

# 冰-砗碰撞在输水隧洞中的力学特性机理\*

贡力<sup>1</sup>, 贾治元<sup>1</sup>, 王鸿<sup>2</sup>, 李义强<sup>1</sup>, 官雪磊<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院 兰州, 730070)

(2. 中铁一院新疆铁道勘察设计院有限公司 乌鲁木齐, 830011)

**摘要** 为了研究西北寒冷地区中小型流冰对输水隧洞的碰撞问题, 基于实验分析结合数值模拟的方法, 选取模型实验几何比尺 $\lambda$ 为1:5, 通过 ANSYS/LS-DYNA 软件进行有限元仿真, 得到不同工况下流冰对输水隧洞衬砌撞击力影响规律。结果表明: 流冰撞击力峰值与流冰速度呈现出近似的线性关系; 流冰撞击力峰值与流冰压缩强度呈现出近似的对数函数关系, 在较高速度下, 流冰的塑性效果起主要作用, 流冰的压缩强度对流冰的撞击力结果影响较为不明显; 流冰撞击力峰值与流冰厚度呈现出近似线性关系。同时, 通过数值模拟与模型实验得到的流冰撞击力影响规律基本一致, 验证了冰-砗碰撞实验装置的准确性及合理性。由于数值模拟时流固耦合的计算方法考虑了水介质对流冰的影响, 在流冰撞击输水隧洞衬砌时形成水垫效应, 从而会轻微地降低流冰撞击力, 而模型实验未考虑水体对流冰的影响, 因此各种工况下的模型实验结果均普遍大于数值模拟结果。

**关键词** 冰-砗碰撞; 输水隧洞; 力学特性; 模型实验; 有限元仿真; 撞击力

**中图分类号** TV672; TH13

## 引言

我国西北地区冬季寒冷, 在输调水工程冰期输水过程中由于经常受到流冰的冲击作用, 造成隧洞衬砌龟裂或者表层剥落等破坏, 对输水隧洞的衬砌结构安全以及长期供水稳定性存在严重影响。因此, 笔者应用模型实验结合数值模拟的方法进行流冰对输水隧洞撞击作用的研究。

在水工实验方面, 由于水工建筑物具有浸水特殊性, 实体实验较难展开, 故模型实验成为一种较为合适的研究方法。黄炎等<sup>[1]</sup>构建了基于触觉式压力传感系统的冰-船碰撞模型实验, 得到相应的荷载时间历程曲线以及荷载空间分布图。周炜等<sup>[2]</sup>针对高速公路上轿车碰撞路侧护栏的交通事故形态特征, 建立了含乘员约束系统的汽车-护栏-道路系统的有限元模型, 采用显式动力学有限元方法对汽车撞击双波护栏过程进行数值模拟, 并通过实车碰撞护栏实验进行验证。张健等<sup>[3]</sup>建立了几何比尺为1:10的实验模型, 研究水介质中不同冰体撞击速度对船体板架结构各部位的影响。张梁等<sup>[4]</sup>针对双立柱式堆垛机碰撞问题, 运用模态综合法, 并利用 Nastran 计

算了立柱框架结构模态, 通过锤击实验验证了有限元模型的正确性。贡力等<sup>[5]</sup>对流冰与输水隧洞的撞击作用进行非线性有限元仿真模拟和实验研究。Masterson 等<sup>[6]</sup>将船舶在冰海域航行测试数据中的“P-A”关系曲线运用到相应碰撞的评价中。Shen 等<sup>[7]</sup>经过实验研究, 建立了一套冰盖下输冰的计算公式。可以看出, 以上关于冰排与桥墩、船舶及海上结构撞击影响的研究较多, 缺乏中小型流冰对输水隧洞撞击影响方面的研究。

为了正确研究冰-砗碰撞的过程及影响规律<sup>[8]</sup>, 笔者研究了流冰对输水隧洞撞击作用以及不同碰撞工况下流冰对隧洞衬砌撞击的力学性能规律。这对保证长距离输水结构的安全、延长工程使用寿命等具有重要的现实意义, 同时也为西北寒旱地区冰期输水安全提供一定的理论支撑。

## 1 模型实验概述

### 1.1 相似比尺及参数

冰力学实验由于具有特殊性, 原型观测一般较难展开。因此, 模型实验成为其研究的主要方法。

\* 国家自然科学基金资助项目(51969011); 甘肃省科技计划资助项目(20JR10RA274, 20JR2RA002, 21JR7RA301); 甘肃省优秀研究生“创新之星”资助项目(2022CXZX-603, 2022CXZX-595)

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-28

通过冰力学模型实验可以有效研究流冰荷载作用下结构物的破坏机理及动态响应等问题<sup>[9]</sup>。冰力学模型实验的建立需遵循佛汝德相似准则与柯西相似准则。引入几何比尺 $\lambda$ ,根据吴国英等<sup>[10]</sup>的研究结果,得到冰凌撞击力正态模型实验相似比尺。

