

弯曲冰块在顺直河段中的输移条件

茅泽育,袁婧,马壮,樊霖

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:针对弯曲冰块在顺直河段中的输移条件,以春季封冻河道的冰盖破裂机理为基础,根据水动力学、热力学、固体力学及气象水文等学科理论,综合考虑水力、热力、河势及地貌特征等影响因素,引入顺直河道固体边壁的约束条件,建立力学分析模型,进而提出了弯曲冰块在顺直河道中输移所需最小流量即临界流量的判别准则,并对其适用性及相关参数进行了研究分析。应用黄河河曲段的原型观测资料对该准则及相关参数进行了率定及验证,结果表明提出的针对弯曲冰块在顺直河段输移的临界流量计算值与实测值较为接近,可以认为该输移判别准则能够较好地用于判别弯曲冰块在顺直河段中的输移情况。此外,根据实测资料提出了反映热力消融对冰盖体厚度减小、强度降低等的综合系数表达式,可用于没有开河历史观测资料河道的冰情研究。

关键词:武开河;弯曲冰块;顺直河段;边界约束;冰盖破裂;演变机理

中图分类号:TV875

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)06-0018-04

Transport criterion for bending ice-blocks in straight river reaches//MAO Zeyu, YUAN Jing, MA Zhuang, FAN Lin
(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As for the transport criterion for bending ice-blocks in straight river reaches, based on the ice-cover fracture mechanism of frozen rivers in spring, a mechanical model is established by introducing the constraints of solid walls of straight rivers according to the theories of hydrodynamics, thermodynamics, solid mechanics and hydrometeorology by comprehensively considering hydraulic conditions, thermal conditions, river regimes and topographic features. The criterion of the minimum flow discharge required for transport of bending ice-blocks in straight river reaches is put forward, that is, the critical flow discharge. Its applicability and the relevant parameters are analyzed. The criterion and the relevant parameters are calibrated and validated by means of the data of field observations in Hequ reach of Yellow River. The results show that the calculated values of the critical flow discharge for the transport of bending ice-blocks in straight river reaches are close to the observed ones. Accordingly, the proposed criterion can be appropriately used to determine the transport of bending ice-blocks in straight river reaches. In addition, according to the observed data, a mathematical expression is put forward for the comprehensive coefficient, which reflects the decrease of thickness and strength of ice-covers induced by thermal thawing, and it can be employed to study ice situations of river reaches without historical observation data of break.

Key words: violent break; bending ice-block; straight river reach; boundary constraint; ice-cover fracture; evolution mechanism

研究春季武开河冰块输移条件,对于探明冰块输移规律,防止冰坝所导致的冰凌灾害具有重要意义。如图1所示,冰坝是大量流冰在河道内受阻,冰块上爬下插形成的冰凌阻水体。当冰坝由块大质坚的冰块上爬下插堆积而成时,将严重阻塞过水断面,导致上游水位显著壅高,引发凌汛。冰坝形成后持续时间较短,溃决时常伴随凌峰产生,其流量沿程递增,造成的危害较大^[1-9]。一般来说,冰坝多发生于春季河流解冻期,由低纬度向高纬度流动的河段上:

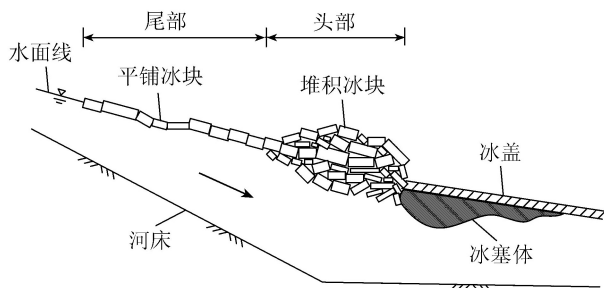


图1 冰坝示意图

其下游河段因纬度较高,故封冻早,解冻晚,冰盖厚,封冻历时长;上游河段因纬度较低,故封冻晚,解冻早,冰盖薄,封冻历时短。所以,当上游河段因气温升高,或因流量突然增大,水位上升,迫使冰盖破裂形成开河时,上游来水加上槽蓄水量,便携带破裂后的冰块向下游流动,此时下游河段往往还处于固封状态,阻止冰水下泄,因而极易形成冰坝。冰坝形成后,上游水位急剧上升,下游水位急剧下降。冰坝发展到一定规模,承受不了上游冰水压力,便突然溃决,以更多的水量和冰量、更快的速度向下游流动,而在下游的弯曲、狭窄及固封河段卡冰阻水,再次形成冰坝。冰坝溃决形成的凌峰流量,往往是沿程递增的。

