

冰盖下的输冰量计算分析

王 军, 郭力文, 赵慧敏, 李清刚

(合肥工业大学土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 冰塞或冰盖下输冰受热力、水力以及边界条件等影响, 计算河道在稳封期的冰流量对计算冰塞厚度及冰期水位具有重要的意义。根据对实验室试验数据的分析, 提出平衡输冰形式的回归公式。同时对比了黄河河曲段稳封期的实测资料, 结果显示这一计算输冰量公式的结构形式是合理的, 可为天然河道稳封期输冰流量计算提供参考。

关 键 词: 冰盖; 输冰量; 冰流量计算

中图分类号: P332.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2009)02-0293-05

我国北方河流冬季常出现凌汛灾害, 产生的原因是由于冰塞或冰坝的出现, 过流能力减弱, 上游水位升高, 从而诱发凌洪灾害。冰塞或冰盖下输冰是由热力、水力以及河流边界条件等共同作用的结果, 冰盖前缘的上游来冰量是导致后期形成灾害的重要基础^[1]。稳封期输冰流量的计算, 是冰情分析的基础^[2], 也是计算冰期水位的重要方面^[3]。因此, 确定一种简单且合理的平衡冰塞输冰量计算形式对整个冰塞形成过程的研究以及预报并避免凌洪灾害形成有着重要的意义。

河流由入冬到春末, 经历流凌、封冻、初始冰塞、平衡冰塞、开河及开河期冰塞等阶段。对于流凌期的面冰流量计算, 已有了较多的研究成果, 如 Beltaos 提出当流凌量超过局部输冰能力时, 就会发生充塞现象从而导致初封, 其面冰流量计算公式为^[4]

$$Q_i = N_i B V_s h_i (1 - p) \quad (1)$$

式中 N_i 为冰块的面浓度; B 为冰块可自由流动的水流宽度; V_s 为水面速度; h_i 为冰块厚度; p 为冰塞孔隙率。类似的研究还有 Nuttal^[5]、Calkins 等^[6]、Ackerman^[7]等。Urroz-Aguirre^[8]在 Ackerman 的研究基础上, 提出了面冰流量计算公式为

$$\frac{Q_i}{Q_w} = 2.4 \left(\frac{1}{\theta} \right)^{0.682} \left(\frac{h_i}{L} \right)^{1.181} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.845} \left(\frac{g B^5 S_0}{Q_w^2} \right)^{0.317} Q^{0.135} \quad (2)$$

式中 Q_i 、 Q_w 分别为冰和水的流量; θ 为梯形河槽边坡; L 为冰块直径; B 为渠底宽度; g 为重力加速度; S_0 为渠道坡度。

文献[9]基于试验研究, 提出了计算冰流量的公式, 文献[10]基于输冰和输沙的相似性, 借鉴轻质推移质计算公式, 认为 Bagnold^[11]和 Luque-Beek^[12]推移质公式可用于估算稳封期的输冰流量, 但冰(盖)塞下表面剪切力 τ_i 的确定相对较为困难, 因为冰盖或冰塞底面的糙率是随时间变化的^[13]。

1 平衡冰塞输冰量分析

冰塞达到平衡以前, 各断面的输冰量是不相同的, 也正是由于这种差异, 才产生了各断面冰塞的堆积演变, 最后达到平衡状态, 在冰塞形成堆积的过程中, 质量守恒方程可写为^[10]

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x} + (1 - p) B \frac{\partial D_i}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10372028)

作者简介: 王 军(1962-), 男, 安徽天长人, 教授, 主要从事河冰水力学研究。E-mail: Jun.wanghufut@126.com

式中 x 为沿水流方向的流程; t 为时间; p 为冰塞堆积体的孔隙率; $\bar{B}$ 为断面平均宽度, 对于矩形试验水槽则为槽宽; D_i 为冰塞厚度。

当形成平衡冰塞后, 各断面输冰量相等, 冰塞厚度维持不变, 从而有

$$\frac{\partial D_i}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0$$

Q 、 Q_i 、 Q_w 借鉴泥沙输运理论^[9], 依据实验室资料, 平衡冰塞输冰量计算应具有以下形式:

$$\frac{Q_i}{Q} = f\left(\frac{d}{h}, \frac{D_{ie}}{h}, \frac{U - U_{ic}}{U}\right) \quad (4)$$

式中 Q 为水的流量; d 为冰粒粒径; U_{ic} 是相应冰塞下冰粒起动时上游畅流段的水流平均速度; U 是上游畅流段的水流平均速度; D_{ie} 是平衡冰塞的厚度; D_{ie}/h 反映平衡冰塞厚度对河道的堵塞程度; d/h 反映冰粒相对于冰塞下水流深度的比尺和冰粒相对于水深的堵塞程度; $(U - U_{ic})/U$ 反映水流所具有的相对输冰能力。

