

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0113

水动力作用下流冰撞击闸墩的动力响应研究*

杨腾腾, 贡力, 董洲全, 杜云飞, 崔越
(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 高寒地区河冰撞击河道的闸墩结构会产生极端冰载荷和冰激振动, 水的动力效应使得碰撞过程更加复杂。采用任意拉格朗日-欧拉流固耦合方法, 考虑作用在流冰和闸墩表面的流体力, 建立了水-冰-闸墩耦合模型, 探究了偶然极端条件下冰-闸墩碰撞的力学特性, 设计了冰-砼碰撞实验。结果表明: 冰-砼碰撞实验中, 撞击力的模拟结果与实验结果吻合良好; 对流固耦合的水动力效应分析发现, 水-冰-闸墩耦合模型能够体现水的流体特性, 在流冰撞击闸墩近场逼近过程中, 初始时刻水的动力效应能够增加流冰的动能, 撞击楔入闸墩过程中, 水介质形成一个瞬态高压力场, 产生水垫效应吸收冰体部分动能, 从而抑制流冰运动; 在不同流冰体积和压缩强度工况下, 闸墩结构所承受的冰力随着流冰体积的增大而增大, 流冰压缩强度对冰力的影响较小, 流冰损伤与闸墩结构响应主要集中在碰撞接触区, 流冰撞击闸墩结构引起冰激振动, 流冰体积对闸墩振动加速度的影响较大, 相同体积的流冰随着压缩强度的增大, 振动幅值差异不明显, 表明流冰体积是影响冰-闸墩碰撞的关键参数。

关键词: 流固耦合; 水动力; 闸墩; 撞击力; 冰激振动

中图分类号: O352; TV672

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

Dynamic response of flowing ice colliding with a sluice pier under hydrodynamic action

YANG Tengting, GONG Li, DONG Zhouquan, DU Yunfei, CUI Yue
(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In frigid regions, the construction of sluice pier structures within river systems is confronted with considerable challenges arising from the presence of severe ice loads and ice-induced vibrations. The collision process between ice and sluice piers is further complicated due to the intricate hydrodynamic effects exerted by water. The arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) fluid-structure interaction (FSI) method is employed in this research to meticulously account for the fluid forces acting upon both the ice and sluice pier surfaces. A comprehensive coupled model encompassing the interactions among water, ice, and sluice piers is established to thoroughly investigate the mechanical characteristics associated with ice-sluice pier collisions under highly unpredictable conditions. Corresponding ice-concrete collision tests are meticulously designed and conducted, revealing an exemplary concurrence between the simulated impact forces and the values obtained from experimental observations. Upon analyzing the fluid-structure interaction and hydrodynamic effects, the present study demonstrates that the water-ice-sluice pier coupled model adeptly captures the fluid characteristics inherent to water. During the approach of an ice mass towards a sluice pier, the initial hydrodynamic effects initiated by the water medium effectively augment the kinetic energy possessed by the ice. As the ice forcefully interacts with the sluice pier, the water medium swiftly generates a transient high-pressure field, thereby establishing a phenomenon colloquially referred to as the water cushion

* 收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51969011); 甘肃省科技计划资助项目(21JR7RA301); 甘肃省黄河水环境重点实验室开放基金(21YRWEK003); 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2023CXZX-600)

第一作者: 杨腾腾(1997—), 男, 硕士研究生, 2680673647@qq.com

通信作者: 贡力(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, gongl@mail.lzjtu.cn

effect. This effect is manifested by absorbing a portion of the ice's kinetic energy, effectively dampening its movement. Distinctive scenarios characterized by varying ice volumes and compression strengths elucidate that the ice forces exerted upon the sluice pier structure directly correlate with the magnitude of the ice volume, while the influence of ice compression strength on said forces is relatively negligible. The consequential damages inflicted upon the ice and the response exhibited by the sluice pier structure primarily manifest within the contact area at the moment of collision. Consequently, the collisions between ice and the sluice pier structure induce vibrations that are uniquely attributed to ice-related factors. The volume of ice significantly influences the acceleration of sluice pier vibrations. Furthermore, under the condition of maintaining a consistent ice volumes, an increase in compression strength yields only marginal discrepancies in vibration amplitude. This finding convincingly substantiates the critical role played by ice volume as the paramount parameter governing ice-sluice pier collisions.

Keywords: fluid-structure interaction; hydrodynamic; sluice pier; collision forces; ice-induced vibration

季节性气候变化使得全球约 1/3 的陆地冬季出现结冰现象^[1], 北半球高纬度地区约有 60% 以上的河流在冬季遭受冰凌灾害^[2]。在我国北方的新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区、内蒙古自治区和黑龙江、辽宁、吉林等省, 河流都有冰凌现象发生, 在黄河内蒙古河段^[3-4], 已建成水库、拦河闸等众多大型水利工程, 用于防御凌汛、解决农业灌溉和人畜饮水等问题, 然而由于其特殊的地理位置、水文气象条件和河道特性, 防冰工作依然面临严峻挑战, 冰凌灾害仍在危害该地区河道建筑物的结构安全, 并链发一系列次生灾害^[5-7]。

河道修建的挡水或取水建筑物最主要的结构为墩体结构, 在冬末春初开河期间, 河道中的冰盖发生破裂, 在水动力作用下, 具有一定初始动能的河冰沿河道输移扩散, 闸墩受到不同体积的流冰撞击和挤压破坏, 小体积流冰使得闸墩结构的混凝土衬砌表层脱落, 大体积流冰对闸墩迎冰面产生较大的推力, 使得闸墩和闸门结构整体破坏, 降低水工建筑物的使用寿命, 严重威胁该地区农业灌溉和受水区冰期供水的稳定性。图 1 所示为黄河冰凌撞击水利枢纽拦河闸。因此, 需要采取多种措施进行防冰, 评估河冰撞击引起的工程结构动力响应是保障寒冷地区水工建筑物结构安全的重要环节^[8-9]。



图 1 黄河冰凌撞击拦河闸

Fig. 1 The Yellow River ice hit the barrage

冰-结构碰撞研究主要采用物理模型实验和有限元数值模拟等方法, 实验中, 采集冰力准确度最高的是全尺度法, 但是时间和成本等因素增加了其适用难度^[10], 而缩尺实验受到实验条件的限制。相比于实验法, 有限元数值模拟提供了一种评估冰-闸墩碰撞动力响应的重要手段。值得注意的是, 冰材料模型中, 材料参数的设置尤为重要, 是冰-结构碰撞过程中有限元数值模拟亟需解决的难点问题^[11], Gong 等^[12]基于损伤材料模型, 采用流固耦合 (fluid-structure interaction, FSI) 方法研究了水介质中流冰冲击隧道混凝土衬砌的力学特性。水的动力效应使得碰撞过程极其复杂, 因此还需要考虑周围流体介质在撞击过程中的影响, Zhou 等^[13]采用数值模拟方法, 对水动力作用下冰-结构碰撞过程中的流体动力学影响进行了分析。Yu 等^[14]在分析水动力-冰-结构的相互作用时, 采用有限元法模拟了结构物在冰载荷作用下对结构的损坏。Kim 等^[15]采用有限元方法建立了浮冰与结构碰撞的数值模型, 对冰层厚度、浓度和船速等影响因素进行了数值模拟。流冰撞击工程结构物会引起结构振动, 王帅霖等^[16]采用离散元-有限元耦合方法分析了不同冰速和冰厚工况下海洋平台结构的冰载荷和冰激振动。综上所述, 有限元方法在冰与结构的撞击破坏研究方面被广泛应用, 但由于海域面积广阔以及水深影响, 在船冰碰撞、浮冰撞击海洋平台等碰撞场景中, 水动力效应分析考虑流体形态变化、水流速度和冰水耦合压力等关键因素的研究较

少, 因此, 本文中, 考虑流体基本特性, 对流冰撞击闸墩进行水动力效应分析, 结合黄河流域开河期冰的力学特性和水流运动环境等特点, 运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 开展水动力作用下流冰撞击闸墩的动力响应研究, 采用任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 流固耦合方法, 探究流冰的体积和压缩强度对闸墩撞击力和结构冰激振动的影响。