冰坝的形成和溃决常造成冰凌灾害。冰坝是热力、动力、河道特征等多种影响因素综合作用的结果,其主要形成条件可归纳为:①上游河段有足够数量和强度的流冰块。②有输移大量冰块的水流条件,不流动或流动缓慢的冰是形不成冰坝的。一般地说,只要大江大河形成武开河,其流量、流速是具备此条件的。③有阻止流冰下泄的边界条件,如河道比降由陡突然变缓的河段、水库的回水区、河流的河口地区、河流的急弯狭窄段和有坚硬冰盖的冰塞河段等。

我国是一个冰情严重、冰坝灾害频繁的国家。至今,对封冻期冰凌形成机理、预报及防治措施的研究成果较多^[10],而对于春季武开河及冰坝的研究涉及较少。冰坝的形成不仅直接影响引水发电、给排水等水利工程,而且当河流中的冰坝严重阻塞河道时,往往将导致洪水泛滥成灾,给人民生命财产带来严重损失。春季开河对于河流防凌防汛至关重要,特别在武开河时,冰盖体破裂后形成的冰块尺寸大、强度高,在向下游输移过程中极易卡堵堆积,形成大型且持久的冰坝而造成严重冰害^[11-12]。

如上所述,武开河是主要由水力作用而导致的开河事件,武开河时河流上游往往具有较大径流量,有时还有槽蓄水体下泄,而此时气候仍保持相对寒冷,在热力作用促使冰盖厚度和强度显著减小之前,出现冰盖破裂。显然,冰块在河道中的持续输移对冰坝的形成与演变具有极大影响,对冰块输移与否的准确判断可为预防冰坝提供科学依据,提出适用的冰块输移条件,对实现有效防凌防汛具有非常重要的意义。

一般而言,河段可分相对顺直河段和弯曲河段。取决于各种因素,冰盖体断裂初始形成的冰块形状一般呈非规则状,其弯曲突出部位易于与岸壁或冰块之间碰撞而断裂。冰块形状可概化为相对顺直矩形状(或棱柱形)和曲线状(即非棱柱形,本文以下称之为弯曲冰块)两种^[12],因此,河道中的冰块运动可分为以下4种不同组合情况:顺直冰块通过顺直

河段、顺直冰块通过弯曲河段、弯曲冰块通过顺直河段、弯曲冰块通过弯曲河段。文献[12]针对弯曲冰块通过弯曲河段进行了研究,文献[13]针对顺直冰块通过顺直河段进行了研究,文献[14]针对顺直冰块通过弯曲河段进行了研究,本文针对弯曲冰块在顺直河段中的输移现象进行研究,提出相应的判别准则,并应用实测资料进行分析比较。

1 顺直河道中弯曲冰块的输移判别准则

文献[13-18]对武开河时的冰盖破裂机理进行了较为系统地研究分析。当春季气温变暖,融雪和降水使径流量增加,冰盖受水流的上举力作用而发生上挠变形,对于大多数河道,冰盖体首先在岸壁附近形成两条纵向冰缝,如图2所示。图2中 W_F 为稳封期河宽, W_i 为冰盖体宽度, L_s 为纵向冰缝到邻近岸壁的距离,可表示为^[16]

$$L_s = 18.447 h_{i0}^{0.75} \tag{1}$$

式中: h_{i0} 为冰盖体尚未发生热力消融时的厚度(即稳封期冰盖体的最大厚度)。随后,在水流剪切力的作用下,冰盖体将进一步出现横向冰缝,导致连续冰盖体最终断裂成冰块。横向冰缝间的断裂冰盖体长度 L_i 满足以下关系式^[17]:

$$L_i = \sqrt{\frac{\beta \sigma_i h_i W_i}{\tau}} \tag{2}$$

其中

$$\tau = \tau_i + \rho_i g h_i S_0$$

式中: β 为无量纲系数,变化范围为0.3~1.5; σ_i 为开河前夕冰盖体抗弯强度; h_i 为武开河前夕冰盖体厚度; τ 为作用于冰盖体上的全部切应力; τ_i 为作用于冰盖体底部的水流剪切力; ρ_i 为河冰密度, $\rho_i = 920 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度; S_0 为河床纵向平均坡度。

