同流速工况下隧洞衬砌所受撞击压力时程曲线进行汇总,如图11所示。

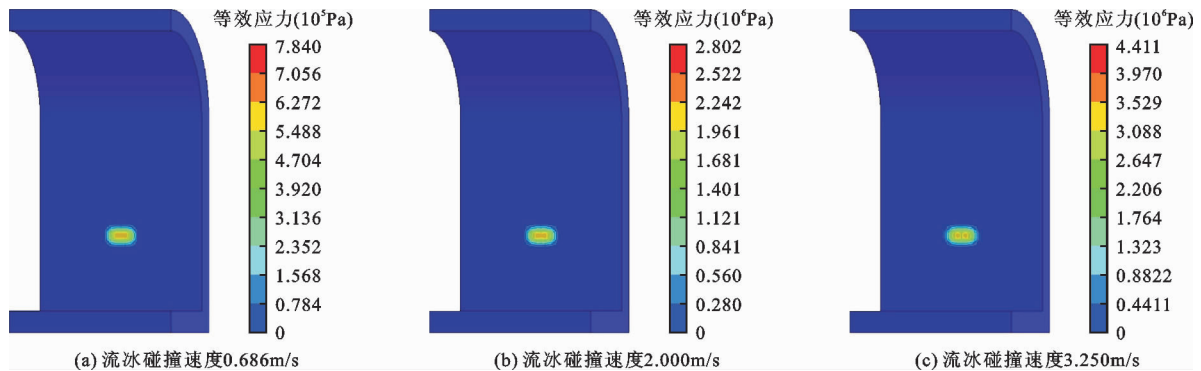


图10 流冰与隧洞衬砌不同碰撞速度下附加质量模型隧洞衬砌应力云图

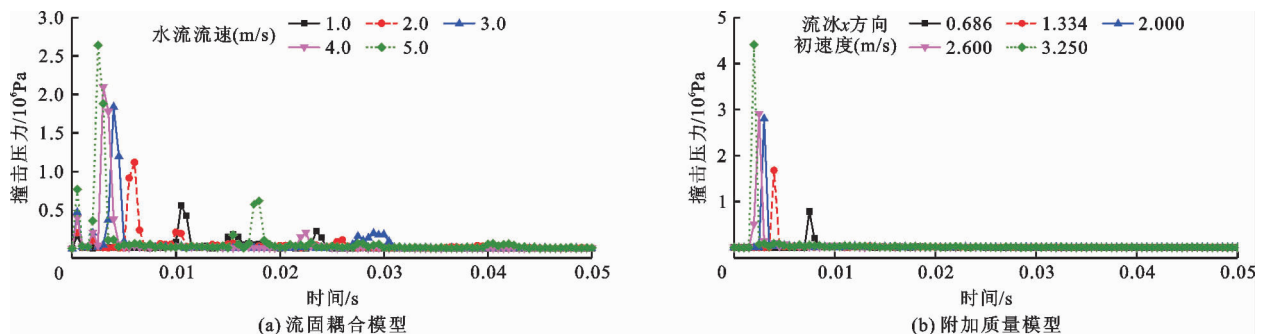


图11 两种计算模型不同流速工况下隧洞衬砌受撞击压力时程曲线

由图11可知,附加质量模型计算得到的撞击压力峰值明显高于流固耦合模型计算得到的撞击压力峰值,且同一流速工况下流固耦合模型计算结果出现多峰值的情况(图11(a)),经过分析发现,出现第1峰值是由于流冰在逼近隧洞衬砌时流冰与隧洞衬砌之间的水会形成一个高压场,出现“水垫效应”,对隧洞衬砌产生压力作用,但作用较小,随着水流流速的增加,第1峰值的数值随之增大,说明水垫效应也呈现出增强的趋势;第2峰值为流冰撞击到隧洞衬砌的作用峰值,该值为整个碰撞过程中的撞击压力最大峰值。附加质量法模拟得到的撞击压力为单峰值(图11(b)),这是由于附加质量法在处理水介质时将动水压力以附加质量的形式加载,建立的模型中并不存在水介质,所以水介质的直接作用和“水垫效应”在该方法中无法体现。另外,由于只考虑动水压力的影响,忽略了水介质对于流冰的阻碍作用,所以附加质量法计算的撞击压力除了出现单峰值的结果,其压力峰值也大于流固耦合模型所计算的峰值,而且附加质量模型计算峰值出现时刻较流固耦合模型提前。

通过对图11中撞击压力的最大峰值进行统计,可得出5种不同流度工况下考虑流固耦合的流冰-水-空气-输水隧洞碰撞模型(流固耦合模型)和考虑附加质量的流冰-输水隧洞碰撞模型(附加质量模型)撞击压力最大峰值结果对比图,如图12所示。

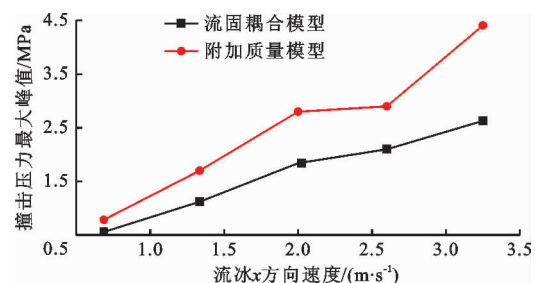


图12 不同碰撞模型中流冰 x 方向速度-隧洞撞击压力最大峰值关系对比图

由图12可知,流固耦合模型和附加质量模型计算结果中,流冰速度与隧洞衬砌受撞击压力最大峰值均呈现出近似的线性关系。在数值方面,附加质量模型所计算出的隧洞衬砌受撞击压力的数值较流固耦合模型计算出的数值大,且随着流冰速度的增大,采

