

# 渠道潜冰底面水压力分布特性的数值模拟研究

宋小艳, 赵新, 刘博静

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 潜入冰盖底面的冰凌称为潜冰, 潜冰的停滞和堆积可能形成冰塞、冰坝等严重的冰情现象。潜冰的运动形式与其底面的水压力密切相关。本文采用 Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型, 对潜冰底面的压力分布进行了三维数值模拟研究。通过与 Larsen 的试验数据对比, 验证了该数值模型的可靠性与正确性。潜冰底面的水压力是前缘分流效应与文丘里效应共同作用的结果。模拟结果表明: 潜冰底面前缘效应与文丘里效应不仅与冰盖下平均流速  $V$ , 相对水深  $t/h$  密切相关, 而且随相对宽度  $b/B$  而变化: 文丘里效应与  $b/B$  呈正比, 前缘效应与  $b/B$  呈幂相关。通过对数值模拟结果进行分析, 得到了考虑潜冰宽度影响的潜冰底面文丘里效应压强和前缘效应压强的计算公式, 并在此基础上提出了潜冰底面水压力的估算公式。

**关键词:** 潜冰; 压力分布; 文丘里效应; 前缘效应

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0117-05

## Numerical simulation of distribution characteristics of water pressure at bottom of submerged ice blocks of channel

SONG Xiaoyan, ZHAO Xin, LIU Bojing

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The floating ice block which submerge under the ice cover are called submerged ice block. The stagnation and accumulation of the block might cause the hard ice situation phenomenons such as ice jam and ice dam. The movement of submerged ice block is closely related to the hydrodynamic forces of bottom. The Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model was applied to establish the 3-D numerical model for studying the pressure distribution at bottom of submerged ice block. The comparison between numerical simulation results and Larsen's physical model experimental results was conducted and they were in good agreement, which proved that the simulation results were reasonable and reliable. The pressure at the bottom was the combined effect of Venturi pressure and leading-edge effect. The simulation results showed that the Venturi pressure and leading-edge effect not only depend on the thickness-to-depth  $t/h$  ratio and the relative width  $b/B$  ratio, but also vary with the flow velocity  $V$  under the ice cover. The Venturi pressure is positively correlated with  $b/B$ , while the leading-edge effect is exponentially correlated with  $b/B$ . The equations of Venturi pressure and leading-edge effect which related to the width of submerged ice blocks are concluded after analyzing the numerical simulation. On the basis of the equations, the paper put up the pressure computational formula at bottom of submerged ice block.

**Key words:** submerged ice blocks; pressure distribution; Venturi effect; leading-edge effect

## 1 研究背景

渠道在冬季输水过程中, 冰凌停滞、堆积可能形成严重的冰塞、冰坝, 大幅减小输水流量, 雍高水位<sup>[1]</sup>。例如, 1958年永定河引水渠三家店拦河闸上

游调节池至龙泉务一段壅集了大量冰凌, 最长达 4 km, 最大堆积厚度达 6.37 m, 给引水带来极大困难<sup>[2]</sup>。

冰凌运动过程中遇到阻碍(如冰盖), 有可能在冰盖前缘发生下潜。冰塞、冰坝等严重冰情现象的

收稿日期: 2013-10-29; 修回日期: 2013-11-12

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCZDJC35100、13JCZDJC36200); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金(HESS-1308)

作者简介: 宋小艳(1989-), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要从事输水工程仿真与控制及冰水力学研究。

通讯作者: 赵新(1984-), 男, 辽宁开原人, 博士后, 主要从事输水工程仿真与控制及冰水力学研究。

产生都与潜冰的停滞堆积有关。潜冰的停滞、堆积取决于其周围的水流作用和它本身的特性<sup>[3]</sup>。因此,研究潜冰底面的压力分布对研究冰坝、冰塞的形成和发展具有重要的实际意义。

由于潜冰的运动与潜冰底面因水流运动产生的压强减小有重要关系,因此研究学者多采用潜冰底面的水压差分布来代表潜冰底面的水压力分布进行研究分析。对于压差分布的研究,人们通常采用物理实验和数值模拟的方法来研究。1991年,Barry Coutermarsh 和 W. Randy McGilvary<sup>[4]</sup>通过物理模型试验上安置传感器的方法测量了浮冰盖底面的压差分布,冰盖底面的压力顺水流方向由负压变为正压,呈马鞍形分布。2009年,Ambtman<sup>[5]</sup>也通过物理模型试验测量了浮冰盖底面的压力分布,他发现冰盖底面前缘效应突出,负压最大,顺水流方向前缘效应逐渐减小,最终稳定为文丘里效应压强。2013年,罗昉昕和赵新<sup>[6]</sup>对浮冰底面的压力分布进行了三维数值模拟,得到了冰块底面压力与冰块前缘形状、冰厚及流速的关系。目前关于冰期输水中冰的相关问题的数值模拟研究主要集中在冰的生成和运输,冰塞的形成和发展,以及潜冰对建筑物的撞击力上,对潜冰底面水压力分布的研究成果较少。

