

冰-水耦合作用下流冰对明渠的撞击破坏 响应分析

贾治元, 贡力, 党丹丹, 董洲全, 杨腾腾

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为研究水介质中流冰对输水明渠的撞击影响, 基于流固耦合的计算方法, 运用 LS-DYNA 软件对水介质中流冰与明渠的撞击过程进行非线性有限元仿真, 并通过几何比尺为 1:10 进行模型试验验证。以流冰与明渠碰撞角度、流冰厚度、明渠衬砌混凝土强度等级为变量, 探究其对流冰碰撞输水明渠的影响规律。结果表明: 碰撞角度为 90° 工况下的明渠衬砌撞击区的最大等效应力与 X 方向最大位移分别是 38.66°, 45°, 63.43° 工况平均峰值的 3.01 倍和 4.19 倍, 且 90° 工况下明渠衬砌撞击区发生了约为 5.72×10^{-6} m 的损伤变形, 而 38.66°, 45°, 63.43° 工况下的损伤变形约 $0 \sim 4.78 \times 10^{-7}$ m, 表明倾斜的坡面可以有效减小流冰对明渠撞击区的撞击力、位移及损伤变形; 流冰厚度对明渠衬砌撞击的最大等效应力与 X 方向最大位移呈现出近似的线性关系; 流冰对明渠衬砌撞击的最大等效应力与 X 方向最大位移随着混凝土强度等级的增大而逐渐减小, 两者呈现出近似的线性关系。综合分析所模拟的不同工况可以发现, 冰渠之间的水由于受到冰运动时的挤压作用而预先产生一个高压力场, 在求解分析时应充分考虑, 不可忽略; 同时, 试验值与模拟值基本吻合, 表明数值模拟仿真模型准确可靠。

关键词: 冰-水耦合; 流冰撞击; 明渠; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV672 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-1033-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.017

引言

中国西北地区位于高寒地带, 冬季气温低, 冰期长, 频繁发生的冰凌灾害已成为该地区长距离输水工程安全运营所面临的首要问题^[1]。位于此地区的输水明渠冰期输水过程中容易产生流冰碰撞, 长期的碰撞冲击会导致衬砌破损、开裂, 严重影响安全输水和衬砌结构的稳定性, 甚至给人民生命财产带来重大损失。因此, 开展流冰对输水明渠破坏机理的研究迫在眉睫。

国内外学者在流冰与结构物碰撞仿真与试验方面展开了大量的研究。目前对于空气介质中流冰撞击结构物的研究较多。Wu 等^[2]研究桥梁在随机冰荷载作用下的动力响应, 并提出一种生成随机冰荷载过程的模拟方法; 张于晔等^[3]采用有限元法分别建立有无防撞装置的桥墩三维实体模型, 分析了车辆撞击作用下各桥墩的动态时程响应; 贡力等^[4]研究了流冰对输水明渠的撞击作用, 发现流冰对输水明渠的撞击影响规律; Li^[5]考虑浮冰冲击对列车-轨道-桥梁动力相互作用的影响; 于天来等^[6]采用模拟

与实测相结合的方法研究流冰与桥墩撞击相互作用。然而, 对流冰-结构物的碰撞研究缺少对水介质的考虑。对水介质的考虑, 在船-海冰碰撞方面的研究较多, 可采用研究海冰碰撞中冰-水耦合作用的方法来研究流冰对明渠的撞击影响。Myher^[7]对冰山与船舶不同部位碰撞的情形进行模拟, 得出抵抗碰撞影响的有利区域; 孙剑桥等^[8]通过冰水池模型试验, 对船-冰碰撞载荷沿船体表面空间移动轨迹及局部冰压力空间分布形态随时间的变化过程进行了研究; Kim 等^[9]对船舶与浮冰碰撞中发生永久变形和冰破坏情况进行实验研究; Gagnon^[10]进行了冰水池冰块与船首侧面相撞试验, 并与数值模拟对比, 结果吻合; 蔡伟等^[11]开展了与实验场景相对应的不同冰材料模型下有限元数值模拟, 对比分析各冰材料模型的特点以及应用局限。综上所述, 研究人员对于流冰-结构物与船-海冰撞击影响研究较多, 但缺乏水工建筑物水介质中流冰对输水明渠撞击影响方面的研究。

为研究寒冷地区长距离输水工程解冻期流冰对输水明渠的撞击影响, 该研究将数值模拟与模型试验相结合, 并运用流固耦合的计算方法, 同时采用软

件 LS-DYNA 建立流冰碰撞输水明渠的有限元仿真模型,模拟水介质中流冰与输水明渠碰撞的全过程,以探究不同工况下流冰对输水明渠的撞击影响规律,为寒旱地区冬季冰期输水安全提供理论支撑和技术保障。

1 流冰对输水明渠撞击理论基础

1.1 显示积分算法

流冰与明渠碰撞属于低速非线性问题,碰撞瞬间流冰发生变形或破碎,明渠撞击区产生应力、位移与损伤变形,整个过程伴随着能量交换与吸收,考虑阻尼后的流冰碰撞明渠运动方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (1)$$

式中 M 为质量矩阵; \ddot{u} 为加速度向量; C 为系统阻尼矩阵; \dot{u} 为速度向量; K 为刚度矩阵; u 为位移向量; $P(t)$ 为外力向量。

1.2 流固耦合

本文基于水介质中流冰与明渠的碰撞场景而建立的水-流冰-明渠三者耦合模型,然而在流固耦合计算过程中流动的材料容易使有限元网格产生严重的变形,从而造成仿真计算结果不收敛。为解决此类问题,通常采用 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) 算法,意在实现拉格朗日算法与欧拉罚函数算法之间的相互作用,提高模拟的准确性。因此本文采用 LS-DYNA 软件进行非线性有限元仿真时选用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来定义流固耦合^[12]。

1.3 实验相似准则

由于流冰与明渠碰撞过程中存在的水介质对流冰的扰动作用,导致流冰与明渠碰撞相互作用过程的原型观测较难展开,因此,模型实验成为解决这一类问题的重要手段。根据文献[13]的研究结果,冰力学模型试验主要以重力相似准则、佛汝德相似准则、柯西相似准则为依据,整理得到模型试验物理量相似比尺如表 1 所示。

表 1 模型试验物理量相似比尺

长度	时间	速度	密度	质量	抗压强度	弯曲强度	弹性模量	冰力
λ_L	$\sqrt{\lambda_L}$	$\sqrt{\lambda_L}$	1	λ_L^3	λ_L	λ_L	λ_L	λ_L^3

1.4 工程实例

本文选取引大入秦工程总干渠段梯形明渠作为

有限元仿真模型。引大入秦总干渠属于天祝县境内的大通河至永登县庄浪河流域,全长 87 km,设计引水量为 32 m³/s,加大引水量为 36 m³/s,设计水深 2.29 m,加大水深 3.37 m。该梯形明渠桩号为 00+406.92~04+231.08,底板为 C25 钢筋混凝土浇筑,厚 0.2 m;边坡挂钢筋网浇筑 C25 细粒混凝土,厚 0.12 m,底宽 4.5 m,渠高 4.3 m,边坡 1:1.25。

