



网格结构对桥墩周围冲刷坑的促淤效果研究^{*}

赵旭东¹, 张民曦¹, 姚文娟², 乐绍林³, 周欢³, 喻国良¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 3. 武汉二航路桥特种工程有限责任公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 减少冲刷坑深度是桥梁设计与维护中常面临的一个重要问题。为了进一步探明促淤网格的安装位置等对桩墩局部冲刷坑促淤修复效果的影响, 通过水槽试验研究促淤修复率随促淤网格安装位置、网孔大小等要素的变化特征。结果表明: 促淤修复率受来流强度的影响不大, 受网格的相对安装位置影响很大; 为提高促淤网格的稳定性和促淤修复效果, 促淤网格应安装在沙波波谷以下尽可能高的位置, 以获得尽可能大的促淤容量, 增大网格的促淤深度; 网格的相对网孔孔径越小, 网格安装位置对冲刷坑促淤修复效果的影响越显著。最后, 提出了促淤网格防护下的最终促淤深度计算公式, 为今后促淤网格的工程应用提供参考。

关键词: 均匀流; 桥墩冲刷; 冲刷坑; 促淤网格; 安装位置; 修复率

中图分类号: U443.8; TV147.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0105-08

Effect of lattice structure promoting sedimentation on scour pits around piers

ZHAO Xudong¹, ZHANG Minxi¹, YAO Wenjuan², YUE Shaolin³, ZHOU Huan³, YU Guoliang¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. CCCC Road & Bridge Special Engineering Co., Ltd, Wuhan 430071, China)

Abstract: How to reduce the scour pit depth is an important issue in bridge design and maintenance. To further explore the influence of the installation position of the lattice promoting sedimentation on the sedimentation and restoration effect of local scour pits around piles and piers, this paper investigates the change characteristics of sedimentation and restoration efficiency with the installation position and aperture size of the lattice promoting sedimentation by flume test. The results show that the sedimentation and restoration efficiency is less affected by the intensity of incoming flow and more affected by the relative installation position of the lattice. To improve the stability and sedimentation and restoration effect of the lattice promoting sedimentation, it is necessary to install the lattice promoting sedimentation as high as possible below the trough of the sand wave, so as to obtain the maximum sedimentation capacity and increase the sedimentation depth. The effect of the installation position of the lattice on the sedimentation and restoration effect of scour pits is significant with the decreasing aperture size of the lattice. Finally, this paper proposes a formula for calculating the final sedimentation depth under the protection of the lattice promoting sedimentation, which can provide a reference for the future engineering application of the lattice promoting sedimentation.

Keywords: uniform flow; pier scour; scour pit; lattice promoting sedimentation; installation position; restoration efficiency

收稿日期: 2022-09-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (52171268)

作者简介: 赵旭东 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口与近海岸工程及泥沙研究。

通讯作者: 喻国良 (1963—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流海岸动力学研究。E-mail: yugl@sjtu.edu.cn

桩墩是广泛应用于跨海大桥、高桩码头等建筑物的基础。在水流作用下，桩墩周围会发生局部冲刷，使桩墩入土深度减小，承载力降低，进而影响桩墩稳定性，威胁上部建筑物的安全与性能。桩墩冲刷是造成桥梁毁损的重要因素之一^[1]，国内外众多桥梁水毁破坏由冲刷造成^[2-3]。因此，开展对桩墩局部冲刷坑的促淤修复研究对跨海大桥、高桩码头等建筑物的安全运行具有十分重要的意义。