本文采用 Realizable  $k - \varepsilon$  紊流模型,建立数值模型,对潜冰底面水压力分布进行了三维数值模拟研究。对不同厚度  $t$ 、长度  $l$ 、宽度  $b$  的潜冰,在不同流速  $V$ 、不同水深  $h$  条件下的潜冰底面压差分布进行了数值模拟,通过与 Larsen 的试验数据对比,验证该数值模型的可靠性与正确性,并且进一步分析了潜冰底面压差分布与潜冰厚  $t$ 、水深  $h$ 、流速  $V$ 、宽度  $b$  之间的关系。通过对压差分布的研究,获得潜冰底面水压力的估算公式。

## 2 数值模型的建立

### 2.1 控制方程

在时均应变率特别大的情况下,标准的  $k - \varepsilon$  紊流模型可能会导致负的正压力的出现,有一定程度的失真。因此采用更符合湍流物理定律的 Realizable  $k - \varepsilon$  紊流模型:对正应力进行某种数学约束,湍动粘度系数  $C_\mu$  不再是常数,而应与应变率联系起来<sup>[7]</sup>。数值模型的水流控制方程包括连续方程、动量方程、紊动能  $k$  方程、紊动能耗散率  $\varepsilon$  方程及湍动粘度系数  $C_\mu$  方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \Delta^2 u_i \quad (2)$$

$k$  方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_r - \varepsilon \quad (3)$$

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{s1} \varepsilon E - C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

湍动粘度系数:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon} \quad (5)$$

式中:  $p_r$  为紊动能生成率,  $p_r = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ;  $\nu_t$

为粘性系数,  $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ;  $C_{s2} =$

$1.9$ ;  $C_{s1} = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5})$ ;  $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon}$ ;

$A_0 = 4.0$ ;  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $A_s = \sqrt{6} \phi$ ;  $\phi =$

$\frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$ ;  $W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ik}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}$ ;  $U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij}}$ 。

### 2.2 网格划分与计算条件

由于冰盖下的水流与空气没有接触,相当于封闭渠段的单相流,因此计算区域可简化为冰盖覆盖的水槽段,长  $x$  方向 5m,宽  $y$  方向 0.6 m,深  $z$  方向 0.3 m,见图 1。采用结构化正六面体网格,只对其中的水体及潜冰进行网格划分。每个网格单元的边长为 1 cm,又由于潜冰相对水体的体积较小,在潜冰处进行网格加密,每个网格单元的边长为 0.5 cm。边界条件设置如下:进口边界为速度进口,出口边界设置为自由出流,槽底、槽壁、冰盖为无滑移固体壁面。

同时,对于靠近壁面区域内的流动,  $Re$  数较低,湍流发展并不充分,流动方式几乎为层流,湍流的脉动影响不如分子粘性的影响大,因此,在近壁区采用壁面函数法<sup>[8]</sup>。壁面函数公式将壁面值同相邻控制体积的节点变量值联系起来。通过标准壁面函数法和 Realizable  $k - \varepsilon$  紊流模型配合,就可解决本文中模型的流动计算问题。

### 2.3 模型的验证

文献[9]通过物理模型试验获得了冰盖下流速沿水深的分布情况。以文献[9]试验为原型建立数值模型,将计算结果与试验数据进行对比,见图2,其中  $V$  为冰盖下平均流速,横坐标为流速与断面平均流速的比值,纵坐标为冰盖下位置与水深的比值。模拟值与理论值的相似度为 0.975,表明本文所建立的数值模拟方法的模拟结果是准确的、可信的。

## 3 潜冰底面压差分布规律

潜冰底面的压差是前缘分流效应和文丘里效应综合作用的结果<sup>[5-6]</sup>,见图3。水流流经潜冰时,在前缘产生了一定的加速和分离,使得潜冰前缘的压强减小到了一个最小值  $P_{\min}$ ,同时压差达到最大值,然而前缘效应只影响潜冰前缘的一部分。同时由于

