

Study on the Control Conditions of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project during the Ice Age

Chuanwei Bian

Hebei Branch of Construction Administration Bureau of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project, Shijiazhuang, Hebei, 050035, China

Abstract

Based on the analysis of the control conditions of the retrograde mode of ice cover and the control of ice diving, the paper gives the control factors of open channel glacial operation, and lays the foundation for the determination of open channel ice transport operation capacity.

Keywords

open channel; ice age operation; control conditions

南水北调中线工程冰期运行控制条件研究

边传伟

南水北调中线干线工程建设管理局河北分局, 中国·河北 石家庄 050035

摘要

论文在分析冰盖上溯推进模式控制条件和冰块下潜控制条件的基础上, 给出明渠冰期运行的控制因子, 为明渠冰期运行输水能力的确定奠定基础。

关键词

明渠; 冰期运行; 控制条件

1 引言

高纬度地区渠道在冬季运行过程中, 会出现结冰现象, 冰块聚集和堆积形成的冰盖、冰塞和冰坝会导致渠道阻力增加, 引起水位上涨, 严重时阻塞过水断面, 并可能引发冰凌洪水。由于冰盖具有一定的隔热效果, 冰盖的存在可以防止冰凌的不断生成, 因此, 冰盖下输水是高纬度地区渠道冰期输水的主要方式之一。为此, 论文以南水北调北拒马河节制闸前渠池为例, 分析了冰盖上溯推进模式的控制条件和冰块下潜的控制条件, 给出了明渠冰期运行的控制因子, 以期为明渠冰期运行提供技术支撑。

2 冰盖上溯控制条件分析

进入冰期, 渠道内首先产生流冰, 如果拦冰索前的水流条件不致引起流冰下潜, 那么流冰就会在拦冰索前堆积, 拦冰索前的渠道断面首先形成冰盖, 并由此逐渐向上游推进。影响冰

盖稳定的水力学因子有水流弗汝德数和冰盖前缘的水流流速。

2.1 水流弗汝德数

研究发现冰盖前缘水流弗汝德数的大小决定了上游来冰是否会在冰盖前缘下潜以及冰盖向上游的推进模式。当冰盖前缘水流弗汝德数小于第一临界弗汝德数时, 冰块不发生翻转、下潜, 冰盖以平铺上溯的模式发展(又称平封), 冰盖的厚度约等于冰块的厚度。沈洪道等通过对 Saint Lawrence 河和上游的现场观测建议第一临界弗汝德数为 0.05~0.06。当冰盖前缘的弗汝德数大于临界弗汝德数时, 单一冰块的并列推进将不可能维持。这时冰盖将以水力加厚的方式向前推进(又称立封)。这种冰盖推进方式下, 水流条件满足公式 1:

$$Fr = \left(1 - \frac{t_i}{H}\right) \left[2(1-e) \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho}\right) \frac{t_i}{H}\right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, Fr 为流弗汝德数; t_i 和 l_i 分别是浮冰块的厚度和长度; H 为冰盖前缘水深; g 是重力加速度; ρ 和 ρ_i 分

布式水和冰的密度； e 为浮冰的空隙率； $f\left(\frac{t_i}{l_i}\right)$ 是冰块的形状系数，取值在0.66~1.3之间。

沈洪道、孙肇初等学者经现场观测认为，第二临界佛汝德数为0.09左右^[1-2]。黄河的刘家峡、盐锅峡河段的原型观测结果也表明第二临界佛汝德数为0.09。引黄济青工程经过多年的运行实践，确定渠道冰期输水过程中水流的佛汝德数应小于0.08^[3]，京密引水工程^[4]将佛汝德数小于0.09作为渠道冰期运行的控制条件之一。可见，要实现冰盖下输水，在冰盖形成期内渠道水流的佛汝德数应小于0.08~0.09。出于安全考虑，刘之平等^[5]将完全下潜的第二临界佛汝德数取为0.08，即将渠道的初始水流佛汝德数小于0.08作为确定渠道在冰盖形成期的输水能力的控制指标。

水流佛汝德数大于第二临界佛汝德数时，顺流而下的冰花将会在冰盖前缘下潜，顺水流向下游输移，冰盖将停止向上游发展，这种情况下敞流段会源源不断的产生冰花，大量的冰花下潜到冰盖下面，容易诱发冰塞和冰坝等冰灾。