## 1.2 实验装置

为了研究中小型流冰对输水隧洞衬砌撞击的影响,根据实验装置和模型冰的缩尺比例并借鉴模型实验<sup>[11]</sup>,设定几何比尺 $\lambda$ 为 1:5 的冰-砼碰撞测试实验台装置进行实验。在模型实验中,用矩形水箱代替隧洞模型,隧洞衬砌采用 C30 混凝土板代替,流冰由动力装置牵引撞击隧洞衬砌。图 1,2 分别为冰-砼碰撞测试实验台与冰-砼碰撞实验动力及数据采集分析系统。

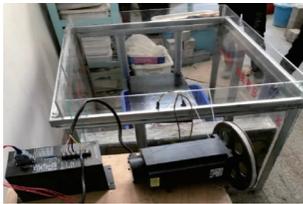


图 1 冰-砼碰撞测试实验台

Fig.1 Ice-concrete collision test bench diagram



图 2 冰-砼碰撞实验动力及数据采集分析系统

Fig.2 Diagram of ice-concrete collision test dynamics and data collection and analysis system

## 1.3 流冰模型

室内流冰实验模型与实际模型的几何比尺为 1:5,冰材料的密度比尺为 1.0,加速度比尺为 1.0<sup>[12]</sup>,实验在常重力场条件下进行。在碰撞实验中用动力装置牵引流冰撞击隧洞衬砌,测得隧洞衬砌动态应变,进而求得流冰撞击力。

## 1.4 应变传感器布置

参考文献<sup>[13]</sup>的方法在隧洞衬砌受撞击区域粘贴应变传感器,用来测得流冰撞击应变。由于实验无法保证流冰模型与隧洞衬砌模型完全贴合,因此需要在应变传感器上覆盖白纸及复写纸,记录流冰撞击隧洞衬砌模型的区域面积,便于后续计算与对比分析。图 3 为撞击区域采集图。



图 3 撞击区域采集图

Fig.3 Collected figure impact area

## 1.5 流冰速度与牵引速度转化

由于在模型实验中模型冰由柔性索与动力装置进行连接,动力装置速度与流冰模型的速度之间存在动态变化角度,模型冰速度不完全等于动力装置速度,因此笔者加装电子激光测速仪器,对模型冰趋近于隧洞衬砌时的速度进行测量,并与动力装置之间转速经验公式进行拟合。模型冰速度转化曲线如图 4 所示。

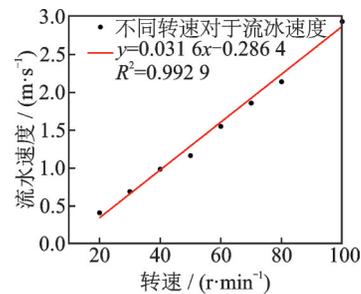


图 4 模型冰速度转化曲线

Fig.4 Model ice speed conversion curve

由图 4 可知,牵引装置转速与流冰速度之间的经验公式为

$$y = 0.0316x - 0.2864 \quad (1)$$

其中: $x$ 为牵引装置转速; $y$ 为流冰速度。

根据笔者预选的 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 和 5.0 m/s 这 10 种流冰速度,速度相似比尺为  $\sqrt{\lambda}$ <sup>[10]</sup>,换算后对应的实验速度分别为 0.224, 0.447, 0.671, 0.894, 1.118, 1.341, 1.565, 1.789, 2.012 和 2.236 m/s。根据式(1)计算实验转速分别为 16, 23, 30, 37, 44, 51, 58, 65, 72 和 79 r/min。

## 1.6 实验步骤与工况设置

### 1.6.1 实验步骤

制备长宽高为 1 m×0.3 m×1 m 的混凝土隧洞模型,在混凝土衬砌上布置 2 个应变片,应变片上覆盖白纸,白纸上覆盖复写纸。复写纸与白纸的作用是记录模型冰撞击区域的撞击面积。连接电脑与动态应变测试分析系统,采用半桥桥接方式连接应变片与动态应变测试分析系统。启动计算机,在软件

上设置电压、混凝土弹性模量和泊松比等,将准备好的模型冰放入模型,利用柔性连接将模型冰与牵引装置连接起来。启动电源,调节脉冲发射器转速,随着模型冰碰撞隧洞衬砌,读取隧洞衬砌区域产生的动态应变曲线并保存数据。由应变时程曲线得到最大应变峰值,最大撞击力的计算公式为

$$E = \sigma/\epsilon \quad (2)$$

$$\sigma = F/A \quad (3)$$

其中: $F$ 为撞击力; $E$ 为弹性模量; $\epsilon$ 为应变; $\sigma$ 为应力; $A$ 为撞击面积。

### 1.6.2 不同流冰速度工况设置

在设置不同流冰速度工况时,不考虑流冰尺寸效应的影响。根据实验步骤,将尺寸规格同为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  的模型冰放入模型,实验时将牵引装置速度分别调为  $0.224, 0.447, 0.671, 0.894, 1.118, 1.341, 1.565, 1.789, 2.012$  和  $2.236\text{ m/s}$ 。

