

文章编号:0559-9350(2020)10-1248-08

冰盖条件下桥墩局部冲刷研究进展

王军¹, 苏奕垒¹, 侯智星¹, 程铁杰¹, 隋觉义²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. Environmental Engineering, University of Northern British Columbia, Prince George, Canada.)

摘要: 冬季, 寒冷地区的河流会出现冰盖或冰塞现象。冰盖的存在使水流湿周增加, 流速剖面与明流条件下完全不同, 最大流速出现在河床表面和冰盖底部之间, 具体位置取决于河床和冰盖的相对粗糙程度。因此, 冰盖条件下桥墩局部冲刷过程不同于明流条件下的局部冲刷过程。明流条件下的桥墩局部冲刷是国内外学者研究的热点问题之一, 但关于冰盖条件下桥墩局部冲刷的研究工作却非常有限。在简要回顾明流条件下桥墩局部冲刷研究成果的基础上, 对冰盖条件下桥墩局部冲刷的研究成果进行了综述和讨论, 并提出了今后的研究方向。

关键词: 冰盖; 冰塞; 局部冲刷; 桥墩; 试验研究

中图分类号: TV143

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200213

1 研究背景

冰盖或冰塞的出现, 改变了河流的边界条件、水流条件和河床泥沙的运动状态, 通过相同流量时, 冰塞上游水位显著增高, 冰塞河段上下游形成较大的水位差, 严重时会诱发凌洪灾害^[1-3]。2006年, 北美洲因冰塞导致的凌洪灾害造成的经济损失高达2.6亿美元^[4]。黄河宁蒙河段冰凌灾害发生频繁, 根据相关统计资料, 在1951—2010年间就有30年发生凌汛灾害, 给沿岸居民造成了巨大的损失^[5]。黑龙江流域局部河段几乎年年形成卡封, 每3年左右时间形成一次较大规模的冰坝^[6]。这些冰情所诱发的高水位和流量的变化可能导致严重的灾害或威胁, 相关学者们给予了广泛的研究和关注^[7-9]。

桥梁作为跨江、河、海的人工建筑物, 往往由于自然灾害、安全设计达不到要求以及后期防护不力等原因造成破坏。根据Imhof^[10]在全球范围内收集的大量数据显示, 在因自然灾害导致桥梁破坏的总体比例中约有60%是由洪水或冲刷原因造成的。Wardhana和Hadipriono^[11]研究了1989年至2000年间美国的503次桥梁毁坏, 其中与水流冲刷有关的事故高达243次。Kandasamy和Melville研究表明, 在Bola龙卷风期间发生破坏的10座桥梁中有6座与桥墩冲刷有关^[12]。2010年, 湖南省高速公路管理局对320余座桥梁进行水下检查, 检查结果表明: 大多数桥墩存在不同程度的冲刷现象, 威胁着桥梁结构和使用者的安全^[13]。

寒冷地区桥梁的建设与冰塞演变过程紧密相关。1987年4月纽约州高速公路上的斯科哈里溪大桥倒塌, 10人因事故丧生, 5辆车坠入河中, 事故的主要原因为桥墩基础被冰盖下水流冲刷导致破坏^[14]。密西西比河上Melvin Price船闸闸坝基础的上游有一非常大的冲刷坑, 在修复以后一年内就重新再现, 研究人员通过模型试验发现, 百年一遇的洪水冲刷并不会出现相应大的冲刷坑, 但是冰

收稿日期: 2020-04-02; 网络首发时间: 2020-09-09

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200904.1007.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508401); 国家自然科学基金项目(51879065); 合肥工业大学研究生质量工程项目(2018YKC02)