2.2 水流流速

Maclachlan 根据圣·劳伦斯河观测资料，认为冰块下潜的临界流速为0.69m/s，Estiveef和Teseaker在类似分析后，认为该临界流速在0.60m/s~0.69m/s范围内变化。

Sinotin 等根据试验研究，认为模拟冰块临界下潜条件为：

$$V_c = (0.035gL)^{1/2} \quad (2)$$

式中： L 为冰块长度。

Michel 则根据其实验结果，认为冰块下潜的临界流速

V_c 的表达式为：

$$V_c = k_0 \left[2g(\rho - \rho') \frac{t}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中： t 为冰块的厚度； ρ 为水的密度； ρ' 为冰的密度； k_0 为冰块的形状系数。

王军通过对试验数据进行回归分析，认为冰块下潜的临界流速由下式确定：

$$\frac{V_c}{\sqrt{gt}} = 0.1034 \left(\frac{t}{L} \right)^{-0.1129} \left(\frac{B}{L} \right)^{0.2597} \left(\frac{t}{h} \right)^{-0.4919} \quad (4)$$

式中： L 为冰块长度； B 为冰块宽度； t 为冰块厚度； h 为水深。

试验研究发现，冰凌在障碍物阻滞下是否下潜，与冰凌的运动速度具有直接关系，王军在其实验中也证实了这一点：

同一尺寸的冰块临界下潜时，水流所具有的平均流速对水深变化不敏感。冰块是否下潜取决于冰块的运动速度，即水流表面流速。因此，以水流表面流速作为冰凌下潜指标较为合适。

《水工建筑物抗冻设计规范》(SL211-98)里对冰期运行行内的流速作了相关规定，流速应控制在0.5~0.7m/s，不得大于0.7m/s。

1989~1991年连续两个冬季，中国北京市水利科学研究所对京密引水渠开展了冰期输水观测，发现当流速小于0.6m/s时，上游产生的薄冰片漂浮于水面，到达冰盖前缘或拦冰索处，不潜入水中，而停滞在冰盖前缘呈叠瓦状堆积，冰面堆积到一定的厚度后，逐渐向上游发展，并形成冰盖^[4]。中国北京市水利科学研究所分析原型观测的结果，认为在冰盖形成期渠道内的断面平均流速应控制在0.6m/s以下，以避免冰盖前缘冰花下潜并向下游输移而发生冰塞。《南水北调中线工程关键水力学问题研究》也将渠道内水流流速不超过0.6m/s作为冰盖形成期输水能力的控制指标之一。

分析式(2)和(3)可见，冰块下潜临界流速并不是定值，它与冰块的长度和厚度有关。王军对试验数据回归分析得到的计算公式本质上是冰厚佛汝德数，其值与冰块的长度、厚度、宽度和冰盖前缘的水深有关。因此，将水流流速作为冰盖稳定的控制因子存在一定的不确定性，当控制不当时，有可能引发冰塞。

以北拒马河节制闸前渠池为例，2015年~2016年冬季输水过程中，北拒马河节制闸的过闸流量约为30m³/s，闸前流速为0.44~0.53m/s，小于0.6m/s，其闸前水流佛汝德数在冰期输水过程中为0.08~0.09(见图1)，与国际文献中给出第二临界佛汝德数相同。2015年~2016年冬季冰期运行经验表明，在冰盖上溯过程中，有不少冰块从冰盖前缘下潜，并随水流运行至拦冰索，在拦冰索底部下潜进入拦污栅前渠段内。为了防止浮冰堵塞拦污栅，影响渠道的输水安全，需要人工打捞浮冰块，通常每3个小时打捞一次，每次耗时约1小时。在气温特别寒冷的时候，通常要一天24小时不断的打捞浮冰。

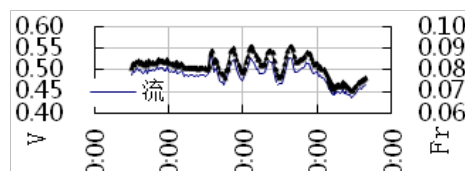


图1 北拒马河2015~2016年冰期输水期间闸前水流流速和流佛汝德数变化曲线

北拒马河节制闸前渠段冰期输水运行经验表明,渠道内水流流速并不能作为冰盖形成期渠道输水能力的主要控制指标,只能作为辅助控制指标,而第二临界弗汝德数的大小也需要通过深入分析才能确定。