### 1.6.3 不同流冰压缩强度工况设置

在设置不同流冰压缩强度工况时,不考虑流冰尺寸效应的影响。根据实验步骤,将尺寸规格同为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  的模型冰放入模型,利用牵引装置将流冰速度设置为  $1.789\text{ m/s}$ ,对应预选速度为  $4.0\text{ m/s}$ 。将不同抗压强度流冰置于实验模型中,根据笔者预选的  $2.357, 2.528, 2.668, 2.786, 2.889, 2.979, 3.059, 3.133$  和  $3.199\text{ MPa}$  的流冰压缩强度,冰抗压强度相似比尺为  $\lambda$ ,换算后对应的实验压缩强度分别为  $0.471\ 4, 0.505\ 6, 0.533\ 6, 0.557\ 2, 0.577\ 8, 0.595\ 8, 0.611\ 8, 0.626\ 6$  和  $0.639\ 8\text{ MPa}$ 。

### 1.6.4 不同流冰厚度工况设置

在设置不同流冰厚度工况时,根据实验步骤将模型冰速度设为  $1.565\text{ m/s}$ ,对应预选速度为  $3.5\text{ m/s}$ 。根据笔者预选的  $5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5$  和  $20\text{ cm}$  冰厚度,相似比尺为  $\lambda$ ,换算后对应的实验厚度分别为  $1.0, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  和  $4\text{ cm}$ 。

## 2 实验结果分析

### 2.1 不同速度流冰对隧洞撞击影响

考虑到流冰碰撞的复杂性和随机性,故笔者在研究流冰碰撞问题时只考虑单次正面碰撞情况。图 5,6 分别为流冰速度为  $3.0\text{ m/s}$  时隧洞衬砌应变时程图及受流冰撞击区域图。

由图 5 可以看出,流冰速度为  $3.0\text{ m/s}$  时隧洞衬砌应变峰值为  $259.888\ 8$  (应变值为无量纲),流冰碰撞过程依次有荷载加载阶段、峰值阶段和荷载

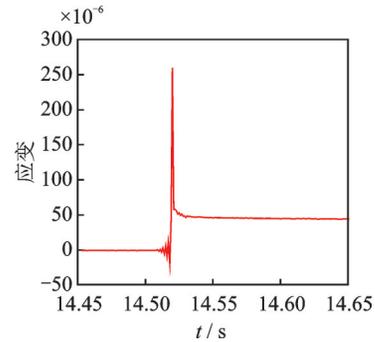


图 5 流冰速度为  $3.0\text{ m/s}$  时隧洞衬砌应变时程图

Fig.5 Time history diagram of tunnel lining strain when drift ice velocity is  $3.0\text{ m/s}$



图 6 流冰速度为  $3.0\text{ m/s}$  时隧洞衬砌受流冰撞击区域图

Fig.6 Diagram of tunnel lining impacted by drift ice when drift ice velocity is  $3.0\text{ m/s}$

卸载阶段。出现一次峰值是因为流冰正面撞击隧洞衬砌,碰撞瞬间流冰被弹回,撞击结束。在采集撞击区域实验中应变片需布置在混凝土衬砌上,导致流冰与混凝土衬砌之间的碰撞接触面不平整。为了降低实验装置误差,在计算撞击面积时只考虑碰撞接触区域。由图 6 计算出撞击面积为  $187.801\ 5\text{ mm}^2$ ,得到其最大撞击力为  $237.937\text{ kN}$ ,同理得到流冰速度分别为  $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5$  和  $5.0\text{ m/s}$  工况下的流冰最大撞击力分别为  $48.320, 79.840, 125.637, 139.463, 223.091, 234.926, 270.888, 401.972$  和  $436.041\text{ kN}$ 。分析流冰速度-最大撞击力的关系,绘制流冰速度-撞击力关系如图 7 所示。由图 7 可知,在不改变流冰其他参数情况下,只改变流冰速度,流冰最大撞击力随着流冰速度的增大而相应的增大,且流冰速度-撞击力峰值关系呈现出近似的线性关系。流冰速