2 质量守恒法计算稳封期天然河道的输冰流量

根据实验室得出的稳封期冰流量的计算公式形式, 依据黄河河曲段 1986 - 1994 年实测资料, 分析黄河河曲段的输冰量与水深和粒径、水流输冰能力的关系。

2.1 冰流量的计算

自黄河河曲段水文站断面向上游计算到龙口断面, 断面位置等可参见图 1。对黄河河曲段冬季输冰率即冰流量的计算依据质量守恒定律, 将式(3)写成:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x} + (1 - p) \frac{\partial A_i}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

式中 A_i 为冰塞的横断面面积; 对于冰塞的孔隙率 p , 计算时取 0.4。式(5)的差分格式如下^[14]:

$$\overline{Q_{i,k}^m} = \overline{Q_{i,k+1}^m} + \frac{(1 - p)\Delta x_k}{\Delta t_m} (\overline{A_{i,k}^m} - \overline{A_{i,k+1}^m}) \quad (6)$$

资料分析发现, 在断面 10 至 18 之间的冰储量几乎保持不变, 而且大大少于断面 10 上游的储冰量。故假定断面 10 的冰流量为零。

2.2 实测资料的整理及计算

冰流量计算的断面包括龙口、英战滩、楼子营、娘娘滩、焦尾城、北元、南元、九良滩及水文站等 9 个断面, 如图 1 所示, 冰流量计算过程中涉及的因素包括断面间的距离, 各断面冰盖横断面面积及冰花横断面面积, 时间步长(由于相隔 5 d 记录一次数据, 故时间步长为 5 d, 折合 432 000 s)等。依据式(6)可计算出稳封期各断面的冰流量。

3 天然河道输冰流量计算公式形式

已知由实验室得出的平衡冰塞输冰量计算形式如式(4)所示。天然实测资料表明, 河曲段水内冰粒径平均大约 1 cm, 因此冰粒粒径 d 取 1 cm, 亦或相当于中值粒径。 U 是用最上游龙口断面 7 年内相应天数的流量除以有效径流面积获得, U_{ic} 根据式(7)求得^[15]



图 1 黄河河曲段实测断面示意图

Fig. 1 Measured cross-section diagram of Hequ in the Yellow River

$$\frac{U_{ic}}{\sqrt{\frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma} g h_i}} = 2.022 \left(\frac{h}{h_i} \right)^{0.1168} \quad (7)$$

式中 γ 、 γ_i 分别为水和冰的容重; h 为冰塞下水深。

任意选取英站滩、焦尾城及南元 3 个断面 1987 - 1988 年、1990 - 1994 年 7 年中 D_{ic}/h 以及温度相似的天数, 观察 Q_i/Q 与 $(U - U_{ic})/U$ 之间的关系, 以 $(U - U_{ic})/U$ 为横坐标, Q_i/Q 为纵坐标绘制图 2。通过对图 2 的曲线总体趋势进行分析可以看出, Q_i/Q 是随着 $(U - U_{ic})/U$ 的增大而逐渐增大的。

同样选取英站滩、焦尾城及南元 3 个断面 1986 - 1988 年、1989 - 1994 年 9 年中 $(U - U_{ic})/U$ 以及温度相似的天数, 观察 Q_i/Q 与 D_{ic}/h 之间的关系, 以 D_{ic}/h 为横坐标, Q_i/Q 为纵坐标绘制图 3。通过对图 3 的曲线总体趋势进行分析可以看出, Q_i/Q 是随着 D_{ic}/h 的增大而逐渐减小的, 图 2、图 3 和文献[6]的实验室中结果定性趋势是一致的。