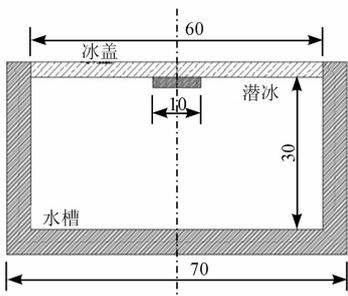


图 1 模型计算区域简图 ( $y-z$  平面)

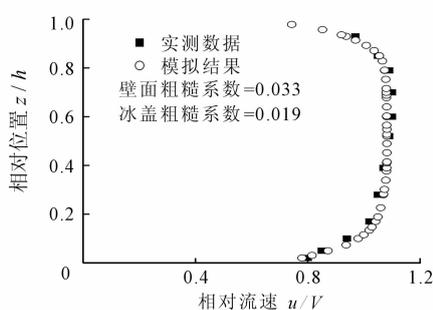


图 2 与文献[9]的流速分布比较

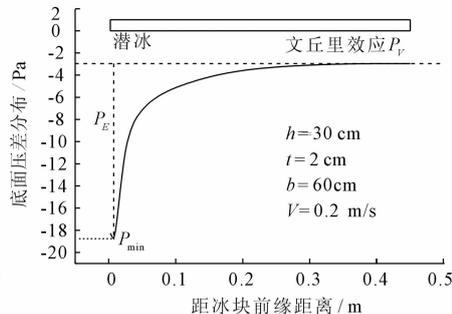


图 3 潜冰底面的压力分布图

由式(6)、(7)可得,文丘里效应和前缘效应的影响因素包括:冰盖下水流平均流速  $V$ , 相对水深  $t/h$ 。下面通过数值模拟的方法分析  $V$  及  $t/h$  对文丘里效应和前缘效应的影响。

### 3.1 流速 $V$ 对潜冰底面压差的影响

冰盖下水深恒定为  $h = 30 \text{ cm}$ , 潜冰厚度  $t = 2 \text{ cm}$ , 改变水流的平均速度  $V$ , 将文丘里效应及前缘效应的模拟值与理论值进行对比,见表1,其中模拟值与理论值的最大误差为 8%。

表 1 不同流速下文丘里效应与前缘效应模拟值与理论值  $\text{m/s, Pa, \%}$

速度 $V$	$t/h$	$P_V$	$P_V$ 理论值	$P_V$ 误差	$P_E$	$P_E$ 理论值	$P_E$ 误差
0.06		-0.25	-0.27	8.00	-1.36	-1.45	6.11
0.1		-0.79	-0.74	-7.23	-3.82	-4.02	4.83
0.2	0.067	-2.96	-2.96	-0.13	-15.80	-16.07	1.67
0.3		-6.21	-6.66	6.80	-33.28	-36.16	7.98
0.4		-11.31	-11.84	4.49	-60.74	-64.29	5.51
0.6		-27.09	-26.63	-1.71	-147.40	-144.64	-1.90

注:  $P_E$  理论值采用 Dow Ambtman<sup>[10]</sup> 提出的公式(7)进行计算。

潜冰厚度的原因,使得潜冰下的过水断面减小,平均流速增大,压强减小,形成文丘里压差  $P_V$ 。文丘里效应压差  $P_V$  可由伯努利方程得到:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho_w (V^2 - U^2) = \frac{1}{2} \rho_w V^2 [1 - (1 - t/h)^{-2}] \quad (6)$$

式中:  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V$  为冰盖下水流平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $U$  为潜冰下水的平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $h$  为冰盖下水深,  $\text{m}$ ;  $t$  为潜冰的厚度,  $\text{m}$ 。Dow Ambtman<sup>[10]</sup>

通过物理试验研究,得到  $P_{\min} = \frac{1}{2} \rho_w (V^2 - 1.7U^2)$ , 前缘效应压强为:

$$P_E = P_{\min} - P_V = -0.35 \rho_w U^2 = -0.35 \rho_w V^2 (1 - t/h)^{-2} \quad (7)$$

其底面文丘里效应压强绝对值  $|P_V|$  及前缘效应压强的绝对值  $|P_E|$  的变化,可以得到,随着流速  $V$  的增大,文丘里效应与前缘效应都变强,且  $|P_V|$  和  $|P_E|$  均与  $V$  呈正比例关系。