作者简介: 王军(1962-), 教授, 主要从事河冰水力学研究。E-mail: junwanghfut@126.com

盖下的小流量冲刷出现了相应最大的冲刷坑，从而影响了结构包括桥梁的安全^[15]。2011年4月，松花江下游富锦至绥滨段松花江公路大桥在凌汛期遭遇河道封冻的影响，致多处便桥、施工平台受损（黑龙江日报2011年4月21日）。由冰塞引发的灾害和工程事故早已引起国内外相关学者的高度关注，但有关冰期桥墩局部冲刷的问题研究还很匮乏。随着经济和社会的发展，北方寒冷地区的桥梁建设也越来越多，冰期桥墩附近局部冲刷问题的研究已不容忽视。

2 明流条件下桥墩附近局部冲刷的研究

2.1 相关规范推荐公式 《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30-2015)^[16]根据有关桥墩局部冲刷的实测资料，并参考国内外的试验数据，推荐在工程设计中采用65-1修正式和65-2式计算桥墩局部冲刷深度。

65-1修正式：

$$h_b = \begin{cases} K_\varepsilon K_{\eta_1} B_1^{0.6} (V - V'_0) \left(\frac{V - V'_0}{V_0 - V'_0} \right)^{n_1} & V > V_0 \\ K_\varepsilon K_{\eta_1} B_1^{0.6} (V - V'_0) & V \leq V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： h_b 为桥墩局部冲刷深度，m； K_ε 为墩型系数； B_1 为桥墩计算宽度，m； V 为一般冲刷后墩前行近流速，m/s； $V_0 = 0.0246 \left(\frac{h_p}{d} \right)^{0.14} \sqrt{332\bar{d} + \frac{10 + h_p}{\bar{d}^{0.72}}}$ 为河床泥沙起动流速，m/s，其中 \bar{d} 为河床泥沙平均粒径、 h_p 为一般冲刷后的最大水深； $V'_0 = 0.462 \left(\frac{\bar{d}}{B_1} \right)^{0.06} V_0$ 为墩前泥沙始冲流速，m/s； K_{η_1} 为河床颗粒影响系数； $n_1 = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25\bar{d}^{0.19}}$ 为指数。

65-2式：

$$h_b = \begin{cases} K_\varepsilon K_{\eta_2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right)^{n_2} & V > V_0 \\ K_\varepsilon K_{\eta_2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right) & V \leq V_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $K_{\eta_2} = \frac{0.0023}{\bar{d}^{2.2}} + 0.375\bar{d}^{-0.24}$ 为河床颗粒影响系数； $V_0 = 0.28(\bar{d} + 0.7)^{0.5}$ ； $V'_0 = 0.12(\bar{d} + 0.5)^{0.55}$ ； $n_2 = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25 + 0.19 \log(\bar{d})}$ 为指数。

美国公路桥梁设计规范(AASHTO LRFD)^[17]中所采用的是HEC-18中的CSU方程计算桥墩局部冲刷深度，即

$$h_b = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.65} Fr^{0.43} h \quad (3)$$

式中： h_b 为桥墩局部冲刷深度； h 为一般冲刷后桥墩上游水深； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别为墩型修正系数、水流攻角修正系数、河床条件修正系数和泥沙尺寸分布系数； b 为桥墩宽度； $Fr = V_1 / (gh)^{0.5}$ 为桥墩上游水流流动的弗劳德数，其中 V_1 为桥墩上游水流平均速度， g 为重力加速度。

祝志文^[18]对中美规范推荐的桥墩局部冲刷深度计算公式进行了对比分析，研究认为，中国规范

的冲刷计算公式在参数确定方面存在一定不足,在计算实际桥墩局部冲刷深度时,计算结果偏小,对于大型桥梁建设更需要重视模型试验以及现有资料的整合。Hong和Abid^[19]认为现有的美国联邦公路管理局推荐的局部冲刷深度计算方程对冲刷深度的预测过于保守,主要原因在于对试验条件的理想化和公式推导的简化。

2.2 复杂条件下桥墩局部冲刷研究 齐梅兰等^[20]通过水槽试验观测了床面突降条件下的溯源冲刷和墩柱局部冲刷耦合发展规律及其主要影响因素,建立了溯源与局部耦合冲刷的实时计算方法,运用该方法可预测溯源与局部耦合冲刷时结构物总冲刷深度的发展。喻鹏和祝志文^[21]利用雷诺时均N-S方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对双圆柱桥墩周围的复杂流场进行分析,说明了双圆柱桥墩局部冲刷的发展过程和冲刷机理。