1.5 模型材料参数

1.5.1 流冰模型材料参数

冰的复杂性主要表现在其失效强度与应变率,其压缩强度也会随环境温度的变化而改变。在软件 LS-DYNA 计算中,添加关键字 *MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_FAILURE 进行冰材料的定义,可模拟流冰碰撞时产生的破碎效果。冰材料模型参数参考文献[14],冰材料模型参数如表 2 所示。

表 2 冰材料模型参数

材料密度/(kg·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	截断应力/MPa
910	2.2	2.12	4.26	5.26	0.35	-4.0

1.5.2 输水明渠衬砌混凝土材料

明渠几何形状、尺寸、混凝土材料等的选择取决于引大入秦工程总干渠段梯形明渠的实际工程,模拟计算中明渠衬砌混凝土材料参数采用连续面盖帽模型^[15],添加关键字 *MAT_CSCM_CONCRETE 进行定义,该模型可记录碰撞过程中明渠衬砌的撞击力、位移及损伤变形,在混凝土结构低速冲击方面的应用较多。混凝土材料模型参数如表 3 所示。

表 3 混凝土材料模型参数

质量密度 r_0 /(kg·m ⁻³)	计算控制参数	计算控制参数	率效应开关	预损伤
2500	0	0	1	0
侵蚀系数	系数恢复参数	盖帽选项	抗压压缩强度/MPa	骨料粒径/m
1.1	10	0	29	0.02

1.5.3 水介质材料参数

在软件 LS-DYNA 中进行流固耦合计算时,水介质参数采用空白材料组 *MAT_NULL 进行定义,其密度参数为 1000 kg/m³、截断应力为 -1×10^5 Pa。对于流体介质,还需定义状态方程,水介质采用

Gruneisen 状态方程,水介质状态方程参数如表 4 所示^[16]。

表 4 水介质状态方程参数

Tab. 4 Parameters of state equation of water medium

常数 C	常数 S_1	常数 S_2	常数 γ	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

1.6 有限元模型的建立

流冰与输水明渠碰撞过程中的接触算法以罚函数法为主,接触类型为自动面面接触,明渠衬砌面为主面,流冰接触面为从面,通过关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TOSURFACE进行设置。对明渠衬砌底板及边壁均进行全约束,水介质的边界条件在 xoy 平面的欧拉单元均采用无反射边界条件(non-reflecting boundary);而 yoz 平面内的流体由于受到明渠边壁的约束,因此对该平面内的流体单元不设约束;对于 xoz 平面内的水介质单元,与流冰接触面定义为无反射边界条件,与明渠底部接触面由于受到边壁的约束作用而不设约束。

为了准确模拟水中流冰对明渠的冲击碰撞作用,消除流冰运动过程中水介质对流冰的能量消耗,进而更加接近真实的碰撞场景,因此,本文在流固耦合仿真模拟中将 X 方向的初速度赋予流冰,去近似替代水流拖动流冰运动的水平速度,以保证流冰碰撞到明渠衬砌的速度为所设置的初始速度。为减少模拟计算时间,将流冰与明渠之间的距离设置为 0.01 m,以确保流冰运动过程中较小的能量损失。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,只考虑水流拖动流冰运动的水平荷载^[17]。

流冰碰撞输水明渠是一个非线性动态响应的过程,为研究方便,本文以引大入秦工程总干渠段梯形明渠为原型建立有限元仿真碰撞模型。以大通河冰情和明渠所在地理位置为依据,并参考张宿峰^[18]在流冰方面的研究,选取 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的长方体流冰模型,其中流冰厚度为 0.4 m,碰撞面积为 0.4 m^2 ,流冰吃水深度为 0.35 m。根据引大入秦工程中明渠运营水深及最大水深,选取模拟水深为 2.0 m。水、流冰和明渠均选取 3D Solid164 实体单元,采用 SWEEP 网格划分,建立水-流冰-明渠衬砌有限元碰撞模型,水-流冰-明渠衬砌碰撞网格划分图如图 1 所示。

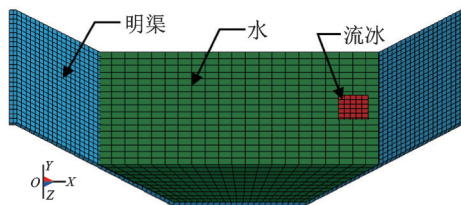


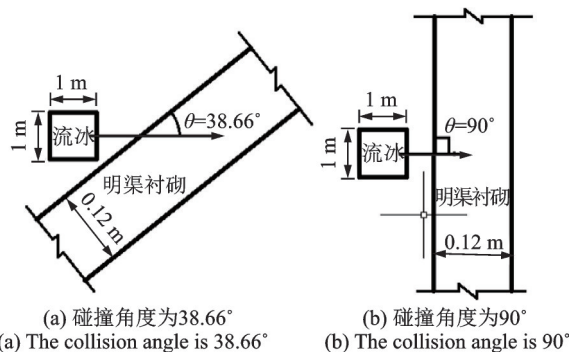
图 1 水-流冰-明渠衬砌碰撞网格划分图

Fig. 1 Water-drift ice-open channel lining collision part meshing diagram

2 不同工况下流冰对输水明渠的撞击响应

2.1 不同碰撞角度

根据引大入秦工程中明渠设计流速及最大流速,选取流冰速度为 3 m/s,混凝土等级为 C25,探究流冰与明渠不同碰撞角度对明渠衬砌的影响。由引大入秦输水明渠实际运营及文献[19]规范对边坡系数的设计要求,选取明渠边坡系数为 1.25, 1, 0.5, 0 (矩形明渠),对应流冰与明渠的碰撞角度 θ 为 $38.66^\circ, 45^\circ, 63.43^\circ, 90^\circ$ (正碰),流冰与明渠衬砌碰撞角度示意图如图 2 所示(以 $\theta=38.66^\circ, 90^\circ$ 为例)。



(a) 碰撞角度为 38.66° (a) The collision angle is 38.66° (b) 碰撞角度为 90° (b) The collision angle is 90°

图 2 流冰与明渠衬砌碰撞角度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collision angle between drift ice and open channel lining

因为在流冰碰撞仿真模拟过程中非常容易出现沙漏情况,所以对流冰碰撞模拟计算精度有一定的要求。图 3 为碰撞角度为 90° 工况下的能量曲线变化图,可以看出总能量基本保持不变,动能曲线包括流冰与明渠的动能,在初始时刻明渠未发生振动,其动能为零,流冰动能为 $1.65 \times 10^3 \text{ J}$,约占总能的 100%。当流冰与明渠发生碰撞后,流冰动能开始下降,然而不是呈线性下降,主要是撞击发生后,明渠产生了振动和流冰速度减小导致。初始时刻内能为零,随着流冰的运动,内能相对应的增加。还可以看出沙漏能在整个过程中很小,其峰值约为总能峰值的 0.79%,满足在 10% 以内的要求,说明该仿真模拟计算结果有效地控制了沙漏能问题,表明数值模

