文章编号:1672-3031(2021)06-0533-09

冰盖下桥墩局部最大冲刷深度试验研究

孙鸿渐, 王 军
(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 冬季寒冷的北方河流易形成冰盖或冰塞, 冰盖的存在对桥墩附近局部冲刷产生影响。在清水冲刷条件下, 试验研究了有无冰盖条件下, 不同流速和水深对桥墩附近局部冲刷的影响。研究结果表明: 对比明流条件, 冰盖的存在导致更大的近底流速和近底流速梯度, 从而桥墩局部最大冲刷深度更大; 其它条件相同的情况下, 随流速的增大, 桥墩局部最大冲刷深度增大; 随着桥墩墩径增大, 桥墩局部最大冲刷深度增加; 水深增加时桥墩局部最大冲刷深度相对减小。根据试验数据, 给出了有冰盖条件下桥墩局部最大冲刷深度的计算公式, 与国内外相关试验数据吻合较好。

关键词: 冰盖; 桥墩; 局部冲刷; 试验研究
中图分类号: TV91 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200077

1 研究背景

冬季, 寒冷地区河流会因结冰形成冰盖或冰塞。广义的说, 冰盖属于冰塞的一种。Robert等[1]研究得出, 与明流相比, 冰盖的存在导致水流结构及其紊流动能区别于明流, 影响河床泥沙的输运。桥墩附近的局部冲刷是水流与河床相互作用的结果[2], 明流条件下桥墩局部最大冲刷深度已有了大量研究, 分别涉及水流强度、泥沙粒径及其分布、桥墩参数和时间等影响因素对最大冲刷深度的影响, 并建立了很多最大冲刷深度的经验公式[3-5], 这里仅选择中国和美国相关规范或标准推荐公式作简单介绍。为方便说明, 桥墩局部最大冲刷深度以下简称为局部最大冲深。

1.1 中国相关规范推荐式 中国《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30-2015)[6]中非黏性土桥墩局部冲刷修正式(65-1)为

$$h_b=\begin{cases}K_aK_1B^{0.6}(V-V'_0)\\ K_aK_1B^{0.6}(V-V'_0)\left(\dfrac{V-V'_0}{V_0-V'_0}\right)^{n_1},\quad V>V_0\end{cases}\tag{1}$$

式中: h_b 为桥墩局部冲刷深度, m; V 为墩前行近流速, m/s; K_a 为墩形系数; B 为桥墩计算宽度, m; K_1 为河床颗粒影响系数; V'_0 为墩前始冲流速, m/s; V_0 为河床泥沙起动流速, m/s; n_1 为指数。

规范中规定该公式仅适用于非黏性土河床条件下桥墩局部冲刷, 且有下述适用范围: (1)河床泥沙平均粒径适用范围为0.1 ~ 500 mm。(2)墩前行近流速 V 适用范围为0.1 ~ 6.0 m/s。(3)桥墩计算宽度 B 适用范围为0 ~ 11 m。

1.2 美国HEC-18式 美国交通部建议采用HEC-18[7]中的CSU方程作为桥梁局部冲刷计算的方法, 即

$$\frac{h_s}{h}=2.0K_AK_BK_CK_D(b/h)^{0.65}Fr^{0.43}\tag{2}$$

收稿日期: 2020-06-09; 网络首发时间: 2021-02-05
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210205.1332.001.html
基金项目: 国家自然科学基金项目(51879065); 国家重点研发计划项目(2018YFC1508401); 合肥工业大学研究生质量工程项目(2018YKC02)
作者简介: 孙鸿渐(1994-), 硕士生, 主要从事河冰水力学研究。E-mail: shjhfut333@163.com
通讯作者: 王军(1962-), 教授, 主要从事河冰水力学研究。E-mail: junwanghfut@126.com

式中：h_s为桥墩局部冲刷深度；h为桥墩上游水深；K_A、K_B、K_C、K_D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为桥墩上游水流弗劳德数。式(2)对清水冲刷和动床冲刷条件都可以进行计算。