Link^[22]研究了不同水流和泥沙条件对桥墩局部冲刷的影响,并对洪水期桥墩局部冲刷和泥沙淤积进行现场测量及模型计算,验证了超声波传感器用于桥墩局部冲刷监测的有效性。Yang^[23]对复杂桥墩清水冲刷进行了试验研究,研究了三种不同的桩基和水流夹角对桥墩局部冲刷的影响,确定了复杂桥墩冲刷发展的四个阶段,分别为起动阶段、停滞阶段、发展阶段和平衡阶段。赵嘉恒等^[24]通过试验研究结合理论分析的方法推导了弯道中斜交桥的局部冲刷计算结果。

明流条件下桥墩局部冲刷研究已经获得了许多有价值的研究成果,从单个桥墩局部最大冲刷深度计算公式的提出到桥墩局部冲刷计算公式的改进;从一般桥墩冲刷作用机理到考虑复杂组合桥墩效应等问题研究均取得了长足的进展,近年来因跨海桥梁建设的需要,许多学者加大了对波浪、潮汐等因素作用下的桥墩冲刷研究^[25-28]。

3 冰期桥墩局部冲刷问题的研究

寒冷地区桥梁的建设,改变了冰塞演变的原有条件,桥墩处形成的冰桥、冰盖和冰塞也会对桥墩附近的局部冲刷产生影响,从而导致桥墩局部冲刷的结果不同于明流条件,表现为最大冲刷深度和冲刷范围的变化。

王军^[29]基于水槽试验,对浮动冰盖下的散粒体泥沙起流速进行了研究,研究发现,相同水流条件下,冰盖下的河床泥沙更易起动;试验中,通过加糙改变模拟冰盖下表面的光滑程度,加糙后的模拟冰盖称为粗糙冰盖,相对未经加糙的冰盖称为光滑冰盖,研究表明,粗糙冰盖条件下泥沙相对于光滑盖条件更容易起动,反映了冰期河床的冲刷问题是不同于明流条件的。作为冰期桥墩局部冲刷的研究基础,Wang和Sui等^[30-34]对冰塞与桥墩相互水力作用特性进行了试验研究,研究得出了与无桥墩相比,在相同水力条件下,有桥墩时平衡冰塞厚度较小,平衡冰塞的水位增值也相应较小;基于理论分析得到了桥墩作用下临界流凌密度的计算公式和冰塞稳定判别公式。

3.1 单个桥墩冲刷试验研究 Bacuta和Dargahi^[35]基于清水冲刷试验条件,在试验水槽上研究对比了明流和冰盖条件下圆柱形桥墩的局部冲刷问题,研究发现,冰盖流条件下的桥墩局部冲刷深度比明流条件下有所增加,这或许是当前冰期桥墩局部冲刷问题研究可见的较早文献。

Ackermann和Shen^[36]通过水槽试验研究了冰盖对圆柱形桥墩局部冲刷的影响,该研究中采用了清水冲刷和动床冲刷两种不同的冲刷模式,研究得出了冰盖的存在可使局部冲刷深度较明流条件增加25%~35%的结论。Hains和Zabilansky^[37-38]在CRREL试验室对冰盖下桥墩局部冲刷进行了研究,冰盖条件分别为浮动冰盖和固定冰盖,也分为光滑和粗糙两种情况,并与明流条件的试验结果进行了对比,研究发现,由于冰盖的出现,使近床面处水流动能增加,冲坑深度较明流条件增大约10%;当冰盖糙率增大后,断面最大流速点偏向于河床表面,导致桥墩附近局部冲刷深度进一步加大。Munteanu^[39]在明流和冰盖两种条件下,对圆柱形桥墩进行了清水冲刷试验研究,研究表明,模拟岸边冰盖的存在,使冲刷深度较明流条件增加很多,最大增加幅度可达到55%。Wu和Balachandrar^[40]对冰盖条件下圆柱形桥墩局部冲刷进行了研究,将冲刷半径作为一个指标,并在此基础上建立了明流和冰盖条件下计算桥墩冲刷深度和冲刷半径的经验方程。上述研究总体得到的认识是冰盖对