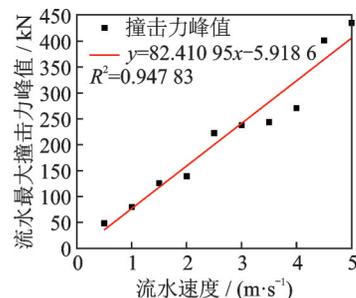


图 7 流冰速度-撞击力关系

Fig.7 Drift ice speed-impact force diagram

度-撞击力的关系式为

$$y = 82.41095x - 5.9186 \quad (4)$$

其中: $y$ 为流冰最大撞击力; $x$ 为流冰速度。

### 2.2 不同压缩强度流冰对隧洞撞击影响

本次实验速度设置为 1.789 m/s,对应预选速度为 4.0 m/s,流冰压缩强度为 2.357 MPa时隧洞衬砌撞击应变时程图以及撞击区域如图 8,9 所示。

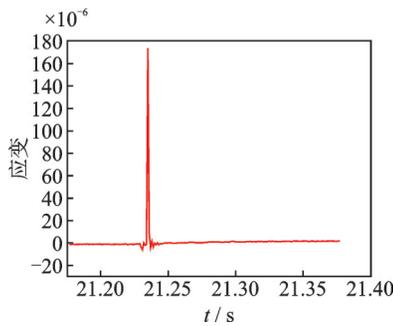


图 8 流冰压缩强度为 2.357 MPa 时隧洞衬砌撞击应变时程图  
Fig.8 Tunnel lining the impact of strain when the compression strength of drift ice is 2.357 MPa

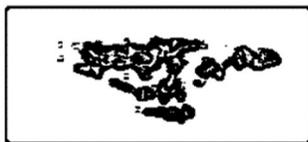


图 9 流冰压缩强度为 2.357 MPa 时隧洞衬砌撞击区域图  
Fig.9 Diagram of impact area of tunnel lining when the compression strength of drift ice is 2.357 MPa

由图 8 可以看出,其应变峰值为 173.938 2。由图 9 计算出其面积为 313.054 3 mm<sup>2</sup>,可得流冰撞击力为 265.45 kN。同理可得流冰压缩强度分别为 2.528, 2.668, 2.786, 2.889, 2.979, 3.059, 3.133 和 3.199 MPa 工况下的流冰最大撞击力分别为 266.87, 270.54, 271.44, 273.99, 272.49, 272.50, 272.13 和 273.99 kN。流冰压缩强度-撞击力关系如图 10 所示。

由图 10 可知,流冰压缩强度与最大撞击力呈现出对数函数的关系,由于实验环境的影响,部分最大撞击力出现偏移情况。流冰压缩强度与撞击力的关系式为

$$y = 5.1072 \ln(x - 2.1666) + 273.59514 \quad (5)$$

其中: $y$ 为流冰最大撞击力; $x$ 为流冰压缩强度。

### 2.3 不同厚度流冰对隧洞撞击影响

实验流冰实验速度设置为 1.565 m/s,对应

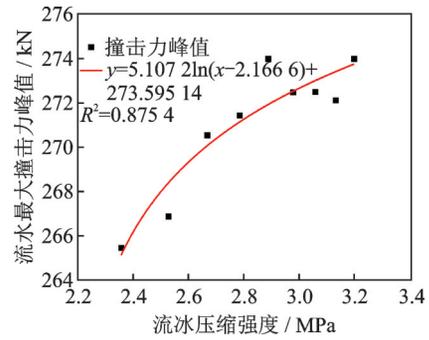


图 10 流冰压缩强度-撞击力关系

Fig.10 Drift ice compression strength-impact force diagram

预选速度为 3.5 m/s,分别绘制流冰厚度 10 cm 隧洞衬砌应变时程图及撞击区域图如图 11, 12 所示。

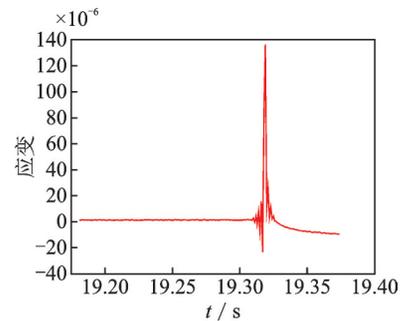


图 11 流冰厚度为 10 cm 时的隧洞衬砌应变时程图

Fig.11 Tunnel lining of strain with a thickness of 10 cm of drift ice

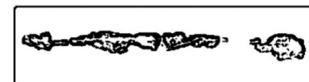


图 12 流冰厚度为 10 cm 时的隧洞衬砌撞击区域图

Fig.12 Impact area map of tunnel lining with a thickness of 10 cm of drift ice

由图 11 可以看出其应变峰值为 136.581 5,由图 12 计算出其面积为 150.030 06 mm<sup>2</sup>,通过计算可得其撞击力为 99.895 kN。同理可得流冰厚度分别为 5.0, 7.5, 12.5, 15.0, 17.5 和 20.0 cm 工况下的流冰最大撞击力分别为 10.538, 59.823, 137.367, 191.461, 236.615 和 243.926 kN。流冰压缩强度-撞击力关系如图 13 所示。