祝志文[8]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，研究表明：相比美国规范，中国规范的冲刷计算公式在量纲一致性、水力学含义、冲刷影响参数的确定等方面存在一定不足，表现出较强的经验性，在计算实际桥墩局部冲刷深度时，相较于美国规范计算结果偏小；美国规范考虑了漂流物聚集对桥墩局部冲刷的影响；对复杂群桩桥墩冲刷的叠加法，概念明确，实现了与简单桥墩冲刷的统一计算。赵嘉恒等[9]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。陈启刚和齐梅兰等[10-11]通过明渠圆柱绕流试验，采用粒子图像测速技术对圆柱体周围的流速进行测量，获得了瞬时的二维流场，在此基础上对柱体结构周围产生的马蹄涡流运动特性进行了研究并建立了数学模型，为桥墩局部冲刷的计算提供了理论依据。齐梅兰等[12]通过水槽试验研究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，建立了溯源与局部冲刷耦合的实时计算方法，可用于预测溯源与局部冲刷耦合时结构物总冲刷深度的发展。

虽然明流条件下的桥墩局部冲刷的研究成果很多，但是冰盖下桥墩局部冲刷的研究非常有限，Batuca等[13]在清水冲刷条件下，试验研究了有冰盖时桥墩局部冲刷的变化，结果发现冰盖条件下的局部冲刷程度比明流条件要大。王军等[14-15]试验研究了冰盖下的泥沙起动流速，研究发现，其他条件相同时，冰盖下的泥沙更易起动，且粗糙盖下的泥沙起动流速比光滑盖要小，表明了水流在桥墩附近的冲刷能力比明流时要强。Ackermann等[16]基于动床冲刷条件，采用圆柱形桥墩，研究了冰盖下桥墩局部冲刷情况，得出了局部最大冲深在明流条件下最小，粗糙盖时略大于光滑盖；当水流平均速度是泥沙起动流速的1.5～2.0倍时，有盖的最大冲刷深度可比明流条件大35%。Hains等[17]通过试验，研究了明流条件、固定冰盖条件和浮动冰盖条件下圆柱形桥墩附近局部冲刷的变化情况，分析得出了固定冰盖和浮动冰盖条件下，桥墩局部冲刷深度发展过程是相似的，但冰盖条件下的局部最大冲深比明流条件下大，最大可超出其21%；冰盖粗糙度的变化会影响水流的速度分布并可能引起动床冲刷，冰盖粗糙度增加导致了桥墩局部冲刷深度增加。Wu等[18]分析了冰盖下非均匀泥沙的起动机理，引入了冲刷角的概念(即河床表面与桥墩迎水面的夹角)用以进行冲刷坑内流速的计算，分析了冰盖条件下局部最大冲深与流速的关系；研究得出局部最大冲深随着无量纲剪切应力的增加而增加；与明流和光滑冰盖条件相比，在粗糙冰盖条件下，达到相同冲刷深度所需的无量纲剪切应力较小。Wu等[19]试验研究了有无冰盖条件下冲刷坑的轮廓形状和剖面，得到了冰盖的存在导致局部最大冲深较明流有所增加；无量纲最大冲刷深度与水流深度和桥墩直径之间的比值成反比。

Wu等[20-22]通过在试验水槽的边壁粘贴半圆形和矩形桥墩，研究了冰盖下桥墩附近的局部冲刷问题，得出对于半圆形桥墩，最大冲深点出现在墩顶偏向上游大约15°处，明流条件下圆形桥墩形状因子0.75，冰盖下半圆形桥墩的形状因子为0.66～0.71，粗糙盖条件下的最大冲刷深度比光滑盖条件要大且最大可达35%，对于矩形桥墩，最大冲深出现在上游角点处，并提出了桥墩边墩局部最大冲深的回归计算形式为：

$$\frac{y_m}{H}=A\left(\frac{U}{\sqrt{gH}}\right)^{\alpha}\left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{\beta}\left(\frac{n_i}{n_b}\right)^{\gamma} \tag{3}$$

式中：y_m为局部最大冲深；U为行近流速；H为行近水深；d_{50}为泥沙中值粒径；n_i为冰盖糙率；n_b为河床泥沙糙率。

式(3)因为受到试验条件和数据的限制，在桥墩墩径变化方面的考虑稍显不足；对于水槽中间单个桥墩情况，Wu等通过研究得出了水深较浅时，冰盖对冲深的影响更大，提出了这种情况下回归计算形式为：

$$\frac{y_m}{D}=A\left(\frac{U^2}{gD}\right)^{\alpha}\left(\frac{H}{D}\right)^{\beta}\left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{\gamma} \tag{4}$$