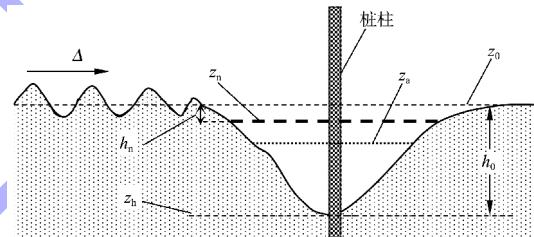
目前，国内外学者对于桩墩局部冲刷防护与冲刷坑的促淤修复理论及措施已进行许多研究，取得了大量成果。Chiew^[4]将冲刷防护方法划分为两大类：第一类是被动防护，设法提高桩周底床的抗冲刷能力，该方法施工简单，大多数条件下效果良好，但防护材料的成本及后期维护费用高，且易引发二次冲刷；另一类是主动防护，改变桥墩附近水流的水力特性，削弱下潜水流及马蹄涡等对桩周底床的冲刷能力，该方法的成本较低，但防护效果受来流及底床条件的影响较大。前者的主要措施有抛石防护^[5]、石笼防护^[6]、扩大墩基础防护^[7]等，后者的主要措施有护圈防护^[8]、护壳防护^[9]、墩前牺牲桩防护^[10]等。近年来，很多学者利用新型结构及工程材料，可在实现底床防冲刷目标的同时，达到促进底床淤积的效果。例如利用水草垫^[11]、仿生型柔性促淤护滩结构^[12]、促淤浮帘^[13]、中性促淤网格等。其中的促淤网格为用一种比重略大于水的改性 PVC 材料制成的具有特殊几何特征的结构，将其安装在冲刷坑内的指定高度，可大幅削弱冲刷坑内的水流强度。上游来沙通过网孔落淤至冲刷坑内，原冲刷坑不断被填充，直至建立新的冲淤平衡，桥墩冲刷坑因此得到修复。赵寒燕^[14]将网格覆盖在已有冲刷坑的床面位置上时，促淤效果良好。但由于底床上沙波运动的影响，网格边缘容易出现掏空现象，进而会影响促淤网格的稳定性及降低促淤效果。因此，须进一步研究促淤网格的安装位置等参数对桩墩局部冲刷坑促淤修复效果的影响。

本文以均匀流中圆柱为研究对象，在分析局部促淤深度的影响因素基础上，利用量纲分析方法推导促淤网格防护下的圆柱局部促淤深度的计算模型，随后采用水槽试验探究促淤网格的安装位置及网格孔径等参数对冲刷坑促淤修复效果的影响规律，最后利用试验数据回归提出促淤深度计算公式，为基于促淤网格的防冲刷保护措施提出设计依据。

1 促淤网格防护下圆柱局部促淤深度

1.1 圆柱局部促淤深度的影响因素

如图 1 所示，促淤网格覆盖在圆柱的局部冲刷坑上，防护下的圆柱局部冲刷坑不断被通过网孔下落的泥沙淤积，坑的深度不断减少，直到到达新的冲淤平衡状态。



注： Δ 为沙波高度； z_n 为网格安装高程； z_0 为平均底床高程； z_m 为平衡淤积高程； z_k 为冲刷坑底高程； h_0 为原冲刷深度； h_n 为网格埋深。

图 1 促淤网格防护下的圆柱局部冲刷坑

在该促淤网格防护下，促淤网格的网孔越大，来沙越易落入冲刷坑，但坑内水流强度也越大，泥沙易被再次冲刷出坑；而网孔尺寸太小时，上游来沙则不易落入冲刷坑内，促淤速率太低；网格的安装位置越靠近床面，受沙波的影响越大，网格边缘越易出现掏空，进而影响到网格的促淤修复效果；若网格安装位置太低时，促淤量则太少，致使最终促淤修复率太小。另外，网格孔隙率、网格厚度等对圆柱局部促淤深度也有一定影响。由图 1 可知，最终促淤深度 h_s 为：

$$h_s = h_0 - h_n - (z_n - z_m) \quad (1)$$

引入一个反映网格对冲刷坑内水动力起遮蔽作用导致冲刷深度减少的系数 ξ 来反映网格覆盖

后的网格下方冲刷深度 h_a , $h_a = z_n - z_a = \xi h_0$, 则最终促淤深度改写为:

$$h_s = (1-\xi)h_0 - h_n \quad (2)$$

其中: 无网格覆盖的桩墩冲刷深度(即原冲刷深度) h_0 按照美国 HEC-18 公式^[15]。依据赵寒燕的研究, 网格厚度对促淤效果影响较小。因此, 促淤网格的遮蔽系数 ξ 主要与泥沙粒径 d_{50} 、网格孔径 d_n 、网格埋深 h_n 、网格孔隙率 φ 、墩前行近流速 v 、墩前水深 h 、重力加速度 g 、水流密度 ρ 、水的动力黏度 μ 有关, 可描述为:

$$\xi = f(\rho, d_n, v, \mu, g, h, d_{50}, h_n, \varphi) \quad (3)$$

1.2 圆柱局部促淤深度与修复率计算公式

按量纲分析的基本方法, 选 d_n 、 ρ 、 v 作为基本物理量, 基本量纲为 L、M、T, 则:

$$\xi = f\left(\frac{\mu}{d_n \rho v}, \frac{gd_n}{v^2}, \frac{h}{d_n}, \frac{d_{50}}{d_n}, \frac{h_n}{d_n}, \varphi\right) \quad (4)$$

因 $Re = \frac{d_n \rho v}{\mu}$, $Fr = \frac{v^2}{gd_n}$, 由于造成局部冲刷的

水流属于紊流, 水流进入自模区, 冲刷与雷诺数无关, 上式可简化为:

$$\xi = f\left(Fr, \frac{h}{d_n}, \frac{d_{50}}{d_n}, \frac{h_n}{d_n}, \varphi\right) \quad (5)$$

为此, 需开展水槽试验, 以得到 h_s 的计算公式。

冲刷坑修复率 η 则为:

$$\eta = \frac{z_a - z_h}{h_0} = \frac{(1-\xi)h_0 - h_n}{h_0} = 1 - \xi - \frac{h_n}{h_0} \quad (6)$$

2 促淤网格动床试验

2.1 试验方案

为确定促淤网格对桩局部冲刷产生的遮蔽系数, 进行动床浑水冲刷水槽试验, 试验布置如图 2 所示。水槽长 20 m, 宽 0.58 m, 深 1.0 m, 水槽底坡为平坡, 水槽的上层为铺设沙床厚度 0.3 m 的试验区, 下层为安装有循环水泵的水体循环区, 由变频器调节其循环流量。水槽两侧均为透明钢化玻璃侧壁, 便于观察和记录。水槽进出水口处

设置水平格栅, 用以对水流消能整流, 提供稳定均匀的水流试验条件。试验过程中上游不断补充泥沙, 输沙率按梅叶-彼得公式^[16]计算, 使得床面高程几乎不变。

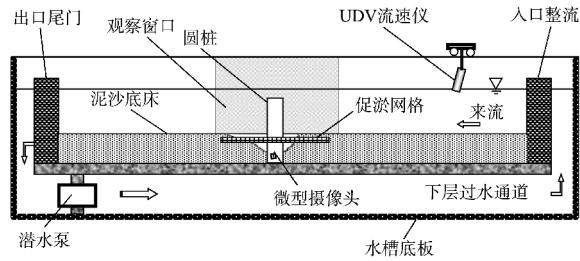


图 2 试验水槽布置

圆柱采用透明有机玻璃材料制成, 桩径 $D=5$ cm, 外壁贴有透明刻度尺标签, 内壁安装有微型摄像头, 用以记录桩前冲刷坑深度随时间的变化。促淤网格采用改性 PVC 材料, 网格结构的长和宽均为 400 mm, 厚 3 mm, 通过 3D 打印机得到孔径分别为 3、5、7、9、11 mm 共 5 种网格。试验沙样为两种中砂, 其参数见表 1。使用超声多普勒速度分析剖面仪(UDV)测量来流流速, 使用激光测距传感器测量冲刷坑深度。