由图 13 可知,流冰厚度与最大撞击力呈现出近似线性的关系,流冰最大撞击力随着流冰厚度的增大而增大。流冰厚度与撞击力的关系式为

$$y = 16.36163x - 64.57393 \quad (6)$$

其中: $y$ 为流冰最大撞击力; $x$ 为流冰厚度。

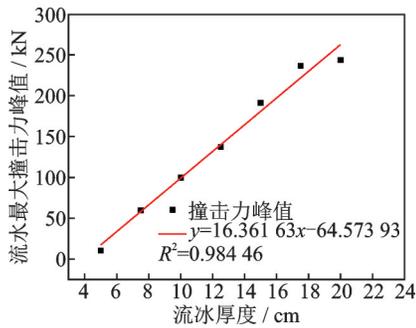


图 13 流冰压缩强度-撞击力关系

Fig.13 Drift ice compression strength - impact force diagram

### 3 流冰对隧洞衬砌撞击影响数值模拟

#### 3.1 盘道岭 37#隧洞工程简介

引大入秦工程总干渠从高程为 2 255.5 m 的科拉沟口开始输水,渠尾高程为 2 189.22 m,全长为 86.79 km。年输水量为  $4.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,控制灌溉面积可达 57 333.33  $\text{m}^2$ 。笔者以引大入秦输水枢纽中的盘道岭 37#为例,进行流冰撞击影响研究。盘道岭 37#隧洞全长为 15.723 km,其加大流量为  $36 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计流量为  $32 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计水深为 2.92 m,加大水深为 3.37 m,纵坡 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,其半径为 2.10  $\text{m}^{[14]}$ 。

#### 3.2 有限元模型的建立

以引大入秦工程盘道岭 37#隧洞为原型,建立水介质中流冰与隧洞衬砌的碰撞有限元模型如图 14 所示。其中:黄色部分为隧洞;红色部分为水;蓝色部分为流冰。

#### 3.3 不同流速流冰对隧洞撞击力影响

流冰速度为 3.0 m/s 时的隧洞衬砌应力云图及应力时程曲线如图 15,16 所示。

由图 16 可知,其最大撞击应力为 2.330 MPa。同理,得到流冰速度分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.5 和 5.0 m/s 这 9 种工况下对应的最大等效应力分别为 0.300, 0.768, 1.138, 1.358, 2.104, 2.668, 2.617, 3.756 和 4.195 MPa。由式(3)计算可得,流冰速度为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 和 5.0 m/s 对应的最大撞击力分别为 30.0, 76.8, 113.8, 135.8, 210.4, 233.0, 266.8, 261.7, 375.6 和 419.5 kN。

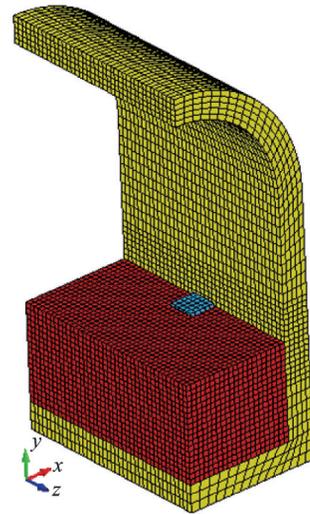


图 14 流冰与隧洞衬砌碰撞有限元模型

Fig.14 The finite element model drift ice collisions with tunnel lining

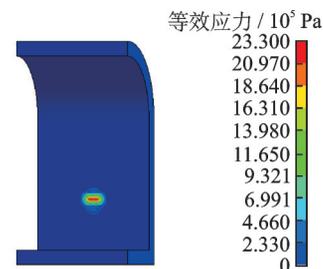


图 15 流冰速度为 3.0 m/s 时的隧洞衬砌应力云图

Fig.15 Tunnel lining stress nephogram when drift ice velocity is 3.0 m/s

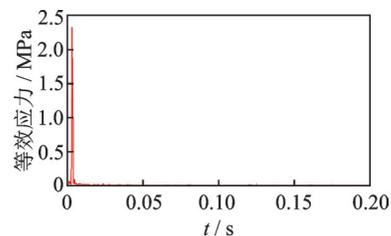


图 16 流冰速度为 3.0 m/s 时的隧洞衬砌应力时程曲线

Fig.16 Tunnel lining stress time history curve when drift ice velocity is 3.0 m/s

#### 3.4 不同压缩强度流冰对隧洞撞击影响

参照文献[15]以及天堂水文站实测资料,推得冬季平均气温在  $-5^\circ\text{C}$  左右,极端最低气温为  $-28.3^\circ\text{C}$ 。流冰压缩强度与温度关系如表 1 所示。