桥墩局部冲刷的影响非常显著，但因为各种各样的条件限制，尚未考虑床面材料、墩型、墩径、墩间距等因素对冰盖条件下桥墩附近局部冲刷的影响，对明流和冰盖条件下冲刷发展过程的不同也即时间尺度的影响尚未深入研究。

Tuthill等^[41]对Montana州Milltown大坝拆除对冰情的变化影响进行了研究，采用HEC-RAS软件模拟计算各工况下冰塞形成和溃决过程，模拟结果表明大坝移除后并不会加剧下游的冰塞危害，但在桥墩附近容易形成冰塞并伴随冰塞体的释放过程，大大增加了河床的剪切力，造成上游5个桥墩局部冲刷现象会更加明显。Ettema^[42]认为水流、泥沙以及边界条件是影响冰期桥墩冲刷的主要方面，但目前大多数用于桥墩局部冲刷深度的计算公式尚未考虑封冻河道对桥墩局部冲刷的影响。以上这些结论都是基于简单的模型计算以及现场有限的观测资料所得到的，因此对问题的认识含有相应的不确定性。

Chen等^[43]采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对冰盖下桥墩处冰塞底部的局部冲刷过程进行了数值模拟研究，得出桥墩处冰塞底部的冲刷和床面冲刷坑呈对称分布，并通过水槽试验进行了验证，两者的结果较为吻合。目前针对冰盖下桥墩局部冲刷的数值模拟研究文献几乎未见；Chen的数值模拟结果还不能完整的描述冰塞演变及床面冲坑形成的动态变化过程。

3.2 边墩桥台及断面双桥墩冲刷试验研究 Wu等^[44]使用非均匀的天然沙，分析了半圆形桥台在粗糙和光滑冰盖条件下最大冲刷深度与水流速度之间的关系，试验研究表明，相对于明流条件，冰盖的存在加大了桥墩局部冲刷深度；低水深时冰盖对桥墩局部冲刷深度的影响更为显著；明流条件下，最大冲刷深度位于桥台上游面约为 50° 角度位置，冰盖条件下，最大冲刷深度位于桥台上游面约 60° 的位置，通过回归分析，认为半圆形桥台周围的最大冲刷深度可以通过以下变量来描述：

$$\frac{d_{\max}}{H} = A \left(\frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^a \left(\frac{D_{50}}{H} \right)^b \quad (4)$$

根据试验数据，得到了明流、光滑冰盖和粗糙冰盖条件下冲刷坑最大深度计算公式：

明流条件：

$$\frac{d_{\max}}{H} = 4.2 \times 10^{-3} \left(\frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{5.1} \left(\frac{D_{50}}{H} \right)^{-2.4} - 0.2734 \quad (5)$$

光滑冰盖条件：

$$\frac{d_{\max}}{H} = 8.2 \times 10^{-3} \left(\frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{5.1} \left(\frac{D_{50}}{H} \right)^{-2.4} - 0.4433 \quad (6)$$

粗糙冰盖条件：

$$\frac{d_{\max}}{H} = 13.0 \times 10^{-3} \left(\frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{5.1} \left(\frac{D_{50}}{H} \right)^{-2.4} - 0.6490 \quad (7)$$