式中D为桥墩墩径。式(2)引入了桥墩墩径弗劳德数，同样受到试验条件的限制，在n_i/n_b的方面考虑受限。

Namaee等[23-26]在试验水槽断面上对称放置两个桥墩，研究了桥墩附近的局部冲刷情况，研究发现，桥墩雷诺数Re_b随墩跨距和墩径比值的增大而减小，冰盖下最大冲深点位于桥墩上游面，桥墩下游一般产生淤积；粗糙冰盖条件下最大冲刷深度和最大淤积高度明显大于明流条件，淤积宽度大于明流条件和光滑冰盖条件；相比较而言，水流弗劳德数对局部最大冲深影响最大；由于非均匀泥沙级配的影响，冲刷坑发展后泥沙的粗化对冲深的进一步发展有抑制作用，随密度弗劳德数的增加冲深相应增加；基于过流断面上的双墩试验数据，给出了局部最大冲深的回归计算形式为：

$$\frac{y_m}{y_0}=A\left(\frac{d_{50}}{y_0}\right)^{\alpha}\left(\frac{G}{D}\right)^{\beta}\left(\frac{n_i}{n_b}\right)^{\gamma}Fr^{\eta} \tag{5}$$

式中：Fr为上游水流弗劳德数；y_0为上游水深；G为两桥墩间距。在试验条件范围内，式(5)在计算双墩局部冲刷深度时给出了非常好的精度。

本文拟采用试验研究方法，对冰盖条件下单个桥墩局部冲刷问题进行研究，并与已有的冰盖下桥墩局部冲刷研究成果进行对比分析。

2　冰盖条件下桥墩局部最大冲刷深度的试验研究

2.1　试验条件　试验是在合肥工业大学水利科学研究所的实验室中进行的，水槽长26.68 m，宽0.4 m，深1.3 m(见图1和图2)。水槽内的流量是通过进口管道上的阀门来调节的，在水槽下游设置一个可调节高度的倾斜狭缝式闸门，以调节水槽内平均水流深度和速度。沿水流方向将水槽一共分为22个断面，桥墩位置固定在16断面，试验采用了墩径分别为2 cm和3 cm的亚克力圆柱型桥墩。冰盖采用轻质聚苯乙烯泡沫板模拟，水槽底部铺设泥沙，试验使用了两种不同中值粒径的泥沙，即d_{50}分别为0.44 mm和0.71 mm。采用超声波流速仪测量墩前沿水流方向的垂向流速分布。流速测点选择：贴近桥墩上游迎水面，根据不同水深按垂线方向将水深四等分，测量每个分段节点的流速。超声波流速仪显示精度为10^{-4}，单位为m/s，实际测量时因最后两位在一定范围内波动取均值。

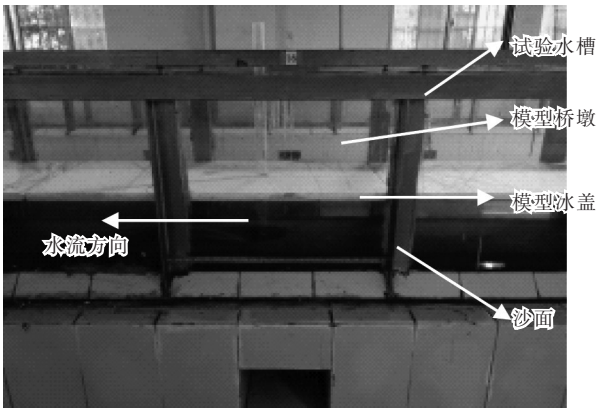


图1　试验模型图

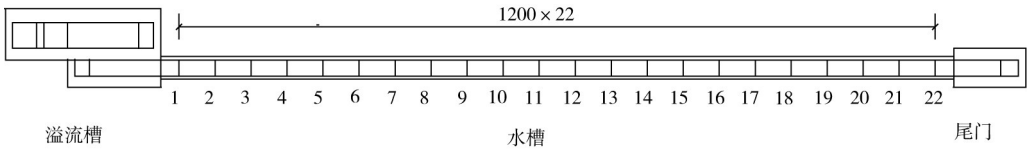


图2　合肥工业大学水力学实验室直槽平面布置图

2.2　试验现象　图3为加盖条件下冲刷坑发展过程图。其试验条件如下：水深h=0.15 m，桥墩上游行近流速v=0.24 m/s，中值粒径d_{50}=0.71 mm，墩径D=2 cm。