1 冰-闸墩相互作用分析

1.1 碰撞理论

水动力作用下流冰-闸墩的相互作用是一个复杂的非线性动力过程, 闸墩在冰排撞击下产生结构变形, 冰材料为各向同性弹性失效材料模型, 冰与闸墩碰撞区撞击力发生变化, 表明该碰撞过程属于高度非线性 (材料非线性、几何非线性和接触非线性等问题) 动态问题, 因此采用显式分析方法对该类问题进行求解。本文中, 冰-闸墩碰撞采用 Lagrange 算法来建立非线性有限元控制方程, 冰体楔入闸墩碰撞过程, 根据连续介质理论, 碰撞系统运动必须保持质量守恒、动量守恒和能量守恒。采用中心差分法求解运动方程, 根据牛顿定律, 并考虑阻尼沙漏, 流冰-闸墩碰撞运动控制方程可以表示为:

$$M\ddot{U}(t_n) = P(t_n) - F^{int}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵, $\ddot{U}(t_n)$ 为 t_n 时刻的加速度矩阵, $P(t_n)$ 为 t_n 时刻的外力向量列阵, $F^{int}(t_n)$ 为 t_n 时刻的单元内力和接触力之和, $H(t_n)$ 为沙漏阻尼向量, C 为阻尼矩阵, $\dot{U}(t_n)$ 为 t_n 时刻的速度矩阵。

由式 (1) 得到 t_n 时刻的加速度, 可以表示为:

$$\ddot{U}(t_n) = M^{-1} [P(t_n) - F^{int}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n)] \quad (2)$$

根据中心差分公式 (3) 和 (4), 更新每个节点的速度和位移:

$$\dot{U}(t_{n+1/2}) = \dot{U}(t_{n-1/2}) + \ddot{U}(t_n)\Delta t_n \quad (3)$$

$$U(t_{n+1}) = U(t_n) + \dot{U}(t_{n+1/2})\Delta t_{n+1/2} \quad (4)$$

式中: $\dot{U}(t_{n+1/2})$ 为 $t_{n+1/2}$ 时刻的速度, $U(t_{n+1})$ 为 t_{n+1} 时刻的位移。

1.2 流固耦合

流冰-闸墩碰撞过程中, 不仅存在冰与闸墩结构之间的相互作用, 周围的流体介质也会对流冰撞击闸墩产生较大的影响, 因而需要采用任意拉格朗日-欧拉流固耦合方法^[17] 建立水介质和空气介质与冰和闸墩的耦合关系, 选用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字定义流固耦合, *DATABASE_FSI 关键字输出耦合压力计算结果。水和空气介质采用 Euler 单元, 闸墩和冰采用 Lagrange 单元, 水和空气介质通过共用节点实现空间上自由移动, 求解流固耦合力采用罚函数法, 得到节点处流固耦合力, 可以表示为:

$$F = p_f \frac{KA^2}{V} \Delta d \quad (5)$$

式中: p_f 为罚函数的系数, K 为流体体积模量, V 为流体体积, A 为耦合的平均面积, Δd 为流体渗透到固体中的深度。

1.3 水-冰-闸墩耦合模型建立

运用 ANSYS/LS-DYNA 非线性有限元软件建立水平冰与闸墩碰撞流固耦合模型, 如图 2 所示。在进行冰-闸墩碰撞有限元分析时, 水介质、空气介质、冰和闸墩单元类型均为 Solid164 单元, 水与空气之间的界面网格通过共用节点衔接, 冰与水与空气之间的网格采用重合衔接, 流冰衔接厚度设置为 0.3 m, 与冰厚一致。为防止流冰与闸墩接触面初始穿透, 设置冰与闸墩之间的距离为 0.01 m, 接触类型选择表面自动接触 (ASTS), 动摩擦因数和静摩擦因数均设置为 0.15^[18], 碰撞接触和滑动界面处采用罚函数方法 (penalty method)。边界条件设置如图 2(b) 所示, 为使有限流体域模拟产生无限大的流场, 在流体边界采

用无反射边界条件模拟流场的无限域,防止边界处产生的应力波反射重新进入模型影响计算结果,考虑流体的运动受边界位移约束的影响,约束流体在 x 方向、 y 方向和水介质底面 z 方向的自由度,同时,闸墩底板约束所有自由度。此外,浮冰沿河道漂浮瞬态撞击工程中,风速对冰速的影响较小,因此仅考虑水流的浮力与拖拽力,设置冰速与水流速度相等。

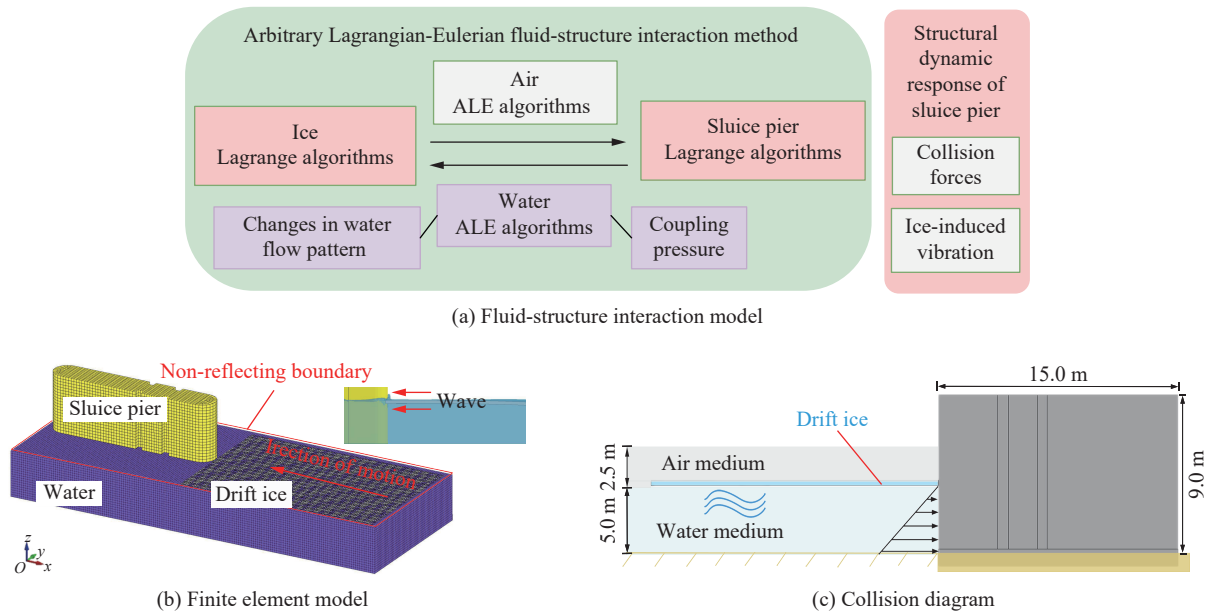


图 2 水平冰-闸墩碰撞有限元模型

Fig. 2 Horizontal ice-sluice pier collision finite element model

1.3.1 闸墩模型

鉴于黄河冰凌现状,本文中,以黄河内蒙古段修建的某输水工程拦河闸闸墩为例,考虑到闸墩与冰排的相互作用和计算时间等问题,选取其中单个墩体进行有限元求解计算。闸墩迎水面采用半圆形,墩宽 2.4 m,槽深为 0.5 m,进水口水深为 5.0 m。为了分析闸墩在碰撞中产生的动力响应,以闸墩混凝土强度 C30 为例,选用包含应变率效应、失效准则的损伤 Brittle Damage 钢筋混凝土材料(MAT_96),应变率效应通过体积黏度设定,通过不同等级弹性刚度张量定义材料损伤^[19-20]。相关材料模型参数^[21]如表 1 所示。

表 1 闸墩材料模型参数^[21]

Table 1 Material parameters of sluice pier^[21]

混凝土材料参数						
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	初始抗拉极限/MPa	抗剪极限/MPa	断裂韧度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	剪切保持力
2 500	30	0.2	4.02	21	0.14	0.03
混凝土材料参数			钢筋材料参数			
体积黏度	屈服应力/MPa	弹性模量/GPa	屈服应力/MPa	硬化模量/GPa	失效应变	
0.72	42	200	335	10	0.75	