表 1 试验沙样参数

沙样 编号	$d_{50}/$ mm	$d_{95}/$ mm	相对 密度 γ	不均匀 系数 C_u	泥沙休止角/ (°)
1	0.33	0.56	2.65	1.37	32.92
2	0.26	0.39	2.65	2.06	32.83

注: $\gamma = \rho_s / \rho$, ρ_s 为沙样密度; $C_u = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$ 。

2.2 试验步骤

首先, 在单向均匀恒定流条件下开展圆柱的冲刷试验, 待冲刷坑形成后, 测量并记录冲刷坑的深度及形态, 并利用三维建模软件 SolidWorks 及 3D 打印设备制作冲刷坑模型, 用以在后续促淤试验中直接在圆柱周围的沙床上利用试验沙塑造出冲刷坑形态。在此基础上, 对应开展网格覆盖下的不同工况的促淤试验。冲刷形态及 3D 打印冲刷坑模型对比见图 3, 试验结果见表 2。透过水槽透明玻璃侧壁测得上游的一般冲刷深度, 由于不断加沙, 上游一般冲刷深度几乎为 0。

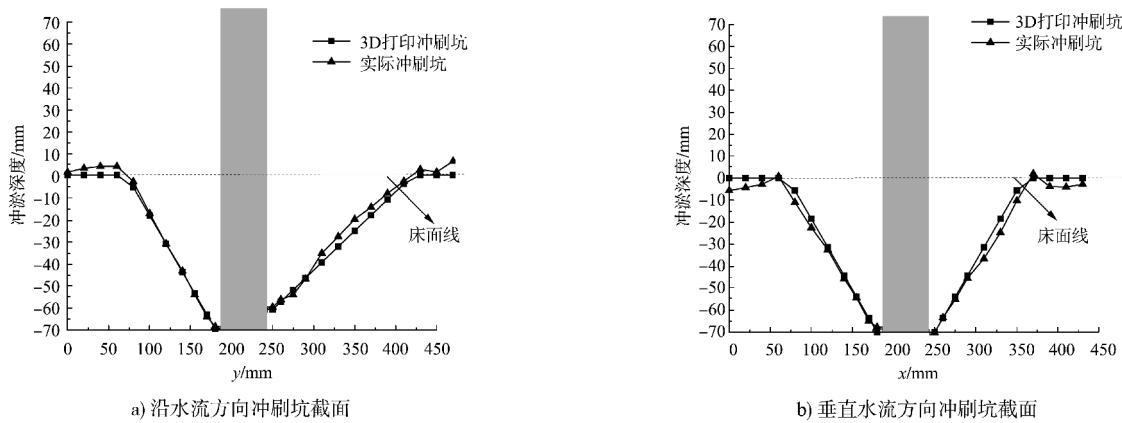


图 3 冲刷形态及 3D 打印冲刷坑模型对比

表 2 水槽试验工况及试验结果

工况	水深 h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	泥沙起动流速 $v_c/(m \cdot s^{-1})$	d_{50}/l mm	d_{95}/l mm	网孔边长 d_n/mm	相对孔径 S	Δ/m	网格相对安装位置 h'_n	h_a/mm	冲刷坑修复率
1	0.25	0.30	0.27	0.33	0.56	-	-	0.023	-	-	-
2		0.35				-	-	0.026	-	-	-
3	0.20	0.38	0.25	0.26	0.39	-	-	0.028	-	-	-
4									0	12.65	0.867
5									0.87	5.83	0.833
6						3	5.36		1.74	1.36	0.775
7									2.61	1.29	0.670
8									0	14.26	0.850
9									0.87	8.36	0.807
10									1.74	3.67	0.751
11									2.61	4.89	0.633
12									0	22.58	0.762
13	0.25	0.30	0.27	0.33	0.56	7	12.50	0.023	0.87	13.98	0.747
14									1.74	8.79	0.697
15									2.61	6.08	0.620
16									0	27.97	0.705
17						9	16.07		0.87	21.90	0.664
18									1.74	14.59	0.636
19									2.61	8.06	0.599
20									0	28.38	0.701
21									0.87	20.93	0.674
22									1.74	15.79	0.623
23									2.61	9.33	0.586
24									0	14.67	0.855
25	0.25	0.35	0.27	0.33	0.56	3	5.36	0.026	0.77	7.69	0.826
26									1.54	4.58	0.758
27									2.31	3.80	0.667
28						3	7.70			15.01	0.853
29						5	12.80			26.11	0.744
30	0.20	0.38	0.25	0.26	0.39	7	17.90	0.028	0	28.65	0.719
31						9	23.10			30.90	0.697
32						11	28.20			34.74	0.659