试验观察到，在明流条件与加盖条件下，圆柱型桥墩冲刷坑发展现象并未有太大差别，大致可描述如下：(1)冲刷坑始于墩前迎水面并逐步变深和拓宽，桥墩两侧也同步刷深、拓宽，水流速度较小时，冲刷坑形成较慢；(2)在桥墩下游，泥沙从冲刷坑内被水流搬运到坑外，墩后淤积高度逐渐上升，泥沙先在墩后两侧堆积，然后淤积逐渐向墩后中轴线发展；(3)墩前最大冲深基本在试验2～3 h内达到桥墩局部最大冲刷深度的80%～90%；(4)水流速度较小时，墩后淤积沙丘高度相对较高，而



(a)过程1　　(b)过程2　　(c)过程3

图3　冲刷发展过程图

流速较大时，沙丘脊线向下游延伸较长，淤积高度相对较低；(5)冲刷平衡时，沙丘高度、形态基本维持稳定，少量沙颗粒随坑内漩涡来回缓慢移动，只在坑内进行局部调整，冲刷坑范围和深度基本保持不变。

2.3　桥墩上游水流行近方向的垂线流速分布　上游行近水流速度和流速分布是引起桥墩局部冲刷最直接的影响因素，上游行近水流在桥墩附近形成的马蹄形涡系和下潜水流导致了桥墩附近的局部冲淤变化。冰盖的存在使得断面水流的最大流速点偏向河床表面。

图4是无桥墩时明流和加盖条件下流速垂线分布，图5是冲刷达到平衡时明流和加盖条件下流速垂线分布。从图4和图5可以看出，有冰盖时流速分布的最大值点位置向床面方向偏移，且接近床面的流速值比明流情况要大，即冰盖的存在导致更大的近底流速从而导致更大的局部最大冲深。

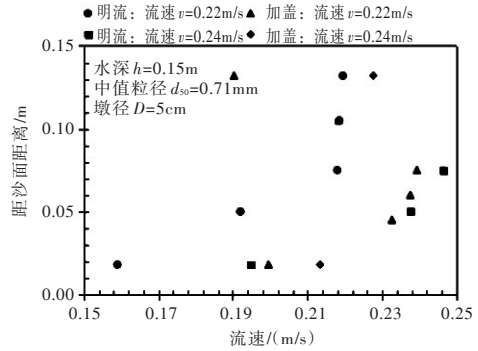


图4　无桥墩时明流与加盖条件下行近流速垂线分布

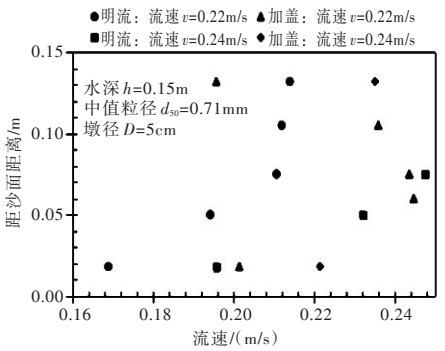
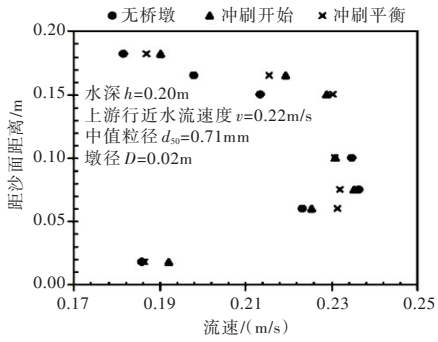


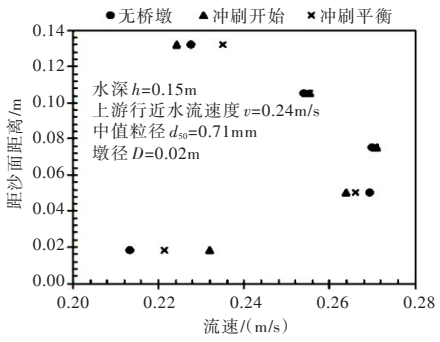
图5　冲刷平衡时明流与加盖条件下桥墩上游行近流速垂线分布

图6中冲刷开始流速指的是床沙开始起动、冲刷坑初始发展时的流速。图7是距离床面高度约2 cm的地方的流速随时间的变化。由图6和图7可知，距离床面高度约2 cm的地方，冰盖条件下该处流速在开始冲刷一段时间内大幅度上升，接近冲刷平衡时变小并逐渐趋于平稳，冲刷坑深度也随时间发展趋于稳定。图8分别为冰盖条件下不同水深在无桥墩和冲刷平衡时的流速分布，可以看出，其它条件相同时，水深较大时接近床面的流速更小，因此，冰盖条件下较大的水深将导致更小的局部最大冲深。