1.3.2 冰模型

根据 Deng 等^[22]在 2020—2021 年冰期测得的冰厚结果,选取 2021 年 2 月 9 日—2021 年 2 月 23 日的实测结果进行冰-闸墩碰撞分析,此时段河冰厚度约为 0.3 m,流冰宽度小于闸孔间距,冰体单元网格尺寸比(网格尺寸与冰厚之比)为 0.5,冰材料模型采用各向同性弹性失效模型^[4],采用失效应变和截断压力作为冰体失效准则,具体模型参数如表 2 所示。

表 2 冰材料模型参数

Table 2 Material parameters of ice

密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	屈服应力/MPa	塑性硬化模量/GPa	体积模量/GPa	失效应变	截断应力/MPa
910	2.2	2.1	4.26	5.26	7.69×10 ⁻⁴	-4.0

1.3.3 流体模型

为真实模拟水动力作用下流冰-闸墩碰撞场景, 建立水和空气的流体模型(见图 2(c)), 流体域中水深为 5.0 m, 水面宽度取值参考流冰宽度设置, 水面线顶部空气介质高度为水面高度的 1/2。参考 Song 等^[23]对刚体容器摇摆测试模拟结果, 空气和水单元的网格尺寸设置为 0.2 m×0.2 m×0.2 m, 采用空白材料(*MAT_NULL)模拟水流运动, 其本构模型和状态方程具有流体样变形特性, 材料模型参数设置如表 3 所示。表中: C₀~C₅为多项式方程系数, E₀为初始体积内能, V₀为相对体积。

表 3 水和空气介质材料参数

Table 3 Material parameters of water and air media

流体介质	密度/(kg·m ⁻³)	截断压力/Pa	黏度系数/(N·s·m ⁻²)	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	E ₀ /MPa	V ₀
空气	1.184 5	-10	1.844×10 ⁻⁵	0	0	0	0	0.4	0.4	0.253	1.0
水	998.21	-1.0×10 ⁻⁵	1.790×10 ⁻³	1.013 3×10 ⁵	2.25×10 ⁹						1.0

水动力作用下, 沿 x 负方向运动的冰体与闸墩碰撞过程中, 重力的存在引起流冰沉降, 通过给水设置静水压力对流冰产生浮力, 使流冰处于竖向平衡状态, 因此, 水的静水压力也是不可忽视的, 采用关键字*INITIAL_HYDROSTATIC_ALE 定义与重力相关的静水压力, 其水层顶部的参考压力设置为标准大气压(p₀=101.3 kPa), 初始压力设置使压力随水深产生振动, 为减小压力振动, 设置临界质量加权阻尼为 100 N·s/m^[24]。图 3(a) 给出了流体稳定状态下的静水压力云图, 提取不同水深的静水压力与时间曲线, 如图 3(b) 所示, 从图中可以看出, 水介质在稳定状态下出现分层现象, 满足静水压力与水流深度关系^[19]。

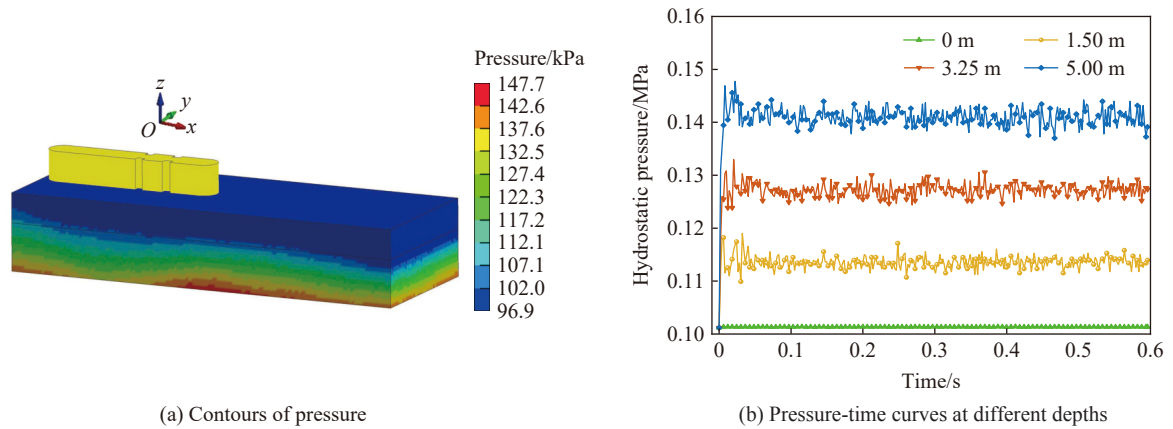


图 3 静水压力

Fig. 3 Hydrostatic pressure

1.3.4 流冰-闸墩碰撞工况

开河期间, 河道中的闸墩可能受到不同尺度流冰的撞击, 在水流的拖拽下, 流冰随水流跨越不同纬度流域, 流冰强度受到温度的影响, 温度变化使得冰的力学性质更加复杂, 其中冰的压缩强度受特定地点和特定季节条件的影响^[25]。本文中将从不同流冰体积和压缩强度 2 个影响参数进行流冰与闸墩碰撞力学特性分析。在确定流冰几何尺寸时, 将各种不规则的冰体简化为矩形结构, 在不改变冰厚和压缩强度的条件下, 建立 6.0 m×4.0 m×0.3 m、8.0 m×6.0 m×0.3 m、12.0 m×8.0 m×0.3 m、18.0 m×12.0 m×0.3 m 和

24.0 m×16.0 m×0.3 m 等 5 种流冰几何尺寸。参考 Deng 等^[22] 对黄河什四份子河道冰期河道主流速的观测数据, 设置冰速和水流速度均为 1.5 m/s, 流冰压缩强度结合该河道环境温度变化范围-24.93~-2 ℃ 确定, 参考文献 [26] 黄河冰单轴压缩强度实验数据拟合得到冰的压缩强度与摄氏温度的关系为 $\sigma_F = 0.767 \ln|T| + 0.591$, 环境温度选取-2、-5、-8、-14 和-20 ℃ 共 5 种工况。流冰-闸墩碰撞具体工况如表 4 所示。

表 4 流冰-闸墩碰撞工况

Table 4 Flowing ice-pier collision conditions

工况	冰厚/m	冰温/℃	冰速/(m·s ⁻¹)	冰体积/m ³	冰压缩强度/MPa
1	0.3	-8	1.5	7.2	2.186
2	0.3	-8	1.5	14.4	2.186
3	0.3	-8	1.5	28.8	2.186
4	0.3	-8	1.5	64.8	2.186
5	0.3	-8	1.5	115.2	2.186
6	0.3	-2	1.5	64.8	1.123
7	0.3	-5	1.5	64.8	1.825
8	0.3	-8	1.5	64.8	2.186
9	0.3	-14	1.5	64.8	2.615
10	0.3	-20	1.5	64.8	2.889

2 冰和混凝土材料有效性验证

为了有效验证冰和混凝土材料模型参数对数值模拟的影响, 本文中设计了冰-砼碰撞实验, 采用单个不同冰厚的小体积冰块撞击混凝土板。为了让冰与混凝土直接接触, 设置防水影响测试结果, 此外, 水箱加水条件下应变片无法正常运行工作, 选择在水箱无水环境条件下进行冰-砼碰撞实验, 碰撞测试实验装置如图 4 所示。实验中, 冰试件的速度由步进电机提供, 设置冰的初始速度为 1.565 m/s, 混凝土板试样尺寸为 1.00 m×0.84 m×0.88 m, 冰试件平面尺寸为 0.1 m×0.1 m, 厚度分别设置为 0.015、0.020 和 0.025 m, 对 3 种厚度的工况进行碰撞实验, 同时根据实验设置的碰撞工况进行有限元分析, 将不同工况下撞击应力实验值与模拟值进行对比, 验证冰材料模型参数和混凝土模型参数的有效性。

