

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.02.001

武开河的边界约束判别准则

茅泽育,赵雪峰,王爱民,刘颖,胡应均

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要 根据封冻河道春季冰盖破裂机理,采用弯曲河道边界约束概念,提出可用于预测武开河发生的判别准则,并对其适用性进行了论证。应用黄河河曲段 1985~1994 年的原型观测资料对该判别准则进行验证,结果表明该准则可以较好地用于河道武开河的判别。

关键词 武开河;河冰;判别准则;边界约束;冰盖破裂;冰坝

中图分类号:P343.6+3;TV875 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2009)02-0001-04

Boundary constraint criterion for onset of mechanical ice-cover breakup//MAO Ze-yu, ZHAO Xue-feng, WANG Ai-min, LIU Ying, HU Ying-jun(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : Based on the mechanism of ice-cover fractures in an ice-covered river, the criterion applied to predict the mechanical ice-cover breakup is presented using the concept of boundary constraints in channel bends. The applicability of this criterion is demonstrated. The prototype observation data from the Hequ Reach of the Yellow River from 1985 to 1994 are used to validate the criterion. The results show that the criterion can appropriately forecast the onset of ice-cover breakup.

Key words : mechanical ice-cover breakup ; river ice ; criterion ; boundary constraint ; ice fracture ; ice dam

迄今,国内外对封冻期冰塞形成机理、预报及防治措施的研究已趋于成熟和完善^[1-2]。然而,对春季开河冰坝的研究则涉及较少。冰坝形成及带来的灾害不仅直接影响到引水发电、给排水等水利工程,而且严重阻塞河道,导致洪水泛滥成灾,给人民生命财产带来严重损失^[3]。我国是一个冰情严重、冰坝灾害频繁的国家,研制普遍的开河预报模型,预测河道开河日期、方式、是否形成冰坝以及形成冰坝的严重性对于有效地防凌防汛至关重要。准确的开河预报可为冰坝的防治提供应急准备时间。

武开河是由水力作用而导致的开河事件,发生武开河时河流具有较大的径流量,此时气候仍维持寒冷,在热力作用促使冰盖厚度和强度显著减小之前,冰盖体出现破裂。破裂后形成的冰块往往尺寸较大、强度较高,因此在向下游输移的过程中容易卡堵堆积,形成大型且持久的冰坝,造成严重冰害。武开河包括冰盖初始破裂、冰块破碎、冰块运动、冰块输移、冰坝形成及演变,以及最终清冰等多个过程。至今缺少以冰盖破裂机理为基础的开河预报准则,现有的一些经验或半经验的开河预报准则^[4]由于没有充分考虑气候、水力及河道地貌条件

对开河的影响,只能适用于某一特定地点。

文献[4-5]对发生武开河时的冰盖破裂机理进行了分析。春季随着气温变暖,融雪和降水使径流量增加,冰盖受水流上举力作用发生上挠变形,对于大多数河道,冰盖体首先在岸壁附近形成 2 条纵向冰缝。如图 1 所示, W_F 为封冻期河宽, W_i 为冰盖体宽度, L_s 为纵缝与邻近岸壁距离。 L_s 可由式(1)确定^[5]:

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

式中 h_{i0} 为冰盖体尚未发生热力消融时的厚度,即封冻期冰盖体的最大厚度。

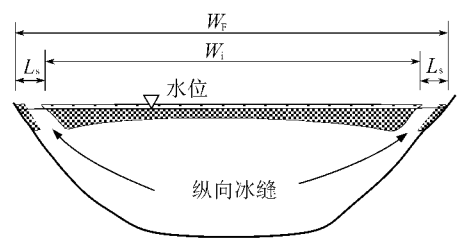


图 1 纵向冰缝示意图

在水流剪切力的作用下,弯曲河道中的冰盖体在纵向冰缝形成后将进一步形成横向冰缝,导致连

续冰盖体最终断裂,如图 2(a)所示。横缝冰缝间的断裂冰盖体长度 L_i 满足下列关系式^[6]:

$$\begin{cases} L_i = \sqrt{\frac{\beta \sigma_i h_i W_i}{\tau}} \\ \tau = \tau_i + s_i \rho g h_i S_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为无量纲系数,变化范围为 0.3 ~ 1.5; σ_i 为武开河前冰盖体的抗弯强度; h_i 为武开河前冰盖体厚度; τ 为作用于冰盖体上的全部切应力; τ_i 为作用于冰盖底部的水流切应力; s_i 为冰的密度, $s_i \approx 0.92$; ρ 为水的密度; S_0 为河床底坡。

纵、横冰缝出现后,在水流的作用下断裂冰盖体与岸壁碰撞或冰盖体相互间碰撞,进一步破碎成尺寸较大的冰块,如图 2(b)所示。然而,由于受弯曲河道形态的影响,冰盖体断裂并不足以引起冰块运动。这是因为较大尺寸的冰块在流向下游时受到河道边界约束,以至于不能移动较长的距离。只有随着流量和水位继续增加,水面宽度增加,大型冰块才能通过弯曲河道并出现持续移动,这标志着武开河初始发生。根据上述物理现象,以下推导武开河的边界约束判别准则。

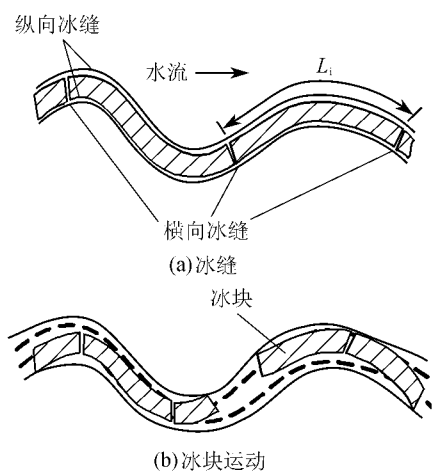


图 2 冰盖体断裂示意图

1 边界约束判别准则

如图 2(b)所示,断裂冰盖体的弯曲凸出部位易于与岸壁碰撞而破裂,破裂后形成的冰块形状相对顺直,因此分析时可概化为矩形,如图 3 所示。水面宽度增加直至满足式(3)时,长 L 、宽 W_i 的冰块将通过曲率半径为 R 的弯曲河段。

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

式中: W_B 为初始开河时的水面宽度, α 满足 $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L}{2R}$, $L = \varphi L_i$ ($0 < \varphi < 1$)。若式(3)中 α 值较小,则 $1 - \cos \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha^2}{8}$, $\sin \alpha \approx \alpha$, 因此 $\alpha = \frac{L}{R}$ 。式(3)可改写为

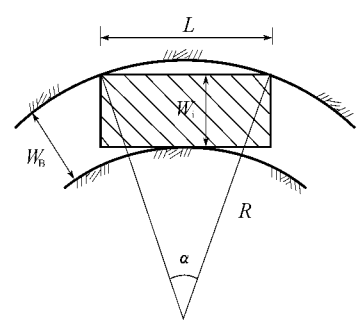


图 3 岩壁边界约束示意图

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

式中无量纲曲率半径 $R_m = R/W_i$ 反映了河道平面几何形状的影响。

开河前 h_i 和 σ_i 实际上通常未知,但 h_{i0} 和抗弯强度 σ_{i0} 则可通过测量或估计得到,为此将式(4)改写为

$$W_B - W_i \geq \frac{\beta' \xi \sigma_{i0} h_{i0}}{8 R_m (\tau_i + s_i \rho g h_i S_0)} \quad (5)$$

式中 $\beta' = \varphi^2 \beta$ ($0 < \beta' < 1.5$); σ_{i0} 的取值范围为 10 ~ 100 kPa^[5], 参数 $\xi = \sigma_i h_i / (\sigma_{i0} h_{i0})$ 综合体现了热力消融导致冰盖厚度减小及强度降低。式(5)反映了弯曲河道对冰块移动的边界约束条件。由式(5)可知,顺直河段 ($R_m \rightarrow \infty$) 将较早发生开河,弯曲河段则容易发生卡堵、形成冰坝,这与实际相符。