拟仿真模型准确可靠。

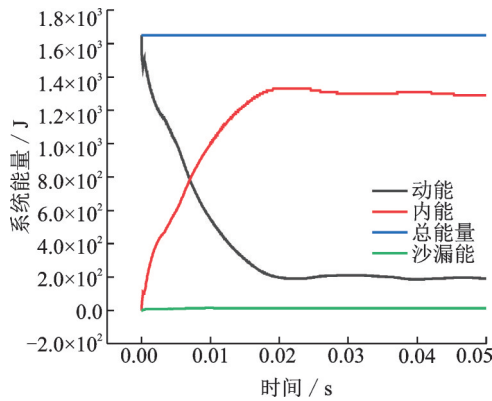


图3 能量变化图

Fig. 3 Energy change graph

经模拟计算,在碰撞角度为 38.66° 工况下,明渠衬砌最大等效应力云图与X方向最大位移云图如图4,5所示。

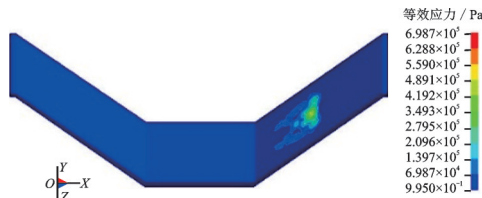


图4 明渠衬砌最大等效应力云图

Fig. 4 Maximum equivalent stress cloud diagram of open channel lining

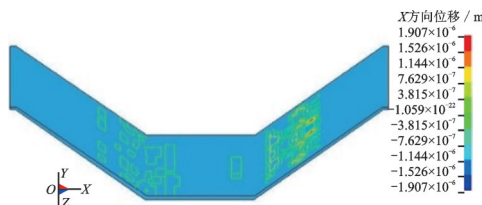


图5 明渠衬砌X方向最大位移云图

Fig. 5 Cloud diagram of maximum displacement in X direction of open channel lining

由图4,5可知,明渠衬砌所受最大撞击应力在 0.0039993 s 时达到峰值,为 $6.987 \times 10^5\text{ Pa}$,此时X方向最大位移也达到峰值,为 $1.907 \times 10^{-6}\text{ m}$ 。同理可知,碰撞角度为 45° , 63.43° 和 90° 工况下的最大等效应力分别为 6.674×10^5 , 9.573×10^5 和 $2.332 \times 10^6\text{ Pa}$;对应X方向最大位移分别为 4.768×10^{-6} , 5.96×10^{-6} 和 $1.764 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。不同碰撞角度下明渠最大等效应力时程曲线与X方向最大位移时程曲线汇总如图6,7所示。

由图6,7可知,不同碰撞角度下明渠的等效应力峰值与X方向位移峰值是不同的。碰撞角度为 38.66° , 45° , 63.43° 和 90° 四种工况下明渠衬砌最大撞击等效应力与X方向最大位移时程曲线均出现多峰值现象,说明流冰与明渠的碰撞过程中出现了持续

的碰撞与挤压,也表明碰撞过程中构件发生了不断的失效和破坏;碰撞角度为 90° 工况下的最大等效应力与X方向最大位移远大于 38.66° , 45° , 63.43° 工况下的峰值,经计算 90° 工况下的最大等效应力是其他3种工况平均峰值的3.01倍,其X方向最大位移是其他3种工况平均峰值的4.19倍,这是由于正碰工况下,碰撞瞬间流冰对明渠衬砌的撞击作用较大,流冰的绝大部分能量都直接作用于明渠衬砌上,只有小部分能量被水介质吸收损失;而其他3种工况碰撞瞬间对明渠衬砌的撞击作用较小,是由于碰撞接触面倾斜,使流冰碰撞倾斜面瞬间发生了顺着斜坡向上的滑动挤压运动,进而使较多能量被倾斜面卸载消耗。由图7可知,正碰工况下X方向最大位移时程曲线发生了约为 $5.72 \times 10^{-6}\text{ m}$ 的损伤变形,而其他工况损伤变形约为 $0 \sim 4.78 \times 10^{-7}\text{ m}$,可忽略不计,表明流冰碰撞角度为 90° 工况下对明渠衬砌损伤变形影响显著,而斜碰对明渠衬砌损伤变形影响很小;且碰撞角度为 90° 工况下最大位移峰值出现后无波动,是因为流冰与明渠碰撞属于正碰,碰撞瞬间流冰被弹回,碰撞结束,不存在二次碰撞及挤压现象。

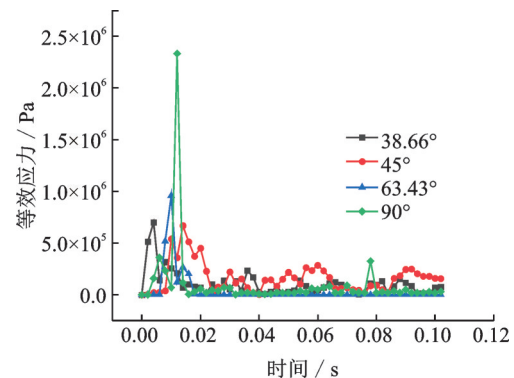


图6 不同碰撞角度下明渠最大等效应力时程曲线

Fig. 6 Time history curve of maximum equivalent stress of open channel under different collision angles

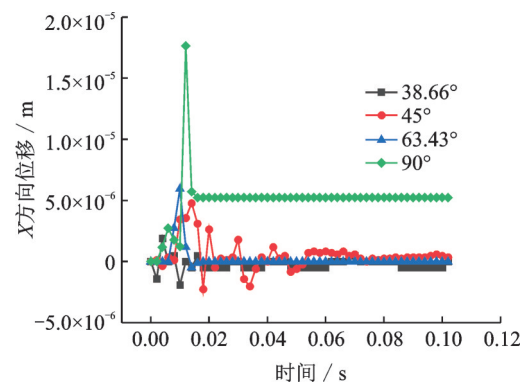


图7 不同碰撞角度下明渠X方向最大位移时程曲线

Fig. 7 Time history curve of maximum displacement in X direction of open channel under different collision angles

2.2 不同流冰厚度

由 2.1 节知,正碰工况下流冰对明渠的撞击影响最大,因此本节选取碰撞角度工况为 90° ,其他条件不变。为研究尺寸效应对流冰碰撞输水明渠的影响,并依据文献[20-21]等给出的流冰压力计算公式,流冰厚度为其冰压力计算的重要指标,结合引大入秦工程明渠所在位置冰情特点,选取 0.2, 0.4, 0.6 m 冰厚度工况对明渠衬砌的碰撞影响进行分析。经模拟计算可得不同流冰厚度工况下 X 方向的冰破碎变形云图与冰破碎变形时程曲线图如图 8, 9 所示。