3 冰块下潜控制因子分析

冰块在冰盖前缘的下潜方式与冰块的尺寸大小有关,当冰块厚度适中时(冰厚与冰块长度比值在0.1~0.8之间),冰块翻转下潜;当冰块的厚度与长度比值超过0.8或者小于0.1时,冰块垂直下潜。

为了分析冰块下潜的机理,Uzuner和Kennedy^[6]进行了大量试验研究,模型相对密度 S_i 从0.37到0.89,冰块厚度与

长度比值从0.096到0.773。其中 $S_i = \frac{\rho_i}{\rho_w}$ 为相对密度; ρ_i

为冰的密度; ρ_w 为水的密度。分析表明:冰凌下潜是由于冰块底部流速增大引起的伯努利效应,以及冰块对水流的分流作用,从而产生向下的力矩所致。当水流对冰块产生的向下力矩超过浮力力矩的最大值时,冰凌将以转动的方式下潜。当向下的吸力和浮力作用点几乎重合时,冰凌将发生垂直运动而下潜。

Ashton^[7]对Uzuner和Kennedy试验数据进行分析,认为冰凌下潜的临界条件与冰厚弗汝德数相关,冰凌下潜的冰厚弗汝德数满足如下关系:

$$F_t = \frac{V_c}{\sqrt{gt \cdot (1-s_i)}} = \frac{2 \cdot (1-t/H)}{\sqrt{5-3 \cdot (1-t/H)^2}} \quad (5)$$

式中: V_c 为冰块上游流速; H 为冰块上游水深; g 为重力加速度。

Ashton在分析冰块下潜时,忽略了冰块厚度与长度比值对冰块下潜的影响。练继建等^[8]为了考虑冰块厚度与长度比值的影响,给出了冰凌下潜的修正公式:

$$F_t = \frac{V_c}{\sqrt{gt \cdot (1-s_i)}} = k \frac{2 \cdot (1-t/H)}{\sqrt{5-3 \cdot (1-t/H)^2}} \quad (6)$$

其中, k 为修正系数。数值模拟和物理模型试验结果表明,修正系数在1.15~1.35之间,当冰块的前缘断面偏向矩形时,修正系数取小值。

冰凌下潜水流弗汝德数与冰厚有关,练继建等分析表明,当冰厚为0.1m时,结冰期冰凌下潜的水流弗汝德数约为0.04。

当水流条件超过冰凌下潜的临界条件时,冰盖将以水力加厚方式向上游推进。随着水流流速的增加,部分冰凌可随水流运动至拦冰索前。如果冰凌在拦冰索前不下潜,则冰盖是稳定的,渠道冰期输水不会出现冰凌灾害。如果冰凌在拦冰索前下潜并越过拦冰索,则渠道冰期输水将容易诱发冰凌灾害。因此,渠道冰期输水的控制指标除了水流条件外,对拦冰索的结构尺寸也应有一定的要求。

目前,对拦冰索的拦冰能力及冰凌下潜的临界指标研究尚未见报道。1978年,Stewart and Ashton^[9]开展了淹没孔口出流冰凌下潜的特性研究,分析表明,影响冰凌在淹没孔口下潜的主要因素包括基于出口水流流速的弗汝德数、出口顶部的淹没水深和出口深度与总深度的比值。Stewart and Ashton的研究对于冰凌在拦冰索附近的下潜具有重要的参考价值。因为当拦冰索被冰凌完全封住时,拦冰索附近的水流流态与淹没孔口附近的水流流态相似。当拦冰索部分堵塞时,部分水流从拦冰索孔隙间流过,与淹没孔口出流相比较,冰凌更不容易下潜。因此,借用淹没孔口出流的研究成果确定拦冰索的拦冰效果及分析冰凌下潜的临界指标,对于工程运行来说是偏于安全的。

Ashton^[10]对30年前的数据进行了深入分析,发现当使用上游流速和水深作为参变量时,研究成果具有更大的参考意义。设孔口或闸门的淹没水深为(水面到孔口顶部的距离),孔口的进口水深为,则冰凌是否下潜与的比值密切相关,当时,冰凌很容易下潜,并被水流携带进入孔口;当时,冰凌下潜的临界水流弗汝德数为