式(5)中 τ_i 可采用下式计算^[6]:

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

式中: J_f 为能坡; n_b 和 n_i 分别为河床及冰盖底部的曼宁系数; n_c 为综合曼宁系数,采用 Sabaneev 公式^[7]计算; Q 为流量。将式(6)代入式(5)整理后得到发生武开河所需的最小流量 Q_{cr} (开河临界流量)计算公式为

$$Q_{cr} = \left[\frac{\beta' \xi \sigma_{i0} h_{i0}}{8 R_m (W_B - W_i)} - s_i \rho g h_i S_0 \right]^{5/3} \frac{2 n_c^{3/2} W_B}{n_i^{5/2} (\rho g)^{5/3} J_f^{7/6}} \quad (7)$$

因而弯曲河道发生武开河的条件可表示为

$$Q \geq Q_{cr} \quad (8)$$

式(8)即为武开河的边界约束判别准则。在确定了 Q_{cr} 后,便可根据河道实际流量 Q ,利用式(8)判别河道是否发生武开河,达到开河预报的目的。从该准则的推导过程可以看出,它是基于冰盖纵向及横向冰缝形成机理而建立的,反映了冰盖破裂机理对开河的影响;同时,这一准则引入边界约束概念,用无量纲曲率半径反映河道地貌特征的影响。

所以,该准则包括了热力气候、水力条件以及河道地貌特征对开河的影响,是一个较为充分反映各种影响条件的武开河判别准则。

2 ξ 值确定

为了应用式(8)进行武开河判别,须确定 Q_{cr} 表达式中的 ξ 值。对式(7)整理得

$$\beta'\sigma_{i0}\xi = \frac{8R_m(W_B - W_i)}{h_{i0}} \cdot \left[\frac{\rho g J_f}{1 + \left(\frac{n_b}{n_i}\right)^{3/2}} \left(\frac{2^{2/3} Q_{cr} n_c}{W_B J_f^{1/2}} \right)^{3/5} + s_i \rho_i g h_i S_0 \right] \quad (9)$$

精确计算 ξ 需有详细的河道水文资料,但实际应用时往往很难获取。由于 ξ 反映的是热力消融导致冰盖厚度减小及强度降低的影响,这些影响可通过某一热力指数表示,本文采用累积日平均热融度 S (accumulated thawing degree-days) 表示^[7]。以下通过对黄河河曲段实测资料^[8]的分析建立 ξ 与 S 的关系。需要强调的是, S 仅为复杂的水力-气候相互作用的代表量,以方便工程实际应用^[9-10]。

黄河河曲段位于晋、陕、蒙 3 省交界处的黄河中游,上自龙口峡谷,下至天桥水电站,全长 70 km,如图 4 所示。选取英战滩、九良滩、河曲水文站(二)、石窑卜、船湾、铺路、阳面 7 个断面于 1985~1994 年