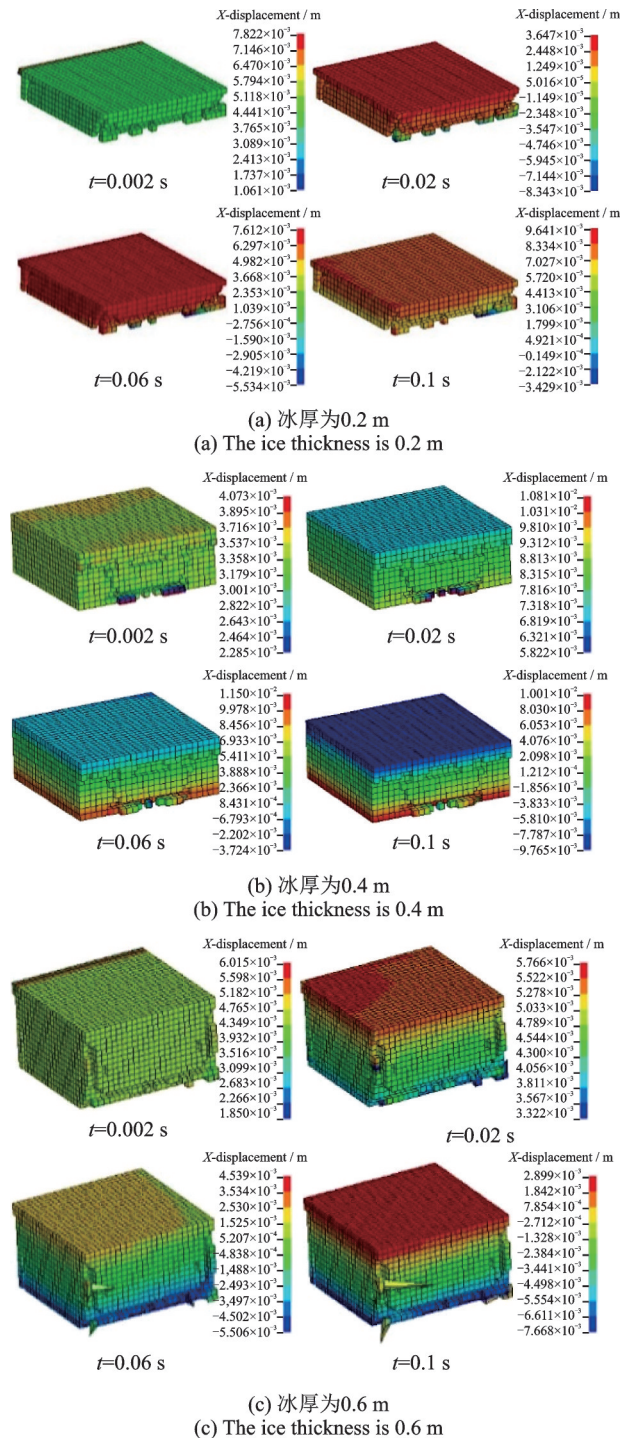


图 8 冰破碎变形云图

Fig. 8 Ice broken deformation cloud map

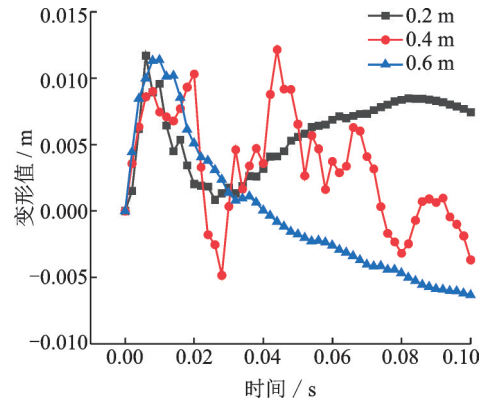


图 9 冰破碎变形时程曲线图

Fig. 9 Time course curve of ice breaking and deformation

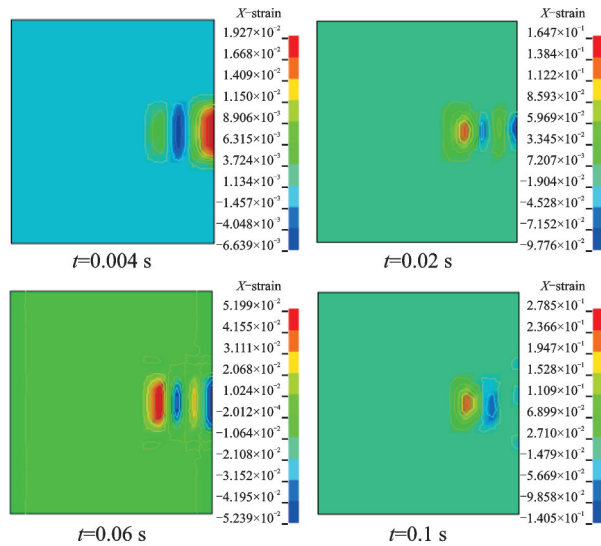
由图 8 可以看出,不同厚度工况流冰在不同时刻发生破碎变形现象,发生碰撞后破碎失效的单元被删除,流冰产生质量损失。由图 9 可知,冰在不同时刻其破碎变形值不同,0.2, 0.4 和 0.6 m 冰厚度工况下的最大变形值分别为 1.17×10^{-2} , 1.22×10^{-2} 和 1.14×10^{-2} m。由于流冰尺寸的变化,尺寸效应的影响导致水垫效应对冰的作用明显,因此不同厚度工况下冰最大变形值出现的时刻是不同的。从图 9 还可以看出冰破碎变形值随着时间出现多个峰值现象,说明流冰构件在撞击过程中出现了连续的破坏和失效。

为了准确模拟流冰与明渠相互作用时水介质扮演的重要角色,使更加接近真实的碰撞场景,因此,冰-水耦合作用中水介质所产生的水垫效应不可忽略。经模拟可得不同流冰厚度工况下水介质的 X 方向应变云图如图 10 所示。

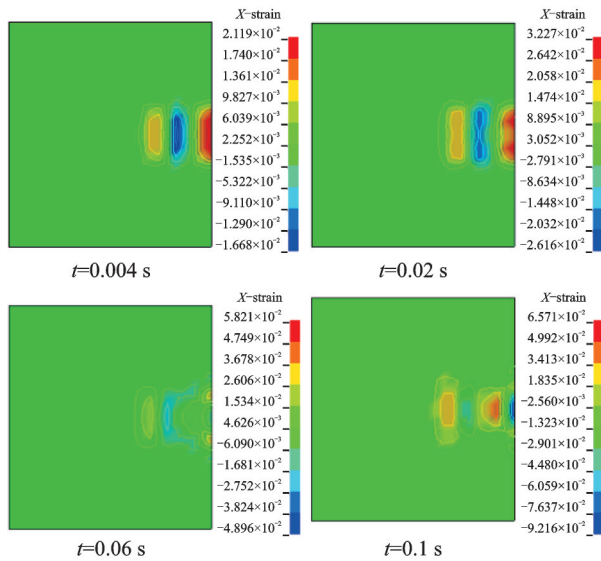
由图 10 可知,同一流冰厚度工况下,水介质的 X 方向应变峰值随着碰撞时间的增大而增大,说明碰撞过程中水介质对流冰的扰动作用是逐渐增强的。并且在流冰与明渠接触面处的水体从受流冰 X 正方向的压力转为受流冰 X 负方向的拉力,反面水体受力则相反。从图 10 还可以看出在同一时刻随着流冰厚度的增大应变值也逐渐增大,说明随着流冰厚度的增大,尺寸效应对水介质的影响逐渐增大。