### 3.2 相对水深 $t/h$ 对潜冰底面压差的影响

冰盖下水流的平均速度恒定为  $V = 0.2 \text{ m/s}$ , 潜冰厚度  $t = 2 \text{ cm}$ , 改变冰盖下水深  $h$ , 将文丘里效应及前缘效应的模拟值与理论值进行对比,见表2,其中模拟值与理论值的误差在 8% 以内。

表 2 不同水深下文丘里效应与前缘效应模拟值与理论值  $\text{cm, Pa, \%}$

水深 $h$	$t/h$	$P_V$	$P_V$ 理论值	$P_V$ 误差	$P_E$	$P_E$ 理论值	$P_E$ 误差
20	0.100	-4.81	-4.69	-2.51	-17.20	-17.28	0.51
25	0.080	-3.50	-3.63	3.58	-16.59	-16.54	-0.30
30	0.067	-2.96	-2.96	-0.13	-15.80	-16.07	1.67
35	0.057	-2.31	-2.50	7.61	-15.46	-15.75	1.84
45	0.044	-1.76	-1.90	7.35	-15.41	-15.33	-0.52
55	0.036	-1.61	-1.54	-4.75	-14.97	-15.08	0.68
70	0.029	-1.15	-1.19	3.60	-14.75	-14.84	0.59

注:  $P_E$  理论值采用 Dow Ambtman<sup>[10]</sup> 提出的公式(7)进行计算。

图 4、5 为不同流速  $V$  条件下,对于相同的潜冰,

图6、图7为改变水深 $h$ 条件下,相同潜冰底面文丘里效应压强绝对值 $|P_V|$ 及前缘效应压强绝对值 $|P_E|$ 随 $t/h$ 的变化,可以得到,随着流速 $t/h$ 的增

大,文丘里效应和前缘效应都变强,具体来说, $|P_V|$ 与 $[(1-t/h)^{-2}-1]$ 呈正比, $|P_E|$ 与 $[(1-t/h)^{-2}]$ 呈正比。

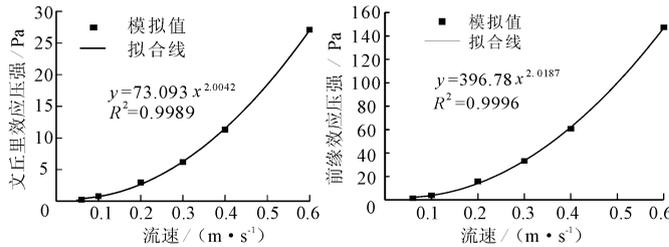


图4  $|P_V|$ 随 $V$ 的变化

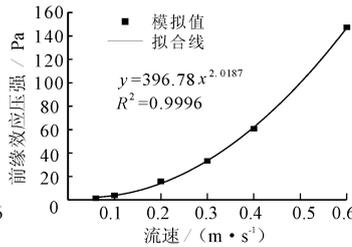


图5  $|P_E|$ 随 $V$ 的变化

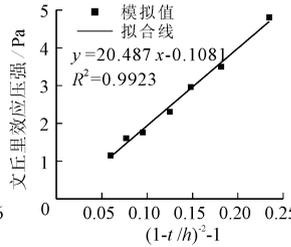


图6  $|P_V|$ 随 $(1-t/h)^{-2}-1$ 变化

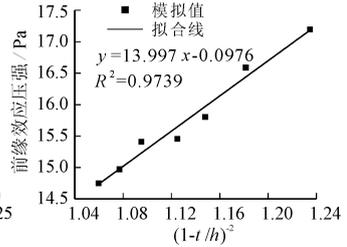


图7  $|P_E|$ 随 $(1-t/h)^{-2}$ 变化

由于潜冰的存在对水流具有分流作用,随着宽度的增加,潜冰的分流的作用愈加明显。因此有必要研究潜冰宽度 $b$ 对底面压差分布的影响。

### 3.3 宽度 $b$ 对潜冰底面压差的影响

水深恒定为 $h = 30$  cm,冰盖下水流平均流速 $V = 0.2$  m/s,对于不同宽度的潜冰,厚度恒定为 $t = 2$  cm。为排除干扰,模拟对象为足够长度的潜冰,不同宽度的模拟组合及模拟结果见图8。从图8中,可以得到对于不同宽度的潜冰,其宽度越大,文丘里效应