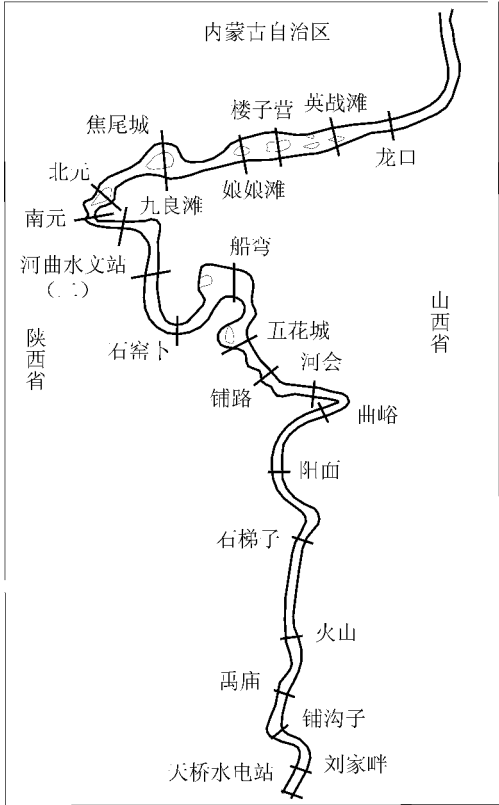


图 4 黄河河曲段观测断面示意图

春季开河期的 39 组原型观测资料,由式(9)分别计算得到相应的 $\beta'\sigma_{i0}\xi$ 值。因篇幅所限本文仅给出石窑卜河段 1994 年春季开河计算结果。河段及冰情观测资料: $S_0 = 3.843 \times 10^{-4}$, $h_i = 0.5$ m, $n_c = 0.03$, $n_i = 0.03$, $h_{i0} = 0.74$ m, $W_F = 200$ m, $R_m = R/W_i = 700/181.2 = 3.86$, $W_i = W_F - 2L_s = W_F - 2 \times 18.447 h_{i0}^{0.75} = 170.56$ m。由式(9)可得 $\beta'\sigma_{i0}\xi = 40.8$ kPa。根据附近气象站的气温记录,以 -5 $^{\circ}\text{C}$ 为基准参照气温计算得到 S_5 。

1994 年石窑卜的开河日期为 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 $^{\circ}\text{C}$,其累积日平均热融度的计算如表 1 所示。将表 1 中最后一列累加,即为开河时的累积热融度 $S_5 = 66.8$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

表 1 石窑卜 1994 年开河 S 计算结果

日期	平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	S / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$	日期	平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	S / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$
03-14	-4.3	0.7	03-20	3.7	8.7
03-15	-3.1	1.9	03-21	2.3	7.3
03-16	-3.3	1.7	03-22	1.5	6.5
03-17	2	7	03-23	1.7	6.7
03-18	2.7	7.7	03-24	1.7	6.7
03-19	2.9	7.9	03-25	-1	4

将测得的 39 组数据点绘成图,如图 5 所示。可以看出, $\beta'\sigma_{i0}\xi$ 随 S_5 的增加呈明显的减小趋势,进一步证实了边界约束判别准则反映了热力作用对开河的影响。根据曲线拟合可以得到以下经验公式:

$$\beta'\sigma_{i0}\xi = 61.024e^{-0.0051S_5} \quad (10)$$

若 $S_5 = 0$ (即冰盖体尚未发生消融), $h_i = h_0$ 且 $\sigma_i = \sigma_{i0}$ 此时 $\xi = 1$,代入式(10)得 $\beta'\sigma_{i0} = 61.024$,由此可得

$$\xi = e^{-0.0051S_5} \quad (11)$$

若没有武开河历史观测资料,实际应用时可采用式(11)近似确定 ξ 值。

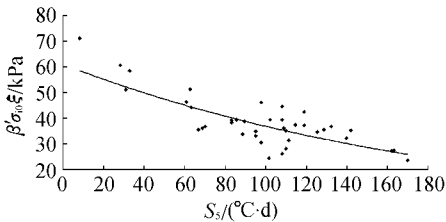


图 5 $\beta'\sigma_{i0}\xi$ 与 S_5 的关系

3 边界约束判别的验证

表 2 给出了黄河河曲段五花城、河会及曲峪 3 个断面的 10 组原型观测数据,采用式(11)计算 ξ 值,对笔者提出的弯曲河道武开河边界约束判别准则进行验证。计算结果如表 3 所示。