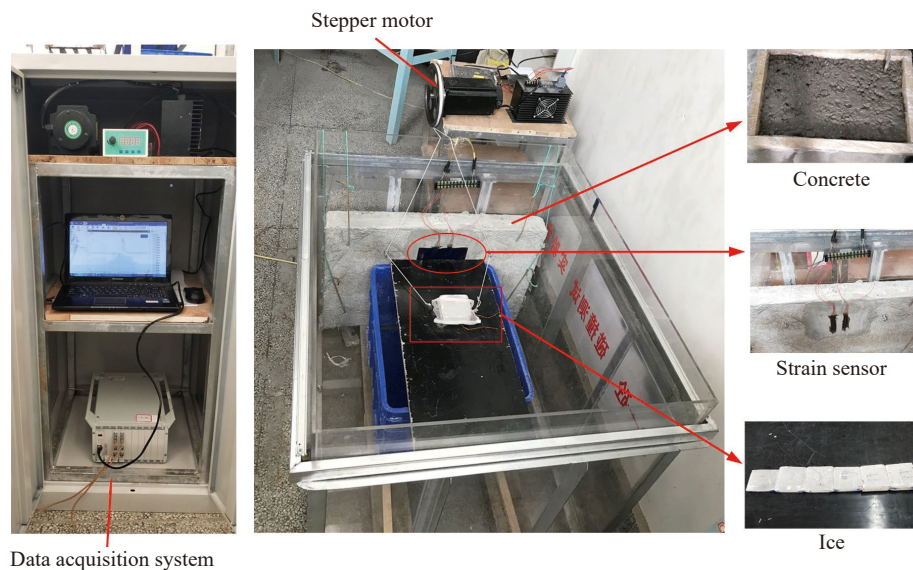


图 4 冰-砼碰撞测试实验装置
Fig. 4 Ice-concrete crash experimental rig

图 5 给出了冰试件厚度为 0.015 m 时冰-混凝土板碰撞的最大等效应力云图, 由图 5 可知, 最大应力主要集中在碰撞接触区, 其撞击过程中的应力时程曲线如图 6 所示, 从图 6 可以看出, 冰与混凝土碰撞属于瞬态响应过程, 模型实验和数值模拟都形成单个尖锐且响应较短的峰值。统计 3 种厚度工况下最大实验值与模拟值进行对比分析, 如图 7 所示, 在不同的冰厚工况下, 冰-混凝土结构碰撞最大应力实验值与模拟值呈现出一致的变化趋势, 相对误差分别为 9.49%、9.53% 和 16.04%, 满足最大允许误差在 20% 以内的要求, 说明该数值模拟中所设置的冰-砼材料参数具有一定的可信性。产生误差的原因: 一方面, 模型实验未考虑水介质对流冰的影响, 在数值模拟求解时, 建立水-冰-混凝土板流固耦合关系, 水的存在使得冰撞击混凝土结构产生水垫效应, 即冰挤压水介质在冰与闸墩之间形成一个瞬态高压力场, 抑制流冰运动, 从而降低流冰的作用力^[27-28]。另一方面, 误差来源于步进电机与冰块通过柔性索连接, 流冰速度与牵引装置步进电机存在动态变化角度, 冰块速度与电机转速转化存在一定的微小误差, 致使实验中步进电机提供的速度过高。

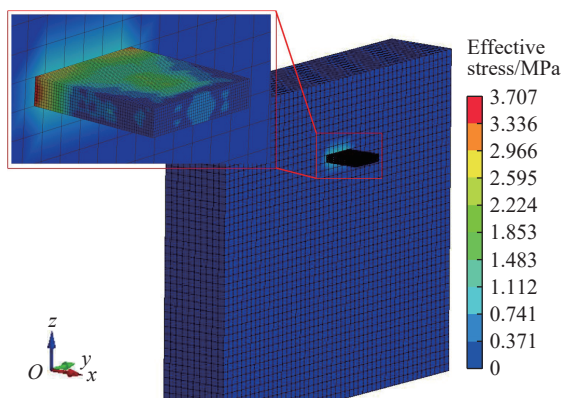


图 5 最大等效应力云图

Fig. 5 Contour of the maximum effective stress

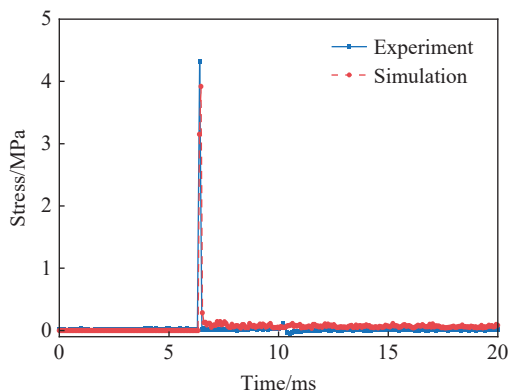


图 6 模拟和实验得到的撞击过程的应力时程曲线

Fig. 6 Stress time history curves of impact process obtained by simulation and experiment

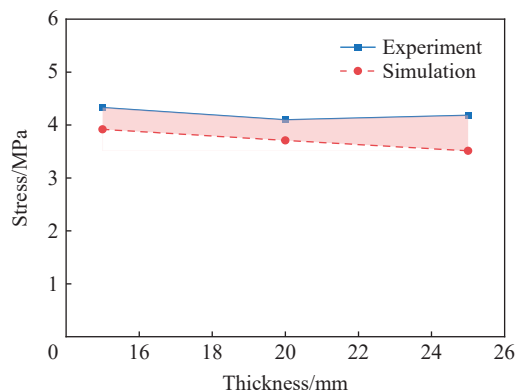


图 7 不同冰厚下模拟与实验最大应力的对比

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental maximum stresses for different ice thicknesses

3 数值模拟结果与分析

3.1 水动力效应影响分析

流冰与闸墩碰撞运动有限元分析时, 在水、空气、冰和闸墩三相耦合场中, 水的动力效应扮演着重要的角色, 为了探究流冰挤压闸墩过程中水介质对撞击力的影响, 模拟中设置计算水域为 33.51 m × 12.50 m × 0.50 m, 选择典型工况 10 验证水-冰-闸墩耦合模型的有效性, 进而通过无流固耦合和流固耦合 2 种碰撞工况进行水动力效应影响分析。

3.1.1 水-冰-闸墩耦合模型验证

在固定水域流冰-闸墩碰撞流固耦合模拟中, 通过流体 y 方向应变反映流体形态变化程度, 间接验证水-冰-闸墩耦合模型的有效性。图 8 给出了不同时刻水介质的形态变化和 y 方向的应变, 从图 8(a) 中可以看出, 冰体和水流沿 x 负方向运动时, 在重力作用下, 流体形态发生显著变化, 入口处水流水位降低, 出口处水位抬升, 主要原因为流域四周分别设置 y 方向和 x 方向的自由度。不同时刻水介质 y 方向的应变如图 8(b)

所示, 水介质最大变形主要集中在冰-水-闸墩耦合接触区, 在冰体撞击闸墩前, 闸墩边缘与水接触区水面附近水域形成了渐进扰动(弓形波)^[29], 在撞击过程中, 闸墩碰撞接触区水面水流涌起波浪, 冲击过程中水浪在闸墩前缘附近和闸门门槽前堆积, 该区域水流垂直于流冰运动方向(y 方向)应变最大, 在 0、0.3 和 0.6 s 对应的最大应变分别为 0.014、0.924 和 1.111, 表明所建立的水-冰-闸墩耦合模型能够体现水的基本特性。