的压强值也越大,前缘效应的影响区域越大,前缘效应越强。为了定性的分析文丘里效应与前缘效应的变化,对结果进行无量纲化。采用潜冰的相对宽度 $(b/B)$ 与相对文丘里效应(文丘里效应模拟值与理论值之比) $P_V / \frac{1}{2}\rho_w(V^2 - U^2)$ ;潜冰的相对宽度 $(b/B)$ 与相对前缘效应(潜冰前缘效应模拟值与理论值之比) $P_E / (-0.35\rho_w U^2)$ 来描述其对应关系,结果如图9、图10所示。

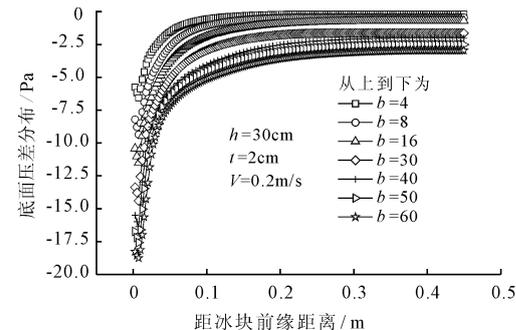


图8 底面压差随潜冰宽度的变化

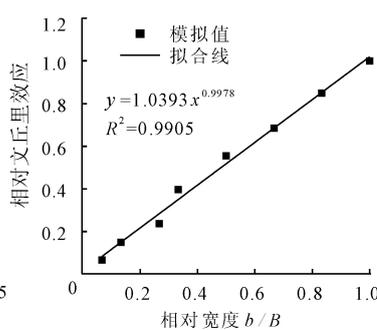


图9  $b/B$ 与相对文丘里的关系

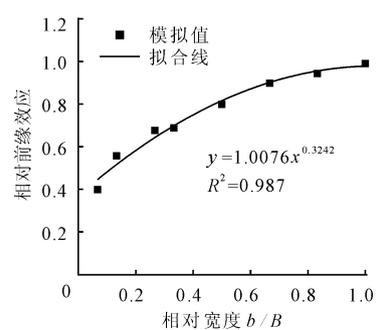


图10  $b/B$ 与相对前缘效应的关系

由图9可得,潜冰的相对宽度 $b/B$ 与文丘里效应的相对值 $P_V / \frac{1}{2}\rho_w(V^2 - U^2)$ 呈线性相关关系。根据上述的模拟分析结果可得,考虑潜冰宽度的变化,修正潜冰底面文丘里效应压强的计算公式为:

$$P_V = \frac{1}{2} \frac{b}{B} \rho_w (V^2 - U^2) \quad (8)$$

由图10可得,潜冰的相对宽度 $b/B$ 与相对前缘效应 $P_E / (-0.35\rho_w U^2)$ 呈幂函数关系。根据上述的模拟分析结果可得,考虑潜冰宽度的变化,修正潜冰底面前缘效应压强的计算公式为:

$$P_E = -0.35 (b/B)^{0.32} \rho_w U^2 \quad (9)$$

## 4 潜冰底面水压力估算公式

潜冰的运动形式与作用在其底面的水压力有密切关系。水压力形成机理较为复杂,难以进行简单而准确

的计算,为方便实际工程的应用,可以采用估算公式。

水压力 $F_L$ 主要包括文丘里压力和前缘效应压力。其中文丘里压力可以由修正的文丘里压强计算公式(8)获得,即:

$$F_V = \frac{1}{2} \rho_w \frac{b}{B} (V^2 - U^2) lb \quad (10)$$

前缘效应压力作用于潜冰的前部,随着潜冰长度的增加有所不同。对比Dow Ambtman在文献[10]中关于浮冰块底面压差分布的研究,选择 $x_{50}$ 衡量潜冰长度的影响, $x_{50}$ 是压差起始值与文丘里压强差值的一半所对应的距冰块前缘的距离,见图11。将前缘效应压差积分后近似简化为底面的均布力 $P'_E = \phi P_E$ ,按照积分近似的结果, $\phi$ 的取值为:当潜冰长度 $l < 0.5x_{50}$ , $\phi = 1$ ;当潜冰长度 $0.5x_{50} < l < 3x_{50}$ , $\phi = \frac{1}{2}$ ;当潜冰长度 $l > 3x_{50}$ , $\phi = \frac{1}{5}$ 。