用两种模型所计算的撞击压力的最大峰值之间的差值也越加明显;在计算时间方面,流固耦合模型计算时间大约在 5 400 ~ 7 200 s,而附加质量模型计算时间大约在 900 ~ 1 200 s 左右,因此附加质量模型可以比流固耦合模型节省约 80% 左右的计算时间。

5 结 论

本文与先前研究所不同的是,考虑水介质对于流冰—输水隧洞碰撞的动态响应影响,运用有限元分析软件 LS-DYNA 基于不同流速工况模拟分析了两种碰撞模型中流冰与输水隧洞衬砌的撞击影响作用,得到了以下结论:

(1) 不同碰撞模型所计算得到的隧洞衬砌应力云图中,高应力区存在着一定的差异性,流固耦合模型中隧洞衬砌高应力区较小,且出现明显的不规则性;而附加质量模型中隧洞衬砌高应力区较大且较为规整,并与流冰撞击部分面积较为吻合;同时,不同碰撞模型中隧洞衬砌所受的最大撞击压力与流冰速度均呈现出近似的线性关系。

(2) 附加质量模型对撞击压力的计算结果大于流固耦合模型计算结果,且随着流冰速度的增大,两者之间的差值愈加明显。在计算耗时方面,附加质量模型较流固耦合模型可节省约 80% 左右的计算时间,且由于水介质的作用,流固耦合模型计算的撞击压力最大峰值出现时刻较附加质量模型会出现略微推迟的现象。

(3) 与附加质量模型相比,流固耦合模型既将流冰与输水隧洞碰撞过程中的动水作用考虑在内,而且也考虑了流冰与输水隧洞逼近时产生的高压力场“水垫效应”,所以使得流固耦合模型能够更真实地模拟流冰与输水隧洞的真实碰撞状况。但在结构防撞设计方面,由于附加质量模型计算结果更加偏于安全,因而利用附加质量模型计算结果进行设计将有利于结构抗碰撞性能,保障结构安全。在实际工程中漂浮在水面的流冰运动是受多因素影响的,诸如风速、水温和流态等,对于更为精确地模拟还需要做进一步的研究。因此,本文研究内容可以为后续更为精确地模拟流冰与隧洞衬砌的撞击作用提供一定的支持与参考。

参考文献:

[1] GAGNON R E, DERRADJI - AOUAT A. First results of numerical simulations of bergy bit collisions with the CCGS terry fox ice-breaker [C] // In: Proc. of the 18th Int. Ass. for the Hydro-Enviroment Eng. and Research (IAHR) on

ice, Aug. 28 - Sep. 1 2006, Sapporo, Japan, 2006.

- [2] 张宿峰. 流冰与桥墩的相互作用 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [3] KIM H, DALEY C, COLBOURNE B. A numerical model for ice crushing on concave surfaces [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 289 - 297.
- [4] 贡 力, 李雅娴, 靳春玲. 流冰对引水隧洞撞击破坏力学特性数值分析与验证 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (13): 144 - 151.
- [5] 李明伟, 张 娜, 耿 敬, 等. 冰荷载作用下护岸结构数值模拟 [J]. *水运工程*, 2018 (12): 78 - 81.
- [6] 杨 亮, 马 骏. 冰介质下的船舶与海洋平台碰撞的数值仿真分析 [J]. *中国海洋平台*, 2008, 23 (2): 29 - 33.
- [7] KIM J H, KIM Y, KIM H S, et al. Numerical simulation of ice impacts on ship hulls in broken ice fields [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 180: 162 - 174.
- [8] 张 健, 王甫超, 刘海冬, 等. 水介质对船冰碰撞结构响应的研究 [J]. *船舶工程*, 2019, 41 (7): 12 - 15 + 22.
- [9] 袁正国. 内河冰凌力学性能及其对桥墩等效应力作用的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [10] 李静肖, 陈彦勇, 张 涛, 等. 雷 - 靶碰撞结构响应仿真分析 [J]. *水下无人系统学报*, 2019, 27 (1): 87 - 92.
- [11] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22 (4): 321 - 326.
- [12] 潘 晋, 张小强, 许明财, 等. 船 - 桥梁浮式钢套筒碰撞数值模拟中的流场处理方法对比研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35 (7): 124 - 129 + 151.
- [13] 孟 一, 易伟建. 混凝土圆柱体试件在低速冲击下动力效应研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30 (3): 205 - 210.
- [14] 李其桐. 甘肃省引大入秦工程盘道岭隧洞简介 [J]. *水电站设计*, 1991, 7 (3): 59 - 62.
- [15] 高 岩. 冰材料模型与局部形状对船冰碰撞影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [16] 吴素杰, 宗全利, 郑铁刚, 等. 高寒区多口融冰井引水渠道水温变化三维模拟及井群优化布置 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (14): 130 - 137.
- [17] 王 璨. 水利水电工程边坡抗震稳定分析研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [18] 李抗彬, 沈 冰, 李智录, 等. 基于非恒定水流模拟的灌区明渠水力响应特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (10): 107 - 114.
- [19] 李大冉. 输水工程冰力学模型试验及数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [20] 徐国宾, 李大冉, 黄 焱, 等. 南水北调中线输水工程若干冰力学问题试验研究 [J]. *水科学进展*, 2010, 21 (6): 808 - 815.
- [21] 陈云飞. 冰水二相流输水渠道流冰输移演变机理研究及其应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [22] 伍海华, 邹早建. 船舶大漂角斜航运动水动力数值预报 [J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2019, 34 (3): 339 - 345.