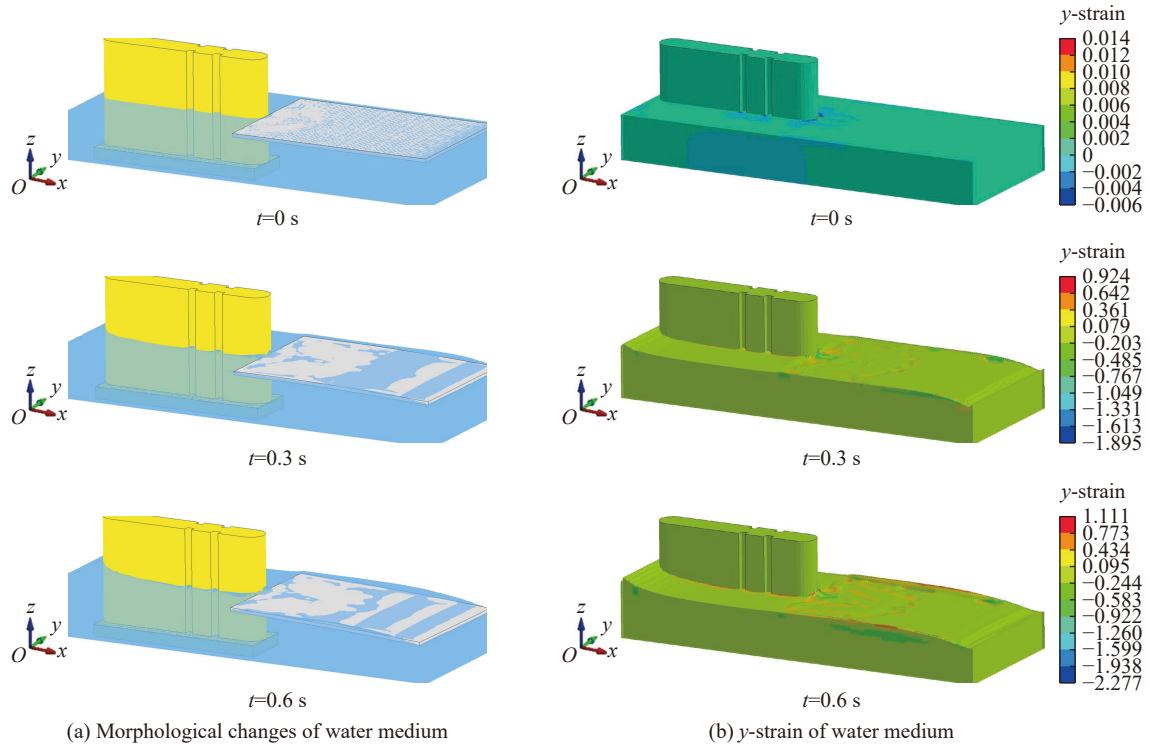


图 8 不同时刻水流形态变化和 y 方向应变

Fig. 8 Changes in water flow pattern and y -strain of water mediam at different times

图 9 给出了流冰撞击闸墩过程中不同时刻的冰速和水流速度时间曲线, 设置冰速与水流速度的初始值相等, 在流冰近场逼近闸墩过程中, 由图 9(a) 可知, 流冰撞击闸墩消耗动能以及受到水垫效应的影响, 冰速逐渐降低。由图 9(b) 可知, 由于闸墩的存在, 改变了水流运动条件, 在冰-水-闸墩耦合相互作用过程中, 流冰与闸墩撞击接触区域内的水介质形成一个瞬态高压力场, 使得水流速度快速升高, 最高速度达到约 3.0 m/s, 远离撞击接触区的水流速度保持在约 1.5 m/s。

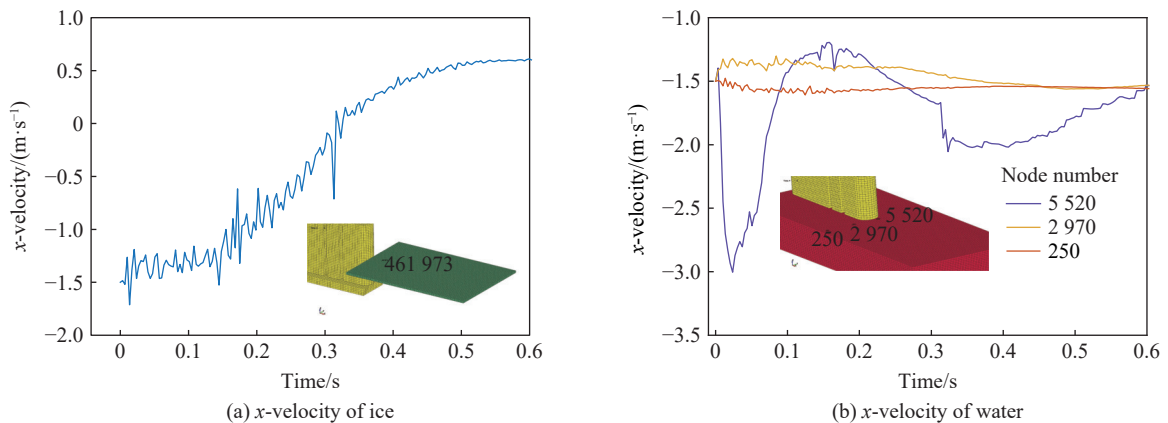


图 9 不同时刻的水流速度和冰速

Fig. 9 Water velocity and ice velocity at different times

3.1.2 流固耦合分析

为了研究水的动力效应对冰-闸墩碰撞过程的影响, 设置无流固耦合和流固耦合 2 种碰撞工况进行分析。通过无流固耦合和流固耦合有限元求解计算, 得到冰-闸墩相互作用撞击力时程曲线, 如图 10 所示。2 种工况下, 流冰持续挤压闸墩, 当塑性应变超出失效阈值时, 流冰单元失效, 在冰-闸墩碰撞接触区, 冰体边缘发生破裂产生卸载, 同时流冰继续楔入闸墩进入加载阶段, 致使撞击力峰值呈现瞬间加载-卸载, 产生多个峰值, 加载-卸载过程中, 流冰单元的失效位置具有不确定性, 使得撞击力峰值出现位置存在随机性。与流固耦合对比发现, 无流固耦合工况下, 冰力波动更加频繁, 与 Liu 等^[30]的流固耦合影响结果一致, 二者最大撞击力峰值出现在 $t=0.0189\text{ s}$, 无流固耦合和流固耦合工况对应的最大撞击接触力分别为 1 629.46 和 1 981.81 kN。结合图 9(a) 可知, 流冰速度在初始时刻快速升高, 表明在初始时刻, 相同的冰速条件下, 水的动力效应能够增加流冰的动能, 但在 $t=0.0219\text{ s}$ 后, 无流固耦合工况下撞击力峰值显著高于流固耦合, 撞击力加载-卸载频次增加, 碰撞接触区冰体楔入闸墩深度更大, 表明水-冰-闸墩流固耦合模型中, 流体对撞击接触力影响较大。

图 11 给出了冰-水耦合平均压力时程曲线, 由图 11 可知, 在流冰近场逼近挤压闸墩过程中, 其耦合平均压力瞬间发生波动式升高和下降, 在 $t < 0.2\text{ s}$ 时间范围内, 流冰与闸墩混凝土衬砌之间的水介质形成一个瞬态高压力场, 形成耦合压力抑制流冰运动, 随着动能降低, 撞击力逐渐减小。

3.2 不同影响参数下冰-闸墩碰撞力学特性分析

3.2.1 冰作用于闸墩撞击力分析

通过水-冰-闸墩耦合模型比较流冰的体积 (V) 和压缩强度 (f) 对闸墩结构响应和撞击力的影响, 选择 10 种工况进行流冰-闸墩碰撞有限元模拟。图 12(a) 给出了不同流冰体积工况下流冰与闸墩碰撞的撞击力时程曲线, 由图 12(a) 可知, 不同体积的流冰撞击闸墩时, 随着流冰体积的增大, 撞击力峰值呈现逐渐增加的趋势。当流冰体积小于 14.4 m^3 (流冰几何尺寸为 $8.0\text{ m} \times 6.0\text{ m} \times 0.3\text{ m}$) 时, 流冰撞击闸墩后立即反弹, 其撞击过程属于瞬态响应, 流冰无法对闸墩产生持续的挤压破坏, 形成单个尖锐而响应时间较短的冰力峰值。当流冰体积达到 28.8 m^3 (流冰几何尺寸为 $12.0\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 0.3\text{ m}$) 时, 流冰与闸墩的相互作用经历撞击和挤压 2 个发展过程, 在流冰楔入闸墩过程中, 撞击力加载-卸载出现时刻具有随机性。图 12(b) 给出了不同压缩强度工况下冰-闸墩碰撞的撞击力时程曲线, 由图 12(b) 可知, 在水动力作用下, 冰排挤压闸墩楔入闸墩过程中峰值差异较小, 不同压缩强度下撞击力峰值出现时间基本一致, 在 $0 \sim 0.04\text{ s}$ 时间段内, 流冰撞击闸墩冰体开始发生破裂; 在 $0.04 \sim 0.35\text{ s}$ 时间段内, 流冰持续挤压逐渐楔入闸墩的过程中, 流冰边缘接触区产生局部破碎现象; 0.35 s 后, 随着动能减小, 撞击力逐渐消失。图 12 中各工况撞击力时程曲线的相同之处在于, 不同体积和压缩强度工况下, 当流冰体积大于 28.8 m^3 时, 流冰挤压闸墩结构