2.4　桥墩上游行近流速垂线方向的速度梯度分析　近底流速梯度反映了水流对河床表面拖曳力的大小和水流对河床的冲刷能力。为进一步揭示近床面的冲刷机理，接近河床部分的流速梯度进行了分



(a)水深h=0.2m，行近流速v=0.22m/s



(b)水深h=0.15m，行近流速v=0.24m/s

图6　冰盖条件下桥墩冲刷开始前后的流速分布

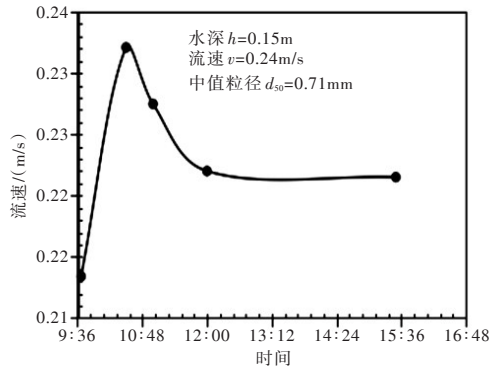


图7　距离床面2cm处的流速变化

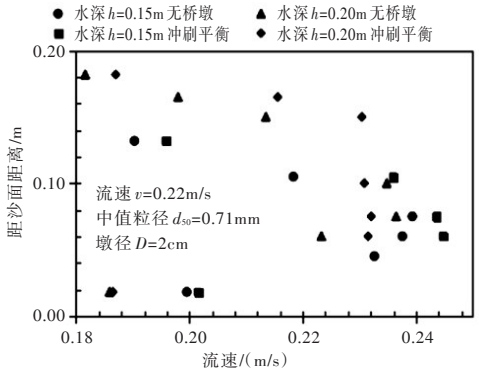


图8　冰盖条件下不同水深流速分布

析比较。

由图9可以看出，明流与加盖条件下随着冲刷过程的变化，近底流速梯度呈现先有所增大后逐渐稳定的趋势，也说明了冲刷开始时发展很快然后逐渐达到平衡的趋势。

由图10可以得出，(两种水深)冰盖条件下较大的平均水深其近底流速梯度较小，即水流拖曳力较小，将会导致其冲刷坑深度和范围等不如较小的水深条件，同时，也反映出随水深的增大，冰盖对床面的影响将渐渐减小。

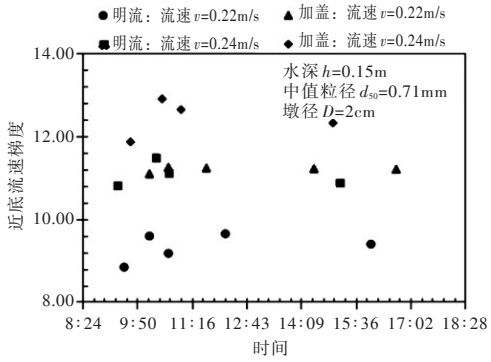


图9　明流与加盖条件近底流速梯度随时间变化

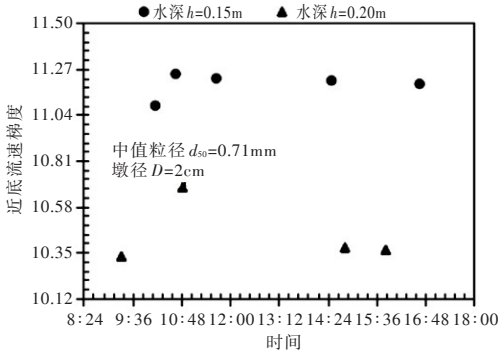


图10　冰盖条件下近底流速梯度随时间的变化

2.5　局部最大冲深分析

2.5.1　*局部最大冲深和上游行近水流速度关系*　由图11可见，其他条件不变的情况下，不论明流条件还是加盖条件，流速对局部最大冲深影响较为明显。其他条件不变的情况下，局部最大冲深随流速的增大而增大。