式中： d_{\max} 为冲刷坑的最大深度，m； H 为水深，m； U 为行近流速，m/s； D_{50} 为不均匀泥沙的中值粒径； g 为重力加速度。

后续工作中，Wu^[45-47]通过水槽试验对冰盖条件下方形桥台和半圆形桥台局部冲刷问题进行了对比研究，假定明流条件下方形桥台和半圆形桥台的形状系数分别为1.0和0.75，引入密度弗劳德数，分析桥台几何形状和冰盖粗糙度对桥台最大冲刷深度的影响，研究得出：冰盖情况下半圆形桥台的形状系数约为0.66~0.71，形状系数对最大冲刷深度的影响小于明流条件；伴随冰盖粗糙度的增大，床面剪切力增大，最大冲刷深度也会增大。

Namaee^[48-49]在试验水槽的过流断面上布置一对并排双桥墩，对冰盖下的桥墩局部冲刷进行了试验研究。试验研究中采用了中值粒径分别为0.50 mm、0.47 mm、0.58 mm的非均匀沙，桥墩直径分别为60 mm、90 mm、110 mm和170 mm，为了研究冰盖条件下桥墩附近的局部冲刷规律，采用声学多

普勒测速仪(ADV)对并排桥墩的三维流速分布进行测量；研究发现，冰盖条件下的冲刷过程显得更为强烈，马蹄形旋涡的强度与并排桥墩跨距及桥墩尺寸大小有关；桥墩尺寸越小，桥墩间距越大，桥墩周围的马蹄旋涡强度越弱，冲刷深度越浅；通过回归分析，得到了明流和冰盖条件下的冲刷坑最大深度计算公式如下：

加盖条件下：

$$\frac{y_{\max}}{y_0} = 5.96 \left(\frac{D_{50}}{y_0} \right)^{-0.070} \left(\frac{G}{D} \right)^{-0.256} \left(\frac{n_i}{n_b} \right)^{0.546} (Fr)^{1.677} \quad (8)$$

明流条件下：

$$\frac{y_{\max}}{y_0} = 1.45 \left(\frac{D_{50}}{y_0} \right)^{-0.314} \left(\frac{G}{D} \right)^{-0.372} (Fr)^{1.739} \quad (9)$$

式中： y_{\max} 为冲刷坑的最大深度，m； y_0 为行近流的水深，m； G 为桥墩间距，m； D 为桥墩直径，m； n_i 和 n_b 分别为模拟冰盖和河床的粗糙系数； $Fr = \frac{U}{\sqrt{gy_0}}$ 为弗劳德数，其中 U 为行近流速(m/s)； g 为重力加速度。

Namaee^[50-51]在试验研究中，对比明流条件讨论了冰盖条件下冲刷坑保护层对桥墩局部冲刷深度的影响，分析了桥墩附近泥沙的起动机理，试验观察到明流条件下冲刷坑的几何形状与冰盖条件下具有一定相似性，粗糙冰盖条件下冲刷坑的体积和范围要明显大于光滑冰盖。

冰期桥墩局部冲刷问题的研究可以认为尚在起步阶段，上述近年来有关冰盖条件下桥墩局部冲刷问题的研究，已经涉及了通过有限的改变桥墩位置、水流条件、冰盖糙率以及床面粒径等对相关问题进行了探索，并通过量纲分析的方法，得到了试验条件范围内用于冰盖下桥墩局部冲刷深度的计算公式；但受试验条件的限制，研究主要是针对圆柱形桥墩、长方形、半圆形边墩桥台和跨中并排圆柱形桥墩开展的；试验中也尚未充分考虑不同桥墩墩型、墩径、多墩组合等因素对冰盖条件下桥墩局部冲刷的影响；更未考虑到桥墩附近冰塞演变和冰塞体厚度对局部冲刷的影响。

4 问题与讨论

寒冷地区冬季河流所出现的冰盖或冰塞，使得本来就复杂的桥墩局部冲刷问题变得更加复杂。如前所述，明流条件下的桥墩局部冲刷问题已经有了相对充分的研究，但冰期桥墩局部冲刷问题研究尚在起步，已有的实际工程和研究都已经发现，冰期较小流量导致的冲刷坑深度和范围可以比明流时洪水期的冲刷坑深度和范围更大。因此，冰期桥墩局部冲刷问题的研究已非常迫切，限于问题的复杂性，目前尚有很多方面需要研究。