注: $S = \frac{d_n}{d_{95}}$; $h'_n = \frac{h_n}{\Delta/2}$ 。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 沙波对网格安装位置的制约

图 4 为冲刷坑人为塑造后的形态、网格铺设的状态, 以及在工况 13 下促淤试验完成后的冲刷坑修复效果。与其它试验工况一样, 促淤网格覆盖对已有的冲刷坑具有良好的促淤修复效果。

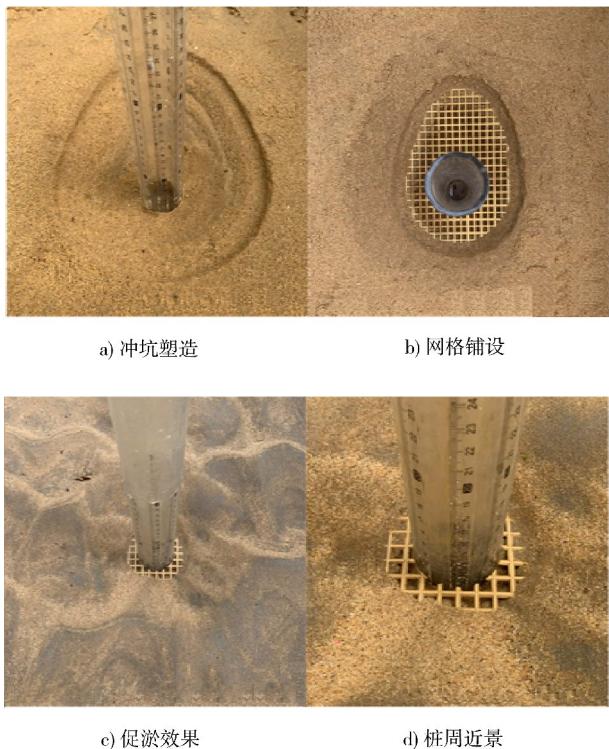


图 4 安装网格促淤效果

值得注意的是, 受沙波的影响, 促淤网格边缘易出现掏空现象, 这会使高速来流直接从网格下方穿过, 进而影响到网格的促淤修复效果。图 5 展示了促淤网格边缘掏空程度随网格相对安装位置的变化, 由图可知: 当网格相对安装位置 $h'_n = 0$ 时, 当沙波的波谷推进到网格区域时会使网格边缘下的泥沙被掏空, 导致网格下方桩周附近的冲刷深度较大, 不但影响网格的稳定性, 且降低促淤效果; 当 $h'_n = 0.87$ 时, 沙波波谷与网格高程基本平齐($h'_n \approx 1$), 虽然网格边缘出现了一点掏空现象, 但网格下方桩周附近的冲刷深度同 $h'_n = 0$ 相比则大幅减小; 当 $h'_n = 1.74$ 和 $h'_n = 2.61$ 时, 促淤网格边缘未出现掏空现象, 沙波的波谷位于促淤网格上方($h'_n > 1$), 网格下方桩周附近的冲刷深度进一步减小, 原有的冲刷坑被泥沙基本填满。因此,