2.5.2　*局部最大冲深与水深和墩径关系*　图12中流速指的是上游行近水流速度。由图12可见，冰盖条件下，其他条件相同时，局部最大冲深随水深的增大而减小。

图13(a)为不同水深条件下，2 cm与3 cm墩径的局部最大冲深随流速变化图，图13(b)为2 cm与3 cm墩径分别在0.15 m水深条件下局部最大冲深差随流速变化图。由图12和图13得出，无论是明

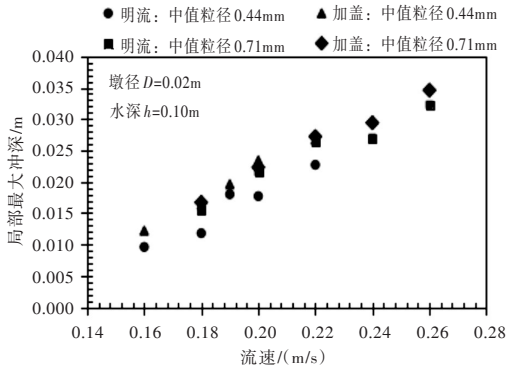


图11　局部最大冲深随流速变化示意图

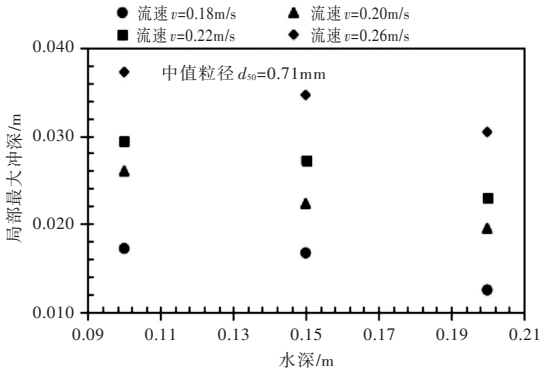
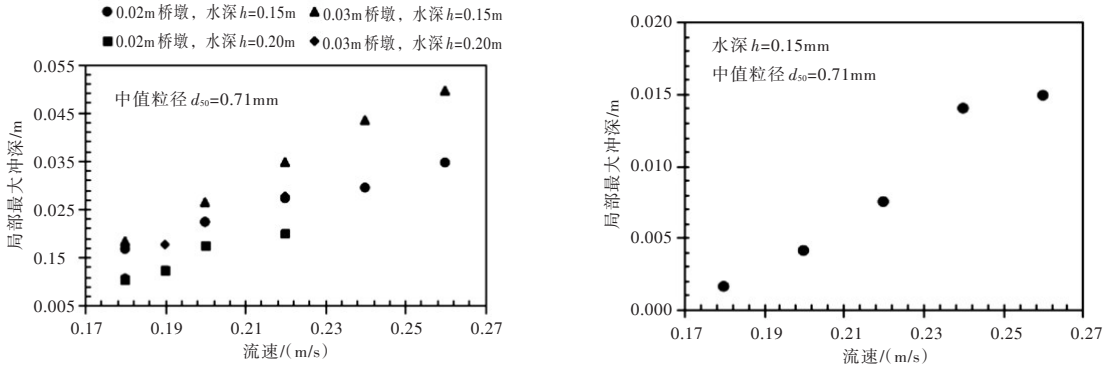


图12　冰盖条件下局部最大冲深变化示意图

流还是有冰盖的情况，墩径增大，局部最大冲深随之增大；流速较低时，墩径对局部最大冲深的影响较小，随流速增大，较大墩径的局部最大冲深增长幅度会增大。



(a)不同水深2cm与3cm墩径对比　　(b)2cm与3cm墩径0.15m水深对比

图13　冰盖条件局部最大冲深随流速墩径变化图

3　冰盖条件下桥墩附近局部冲刷深度计算的回归分析

影响局部冲刷的因素按性质大致可分为3类：(1)水流因素；(2)河床特性；(3)桥墩特征性质[14]。结合试验数据，明流条件下的局部最大冲刷深度可表示为：

$$y_m = f\left(U,\ U_c,\ h,\ g,\ d_{50},\ D,\ B\right) \tag{6}$$

式中：y_m为局部最大冲深；U为断面平均流速；U_c为桥墩附近局部冲刷起动流速。根据文献[27]有如下计算式：

$$\begin{cases} u^* = \left(16.2 d_{50}\left\{\dfrac{9.09\times10^{-6}}{d_{50}} - d_{50}\left[38.76 + 9.6\ln\left(d_{50}\right)\right] - 0.005\right\}\right)^{\frac{1}{2}} \\ R = \dfrac{u^* d_{50}}{2.32\times10^{-7}} \\ V_c = 2.5u^*\ln\left(\dfrac{73.5y_1}{d_{50}\left\{R\left[2.85 - 0.58\ln\left(R\right) + 0.002R\right] + \dfrac{111}{R} - 6\right\}}\right) \end{cases} \tag{7}$$