(1)冰期桥墩局部冲刷涉及桥墩结构、冰盖特征和水流流态三个方面的相互影响，河床泥沙起动和冲刷机理包括桥墩周围水流涡系结构具有相当的复杂性，因此，冰盖条件下桥墩周围三维流场及其变化的机理研究、冰盖粗糙度与泥沙运动之间的关系、桥墩冲刷坑深度和范围的预测等，这些方面均有待于进一步探索。

(2)冰盖条件下，有关各种水流条件、床面材料、桥墩墩型、墩径、墩间距、多墩组合等因素对冰期桥墩局部冲刷影响的研究尚待充实；包括明流和冰盖条件下冲刷发展过程的区别尚待深入研究。

(3)冰盖条件下桥墩附近河床局部冲刷问题的数值模拟研究文献几乎未见；Chen的数值模拟研究的是桥墩附近的冰塞局部冲刷，如何完整的描述桥墩附近冰塞演变及床面冲坑形成的动态变化过程尚有待探索。

(4)迄今为止的研究都是在单一冰盖厚度条件下的研究，图1为作者近期的研究成果，在明流、冰盖、冰塞三种条件下，使用直径为2 cm的圆柱型桥墩在试验水槽中进行了桥墩局部冲刷试验，由图可见，在相同的水深、流速情况下，冰塞条件下的桥墩局部冲刷深度明显大于加盖和明流条件下

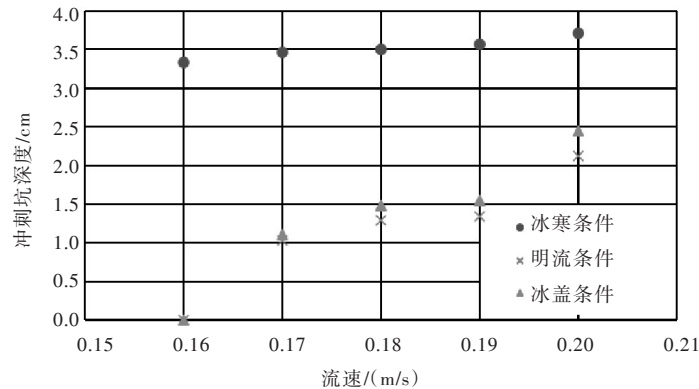


图1 最大冲刷坑深度随流速变化趋势图

的相应深度且要大很多，冲刷深度增加了约200%左右，试验说明了在冰塞条件下，由于冰塞运动和冰塞厚度对过水断面的进一步压缩作用，冰塞条件下的桥墩局部冲刷深度比冰盖条件要大的多。

冬季，寒冷地区河流会经历封冻初期和开河期两个容易成灾的冰塞或冰坝阶段，水流条件、冰塞和河床冲刷演变此时变化最为剧烈，如何结合明流条件下桥墩局部冲刷研究成果和方法、耦合冰塞演变、水流运动和其他相关冲刷影响因素，研究冰期桥墩局部冲刷问题、探索桥墩附近冰塞演变与河床局部冲刷相互作用及其机理应该是充满挑战和极其有意义的。