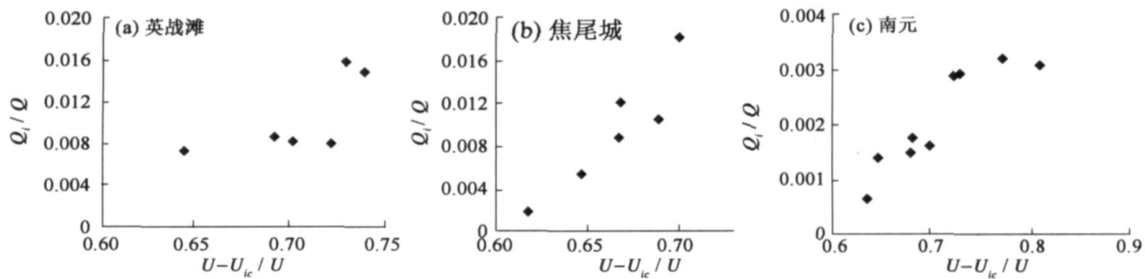


图 2 断面 Q_i/Q 与 $(U - U_{ic})/U$ 关系

Fig. 2 Relationship between Q_i/Q and $(U - U_{ic})/U$

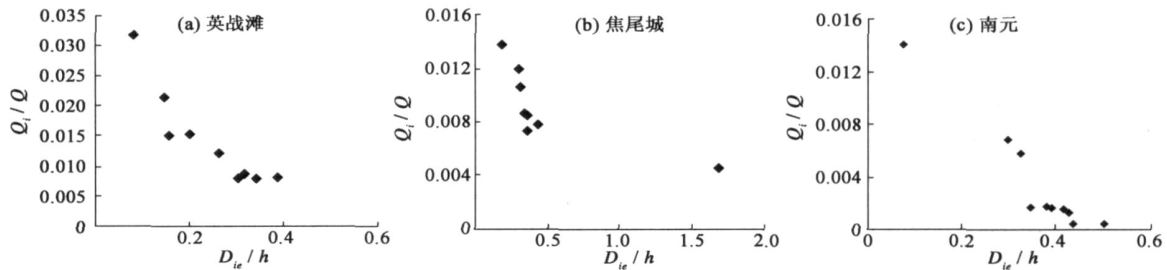


图 3 断面 Q_i/Q 与 D_{ic}/h 关系

Fig. 3 Relationship between Q_i/Q and D_{ic}/h

依据上述分析结果, 根据实验室中试验数据分析的计算形式, 依托实测资料, 运用 SPSS 软件进行回归分析, 将平衡冰塞输冰量计算公式定性为以下形式:

$$\lg \left(\frac{Q_i}{Q} \right) = \alpha \lg \left(\frac{d}{h} \right) + \beta \lg \left(\frac{D_{ic}}{h} \right) + \lambda \lg \left(\frac{U - U_{ic}}{U} \right) + T \quad (8)$$

式中 α 、 β 、 λ 、 T 为系数, 其他同式(4)。

由于各个断面形态和计算段河势的差异, 对各个断面的计算公式进行各自的回归分析, 得到各断面平衡冰塞输冰量计算公式如下:

龙口段

$$\frac{Q_i}{Q} = 0.709 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.326} \left(\frac{D_{ic}}{h} \right)^{-0.940} \left(\frac{U - U_{ic}}{U} \right)^{0.173}$$

英站滩段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.859 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{0.444} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.452} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.079}$
楼子营段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.801 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{0.412} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.469} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.564}$
娘娘滩段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.833 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{0.424} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.570} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.584}$
焦尾城段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.645 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{0.308} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.551} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.660}$
北元段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.505 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{0.246} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-1.485} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{1.180}$
南元段	$\frac{Q_i}{Q} = 3.100 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{2.810} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.883} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.059}$
九良滩段	$\frac{Q_i}{Q} = 1.350 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{2.110} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.025} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.830}$
水文站段	$\frac{Q_i}{Q} = 0.741 \left\{ \frac{d}{h} \right\}^{1.113} \left\{ \frac{D_{ic}}{h} \right\}^{-0.353} \left\{ \frac{U - U_{ic}}{U} \right\}^{0.825}$

4 结果对比分析

将运用质量守恒公式得到的各断面冰流量值与运用经验公式得到的各断面冰流量值进行对比, 图4是英站滩、焦尾城及南元3个断面冰流量值的对比图。由图4可看出, 点群的趋势和规律性还是比较明显的。但两者之间存在着离散误差, 原因是多方面的, 如原始的测试数据本身会存在误差; 对天然河道是否处于平衡输冰状态的判别也存在误差, 统计回归也不可避免的有误差等。

上述对比表明, 各段经验回归的公式可用以计算各断面的输冰流量, 虽然冰流量的计算采用质量守恒公式似更具理论性, 但需要全河段的资料, 如全河段的地形图、纵横断面图、河道中泓长度以及对横断面的概化处理等, 且确定是否处于平衡输冰阶段具有一定的经验和近似性, 需要由观测资料支撑判断。场所性的经验回归公式在实测资料要求方面具有更简单的灵活性, 通常只需要进行横断面的处理。所以, 虽然计算冰流量的式(4)形式起初是根据实验室资料提出的, 但根据上述分析, 无论实验室还是原型观测资料都表明式(4)是计算冰流量的合适形式。