式中V_c为无桥墩时床面泥沙起动流速，本试验中采用桥墩附近局部冲刷起动流速U_c，对比试验实测数据，代入计算的U_c为式(7)中V_c乘以修正系数后所得；h为断面平均水深；d_{50}为泥沙中值粒径；D为墩径；B为水槽宽度。明流条件下的试验数据回归结果如下：

$$\frac{y_m}{h} = 0.235\left(\frac{U-U_c}{\sqrt{gh}}\right)^{0.623}\left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{-0.135}\left(\frac{B-D}{h}\right)^{0.499} \qquad R^2 = 0.75 \tag{8}$$

冰盖条件下桥墩局部最大冲刷深度计算式可表示为：

$$y_m = f\left(U,\ U_c,\ h,\ g,\ d_{50},\ D,\ n_i,\ n_b\right) \tag{9}$$

其中n_i为冰盖糙率，n_b为河床泥沙糙率，冰盖糙率n_i按照文献[28]方法确定，河床糙率n_b采用[29]方法确定，其中n_b包含d_{50}。

根据相关试验数据，得到回归方程：

$$\frac{y_m}{h} = 0.285\left(\frac{U-U_c}{\sqrt{gh}}\right)^{0.391}\left(\frac{B-D}{h}\right)^{0.458}\left(\frac{n_i}{n_b}\right)^{0.481} \qquad R^2 = 0.65 \tag{10}$$

图14是试验实测值与计算值对比，图中还包含了文献[17，20-26]的试验数据。由图14可见，式(10)的计算值和试验实测值吻合度较好，因此式(10)不仅很好的反映了本文试验数据中各个因素

的关系和规律，而且和目前作者能够收集到的文献相关数据吻合度较高，因此，可以认为该式具有很好的实用范围。

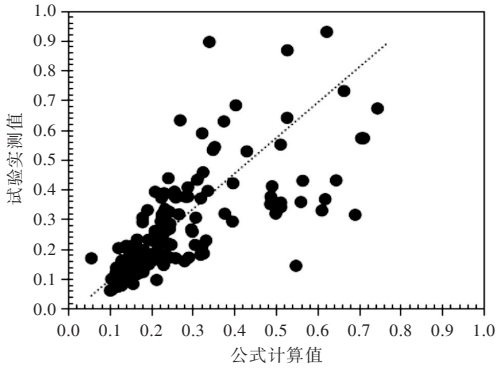


图 14　试验实测值与回归经验公式值对比

4　结论与讨论

（1）无论是明流或冰盖条件，冲刷刚开始时，冲刷坑发展较为迅速，随冲刷时间增长，冲刷坑深度和冲淤范围的变化速率渐缓，并最终趋于稳定；水流速度的变化对局部冲刷的影响最大，冲刷深度随着水流速度的增大而增大。

（2）明流或加盖条件下，近底流速在冲刷开始时有所增加，然后减小并渐趋于稳定；沿水流方向，近底流速梯度同样呈现先增大后趋于稳定的趋势。

（3）试验发现，和明流条件相比，冰盖的存在导致了更大的近底流速和近底流速梯度，因此，冰盖条件下的桥墩局部最大冲刷深度及其范围更大；当水深增大时，冰盖对床面冲刷的影响有所减小，水深越大，影响越小，表现为当水深增加时局部最大冲深相对减小。

（4）无论明流还是加盖，桥墩墩径的增大会导致局部最大冲深增大，流速较低时墩径对局部最大冲深影响较小，而当流速增大时，较大的墩径其局部最大冲深增长幅度则更大。

墩型、墩跨距和墩径之比，边墩问题等暂时未纳入考虑，冰盖下河床泥沙起动和冲刷机理及其相互的关系研究尚不充分，目前对桥墩局部冲刷研究时的冰盖条件基本都是单一厚度的完全冰盖，冰盖变化条件下的相关研究更是空白，这些方面均有待于进一步探索。

参　考　文　献：

[1] ROBERT A, TRAN T . Mean and turbulent flow fields in a simulated ice-covered channel with a gravel bed: some laboratory observations[J] . Earth Surface Processes And Land forms, 2012: 951-956 .