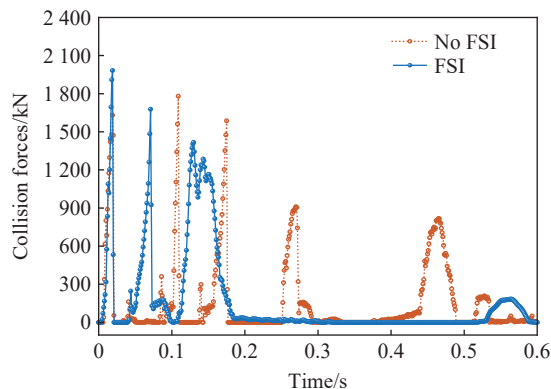


图 10 不同工况下冰-闸墩撞击力曲线

Fig. 10 Ice-sluice pier impact force curves under different working conditions

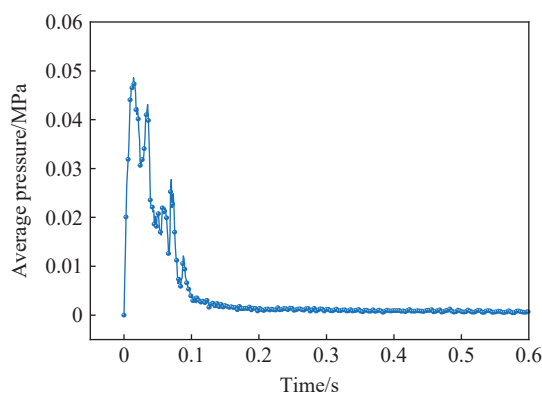


图 11 冰-水耦合压力曲线

Fig. 11 Ice-water coupling pressure curve

在碰撞接触区引起冰体局部破裂, 撞击力时程曲线产生加载-卸载现象, 在流冰持续楔入闸墩过程中, 每一次冰力的加载-卸载对应一次流冰能量的集中释放, 使得冰力逐渐减小, 撞击力峰值随时间变化呈现十分复杂的非线性特征, 该特征主要与冰的承载能力快速损失有关, 即冰体达到屈服点后, 表现出典型的脆性行为。

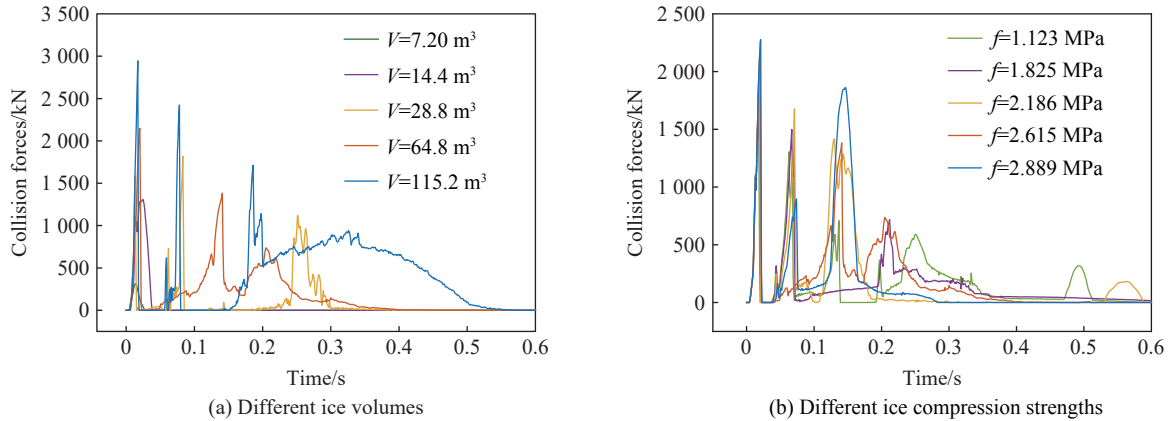


图 12 不同体积和压缩强度下的力-时间历程

Fig. 12 Force-time histories under different volumes and compression strengths

同时, 对不同工况下的撞击力峰值和平均值进行统计, 图 13(a) 给出了不同流冰体积与撞击力的非线性关系, 由图 13(a) 可知, 最大撞击力峰值分别为 315.81、1 307.77、1 820.77、1 981.81 和 2 945.43 kN, 随着流冰体积的增大而增大, 其关系拟合曲线为 $F = 601.56 \ln(V - 5.17) - 97.31$, $R^2 = 0.963$, 表明该拟合曲线能够描述流冰体积与撞击力的关系, 平均值也随着撞击力的增大而增大。图 13(b) 给出了不同压缩强度工况下撞击力的非线性关系, 最大撞击力峰值分别为 1 851.33、1 928.76、1 981.81、2 148.16 和 2 275.77 kN。随着流冰的压缩强度的增加而增大, 但增长幅度较小, 低强度 (1.123 MPa) 与高强度 (2.889 MPa) 的最大值与平均值分别相差 424.44 和 542.76 kN, 表明环境温度对大体积流冰撞击闸墩撞击力的影响较小, 其关系拟合曲线为 $F = e^{7.6 - 0.14f + 0.06f^2}$, $R^2 = 0.995$, 表明该拟合曲线能够描述流冰压缩强度与撞击力的关系。从上述分析可知, 闸墩结构所承受冰力随着流冰体积的增大而增大, 流冰压缩强度对冰力的影响较小, 即流冰体积是影响闸墩结构安全的关键参数。

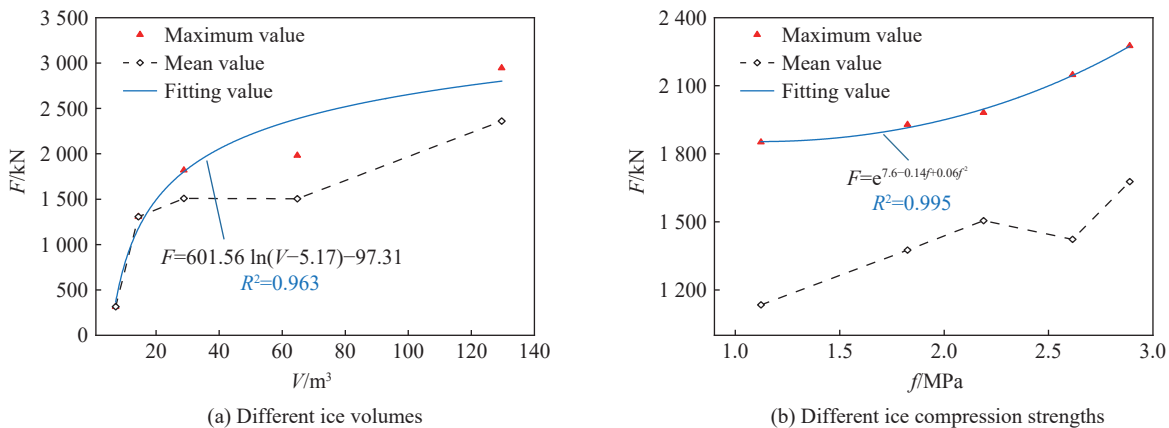


图 13 不同体积和压缩强度与撞击力的关系

Fig. 13 Relationships of the volume and compressive strength of ice with collision force

3.2.2 闸墩结构冰激振动分析

通过水-冰-闸墩耦合碰撞模型, 分析不同流冰体积和压缩强度工况下流冰撞击闸墩引起的冰激振动, 图 14(a) 给出了不同流冰体积工况下闸墩顶端冰激振动加速度时程曲线, 由图 14(a) 可知, 冰排撞击闸墩产生明显的随机振动, 且振动的高频分量和低频分量较大, 位移幅值大小存在显著差异, 撞击振动