流冰速度为 4 m/s、流冰压缩强度为 2.357 MPa 时隧洞衬砌最大撞击应力云图及应力时程曲线如图 17,18 所示。

由图 18 可知,其最大撞击应力为 2.617 MPa。同理,得到当流冰速度为 4 m/s、流冰压缩强度分别

表 1 流冰压缩强度与温度关系

Tab.1 Relationship between the ice compression strength and temperature

| 温度/°C | 流冰压缩强度/MPa |
|-------|------------|
| -10.0 | 2.357      |
| -12.5 | 2.528      |
| -15.0 | 2.668      |
| -17.5 | 2.786      |
| -20.0 | 2.889      |
| -22.5 | 2.979      |
| -25.0 | 3.059      |
| -27.5 | 3.133      |
| -30.0 | 3.199      |

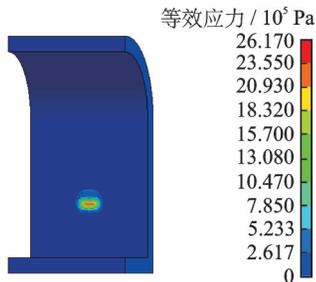


图 17 流冰压缩强度为 2.357 MPa 时隧洞衬砌最大撞击应力云图

Fig.17 Tunnel lining the maximum impact stress nephogram when drift ice compression is 2.357 MPa

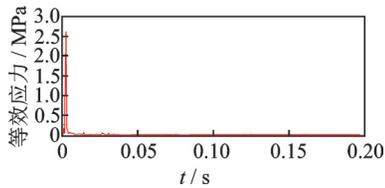


图 18 流冰压缩强度为 2.357 MPa 时隧洞衬砌最大撞击应力时程曲线图

Fig.18 Tunnel lining the maximum impact stress time history curve when drift ice compression is 2.357 MPa

为 2.528, 2.668, 2.786, 2.889, 2.979, 3.059, 3.133 和 3.199 MPa 这 8 种工况下对应的最大等效应力分别为 2.616, 2.621, 2.648, 2.648, 2.654, 2.652, 2.653 和 2.654 MPa。由式(3)计算可得,流冰压缩强度分别为 2.357, 2.528, 2.668, 2.786, 2.889, 2.979, 3.059, 3.133 和 3.199 MPa 时,对应的流冰最大撞击力分别为 261.7, 261.6, 262.1, 264.8, 264.8, 265.4, 265.2, 265.3 和 265.4 kN。

### 3.5 不同厚度流冰对隧洞撞击影响

通过观察自然界中输水工程流冰大多数属于形

状不规则的板类结构,流冰厚度与当地气候条件密切相关,笔者综合考虑大通河冰情和盘道岭隧洞所处地理位置以及文献[16]等在流冰方面的研究,选取 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 和 20 cm 厚度流冰。流冰速度为 3.5 m/s、流冰厚度为 10 cm 时的隧洞衬砌最大撞击应力云图及最大应力时程曲线如图 19, 20 所示。

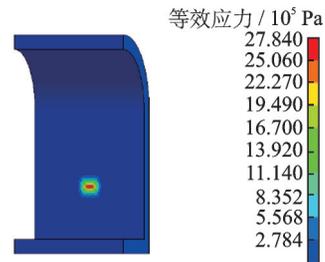


图 19 流冰厚度为 10 cm 时隧洞衬砌最大撞击应力云图

Fig.19 Tunnel lining the maximum impact stress nephogram when drift ice thickness is 10 cm

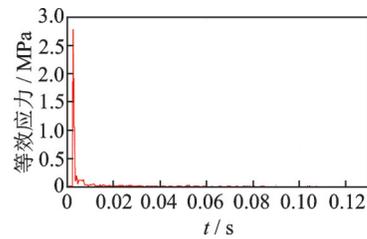


图 20 流冰厚度为 10 cm 时隧洞衬砌最大撞击应力时程曲线

Fig.20 Tunnel lining the maximum impact stress time history curve when drift ice thickness is 10 cm

由图 20 可知,其最大撞击应力为 2.784 MPa。同理,得到流冰速度为 3.5 m/s、流冰厚度分别为 5.0, 7.5, 12.5, 15.0, 17.5 和 20.0 cm 这 6 种工况下对应的最大等效应力分别为 0.330, 1.443, 2.040, 2.400, 2.678 和 2.960 MPa。由式(3)计算可得,流冰厚度为 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5 和 20.0 cm 所对应的流冰最大撞击力分别为 8.255, 54.11, 139.2, 127.5, 180.0, 234.33 和 269.00 kN。

## 4 实验与模拟对比分析

### 4.1 不同速度流冰对隧洞撞击对比影响

将不同流冰速度工况下的实验与模拟所得流冰撞击力数据进行汇总,得到不同流冰速度撞击力结果对比如图 21 所示。

由图 21 可知,不同流冰速度撞击结果总体呈现线性趋势,随着流冰速度的增大,撞击力呈现出增大的趋势。对比数值模拟结果以及模型实验结果可知,模型实验结果普遍大于数值模拟结果,这是由于数值模