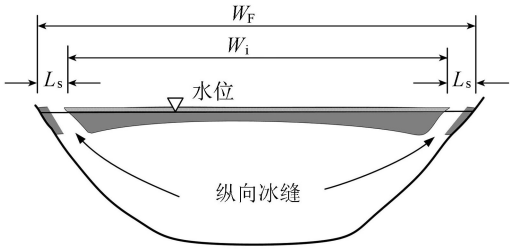


图2 纵向冰缝示意图

横向及纵向冰缝形成后,连续冰盖体断裂成具有一定尺寸及强度的冰块,在一定条件下(如水位上涨)将开始输移运动。然而,冰块在向下游输移的过程中可能受到河道边壁约束,出现卡堵堆积。只有当水面宽度随着流量增大、水位升高而加宽时,大型冰块才可能通过该河段继续向下游移动。

如图3所示,为简化问题,将弯曲型冰块概化为长 L_i 、宽 W_i 的圆弧形冰块体,其中心线曲率半径为

R 、中心角为 α 。随着上游流量增大,水位上升,水面宽度不断加大,直至满足式(3)时,该弯曲冰块将可能通过顺直河段:

$$W_B - W_i \geq \left(R - \frac{W_i}{2}\right) \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

式中: W_B 为水面宽度。由圆弧长度的计算公式,即

$$L_i = \alpha R \text{ 得 } \alpha = \frac{L_i}{R}, \text{ 若式(3)中 } \alpha \text{ 值较小, 则有}$$

$$1 - \cos \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha^2}{8} = \frac{L_i^2}{8R^2}。 \text{ 将式(2)代入式(3), 得}$$

$$W_B - W_i \geq \frac{(R_m - 0.5)\beta\sigma_i h_i}{8R_m^2 \tau} = \frac{(R_m - 0.5)\sigma_i h_i}{8R_m^2 (\tau_i + \rho_i g h_i S_0)} \quad (4)$$

式中: R_m 为无量纲曲率半径, $R_m = \frac{R}{W_i}$ 。

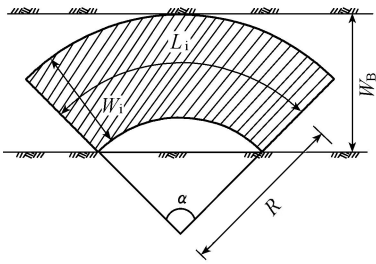


图3 岸壁边界约束示意图

实际情况下,开河前夕冰盖体厚度 h_i 、冰盖体抗弯强度 σ_i 通常未知或很难直接量测得到,但冰盖体尚未发生热力消融时(稳封末期)厚度 h_0 和抗弯强度 σ_0 则可通过测量或估计得到。为此,将式(4)改写为

$$W_B - W_i \geq \frac{(R_m - 0.5)\beta\xi\sigma_0 h_0}{8R_m^2 (\tau_i + \rho_i g h_i S_0)} \quad (5)$$

其中

$$\xi = \frac{\sigma_i h_i}{\sigma_0 h_0}$$

式中: σ_0 的取值范围为 $10 \sim 100 \text{ kPa}^{[17]}$; ξ 为系数,综合体现了热力消融导致冰盖体厚度减小及强度降低等因素的影响。式(5)反映了河道边壁对冰块移动的约束条件,本文称为顺直河道的边界约束条件。式(5)中 τ_i 可采用式(6)计算^[14]:

$$\tau_i = \frac{\rho g J_f}{1 + (n_b/n_i)^{3/2}} \left(\frac{2^{2/3} n_c Q}{W_B J_f^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (6)$$

式中: J_f 为水力坡度; Q 为流量; ρ 为水的密度; n_i, n_b 分别为冰盖底部及河床床面的曼宁粗糙系数; n_c 为综合曼宁系数,采用 Sabaneev 公式计算^[15],即

$$n_c = \left[\frac{1}{2} (n_i^{3/2} + n_b^{3/2}) \right]^{2/3} \quad (7)$$

将式(6)代入式(5)可得

$$Q \geq \left[\frac{(R_m - 0.5)\beta\xi\sigma_0 h_0}{8R_m^2 (W_B - W_i)} - \rho_i g h_i S_0 \right]^{5/3}。$$

$$\frac{2n_c^{3/2} W_B}{n_i^{5/2} (\rho g)^{5/3} J_f^{1/6}} \quad (8)$$

由式(8)可得弯曲冰块在顺直河道中输移所需的最小流量 Q_{cr} ,即临界流量为

$$Q_{cr} = \left[\frac{(R_m - 0.5)\beta\xi\sigma_0 h_0}{8R_m^2 (W_B - W_i)} - \rho_i g h_i S_0 \right]^{5/3} \cdot \frac{2n_c^{3/2} W_B}{n_i^{5/2} (\rho g)^{5/3} J_f^{1/6}} \quad (9)$$