碰撞角度为 90° 时,不同厚度工况下明渠最大等效应力时程曲线与 X 方向最大位移时程曲线如图 11, 12 所示。

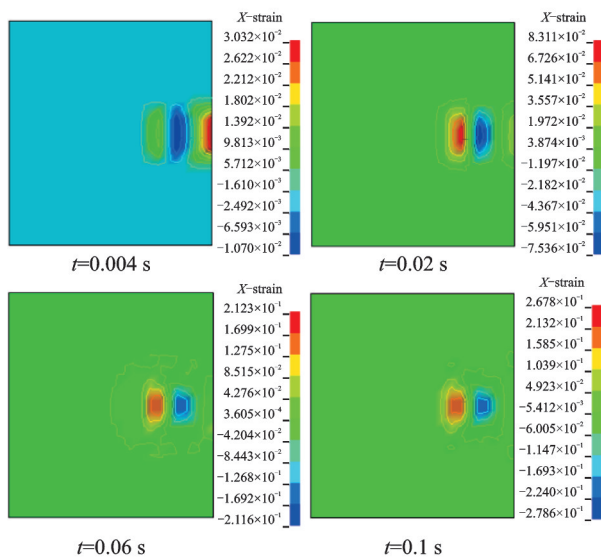
由图 11 可知,冰厚度为 0.2, 0.4, 0.6 m 工况下流冰对明渠衬砌撞击的等效应力峰值分别为 8.01×10^5 , 2.33×10^6 , 5.03×10^6 Pa, 即最大等效应力随着流冰厚度的增大而增大,两者呈现出近似的线性关系。从图 11 还可以看出随着冰厚度的增大,等效应力峰值出现的时间是逐渐延迟的,这是因为流冰厚度的增大伴随着质量的增加,水介质对冰的拖拽力及黏滞性增强,流冰尺寸的改变使水垫效应作用明



(a) 冰厚为0.2 m
(a) The ice thickness is 0.2 m



(b) 冰厚为0.4 m
(b) The ice thickness is 0.4 m



(c) 冰厚为0.6 m
(c) The ice thickness is 0.6 m

图10 不同流冰厚度工况下水介质的X方向应变云图
Fig. 10 X-direction strain cloud map of water medium under different drift ice thickness conditions

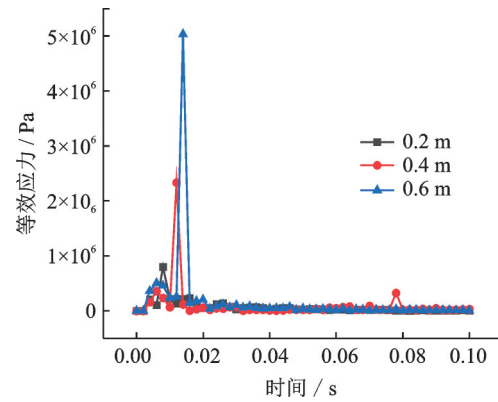


图11 不同厚度下明渠最大等效应力时程曲线
Fig. 11 Time history curve of maximum equivalent stress in open channels under different thicknesses

显,导致碰撞时间出现了滞后的现象,因此峰值出现的时间也是不一致的。由于水介质中流冰在近场逼近明渠时水介质受到流冰的挤压会预先产生一个高压场,该力场使冰渠之间产生一个降低速度的水垫效应,同时在冰渠结构上产生一个瞬间压力荷载,因此,在等效应力最大峰值前出现了微小的中间峰值,说明在流固耦合计算中对水介质的作用及水垫效应的影响不可忽视。

由图12可知,冰厚度为0.2,0.4,0.6 m工况下流冰对明渠衬砌撞击的X方向位移峰值分别为 8.431×10^{-6} , 1.76×10^{-5} , 2.67×10^{-5} m,即随着流冰厚度的增大而增大,两者呈现出近似的线性关系。从图12还可以看出随着冰厚度的增大,明渠X方向位移峰值出现的时间是逐渐延迟的,这是因为流冰厚度的增大伴随着质量的增加,水介质对冰的拖拽力及黏滞性增强,流冰尺寸的改变使水垫效应作用明显,导致碰撞时间出现了滞后的现象,因此峰值出现的时间也是不一致的。由于水介质中流冰在近场逼近明渠时水介质受到流冰的挤压会预先产生一个高压场,该力场一方面使冰渠之间产生一个降低速

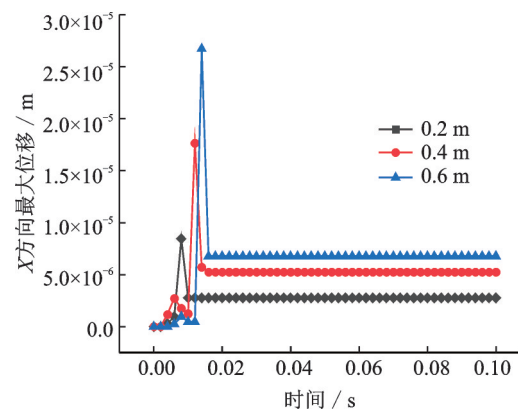


图12 不同厚度下明渠衬砌X方向最大位移时程曲线
Fig. 12 Time history curve of X-direction maximum displacement of open channel lining under different thicknesses

度的水垫效应,同时在冰渠结构上产生一个瞬间压力荷载。因此,在 X 方向最大位移峰值前出现了的中间峰值,说明在流固耦合计算中水介质所扮演的角色及水垫效应的影响不可忽视。从图 12 还可以看出不同流冰厚度工况下明渠衬砌的损伤变形分别为 2.77×10^{-6} , 5.72×10^{-6} , 6.77×10^{-6} m,随着流冰厚度的增大而增大,两者呈现出近似的线性关系。

2.3 不同混凝土强度等级

实际工程中,随着混凝土抗压强度等级的不同,明渠衬砌强度也随之改变,混凝土强度等级越高,明渠衬砌抵抗流冰碰撞的能力越强。因此,为节约造价成本,减少不必要的材料浪费,根据地区流冰灾害特点在工程设计时选取最优混凝土强度等级尤其重要。

由 2.1 节知,正碰工况下流冰对明渠的撞击影响最大,因此本节选取碰撞角度工况为 90° ,流冰速度为 3 m/s 不变。根据引大入秦明渠工程实际建设及文献[22-23]选取了 C20, C30, C40, C50 四种不同强度等级混凝土来研究流冰对明渠衬砌的碰撞影响。经模拟计算可知, C20 混凝土工况下的明渠衬砌最大等效应力云图与 X 方向最大位移云图如图 13, 14 所示。