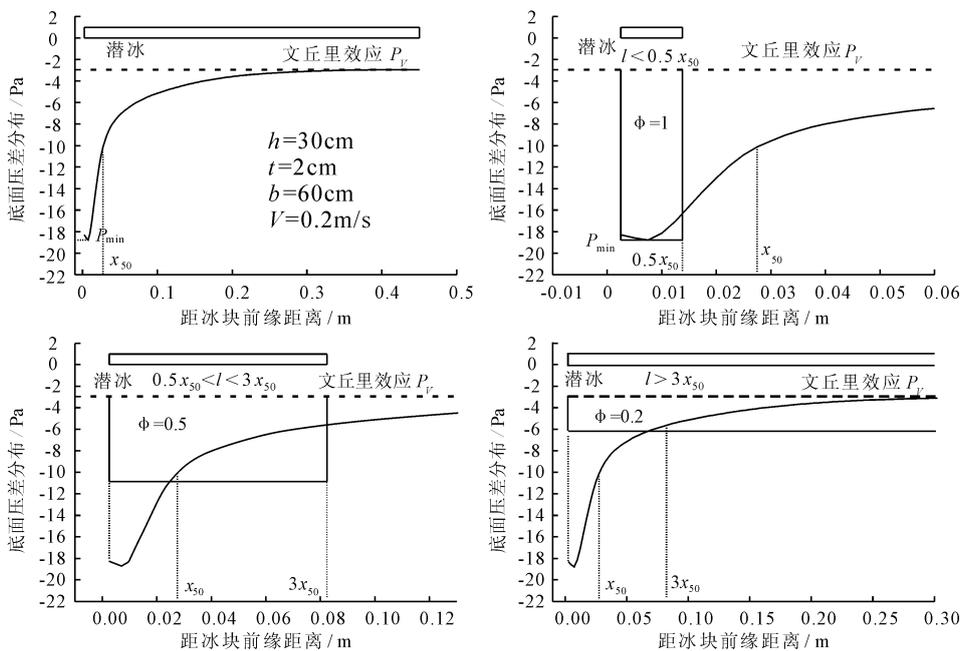


图 11 前缘效应中参数的取值

因此,由修正的前缘效应压强计算公式(9)可以估算前缘效应力为:

$$F_E = -0.35\phi\left(\frac{b}{B}\right)^{0.32}\rho_w U^2 bl \quad (11)$$

综合考虑公式(10)和公式(11),得到潜冰底面水压力估算公式为:

$$F_L = \frac{1}{2}\rho_w \frac{b}{B}(V^2 - U^2)lb - 0.35\phi\left(\frac{b}{B}\right)^{0.32}\rho_w U^2 bl \quad (12)$$

其中,负值代表方向垂直潜冰底面向下。

## 5 结 语

对潜冰底面压差分布的精准数值模拟表明,潜冰底面的水压力是前缘分流效应与文丘里效应共同作用的结果,与冰盖下流速  $V$ ,相对水深  $t/h$  和相对宽度  $b/B$  有密切关系, $V$ , $t/h$  和  $b/B$  增大时,文丘里效应和前缘效应都相应增强,并得到如下结论:

(1) 文丘里效应与  $V^2$ 、 $(1 - t/h)^{-2} - 1$ 、 $b/B$  呈正比,提出修正的潜冰底面文丘里效应压强计算,见公式(8)。

(2) 前缘效应与  $V^2$ 、 $(1 - t/h)^{-2}$  呈正比;与  $b/B$  呈幂相关,提出修正的潜冰底面前缘效应压强计算,见公式(9)。

(3) 潜冰底面的水压力采用文丘里压力(公式10)和前缘效应力(公式11)的叠加来估算,见公式(12)。

## 参考文献:

- [1] 练继建,罗昉昕,赵新. 渠道冰凌下潜的数值模拟研究[J]. 水利学报,2013,44(6):673-679.
- [2] 高霏生,靳国厚. 中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(2):159-164.
- [3] 王军. 冰盖前缘处冰块稳定性研究[J]. 人民黄河,1997,19(1):9-12+18.
- [4] Coutermarsh B, McGilvary W R. Pressure distribution of an overturning ice floe[C]//Proc. 6th Workshop on River Ice. Canadian Geophysical Union - Hydrology Section, 1991:143-163.
- [5] Ambtman K E D, Hicks F E, Steffler P M. Experimental investigation of the pressure distribution beneath a floating ice block[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,137(4):399-411.
- [6] 罗昉昕,赵新. 浮冰块底面水压力分布的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):10-14.
- [7] Sheh T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new  $k-\varepsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995,24(3):227-238.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004
- [9] Peter A Larsen. Head losses caused by an ice cover on open channels[M]. Boston Society of Civil Engineers, 1969.
- [10] Ambtman K E D, Hicks F E, Steffler P M. Experimental investigation of the pressure distribution beneath a floating ice block[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 137(4):399-411.