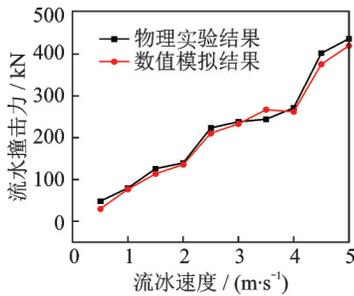


图21 不同流冰速度撞击力结果对比

Fig.21 In different drift ice speed shock results comparison chart

拟考虑水体对流冰的相互作用,在流冰撞击输水隧洞衬砌时形成“水垫效应”,从而会轻微地降低流冰撞击力。由于模型实验未考虑水体对于流冰的影响,因此实验结果会普遍大于数值模拟结果。从总体趋势可以看出,数值模拟结果与模型实验结果吻合性良好,进一步证明笔者运用的实验模型的准确性。

#### 4.2 不同压缩强度流冰对隧洞撞击对比影响

将不同流冰压缩强度工况下的实验与模拟所得流冰撞击力数据进行汇总,图22为不同流冰压缩强度撞击力结果对比。由图22可知,不同流冰压缩强度撞击结果总体呈现对数函数的趋势,随着流冰速度的增大,撞击力呈现增大的趋势,但不明显。分析发现,流冰在较高速度撞击过程中,冰体基本上体现为塑性性能较多,在较高速度撞击情况下,流冰压缩强度对于流冰撞击力的影响较为不明显。对比数值模拟结果以及模型实验结果可知,模型实验结果普遍大于数值模拟结果,这是由于数值模拟结果水体对流冰的作用,在流冰撞击输水隧洞衬砌时形成“水垫效应”,从而会轻微的降低流冰撞击力。由于模型实验未考虑水体对于流冰的影响,因此计算结果普遍大于数值模拟结果。从总体趋势可以看出,数值模拟结果与模型实验结果吻合性良好,进一步证明笔

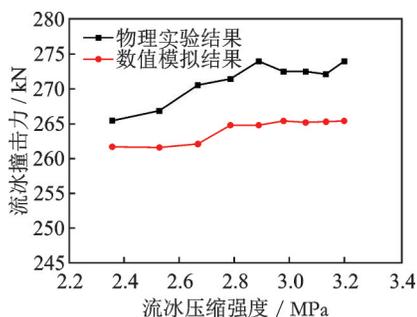


图22 不同流冰压缩强度撞击力结果对比图

Fig.22 In different drift ice compression strength shock results contrast figure

者运用的实验模型的准确性。

#### 4.3 不同厚度流冰对隧洞撞击对比影响

将不同流冰厚度工况下的实验与模拟所得流冰撞击力数据进行汇总,得到不同流冰厚度撞击力结果对比如图23所示。

由图23可知,不同流冰厚度撞击结果总体呈现出近似线性趋势,随着流冰厚度的增大,撞击力呈现增大的趋势。对比数值模拟结果以及模型实验结果可知,模型实验结果普遍大于数值模拟结果,这是由于数值模拟结果水体对流冰的作用,在流冰撞击输水隧洞衬砌时形成“水垫效应”,从而会轻微地降低流冰撞击力。由于模型实验未考虑水体对于流冰的影响,因此计算结果普遍大于数值模拟结果。从总体趋势可以看出,数值模拟结果与模型实验结果吻合性良好,进一步证明笔者运用的实验模型的准确性。

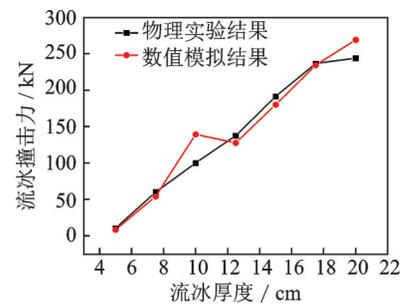


图23 不同流冰厚度撞击力结果对比

Fig.23 Different thickness of drift ice shock results comparison chart

## 5 结论

1) 在只改变流冰速度情况下,流冰撞击力峰值均随着流冰速度的增大而增大,且均呈现近似的线性关系。经计算,模型实验结果大于数值模拟结果。这是由于流固耦合的计算方法考虑了水介质对流冰的影响,在流冰撞击输水隧洞衬砌时形成“水垫效应”,从而轻微地降低流冰撞击力,而模型实验未考虑水体对流冰的影响。因此,模型实验结果普遍大于数值模拟结果。

2) 在只改变流冰压缩强度的情况下,流冰撞击力峰值均随着流冰压缩强度的增大而增大,且均呈现出近似的对数函数关系。经计算,模型实验结果大于数值模拟结果。此外,当流冰速度为4.0 m/s,只改变流冰压缩强度,流冰撞击力变化不明显。这说明在较高速度下,流冰体现的塑性效果起到主要作用,流冰的压缩强度对流冰的撞击力结果影响不明显。