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}} = 0.28 \left(\frac{H_1}{H} \right)^{0.85} \quad (7)$$

式中, V 是水流流速。

当 $H_1/H > 0.33$ 时,应采用冰块弗汝德数 $Fb = \frac{V}{\sqrt{g \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho} \right) t_i}}$ 来判断,为了保证冰块不被输移,冰块弗汝德数应小于3.7。

从式(7)中可知,当 $H_1/H = 0.15$ 时,冰凌下潜的水流弗汝德数为0.056,与冰盖前缘附近冰凌下潜的第一临界弗汝德数一致。说明当淹没深度很小时,建筑物的表面或拦冰索对冰凌的阻挡作用有限,冰凌的下潜完全取决于水流条件。

北拒马河节制闸上游设计水深为3.8m,闸前设一道拦冰索,拦冰索水下深度约0.7~0.8m,根据式(7)计算得知,防

止冰凌在拦冰索处下潜的临界水流弗汝德数为 0.066~0.074。2015~2016 年度冰期运行过程中, 闸前水流弗汝德数为 0.08~0.09, 大于冰凌下潜的临界弗汝德数, 因此, 运行时发现有不少的流冰从拦冰索处下潜进入下游渠道, 影响了渠道的安全运行。2015~2016 年度北拒马河上游渠段冰期运行经验表明, 采用 Ashton 的判据确定拦冰索冰凌是否下潜是合理的。

4 结语

根据上述分析可知, 渠道在冰期输水过程中, 需要控制水流流速并采取适当的拦冰措施才能保证冰期的输水安全。具体指标如下:

(1) 在结冰期, 如果为了减小冰盖的糙率, 可降低水流流速, 使冰盖按照平铺上溯方式发展, 冰盖前缘的水流弗汝德数控制在 0.05~0.06 之间。

(2) 在冬季输水过程中, 如果希望增加渠道冰期的输水能力, 可适当增加水流流速, 使冰盖按照立封方式发展, 水流弗汝德数控制在 0.08~0.09 之间。为冰期运行安全起见, 水流临界弗汝德数可取 0.08。

(3) 为了保证冰盖的稳定, 需在倒虹吸、节制闸等建筑物前布设拦冰设施。拦冰设施在水下的高度与该部位的水流条件有关, 可利用 Ashton 经验公式计算确定。当拦冰索水下高度不足时, 需要减小输水流量, 以保障渠道冰期输水安全。

参考文献

[1] Shen, H.T., Ho, C.F. Two-dimensional Simulation of Ice Cover

Formation in a Large River [C], Proc. IAHR Ice Symp., Iowa City, 1986: 547-558.

[2] Sun, Z. C., Shen, H.T. A Field Investigation of Frazil Jam in Yellow River [C]. Proc. 5th Workshop on Hydr. Of River Ice/Ice Jams, Winnipeg, 1988: 157-175.

[3] 王大伟, 徐茂岭, 于浩等. 冬季冰盖下输水渠道的断面设计 [C]. 第二届全国水力学与水利信息学学术大会, 第二届全国水力学与水利信息学学术大会论文集, 2005:145-149.

[4] 李善增, 程天金, 李为民. 明渠冰盖输水观测研究 [C]. 第一届全国冰工程学术会议论文集, 山西, 1992.12:57-64.

[5] 刘之平, 吴一红, 陈文学等. 南水北调中线工程关键水力学问题研究. 中国水利水电出版社, 北京, 2010 年.

[6] Uzuner, M.S. and Kennedy, J.F. 1976. Theoretical model of river ice jams. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102(HY9), 1365-1383.

[7] Ashton, G.D. 1974. Froude criterion for ice-block stability. J. Glaciology, 13(68), 307-313.

[8] 练继建, 赵新. 南水北调中线工程典型渠段和建筑物冰期输水物理模型试验研究 [R]. 天津大学建筑工程学院, 2015 年 1 月.

[9] Stewart, D. and G. Ashton, 1978. Entrainment of ice floes into a submerged outlet, Proceedings IAHR Symposium on Ice Problem, Lulea, Sweden, Part 2, 291-299.

[10] Ashton, G. D., 2008. Ice entrainment through submerged gates. 19th IAHR international symposium on ice[C], Using new technology to understand water-ice interaction, Vancouver, British Columbia, Canada, July 6 to 11, 129-138.