[2] ZHANG H, NAKAGAWA H . Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke[J] . International Journal of Sediment Research, 2009(24): 33-45 .

[3] LIANG B, DU S, PAN X, et al . Local scour for vertical piles in steady currents: review of mechanisms . influencing factors and empirical equations[J] . Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 8(1) . doi:0.3390/jmse8010004.

[4] LINK O, GARCÍA M, PIZARRO A, et al . Local scour and sediment deposition at bridge piers during floods[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(3) . doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001696.

[5] YANG Y, BRUCE W, MELVILLE, et al . Temporal evolution of clear-water local scour at aligned and skewed complex bridge piers[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4) . doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001732.

[6] 中华人民共和国行业标准 . 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30-2015[S] . 北京: 人民交通出版社, 2015 .

[7] RICHARDSON E . Evaluating scour at bridges: 4th ed[M] . Washington D . C . : Federal Highway Administration, 2001 .

[8] 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 .

[9] 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 .

[10] 陈启刚, 齐梅兰, 李金钊, 等 . 基于粒子图像测速技术的明渠圆柱上游行近流特征研究[J] . 水利学报, 2015, 46(8): 967-973 .

[11] 陈启刚, 齐梅兰, 李金钊 . 明渠柱体上游马蹄涡的运动学特征研究[J] . 水利学报, 2016, 47(2): 158-164 .

[12] 齐梅兰, 邵艳荣 . 河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷[J] . 水利学报, 2017, 48(7): 791-798 .

[13] BATUCA D, DARGAHI B . Some experimental results on local scour around cylindrical piers for open and cov-

ered flow[C]//Third International Symposium on River Sedimentation . University of Mississippi, 1986 .
[14] 王军, 孙连进 . 冰盖下散粒体泥沙起动流速的试验研究[J] . 水利水运科学研究, 1998, 8(2): 164-169 .
[15] WANG J, SUI J, KARNEY W . Incipient motion of non-cohesive sediment under ice cover-an experimental study [J] . Journal of Hydrodynamics, 2008: 117-124 .
[16] ACKERMANN N L, SHEN H T, OLSSON P . Local scour around circular piers under ice covers[C]//Ice in the environment: Proceedings 16th International Symposium on Ice . Dunedin: University of Otago, 2002: 149-155 .
[17] HAINS D, ZABILANSKY L . Laboratory Test of Scour Under Ice: Data and Preliminary Results[R] . 2004 .
[18] 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 .
[19] WU P, BALACHANDAR R . Measurement of scour profiles around bridge piers in channel flow with and without Ice-Cover[C]//22nd Canadian Hydrotechnical Conference, 2015 .
[20] 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 .
[21] 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 .
[22] WU P, BALACHANDAR R, SUI J . Local scour around bridge piers under ice-covered conditions[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 42(1): 115-121 .
[23] NAMAEE M, 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 .
[24] NAMAEE M, 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 .
[25] NAMAEE M, 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 .
[26] NAMAEE M, 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 .
[27] SHEPPARD D M, MELVILLE B, DEMIR H . Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 14-23 .
[28] LI S . Estimates of the Manning's coefficient for ice-covered rivers[J] . Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 2012, 165(9): 495-505 .
[29] HAGER W H . Wastewater hydraulics[M] . Berlin: Springer Verlag, 1999 .

Local maximum scour depth of bridge piers under ice cover: An experimental study

SUN Hongjian, WANG Jun

(*School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei* 230009, *China*)

Abstract: Both ice cover and ice jams occur frequently in northern rivers in the winter. The presence of ice cover has an effect on local scour around the piers. Under the condition of clean water scour, the impact of ice cover, velocity and water depth on local scour around the pier was studied experimentally. The results show that the presence of ice cover leads to greater flow velocity and gradient of flow velocity near bed compared to open channel conditions. Therefore, the local maximum scour depth of the pier is greater. If the flow velocity or pier diameter increases, the local maximum scour depth becomes larger. If the water depth increases, the local maximum scour depth under ice cover becomes smaller. According to the experimental data, the formula is given for calculating the maximum local scour depth of the pier under the condition of ice cover, and the results are in good agreement with the experimental results at home and abroad.
Keywords: ice cover; pier; local scour; experimental study

(责任编辑: 王学凤)