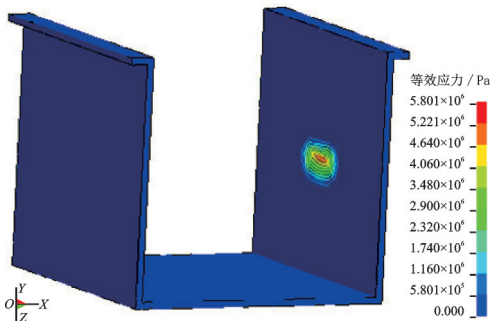


图 13 明渠衬砌最大等效应力云图

Fig. 13 Maximum equivalent stress cloud diagram of open channel lining

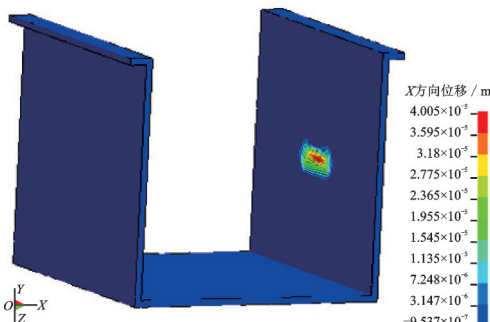


图 14 明渠衬砌 X 方向最大位移云图

Fig. 14 Cloud diagram of maximum displacement in X direction of open channel lining

由图 13, 14 可知,明渠衬砌所受最大撞击应力在 0.0079967 s 时达到峰值,为 5.80×10^6 Pa,此时 X 方向最大位移也达到峰值,为 4.005×10^{-5} m。同理可知,混凝土为 C30, C40, C50 工况下的最大等效应力分别为 4.12×10^6 , 3.86×10^6 , 3.12×10^6 Pa,可知明渠衬砌的最大等效应力随着混凝土强度等级的增大而减小,两者呈现出近似的线性关系;对应 X 方向最大位移分别为 2.893×10^{-5} , 2.241×10^{-5} , 1.526×10^{-5} m,可知明渠衬砌 X 方向最大位移随着混凝土强度等级的增大而减小,两者呈现出近似的线性关系。不同混凝土抗压强度工况下明渠衬砌等效应力时程曲线与 X 方向位移时程曲线如图 15, 16 所示。

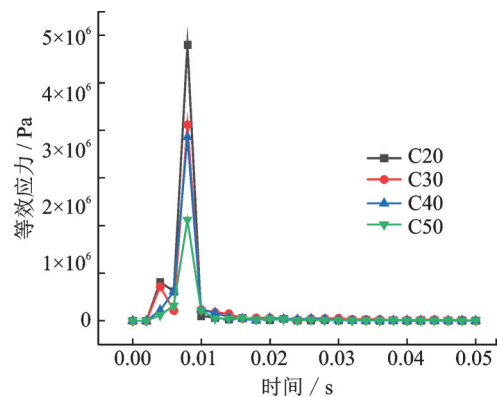


图 15 不同混凝土抗压强度工况下明渠衬砌最大等效应力时程曲线

Fig. 15 Maximum equivalent stress time course curves of open lined-drains under different concrete compressive strength conditions

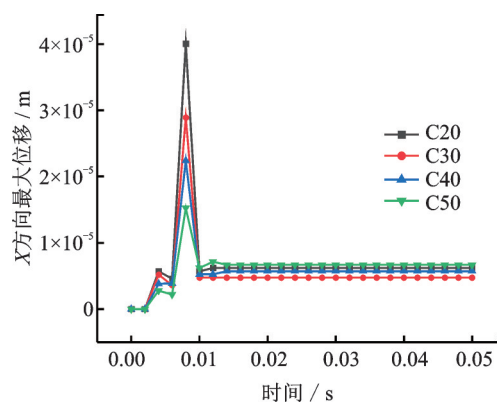


图 16 不同混凝土抗压强度工况下明渠衬砌 X 方向位移时程曲线

Fig. 16 X-direction displacement curves of open-lined drains under different concrete compressive strength conditions

由图 15 可以看出,不同混凝土抗压强度工况下明渠衬砌最大撞击等效应力时程曲线轨迹大致相同,均在同一时刻出现最大值,且最大等效应力随着混凝土强度等级的增大而减小,说明混凝土强度等

级越高,其抵抗流冰撞击力的能力越强。由图 16 可知,不同混凝土抗压强度工况下明渠衬砌 X 方向最大位移在同一时刻出现峰值,且峰值随混凝土抗压强度等级的增大而逐渐减小,说明混凝土强度等级越高,其抵抗流冰撞击作用的能力越强;从图 16 还可以看出,流冰均使四种不同强度明渠衬砌出现了一定的损伤变形,C20,C30,C40 和 C50 混凝土强度下的损伤变形分别为: 6.2×10^{-6} , 4.8×10^{-6} , 5.7×10^{-6} 和 6.7×10^{-6} m,损伤变形变化不明显。

3 模型试验验证

3.1 试验装置

室内试验模型与实际模型的几何比尺为 1:10,在模型试验中,水箱代替明渠模型,明渠衬砌采用混凝土板,流冰由动力装置牵引撞击明渠衬砌,材料的密度比尺为 1.0,加速度比尺为 1.0,在常重力场条件下进行试验。其碰撞测试试验台与动力及数据采集分析系统如图 17 所示。

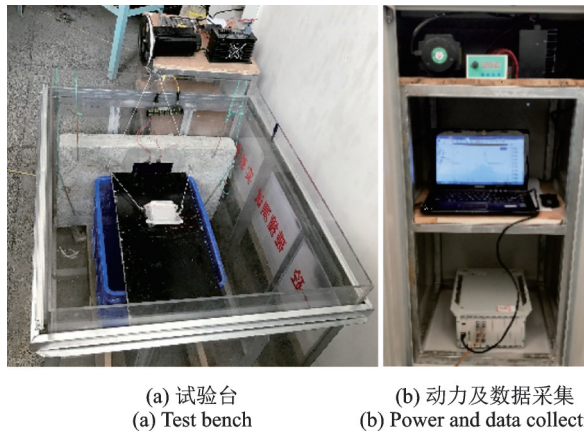


图 17 碰撞测试试验台及动力数据采集分析系统

Fig. 17 Crash test bench and data acquisition and analysis system

3.2 试验步骤

制备长宽高为 1 m×0.12 m×1 m 的混凝土明渠模型,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和撞击面积;连接电脑与动态应变测试分析系统;利用导线将应变片与动态应变测试分析系统采用半桥桥接方式连接;启动计算机,在软件上设置好电压、混凝土弹性模量、泊松比等;将准备好的模型冰放入模型中,利用柔性连接将模型冰与牵引装置连接起来,启动电源,调节好脉冲发射器转速,随着模型冰碰撞明渠衬砌,读取明渠衬砌区域产生的动态应变,保存数据。图 18 为应变传