从促淤网格的稳定性和促淤修复的效果上看, 促淤网格应安装在沙波波谷位置以下。

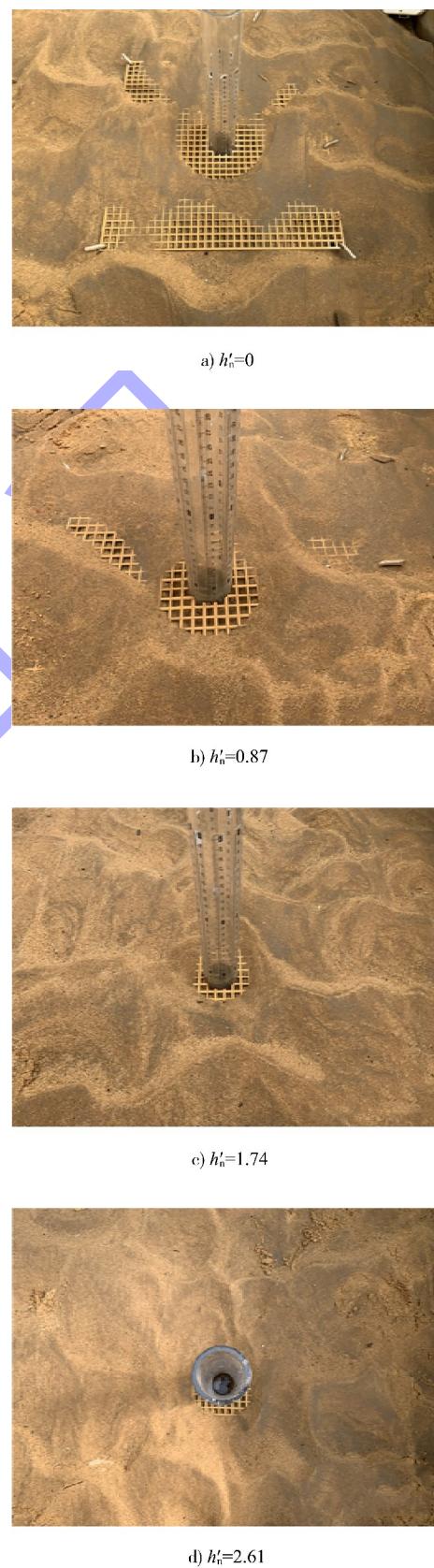
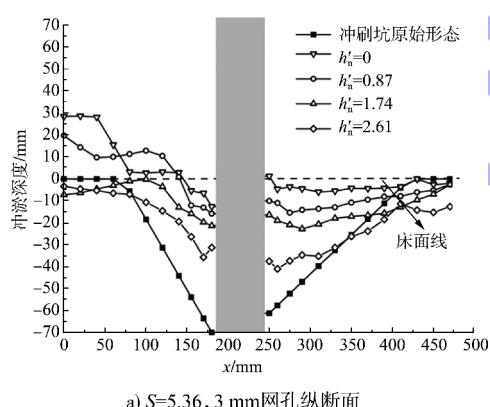
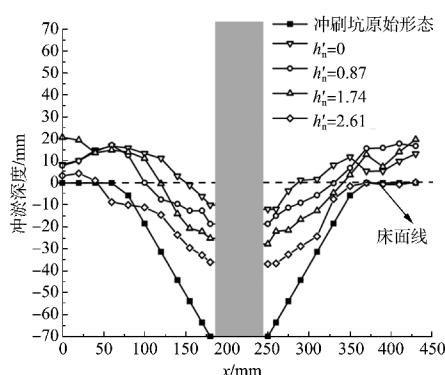
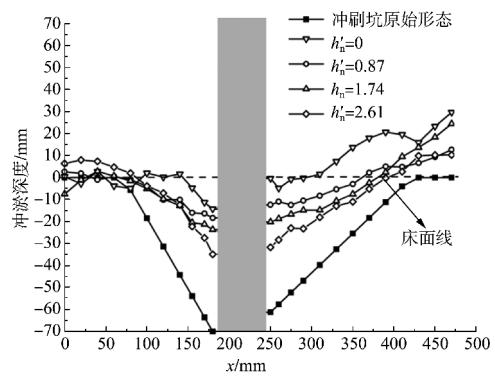
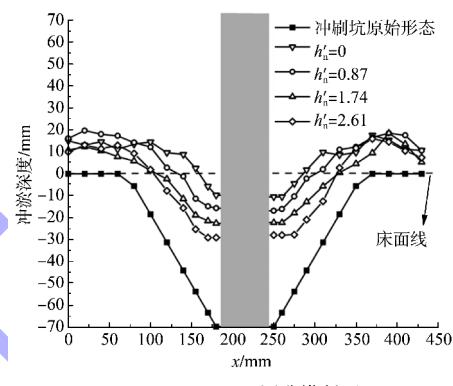
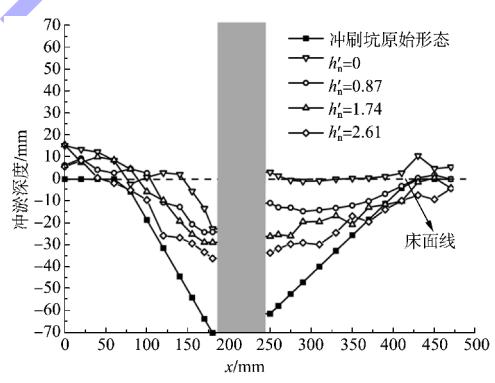
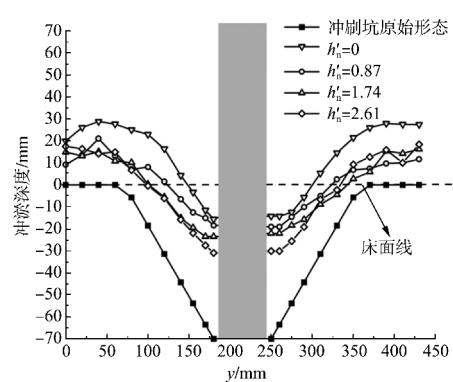