表 2 原型观测数据

断面	年份	h_{i0}/m	h_i/m	W_B/m	W_F/m	$S_S/(\text{℃}\cdot\text{d})$	R_m
五花城	1986	0.90	0.32	580	530	173.0	5.2
	1987	0.73	0.41	493	400	93.5	5.2
	1990	0.65	0.343	440	370	100.6	5.2
河 会	1987	0.95	0.82	248	170	83.0	5.0
	1992	0.72	0.34	241	181	139.1	5.0
	1993	0.90	0.59	260	200	102.1	5.0
	1994	0.53	0.50	260	213	62.8	5.0
曲 峪	1987	0.75	0.50	300	210	68.6	5.5
	1988	0.50	0.25	273	200	88.6	5.5
	1990	0.68	0.40	310	252	100.6	5.5

表 3 Q_{cr} 观测值与计算值的对比

断面	年份	ξ	$Q_{cr}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	
			观测值	计算值
五花城	1986	0.414	2 100	1 821.1
	1987	0.621	723	845.5
	1990	0.599	920	1 002.4
河 会	1987	0.655	723	789.8
	1992	0.492	620	609.9
	1993	0.594	1 280	1 137.3
	1995	0.726	1 520	1 101.8
曲 峪	1987	0.705	682	603.8
	1988	0.636	446	414.4
	1990	0.599	920	868.2

可以看出,根据计算得到的 Q_{cr} 与原型观测结果吻合较好,平均相对误差为 11.29%。其主要原因可能是由于综合考虑了水力、热力和河道地貌等影响因素,准则中涉及变量较多,其中 ξ 的确定采用了经验公式(11),给判别准则的计算精度带来一定的误差,这一点有待于应用更多的实测资料对参数进行率定。

4 结 语

笔者以冰盖破裂机理为基础,引入弯曲河道边

界约束概念,提出了弯曲河道武开河边界约束判别准则,并应用黄河河曲段原型观测数据对该准则进行了验证。研究结果表明, Q_{cr} 计算值与观测值较为接近,采用该判别准则可以达到开河预报的目的。从推导过程可知,该判别准则适用于武开河,也适合于冰盖体出现破裂及运动的半文半武开河,但不适用于文开河情形,因为发生文开河时冰盖体并未发生运动而是就地消融。

参考文献:

[1] 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.
[2] 茅泽育,张磊,王永填,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.
[3] 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,2003(51):153-161.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] BELTAOS S. Onset of river breakup[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25:183-196.
[8] 河曲县防汛抗旱指挥部.黄河河曲冰塞观测资料汇编[R].河曲:河曲县防汛抗旱指挥部,1993.
[9] ASHTON G D. River and lake engineering[M]. Colorado, USA: Water Resources Publications, Littleton, 1986.
[10] BELTAOS S. Threshold between mechanical and thermal breakup of river ice cover[J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37:1-13.

(收稿日期:2008-09-22 编辑:高建群)

·简讯·

2008 年我国风力发电装机容量再创新高

据《中国电力报》报道,截至2008年底,我国风力发电累计装机容量已达到1324万kW,较之2007年底的590万kW翻了一番多,比我国已投产的核电装机也多了不少,成为我国继火电、水电之后的第三大电源,对改善我国电源结构和环境保护有着积极意义。据统计,我国已有25个省、市、自治区有了风电装机,其中排在前5位的分别是内蒙古、辽宁、河北、吉林和黑龙江,它们的风电装机容量都在100万kW以上,风电装机总量已占全国风电装机总量的69.3%。我国近年来风电装机容量增长迅速(见表1),有专家预测到2010年我国累计风电装机容量将突破2000万kW。我国规划将在甘肃、内蒙古、河北、江苏等地建设装机容量超过1000万kW的风力发电基地,预期在2020年前后我国风电装机容量可能达到1亿kW,成为世界上风电装机容量最大的国家。

表 1 近几年我国风电装机容量增长情况

年份	累计装机容量/万 kW	逐年增长率/%	年份	累计装机容量/万 kW	逐年增长率/%	年份	累计装机容量/万 kW	逐年增长率/%
2003	56.7		2005	126.6	65.7	2007	590.3	127.1
2004	76.4	34.7	2006	259.9	105.5	2008	1 324.2	124.3

(吴 高供稿)