加速度随着冰排体积的增大而增大, 其振动加速度在 $8.671 \sim 82.726 \text{ m/s}^2$ 范围内变化, 闸墩顶端振动加速度随着作用于闸墩冰力的减小, 振动幅值也减小。图 14(b) 给出了不同压缩强度工况下冰激振动加速度时程曲线, 从图中可以看出, 其加速度在 $-65.340 \sim 63.660 \text{ m/s}^2$ 范围内变化, 5 种冰体压缩强度工况下, 振动加速度幅值变化趋势一致, 幅值差异较小。结果表明, 不同流冰体积和压缩强度工况下, 闸墩结构均出现弹性变形, 这种变形被认为是流冰撞击闸墩结构引起冰激振动, 且以强迫振动的形式出现, 流冰体积对闸墩振动加速度的影响较大, 相同体积的流冰随着压缩强度的增大, 振动幅值差异并不明显。

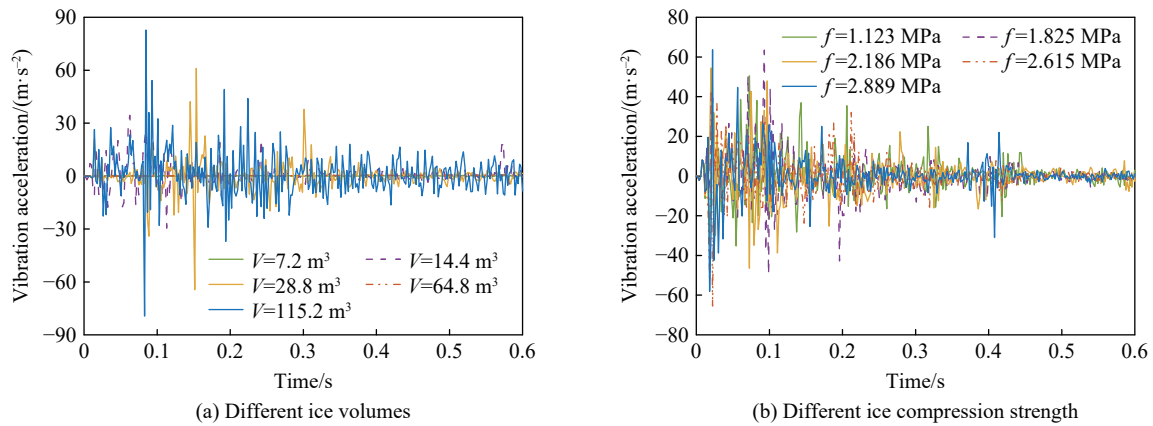


图 14 不同体积和压缩强度工况下冰激振动的加速度-时间历程

Fig. 14 Acceleration-time histories of ice-excited vibration under different volume and compression strength conditions

3.2.3 流冰损伤和闸墩结构响应分析

当流冰体积大于 28.8 m^3 时, 流冰损伤和闸墩结构响应过程相似, 因此, 以工况 5 作为典型案例对同时刻流冰损伤和闸墩结构响应进行分析。图 15 给出了不同时刻流冰接触和楔入闸墩过程中冰体损伤

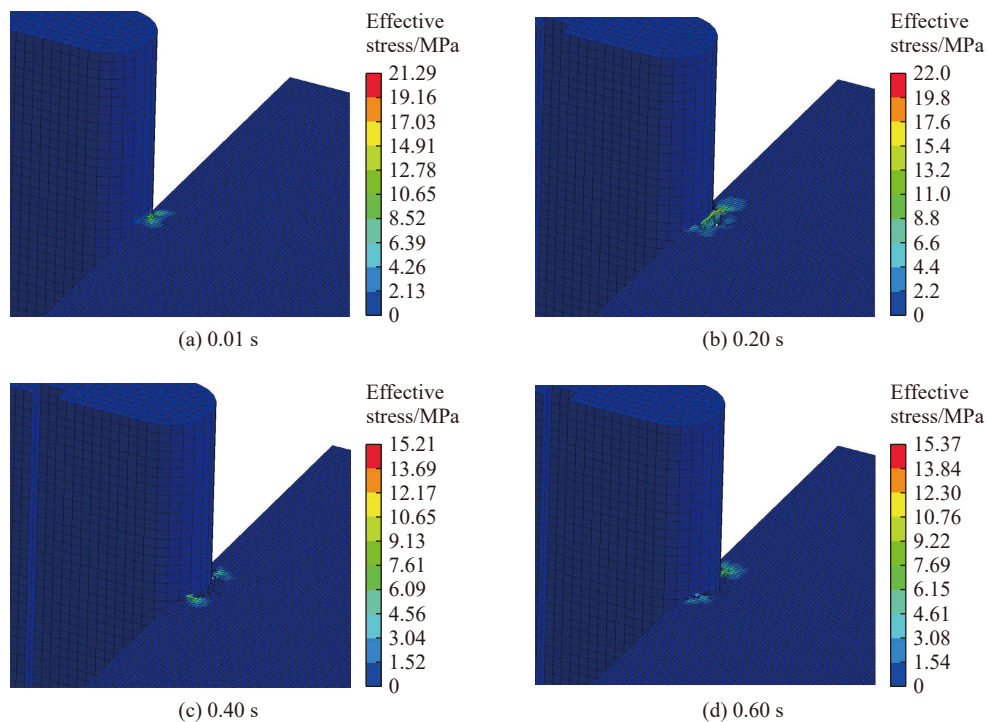


图 15 流冰损伤和闸墩响应等效应力

Fig. 15 Flowing ice damage and contours of pier response equivalent stress

和闸墩结构响应等效应力云图。在流冰与闸墩接触初期, 约在 $t=0.01$ s 时, 流冰接触区边缘沿中心线形成局部破碎破坏, 如图 15(a) 所示, 由图可知, 最大等效应力为 21.29 MPa。随着冰体的进一步运动, 在流冰与闸墩碰撞接触区之间产生碎冰, 如图 15(b) 所示。随后, 接触区碎冰冰体单元受到流冰的挤压, 达到塑性失效应变, 冰体单元失效, 断裂形态开始沿周向扩展, 随着流冰不断地楔入闸墩, 流冰接触破裂面积逐渐扩大, 最终在 $t=0.60$ s 形成闸墩前缘结构形状的破损, 如图 15(d) 所示。同时可以发现, 闸墩混凝土衬砌表面无破坏损伤, 但闸墩结构应力主要集中在闸墩与流冰冰碰撞接触区, 远离碰撞接触区的流冰与闸墩接触应力较小。

4 结 论

通过有限元方法研究了水动力作用下流冰撞击闸墩墩体结构的动力响应, 设计了冰-砼碰撞实验, 验证了冰和混凝土材料模型参数及水-冰-闸墩耦合模型的有效性, 分析了流冰体积和冰体压缩强度 2 个参数影响下流冰撞击闸墩的力学特性, 得出以下主要结论。

(1) 流冰与闸墩发生碰撞时, 在初始时刻, 闸墩边缘与水接触区附近的水域流体形成渐进扰动, 水流逐渐涌起波浪, 在闸墩前缘附近和闸门门槽前堆积, 且该区域水流垂直于流冰运动方向(y 方向)应变最大, 流冰速度受到水介质的影响, 说明本文中建立的水-冰-闸墩耦合模型能够有效验证流体的基本特性, 在水-冰-闸墩耦合模型中, 水的动力效应能够增加初次撞击力峰值, 挤压过程中, 流体形成高压场产生水垫效应, 吸收流冰的动能, 降低冰体的加载卸载频次和峰值。

(2) 在不同的流冰体积和冰体压缩强度下, 撞击接触力随着流冰体积的增大而增大, 流冰压缩强度对冰力的影响较小, 说明流冰体积是影响冰力的关键参数, 在实际破冰过程中应减小流冰体积, 防止大体积流冰对墩体结构产生较大的推力引起结构破坏。

(3) 流冰以 1.5 m/s 速度运动, 当流冰体积大于 28.8 m^3 时, 流冰与闸墩碰撞应力主要集中在流冰与闸墩碰撞接触区, 流冰局部破裂使得撞击力形成加载-卸载现象, 这种十分复杂的非线性特征主要是由于冰的承载能力降低引起碰撞接触区流冰局部破裂, 即冰体达到屈服点后表现出典型的脆性行为。