3) 在只改变流冰厚度的情况下,流冰撞击应力

峰值与流冰厚度呈现近似线性关系。经计算,模型实验结果大于数值模拟结果。此外,数值模拟冲击力结果随着流冰厚度的增加,其波动性较模型实验结果大,模型实验结果呈现出较为规律的结果,主要是由于数值模拟结果涉及水介质对于流冰的扰动作用,且随着流冰厚度的增加,其阻力也相应增大,致使数值模拟结果波动性较大。总体结果来看,数值模拟结果规律与模型实验结果规律基本一致。

### 参 考 文 献

- [1] 黄焱,郭晓辉,孙剑桥. 船-冰碰撞的模型实验方法研究[J]. 中国造船, 2018, 59(3): 46-59.  
HUANG Yan, GUO Xiaohui, SUN Jianqiao. Study on model test techniques of ship-ice impact[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(3):46-59. (in Chinese)
- [2] 周炜,张国胜,张天侠,等. 汽车-护栏系统的碰撞特性[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(S1): 103-106.  
ZHOU Wei, ZHANG Guosheng, ZHANG Tianxia, et al. Collision characteristics of car-guardrail system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(S1): 103-106. (in Chinese)
- [3] 张健,王甫超,刘海冬,等. 水介质中船体板架模型与冰体碰撞实验研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(4): 492-500.  
ZHANG Jian, WANG Fuchao, LIU Haidong, et al. Experimental study on collision of hull plate model and ice in water medium[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(4):492-500. (in Chinese)
- [4] 张梁,张方,秦远田,等. 双立柱式堆垛机碰撞振动与仿真分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6):1143-1147.  
ZHANG Liang, ZHANG Fang, QIN Yuantian, et al. Research and simulation on vibro-impact of double-mast stacker crane[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6):1143-1147. (in Chinese)
- [5] 贡力,王鸿,杨轶群,等. 流冰对输水隧洞衬砌的撞击影响研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 72-80.  
GONG Li, WANG Hong, YANG Yiqun, et al. A study on the impact effect of drift ice on the lining of a water tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(4):72-80. (in Chinese)
- [6] MASTERSON D M, FREDERKING R M W. Local contact pressures in ship/ice and structure/ice interactions[J]. Cold Regions Science and Technology, 1993, 21: 169-185.
- [7] SHEN H T, WANG D S. Under cover transport and accumulation of frazil granules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121(2): 184-195.
- [8] 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.  
ZHANG Jian, WANG Fuchao, LIU Haidong, et al. The influence of water medium on the structure response of ship ice collision[J]. Ship Engineering, 2019, 41(7): 12-15, 22. (in Chinese)
- [9] 路卫卫. 冰排与建筑物挤压破坏有限元模拟分析研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [10] 吴国英,赵连军,李远发. 黄河桥梁冰凌撞击力实体模型相似律及模拟材料选择[J]. 中国农村水利水电, 2016(6):168-172.  
WU Guoying, ZHAO Lianjun, LI Yuanfa. Physical model similarity law of the icicle impact force on yellow river bridges and model material selection[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6):168-172. (in Chinese)
- [11] 刘海冬. 船水冰耦合技术及船冰碰撞模型实验研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2018.
- [12] 王晓玲,周正印,蒋志勇,等. 考虑气温变化影响的引水渠道水内冰演变数值模拟[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6):515-522.  
WANG Xiaoling, ZHOU Zhengyin, JIANG Zhiyong, et al. Numerical simulation of frazil ice evolution in diversion channel considering effect of temperature variation[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(6): 515-522. (in Chinese)
- [13] 黄焱,马高强,孙剑桥. 船-冰碰撞载荷时间历程的模型实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4):7-14.  
HUANG Yan, MA Gaoqiang, SUN Jianqiao. A model test study on the time history of ship-ice impact loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(4): 7-14. (in Chinese)
- [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(3):59-62.  
LI Qitong. Introduction of pandaoling tunnel of Gansu province leading into Yindaruqin project[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1991(3): 59-62. (in Chinese)
- [15] 王庆凯,张宝森,邓宇,等. 黄河冰单轴压缩强度的实验与影响因素探究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(9): 90-94.  
WANG Qinkai, ZHANG Baosen, DENG Yu, 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. (in Chinese)
- [16] 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.



**第一作者简介:**贡力,男,1977年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为输水工程安全。曾发表《流冰对引水隧洞撞击作用力学特性数值分析与验证》(《农业工程学报》2018年第34卷第14期)等论文。  
E-mail: gongl@mail.lzjtu.cn

**通信作者简介:**贾治元,男,1994年11月生,硕士生。主要研究方向为输水工程安全。  
E-mail: 1055302896@qq.com