感器布置图及粘贴白纸及复写纸的撞击区域采集图。

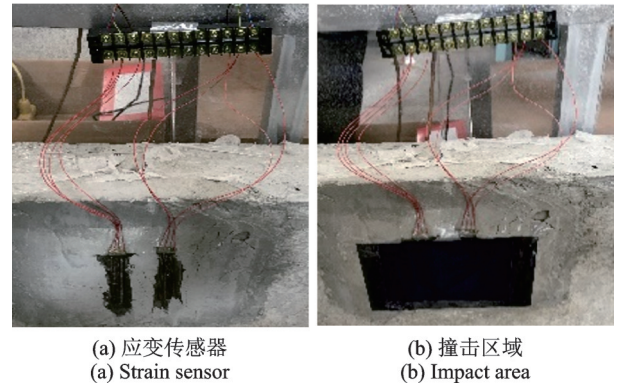


图 18 应变传感器布置图及撞击区域采集图

Fig. 18 Strain sensor layout diagram and impact area acquisition diagram

3.3 试验与模拟结果对比分析

根据 3.2 节实验步骤,将准备好的 1 块尺寸规格同为 10 cm×10 cm×4 cm 的模型冰放入模型中,设置流冰与明渠碰撞角度为 90°,明渠衬砌混凝土等级为 C25。并对模拟速度为 3.0 m/s 进行试验碰撞结果分析验证,根据表 1 撞击速度比尺计算可知,试验流冰速度为 0.949 m/s。图 19,20 分别为流冰速度为 0.949 m/s 时明渠衬砌应变时程图及撞击区域面积图。

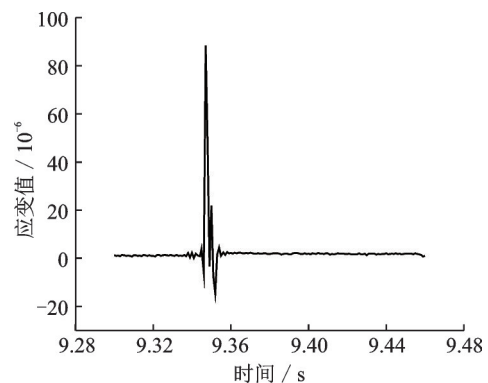


图 19 流速 0.949 m/s 时明渠衬砌应变时程图

Fig. 19 Time-history diagram of open channel lining strain at a flow rate of 0.949 m/s



图 20 撞击区域面积图

Fig. 20 Impact area map

由图19应变时程曲线可以看出,流冰速度为0.949 m/s时明渠衬砌应变峰值为 88.41×10^{-6} (应变值无量纲)。从图19还可以看出流冰碰撞过程包括荷载加载阶段、峰值阶段、荷载卸载阶段,是因为流冰与明渠碰撞角度为 90° ,属于正面碰撞,碰撞接触瞬间流冰被弹回,撞击结束。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

式中 F 为撞击力, kN; E 为弹性模量, MPa; ϵ 为应变; σ 为应力, MPa; A 为撞击面积, mm^2 。

由式(2)可知试验流冰撞击应力峰值 $\sigma_{\max} = E\epsilon = 2.8 \times 10^4 \times 88.41 \times 10^{-6} = 2.475 \text{ MPa}$ (其中 C25 混凝土的弹性模量为 $2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$), 与模拟得到的 2.332 MPa 的结果相对误差为 5.8%, 计算结果相近。在采集撞击区域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, 为了降低试验装置误差, 因此在计算撞击面积时只考虑碰撞接触区域。由图20计算出撞击面积为 229.47 mm^2 , 根据表1知撞击力的比尺为 λ_L^3 , 并通过公式(3)转换可得其最大撞击力为 $F_{\max} = \sigma A / \lambda_L^3 = 2.475 \times 229.47 \times 10^3 = 567.9 \text{ kN}$ (其中 λ_L 为 1:10)。图21为 LS-DYNA 软件模拟出的流冰速度为 3 m/s 时明渠衬砌撞击力时程曲线图。由时程曲线图可知其撞击力峰值为 538.2 kN, 与得到的试验计算结果相对误差为 5.2%, 说明数值模拟仿真模型的较为准确, 满足精度要求。从图21还可以看出试验撞击应力与撞击力峰值均大于模拟值, 这是因为试验忽略了水介质对流冰的影响, 而模拟考虑了冰-水耦合作用, 说明水垫效应对流冰的作用不可忽略。

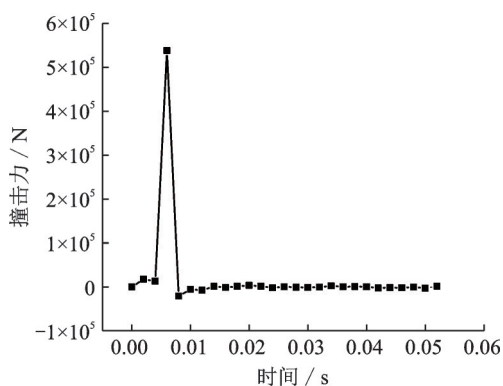


图21 流冰速度为3 m/s时明渠衬砌撞击力时程曲线图

Fig. 21 Time-history curve of impact force on open channel lining at a drift ice velocity of 3 m/s

4 结 论

本文考虑水介质的影响,通过流固耦合的计算

方法,运用LS-DYNA有限元分析软件进行了水介质中不同碰撞角度、不同流冰厚度、不同混凝土强度等级工况下流冰对输水明渠衬砌的碰撞仿真,并开展了相应的模型试验验证,得到了以下结论:

(1)在只改变碰撞角度工况下, 90° 工况下的明渠衬砌撞击区的最大等效应力与X方向最大位移分别是 38.66° , 45° , 63.43° 三种工况平均峰值的3.01倍和4.19倍,且正碰时明渠衬砌撞击区发生了约 $5.72 \times 10^{-6} \text{ m}$ 的损伤变形,而 38.66° , 45° , 63.43° 工况下的损伤变形约为 $0 \sim 4.78 \times 10^{-7} \text{ m}$,表明正面碰撞瞬间流冰对明渠衬砌的撞击作用较大,且对明渠衬砌损伤变形影响明显,倾斜的坡面可以有效减小流冰对明渠撞击区的撞击力、位移及损伤变形。因此,在高寒地区长距离输水明渠设计时应充分考虑其坡度的改变对流冰撞击的影响。

(2)在只改变流冰厚度工况下,明渠衬砌的最大等效应力与X方向最大位移随着流冰厚度的增大,两者呈现出近似的线性关系。因此,冰期输水需要考虑流冰厚度的变化对明渠衬砌的影响,减小流冰对明渠衬砌的碰撞破坏作用。

(3)在只改变明渠衬砌混凝土强度等级工况下,明渠衬砌的最大等效应力与X方向最大位移随着混凝土强度等级的增大而减小,两者呈现出近似的线性关系。表明混凝土强度等级越高,其抵抗流冰撞击作用的能力越强。因此,根据地区流冰灾害特点在工程设计时选取最优混凝土强度等级尤其重要。