参 考 文 献：

- [1] 杨开林. 河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 81-91.
- [2] 郭新蕾, 杨开林, 杨淑慧, 等. 长距离明渠系统反向输水冰情模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 877-882.
- [3] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 模糊理论和神经网络预报河流冰期水温的比较研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 842-847.
- [4] WHITE K D, TUTHILL A M, FURMAN L. Studies of Ice Jam Flooding in the United States [M]. Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security Springer Netherlands, 2006.
- [5] 刘吉峰, 程艳红, 刘珂, 等. 黄河宁蒙河段冬季气温特点及其对凌情影响[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(12): 47-52.
- [6] 彭旭明, 吴煜楠, 徐金鹏, 等. 黑龙江防凌减灾研究进展[J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(6): 15-21.
- [7] 李志军, 徐梓竣, 王庆凯, 等. 乌梁素海湖冰单轴压缩强度特征试验研究[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 662-669.
- [8] 冀鸿兰, 石慧强, 牟献友, 等. 水塘静水冰生消原型研究与数值模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(11): 1352-1362.
- [9] 练继建, 赵新. 静动水冰厚生长消融全过程的辐射冰冻度-日法预测研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1261-1267.
- [10] IMHOF D. Risk assessment of existing bridge structures[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2004.
- [11] WARDHANA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 124-135.
- [12] KANDASAMY J K, MELVILLE B W. Maximum local scour depth at bridge piers and abutments[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(2): 183-198.
- [13] 陈稳. 河流冲刷对既有桥梁墩台承载力影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [14] HAINS D, ZABILANSKY L. Scour under ice: Potential Contributing Factor in the schoharie Creek Bridge Collapse[C]//Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering, Orono, ME, United states, 2007.
- [15] CARR M L, TUTHILL M A. Modeling of scour-inducing ice effects at Melvin Price Lock and Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(1): 85-92.

- [16] JTG C30-2015, 公路工程水文勘测设计规范[S]. 2015.
- [17] American Association of State Highway Transportation Officials. Subcommittee on Bridges. AASHTO LRFD Movable Highway Bridge Design Specifications[Z]. AASHTO, 2010.
- [18] 祝志文, 喻鹏. 中美规范桥墩局部冲刷深度计算的比较研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 36-43.
- [19] HONG S H, ABID I. Physical model study of bridge contraction scour[J]. Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2578-2585.
- [20] 齐梅兰, 邹艳荣. 河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 791-798.
- [21] 喻鹏, 祝志文. 串列双圆柱桥墩局部冲刷精细化模拟[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 111-120.
- [22] LINK O, GARCIA M, Pizarro A, et al. Local scour and sediment deposition at bridge piers during floods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(3): 04020003.
- [23] YANG Y, MELVILLE B W, MACKY G H, et al. Temporal evolution of clear-water local scour at aligned and skewed complex bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020026.
- [24] 赵嘉恒, 张耀哲, 李敏. 复杂边界条件下桥墩冲刷的试验研究[J]. 泥沙研究, 2013(1): 14-19.
- [25] NAJAFZADEH M, BARANI G A, HESSAMI-KERMANI M R. Group method of data handling to predict scour depth around vertical piles under regular waves[J]. Scientia Iranica A, 2013, 20(3): 406-413.
- [26] 陆雪骏, 程和琴, 周权平, 等. 强潮流作用下桥墩不对称“双肾型”冲刷地貌特征与机理[J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 118-125.
- [27] AKSOY A O, BOMBAR G, ARKIS T, et al. Study of the time-dependent clear water scour around circular bridge piers[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2017, 65(1): 26-34.
- [28] HAN H, CHEN Y, SUN Z. Estimation of maximum local scour depths at multiple piles of sea/bay-crossing bridges[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 567-575.
- [29] WANG J, SUI J, KARNEY B W. Incipient motion of non-cohesive sediment under ice cover - an experimental study[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(1): 117-124.
- [30] WANG J, SHI F, CHENG P, et al. Simulations of ice jam thickness distribution in the transverse direction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(5): 840-847.
- [31] 王军, 陈胖胖, 杨青辉, 等. 桥墩影响下冰塞水位变化规律的试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 867-873.
- [32] 王军, 章宝平, 陈胖胖, 等. 封冻期冰塞堆积演变的试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 693-699.
- [33] WANG J, HUA J, SUI J, et al. The impact of bridge pier on ice jam evolution - an experimental study[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2016, 64(1): 75-82.
- [34] 王军, 汪涛, 李淑祎, 等. 桥墩影响下弯槽冰塞形成临界条件和冰厚变化的试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 588-593.
- [35] BATUCA D, DARGAHI B. Some Experimental Results on Local Scour Around Cylindrical Piers for Open and Covered Flow[C]//Third International Symposium on River Sedimentation, University of Mississippi, 1986.
- [36] ACKERMANN N L, SHEN H T, OLSSON P. Local Scour Around Circular Piers Under Ice Covers[C]//Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice, Dunedin, New Zealand, 2002.
- [37] HAINS D, ZABILANSKY L. Laboratory Test of Scour Under Ice: Data and Preliminary Results[R]. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2004.
- [38] HAINS D, ZABILANSKY L. The Effects of River Ice on Scour and Sediment Transport[C]//CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers Hanover, New Hampshire, 2005.
- [39] MUNTEANU A, FRENETTE R. Scouring around a cylindrical bridge pier under ice covered flow condition-experimental analysis[R]. RV Anderson Associates Limited and Oxand report, 2010.
- [40] WU P, BALACHANDAR R, SUI J. Local Scour around bridge piers under ice-covered conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(1): 115-121.
- [41] TUTHILL A M, WHITE K D, VUYOVICH C M. Effects of proposed dam removal on ice jamming and bridge scour on the Clark Fork River, Montana[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(2): 186-194.
- [42] ETTEMA R, MELVILLE B W, CONSTANTINESCU G. Evaluation of bridge scour research: Pier scour process-