因此,顺直河道中弯曲冰块的输移条件可表示为流量的形式,以方便工程实际应用:

$$Q \geq Q_{cr} \quad (10)$$

式(10)即为顺直河道中弯曲冰块的输移条件,即判别准则。该条件的建立是基于冰盖纵、横冰缝形成机理,反映了冰盖体破裂机理对武开河的影响,同时引入了河道边壁的约束即河宽,所以,该条件综合包括了热力气候、水力条件以及河道地貌特征等因素对冰块输移的影响。

从以上推导过程可以看出,该判别准则适用于武开河,也可用于发生冰盖体破裂及运动的半文半武开河,但不适用于文开河情形,因为文开河时冰盖体并未发生运动而是就地消融。

2 ξ 值的确定

为了应用式(10)对冰块输移进行判别,必须首先确定式(9)中的 ξ 值。将式(9)整理可得

$$\beta\sigma_0 \xi = \frac{8R_m^2 (W_B - W_i)}{(R_m - 0.5) h_0} \cdot \left[\frac{\rho g J_f}{1 + (n_b/n_i)^{3/2}} \left(\frac{2^{2/3} Q_{cr} n_c}{W_B J_f^{1/2}} \right)^{3/5} + \rho_i g h_i S_0 \right] \quad (11)$$

可以看出,精确计算 ξ 值需要有详细河道水文资料,而实际工程中这些资料往往很难获取。由于 ξ 反映的是热力消融对冰盖厚度减小及强度降低的影响,而这些影响可通过某一特定热力指数表示,本文采用累积日均热融度^[8] (accumulated thawing degree-days) $\sum t$ 作为热力指数,根据附近气象站的气温观测资料,以 -5°C 为气温的参照基准计算得到^[15]。

通过对黄河河曲段实测资料^[19] 的分析可以建立 ξ 与 $\sum t$ 的相关关系。如图4所示,黄河河曲段位于晋、陕、内蒙古三省区交界处的黄河中游,在北纬 $39^\circ \sim 40^\circ$ 、东经 $110^\circ \sim 112^\circ$ 之间,上自龙口峡谷,下至天桥水电站,全长 70 km。选取黄河河曲段为单一河段的 7 个断面,即英战滩、石窖卜、船湾、五花城、铺路、河会、曲峪、阳面等于 1985—1994 年春季开河期的 40 组原型观测数据,由式(11)可以分别计算得到其相应的 $\beta\sigma_0 \xi$ 值。

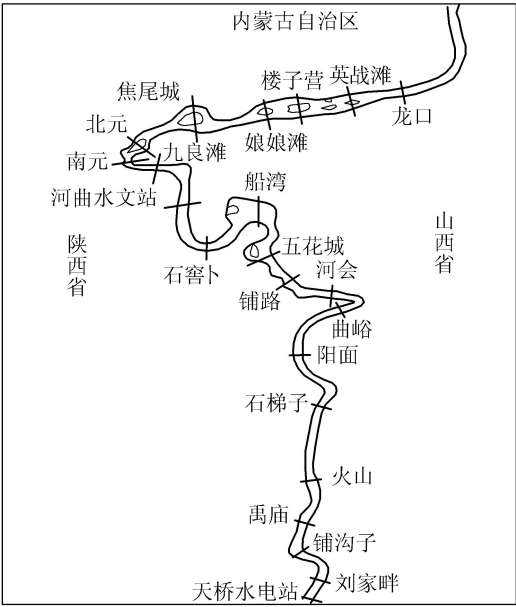


图4 黄河河曲段观测断面

以石窖卜1994年春季开河期的计算结果为例,石窖卜断面的河道及冰情观测资料为: $S_0=3.84\times 10^{-4}$, $h_i=0.50\text{ m}$, $h_{i0}=0.74\text{ m}$, $n_c=0.03$, $n_i=0.03$, $n_b=0.03$, $J_i=4.46\times 10^{-4}$, $W_B=253\text{ m}$, $W_F=200\text{ m}$, $W_i=W_F-2L_s=W_F-2\times 18.447\times h_{i0}^{0.75}=170.56\text{ m}$; $R_m=\frac{R}{W_i}=\frac{700\text{ m}}{170.56\text{ m}}=4.104$, $Q_{cr}=1720\text{ m}^3/\text{s}$ 。由式(11)可得 $\beta\sigma_{i0}\xi=46.87\text{ kPa}$ 。