(4)实际工程中,漂浮在水上的流冰其运动受多因素耦合影响,如水温、风速、流速、水流流态等;在模拟流冰碰撞明渠衬砌时,对于水介质中流冰平面尺寸、流冰压缩强度、流冰形状、多冰块干扰等问题,还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] Wu T, Qiu W. Dynamic analyses of pile-supported bridges including soil-structure interaction under stochastic ice loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128:105879.
- [3] 张于晔,潘睿阳,蒋冬启.车辆撞击作用下泡沫铝防撞桥墩的动态响应特性[J].振动工程学报,2021,34(1):89-98.
Zhang Y Y, Pan R Y, Jiang D Q. Dynamic response characteristics of the bridge piers with aluminum

- foam anti-collision devices under vehicle impact[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(1):89-98.
- [4] 贡力, 贾治元, 李义强, 等. 流冰对输水明渠混凝土衬砌的撞击影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21):163-172.
- Gong L, Jia Z Y, Li Y Q, et al. Impact of drift ice on concrete lining of open water conveyance channel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(21):163-172.
- [5] Li P H. Running safety evaluation of high-speed train subject to the impact of floating ice collision on bridge piers [J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2022, 236(3):220-233.
- [6] 于天来, 雷俊卿, 单思镝, 等. 春季河冰流凌对桥墩撞击作用计算模型的研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6):192-195.
- Yu T L, Lei J Q, Shan S D, et al. Calculation model of impact effect of river ice on piers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6):192-195.
- [7] Myher S A. Analysis of accidental iceberg impacts with membrane tank LNG carriers[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010:145-152.
- [8] 孙剑桥, 黄焱. 基于模型试验的船-冰碰撞载荷空间分布演变历程研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(5):16-23.
- Sun J Q, Huang Y. Evolution of spatial distribution of ship-ice collision load based on model tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(5):16-23.
- [9] Kim E, Storheim M, Amdahl J, et al. Laboratory experiments on shared-energy collisions between freshwater ice blocks and a floating steel structure[J]. *Ships & Offshore Structures*, 2017, 12(4):530-544.
- [10] Gagnon R E. Results of numerical simulations of growler impact tests[J]. *Cold Regions Science Technology*, 2007, 49(3):206-214.
- [11] 蔡伟, 朱凌, 毕璐泽. 船-冰碰撞下冰材料有限元数值方法研究进展[J]. *船舶力学*, 2021, 25(8):1116-1126.
- Cai W, Zhu L, Bi L Z. Review on development of finite element numerical method of ice material model under ship-ice collision[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(8):1116-1126.
- [12] 南明宇, 胡嘉骏, 汪雪良. 基于内外动力学耦合原理的船冰碰撞载荷特性研究[J]. *船舶力学*, 2020, 24(9):1167-1174.
- Nan M Y, Hu J J, Wang X L. Research on characteristics of ship-ice collision load based on coupling internal and external dynamics[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(9):1167-1174.
- [13] 赵新, 王旭, 张雅卓. 输水渠道冰盖增厚物理模型试验相似律研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(3):12-15.
- Zhao X, Wang X, Zhang Y Z. Research on similarity law of physical model experiments for ice cover thickening in the conveyance channel[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(3):12-15.
- [14] 贡力, 李雅娴, 靳春玲. 流冰对引水隧洞撞击作用力学特性数值分析与验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13):144-151.
- Gong L, Li Y X, Jin C L. Numerical simulation and verification on impact damage mechanical property of drift ice on diversion tunnel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(13):144-151.
- [15] 孟一, 易伟建. 混凝土圆柱体试件在低速冲击下动力效应的研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(3):205-210.
- Meng Y, Yi W J. Dynamic behavior of concrete cylinder specimens under low velocity impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(3):205-210.
- [16] 刘德良. 北极冰区船舶碎冰阻力数值仿真研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- Liu D L. Numerical simulation of crushed ice resistance of ship in arctic[J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [17] 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.
- Wu S J, Zong Q L, Zheng T G, et al. 3D simulation on water temperature change of diversion channel and optimal arrangement of multi-wells at high altitude and cold regions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(14):130-137.
- [18] 张宿峰. 流冰与桥墩的相互作用[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2014.
- Zhang S F. Ice and the interaction of bridge piers[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [19] 中华人民共和国水利部. 灌溉与排水工程设计标准: GB 50288—2018[S]. 北京:兵器工业出版社, 2018.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design standard for irrigation and drainage engineering: GB 50288—2018[S]. Beijing: Arms Industry Press, 2018.
- [20] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗冰冻设计规范: GB/T 50662—2011[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for design of hydraulic structures against ice and freezing action: GB/T 50662—2011[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2011.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specification for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [23] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for hydraulic concrete structures: SL 191—2008 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.

Analysis of the impact damage response of open channels by drift ice under coupled ice-water action

JIA Zhi-yuan, GONG Li, DANG Dan-dan, DONG Zhou-quan, YANG Teng-teng

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the impact of ice in the water medium on the open channel, based on the calculation method of fluid-structure coupling, the LS-DYNA software is used to perform a nonlinear finite element simulation of the impact process between the ice in the water medium and the open channel is 1:10 for model test verification. Taking the collision angle of drift ice and the open channel, the thickness of drift ice, and the strength grade of the concrete lining of the open channel as variables, the law of its influence on the collision of drift ice in the open channel is explored. The results show that the maximum equivalent stress and the maximum displacement in the X direction in the impact area of the open channel lining under the collision angle of 90° are respectively 3.01 and 4.19 times the average peak value of the 38.66° , 45° , and 63.43° working conditions. And under the collision angle of 90° , the damage and deformation of the open channel lining impact area is about 5.72×10^{-6} m, while the damage and deformation under the working conditions of 38.66° , 45° and 63.43° are about $0 \sim 4.78 \times 10^{-7}$ m, indicating that the inclined slope can effectively reduce the impact force, displacement and damage deformation of the ice on the open channel impact area; the maximum equivalent stress of the ice thickness on the open channel lining impact and the maximum displacement in the X direction show an approximate linear relationship; the ice on the open channel lining the maximum equivalent stress of the impact and the maximum displacement in the X direction gradually decrease with the increase of the concrete strength grade, and the two show an approximate linear relationship; the different working conditions simulated by the comprehensive analysis show that the water between the ice canals a high pressure field is generated in advance due to the squeezing effect of ice movement, which should be fully considered in the solution analysis and cannot be ignored. At the same time, the test value and the simulation value are basically consistent, indicating that the numerical simulation model is accurate and reliable.

Key words: ice-water coupling; drift ice impact; open channel; numerical simulation; model test

作者简介: 贾治元(1994—),男,硕士研究生。电话:19893179309;E-mail:1055302896@qq.com。

通讯作者: 贡力(1977—),男,博士,教授。电话:13519640338;E-mail:gongl@mail.lzjtu.cn。