- es and predictions[R]. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2011.
- [43] CHEN P, WU P, SONG F, et al. The Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics Around Bridge Abutment Under Ice Cover [C]//22nd IAHR International Symposium on Ice. Singapore, 2014.
- [44] WU P, HIRSHFIELD F, SUI J, et al. Impacts of ice cover on local scour around semi-circular bridge abutment [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 10-18.
- [45] WU P, HIRSHFIELD F, SUI J. Further studies of incipient motion and shear stress on local scour around bridge abutment under ice cover[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41(10): 892-899.
- [46] WU P, HIRSHFIELD F, SUI J. Local scour around bridge abutments under ice covered condition—an experimental study[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(1): 39-47.
- [47] WU P, HIRSHFIELD F, SUI J. Armour layer analysis of local scour around bridge abutments under ice cover [J]. River Research and Applications, 2015, 31(6): 736-746.
- [48] NAMAEE M R, SUI J. Local scour around two side-by-side cylindrical bridge piers under ice-covered conditions [J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(4): 355-367.
- [49] NAMAEE M R, SUI J. Velocity profiles and turbulence intensities around side-by-side bridge piers under ice-covered flow condition[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2020, 68(1): 70-82.
- [50] NAMAEE M R, SUI J. Impact of armour layer on the depth of scour hole around side-by-side bridge piers under ice-covered flow condition[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2019, 67(3): 240-251.
- [51] NAMAEE M R, SUI J. Effects of ice cover on the incipient motion of bed material and shear stress around side-by-side bridge piers[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102811.

Advances in research work regarding local scour around bridge piers/abutments under ice-covered flow condition

WANG Jun¹, SU Yilei¹, HOU Zhixing¹, CHENG Tiejie¹, SUI Jueyi²

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Environmental Engineering, University of Northern British Columbia, Prince George, Canada)

Abstract: In winter, ice cover or ice jam present in many rivers in cold regions due to decrease in temperature. The presence of ice cover/ice jam imposes a solid boundary to flow. The velocity profile under ice-covered condition is totally different compared to open channel flow. Under ice-covered condition, the maximum velocity occurs between channel bed and the bottom of the ice cover and is dependent on the relative roughness of these two boundaries. Thus, the local scour process around bridge piers/abutments under ice-covered condition differs from that under open channel flow condition, which has been investigated by many researchers. However, limited research work regarding local scour process around bridge piers/abutments under ice-covered condition has been reported. In this paper, research results regarding local scour process around bridge piers/abutments under ice-covered flow condition have been reviewed and compared. Analysis and discussions of the reported results have been conducted. Future research topics regarding this topic have been proposed.

Keywords: ice cover; ice jam; local scour; bridge pier/abutment; experimental study

(责任编辑: 李福田)