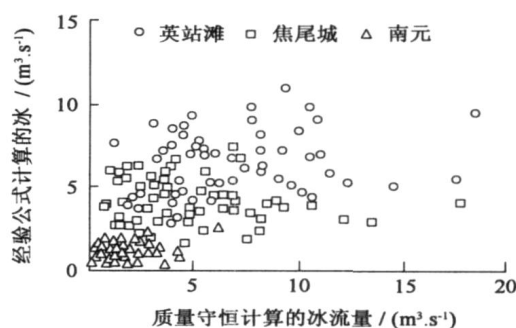


图4 冰流量计算值对比图

Fig. 4 Ice flow calculation value comparison chart

5 结 论

文献[9]通过实验室中所获得的数据进行分析计算, 借鉴泥沙输运理论, 得到稳封期平衡冰塞输冰流量的计算公式。运用统计软件对黄河河曲段的实测资料进行多元回归分析, 对比得出冰流量计算公式, 表明由实验室中所得出的稳封期冰流量计算公式应用于天然河段的可能性。通过黄河河曲段原型观测资料计算分析表明, 由实验室中试验资料分析得出的冰流量计算公式结构形式合理, 可应用于情况类似的天然河道的冰流量计算, 但需要确定场所性的相关系数。

参考文献:

- [1] PROWSE T D, BONSAI B R, DUGUAY C R, et al. River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46:443 - 451.
- [2] 高需生, 靳国厚, 吕斌秀. 南水北调中线工程输水冰情的初步分析[J]. *水利学报*, 2003(11):96 - 101. (GAO Pei-sheng, JIN Guo-hou, LU Bin-xiu. Preliminary study on ice regime in the Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(11):96 - 101. (in Chinese))
- [3] 王 军, 付 辉, 伊明昆, 等. 冰塞水位分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1):102 - 107. (WANG Jun, FU Hui, YIN Ming-kun, et al. Analysis of stages under ice-covered in winter[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1):102 - 107. (in Chinese))
- [4] SPYROS B. River Ice Jam[M]. LLC Colorado: Water-Resources Publications, 1995. 155 - 172.
- [5] NUTTALL J B. River modification and channel improvements[C] WICCIAMS G P. *Proceedings of the Seminar on Ice Jams in Canada*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1973.
- [6] CALKINS D J, ASHTON G D. Arching of model ice floes: effect of mixture variation on two block sizes[R]. Hanover: U S Army CRREL Report 76 - 42, 1976.
- [7] ACKERMAN N L, SHEN H T. Mechanics of ice jam formation in rivers[R]. CRREL Report 83 - 31, Hanover: U S Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1983.
- [8] URROZ-AGUIRRE G E. Studies of ice jams in river bends[D]. Iowa: The University of Iowa, 1988: 243.
- [9] 王 军. 平衡冰塞输冰的试验研究[J]. *水力发电学报*, 2002(1):61 - 67. (WANG Jun. A study on ice jam in balance transporting discharge[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2002(1):61 - 67. (in Chinese))
- [10] SHEN H T, WANG D S. Under cover transport and accumulation of frazil granules[J]. *Jour of Hydraulic Engrg, ASCE*, 1995, 120(2):184 - 194.
- [11] BAGNOLD R A. The flow of cohesionless grains in fluids[J]. *Phil Trans of Royal Society of London*, 1956, 249 (A):235 - 297.
- [12] LUQUE R F, BEEK R V. Erosion and transport of bed-load sediment[J]. *J Hydr Res*, 1976, 14(2):127 - 144.
- [13] SPYROS B. Progress in the study and management of river ice jams[J]. *Cold Regions Science and Technology* 2008, 51:2 - 19.
- [14] 汪德胜, 沈洪道, 孙肇初. 黄河河曲段输冰水力学机理分析[J]. *泥沙研究*, 1993, 4:1 - 10. (WANG De-sheng, SHEN Hong-dao, SUN Zhao-chu. Transport of frazil granules in hequ reach of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 1993, 4:1 - 10. (in Chinese))
- [15] 王 军, 孙连进. 冰塞下冰块起动分析[J]. *水利水运科学研究*, 1999(2):165 - 170. (WANG Jun, SUN Lian-jin. Stability of floes under ice jam[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1999(2):165 - 170. (in Chinese))

Analysis of the formula for ice discharge under ice cover^{*}

WANG Jun, GUO Li-wen, ZHAO Hui-min, LI Qing-gang

(Department of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Ice discharge under ice jam or ice cover is the result from the combined effects of the thermal, hydraulic and boundary conditions. Based on the analysis of the experimental data, the formula for calculating ice discharge is proposed. Meanwhile, compared with the data of stability freezing period from Hequ region in the Yellow River, the result shows that the proposed form of formula is rational and can offer reference to the calculation of ice discharge in the during freeze-up.

Key words: ice cover; ice discharge; formula of ice discharge

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10372028).