对应于本文采用的量测资料,根据附近气象站的气温记录,以 -5°C 为基准参照气温计算得到 $\sum t$ 。如1994年石窖卜开河日期为3月25日,由河曲县的日平均气温记录资料可知,3月14日平均气温首次超过 -5°C ,其累积日均热融度的计算结果如表1所示。将表1中最后一列的累计日均热融度值累加,即为开河时的累积热融度 $\sum t=66.8^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。

表1 石窖卜1994年开河期累积日均热融度计算结果

日期	平均气温/ $^\circ\text{C}$	累计日均热融度/ $(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$	日期	平均气温/ $^\circ\text{C}$	累计日均热融度/ $(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$
3月14日	-4.3	0.7	3月20日	3.7	8.7
3月15日	-3.1	1.9	3月21日	2.3	7.3
3月16日	-3.3	1.7	3月22日	1.5	6.5
3月17日	2.0	7.0	3月23日	1.7	6.7
3月18日	2.7	7.7	3月24日	1.7	6.7
3月19日	2.9	7.9	3月25日	-1.0	4.0

令 $\varepsilon_0=\beta\sigma_{i0}\xi$,将上述7个断面共40组量测资料的计算结果绘于图5。由曲线拟合得到经验公式:

$$\varepsilon_0=67.998e^{-0.0057\sum t}\tag{12}$$

当 $\sum t=0$ (即冰盖体尚未发生热力消融)时 $h_i=h_0$, $\sigma_i=\sigma_{i0}$,所以此时 $\xi=1$,代入式(12)得

$$\beta\sigma_{i0}=67.998\tag{13}$$

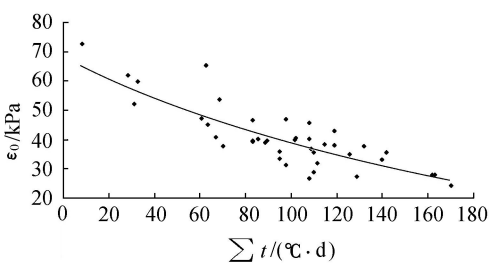


图5 ε_0 与 $\sum t$ 的关系

由此得到 ξ 的计算表达式:

$$\xi=e^{-0.0057\sum t}\tag{14}$$

对于没有以往开河期历史观测资料,但现场勘测结果表明开河期出现冰盖体断裂破碎及冰块运动现象的河段,实际应用时可采用式(14)近似确定 ξ 值。

3 输移判别准则验证

表2给出了黄河河曲段石梯子、河曲水文站两个断面1986—1993年间9组原型观测资料。根据式(14)计算 ξ 值,并对本文提出的顺直河道中弯曲冰块输移条件进行验证,计算结果如表3所示。

表2 原型观测资料

断面名称	年份	h_{i0}/m	h_i/m	W_B/m	W_F/m	$\sum t/(\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d})$	R_m
石梯子	1986	0.61	0.25	376	331	128.8	6.5
	1987	0.78	0.34	320	269	109.9	6.6
	1988	0.52	0.28	327	305	141.9	6.4
	1990	0.51	0.31	518	470	108.1	6.5
河曲水文站	1985	0.86	0.61	301	244	97.7	6.0
	1986	0.92	0.46	310	270	139.9	6.2
	1987	0.77	0.41	354	303	109.9	6.0
	1988	0.58	0.30	294	265	132.1	5.8
	1993	0.59	0.30	358	318	95.1	6.0

表3 临界流量 Q_{cr} 观测值与计算值的比较

断面名称	年份	ξ	$Q_{cr}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	
			观测值	计算值
石梯子	1986	0.480	737	647.6
	1987	0.534	786	728.3
	1988	0.445	996	866.9
	1989	0.540	715	728.4
河曲水文站	1985	0.573	678	721.5
	1986	0.450	860	833.7
	1987	0.534	728	877.9
	1988	0.471	921	881.4
	1993	0.582	1000	1086.2