(4) 在不同的流冰体积和压缩强度下, 流冰撞击闸墩使得闸墩结构产生明显的冰激振动, 闸墩出现弹性变形, 该变形被认为是流冰撞击闸墩结构响应引起的。流冰体积在 $7.2 \sim 115.2 \text{ m}^3$ 时, 撞击振动加速度随着流冰体积的增大而增大, 其振动加速度在 $8.671 \sim 82.726 \text{ m/s}^2$ 变化。流冰压缩强度在 $1.123 \sim 2.889 \text{ MPa}$ 时, 压缩强度变化对振动加速度影响较小, 其加速度在 $-65.340 \sim 63.660 \text{ m/s}^2$ 变化。

参考文献:

- [1] YANG X, PAVELSKY T M, ALLEN G H. The past and future of global river ice [J]. *Nature*, 2020, 577: 69–73. DOI: 10.1038/s41586-019-1848-1.
- [2] ROKAYA P, BUDHATHOKI S, LINDENSCHMIDT K E. Trends in the timing and magnitude of ice-jam floods in Canada [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5834. DOI: 10.1038/s41598-018-24057-z.
- [3] 郭新蕾, 王涛, 付辉, 等. 河渠冰水力学研究进展和趋势 [J]. *力学学报*, 2021, 53(3): 655–671. DOI: 10.6052/0459-1879-20-407.
GUO X L, WANG T, FU H, et al. Progress and trend in the study of river ice hydraulics [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(3): 655–671. DOI: 10.6052/0459-1879-20-407.
- [4] 贡力, 杨腾腾, 靳春玲, 等. 水-空气耦合介质中冰载荷对闸墩的撞击影响研究 [J/OL]. *工程力学*, (2023-04-03)[2022-11-28]. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0491.
GONG L, YANG T T, JIN C L, et al. Research on collision of ice loads on the sluice pier in water-air coupling medium [J/OL]. *Engineering Mechanics*, (2023-04-03)[2022-11-28]. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0491.
- [5] WU C G, WEI Y M, JIN J L, et al. Comprehensive evaluation of ice disaster risk of the Ningxia-Inner Mongolia reach in the upper Yellow River [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 179–197. DOI: 10.1007/s11069-014-1308-z.

- [6] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 424–435. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20150824.
YANG K L. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 424–435. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20150824.
- [7] 王娟, 黄槌, 邓宇, 等. 基于数字图像相关方法的黄河冰断裂性能研究 [J]. *水利学报*, 2021, 52(9): 1036–1046. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20201064.
WANG J, HUANG Y, DENG Y, et al. Research on ice fracture of the Yellow River performance based on digital image correlation method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1036–1046. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20201064.
- [8] WANG Z, SHI H B, LIU X M, et al. Analysis on the ice regime change characteristics in the Inner Mongolia reach of the Yellow River from 1950 to 2010 [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 115(S1): 405. DOI: 10.2112/JCR-S115-115.1.
- [9] 余同希, 朱凌, 许骏. 结构冲击动力学进展 (2010–2020) [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12): 121401. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0113.
YU T X, ZHU L, XU J. Progress in structural impact dynamics during 2010–2020 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 121401. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0113.
- [10] JEON S, KIM Y. Numerical simulation of level ice-structure interaction using damage-based erosion model [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108485. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108485.
- [11] CAI W, ZHU L, YU T X, et al. Numerical simulations for plates under ice impact based on a concrete constitutive ice model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103594. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103594.
- [12] GONG L, DONG Z Q, JIN C L, et al. Flow-solid coupling analysis of ice-concrete collision nonlinear problems in the Yellow River Basin [J]. *Water*, 2023, 15(4): 643. DOI: 10.3390/w15040643.
- [13] ZHOU L, ZONG Z, LI J N. A numerical study of hydrodynamic influence on collision of brash ice with a structural plate [J]. *Journal of Hydrodyn*, 2022, 34: 43–51. DOI: 10.1007/s42241-022-0004-9.
- [14] YU Z L, AMDAHL J. A numerical solver for coupled dynamic simulation of glacial ice impacts considering hydrodynamic-ice-structure interaction [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 226: 108827. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108827.
- [15] KIM J H, KIM Y. Numerical simulation on the ice-induced fatigue damage of ship structural members in broken ice fields [J]. *Marine Structures*, 2019, 66: 83–105. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.03.002.
- [16] 王帅霖, 刘社文, 季顺迎. 基于 GPU 并行的锥体导管架平台结构冰激振动 DEM-FEM 耦合分析 [J]. *工程力学*, 2019, 36(10): 28–39. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.0560.
WANG S L, LIU S W, JI S Y. Coupled discrete-finite element analysis for ice-induced vibration of conical jacket platform based on GPU-BASED parallel algorithm [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 28–39. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.0560.
- [17] 蒋文灿, 程祥珍, 梁斌, 等. 一种组合药型罩聚能装药战斗部对含水复合结构毁伤的数值模拟及试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 083303. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
JIANG W C, CHENG X Z, LIANG B, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage of water partitioned structure by a shaped charge warhead with a combined charge liner [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 083303. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
- [18] ERCEG S, ERCEG B, VON BOCK UND POLACH F, et al. A simulation approach for local ice loads on ship structures in level ice [J]. *Marine Structures*, 2022, 81: 103117. DOI: 10.1016/j.marstruc.2021.103117.
- [19] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual [M]. CA: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2014.
- [20] CHIQUITO. M, CASTEDO. R, SANTOS. A. P, et al. Numerical modelling and experimental validation of the behaviour of brick masonry walls subjected to blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148: 103760. DOI: 10.1016/j.ijimpeng. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.
- [21] 崔堃鹏. 汽车撞击荷载及其作用下高速列车与桥梁系统动力响应与列车运行安全研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
CUI K P. Research of motor collision loads and dynamic responses of highspeed train-bridge system and running safety evaluation of trains subjected to motor collision loads [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [22] DENG Y, LI C J, LI Z J, et al. Dynamic and full-time acquisition technology and method of ice data of Yellow River [J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 176. DOI: 10.3390/s22010176.

- [23] SONG M, MA J, HUANG Y. Fluid-structure interaction analysis of ship-ship collisions [J]. *Marine Structures*, 2017, 55: 121–136. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.05.006.
- [24] YE X D, FAN W, SHA Y Y, et al. Fluid-structure interaction analysis of oblique ship-bridge collisions [J]. *Engineering Structures*, 2023, 274: 115129. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115129.
- [25] INCE S T, KUMAR A, PAIK J K. A new constitutive equation on ice materials [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(5): 610–623. DOI: 10.1080/17445302.2016.1190122.
- [26] 王庆凯, 张宝森, 邓宇, 等. 黄河冰单轴压缩强度的试验与影响因素探究 [J]. *水利水电技术*, 2016, 47(9): 90–94. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.09.018.
WANG Q K, ZHANG B S, DENG Y, et al. Study on test of uniaxial compressive strength of ice in Yellow River and its influencing factors [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(9): 90–94. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.09.018.
- [27] 张健, 王甫超, 刘海冬, 等. 水介质对船冰碰撞结构响应的影响 [J]. *船舶工程*, 2019, 41(7): 12–15, 22. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2019.07.03.
ZHANG J, WANG F C, LIU H D, et al. The influence of water medium on the structure response of ship ice collision [J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(7): 12–15, 22. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2019.07.03.
- [28] 王鸿, 贡力, 王忠慧, 等. 基于不同碰撞模型的流冰-输水隧洞碰撞动态响应研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 164–171. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.24.
WANG H, GONG L, WANG Z H, et al. Dynamic response of drift ice-water tunnel collision based on different collision models [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(1): 164–171. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.24.
- [29] SONG M, KIM E, AMDAHL J, et al. A comparative analysis of the fluid-structure interaction method and the constant added mass method for ice-structure collisions [J]. *Marine Structures*, 2016, 49: 58–75. DOI: 10.1016/j.marstruc.2016.05.005.
- [30] LIU Y Z, SHI W, WANG W H, et al. Dynamic analysis of monopile-type offshore wind turbine under sea ice coupling with fluid-structure interaction [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 12. DOI: 10.3389/fmars.2022.839897.

(责任编辑 蔡国艳)