显然,根据输移条件计算所得最小流量 Q_{cr} (临界流量)与原型观测结果吻合较好,平均相对误差为8.59%。 Q_{cr} 确定之后,便可根据河道的实时流量,由式(10)判断顺直河道中冰块的输移情况。

(下转第26页)

c. 模拟结果表明在持续降雨 1.5 d 左右边坡的稳定系数最小。当裂隙开裂较深时,边坡稳定系数降低到 1 以下,存在发生滑坡危险。但分析结果表明,滑坡的发生存在于边坡的表层土体。

d. 本文提出的边坡裂隙布置方法体现了边坡实际情况下裂隙的产生以及发展,相比以往坡体均布裂隙的布置方法更接近边坡裂隙的真实情况。

参考文献:

[1] 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,1999,10(3):1-7.
[2] 殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京:中国大地出版社,2007.
[3] 张先发,李明华,张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理,1995(3):102-106.
[4] 杨文东. 降雨型滑坡特征及其稳定稳定分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
[5] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
[6] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建

筑工业出版社,1997.
[7] 姚海林,郑少河,李文斌,等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(7):1034-1039.
[8] 姚海林,郑少河,陈守义,等. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(5):606-609.
[9] 陈铁林,邓刚,陈生水,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215.
[10] 李焕强,孙红月,孙新民,等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):589-594.
[11] 殷宗泽,徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(3):454-459.
[12] 阙云,胡昌斌,姚晓琴. 降雨入渗对裂隙性黏土边坡稳定性作用机理的分析[J]. 福州大学学报,2009,37(3):423-429.
[13] MEIN R G, LARSON C L. Modelling infiltration during a steady rain[J]. Water Resource Research, 1973, 9(2):384-393.

(收稿日期:2012-03-01 编辑:周红梅)

(上接第 21 页)

4 结 语

以冰盖破裂机理为基础,引入顺直河道边壁的约束条件,提出了以流量表示的、顺直河道中弯曲冰块的输移条件,并应用黄河河曲段的原型观测数据对该输移条件进行了验证,结果表明:河曲段顺直河道中,弯曲冰块输移所需的最小流量 Q_{cr} 的计算值与观测值差别不大。采用该输移条件可以达到判断冰块输移与否的目的。

参考文献:

[1] ASHTON G D. River and lake engineering [M]. Littleton, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1986.
[2] BELTAOS S. River ice jams [M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995.
[3] ZUFELT J E, ETTEMA R. Fully coupled model of ice-jam dynamics [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(1):24-41.
[4] 茅泽育,吴剑疆,张磊,等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展,2003,14(6):700-705.
[5] 茅泽育,许昕,王爱民,等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展,2008,19(2):214-223.
[6] SHE Y. Numerical and field studies of river ice jam dynamics [D]. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta, 2008.
[7] SHEN H T, GAO L, KOLERSKI T. Dynamics of ice jam

formation. [C]//Proc. of 19th IAHR Ice Symposium. Vancouver, Canada: [s. n.], 2008:317-326.
[8] BELTAOS S. River ice breakup [M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 2008.
[9] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62:3-13.
[10] 茅泽育,吴剑疆,余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报,2002(1):153-161.
[11] 张磊. 江河春季开河机理及冰坝形成和演变研究[D]. 北京:清华大学,2004.
[12] 赵雪峰. 开河期冰盖体断裂机理及开河判别准则研究[D]. 北京:清华大学,2008.
[13] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 武开河的边界约束判别准则[J]. 水利水电科技进展,2009,29(2):1-4.
[14] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 武开河的边壁阻力判别准则[J]. 冰川冻土,2008,30(3):508-513.
[15] 茅泽育,许昕,王爱民,等. 开河期冰坝预测方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):76-94.
[16] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 开河期冰盖纵向冰缝形成机理[J]. 水科学进展,2009,20(3):434-437.
[17] 茅泽育,赵雪峰,胡应均,等. 开河期冰盖横向冰缝形成机理[J]. 水科学进展,2009,20(4):572-577.
[18] 茅泽育,高亮,马壮,等. 春季河道武开河与文开河的判别准则初探[J],水利水电科技进展,2010,30(6):1-3.
[19] 山西省河曲县防汛抗旱指挥部. 黄河河曲冰塞观测资料汇编:四-1,四-2[R]. 河曲:山西省河曲县防汛抗旱指挥部,1995.

(收稿日期:2012-03-13 编辑:熊水斌)