图 5 $S=16.07$ 时不同网格安装位置的促淤试验结果

2.3.2 网格不同安装位置对促淤修复率的影响

网格的相对安装位置对冲刷坑促淤修复率有重要影响。如图 6 所示，在 0.3 m/s 的来流条件下，不同安装位置处的促淤网格形成了不同的冲刷坑修复形态。网格相对安装位置 h'_n 越低，促淤效果受沙波的影响越小，但网格安装位置越低，越靠近冲刷坑底部，促淤网格下方被泥沙填满后，网格上方将不再有泥沙淤积，促淤容量越小，促淤修复率因此反而降低。表 2 的冲刷坑修复率表明：在相同的网孔孔径下，网格相对安装位置 h'_n 越小，泥沙促淤修复率越大；当网格相对孔径 $S < 12.50$ 时，冲刷坑网格安装位置以下的部分被泥沙基本填平，当 $S > 12.50$ 时，网格在不同安装位置处的促淤修复高度相差不大，但促淤修复率仍在 65% 左右。此外，网格还对原始床面具有一定的增阻防护作用，同时受到沙波的影响，网格覆盖下的墩前及墩侧的原始床面同样出现一定程度的淤积。

a) $S=5.36, 3 \text{ mm}$ 网孔纵断面b) $S=5.36, 3 \text{ mm}$ 网孔横断面c) $S=8.93, 5 \text{ mm}$ 网孔纵断面d) $S=8.93, 5 \text{ mm}$ 网孔横断面e) $S=12.50, 7 \text{ mm}$ 网孔纵断面f) $S=12.50, 7 \text{ mm}$ 网孔横断面

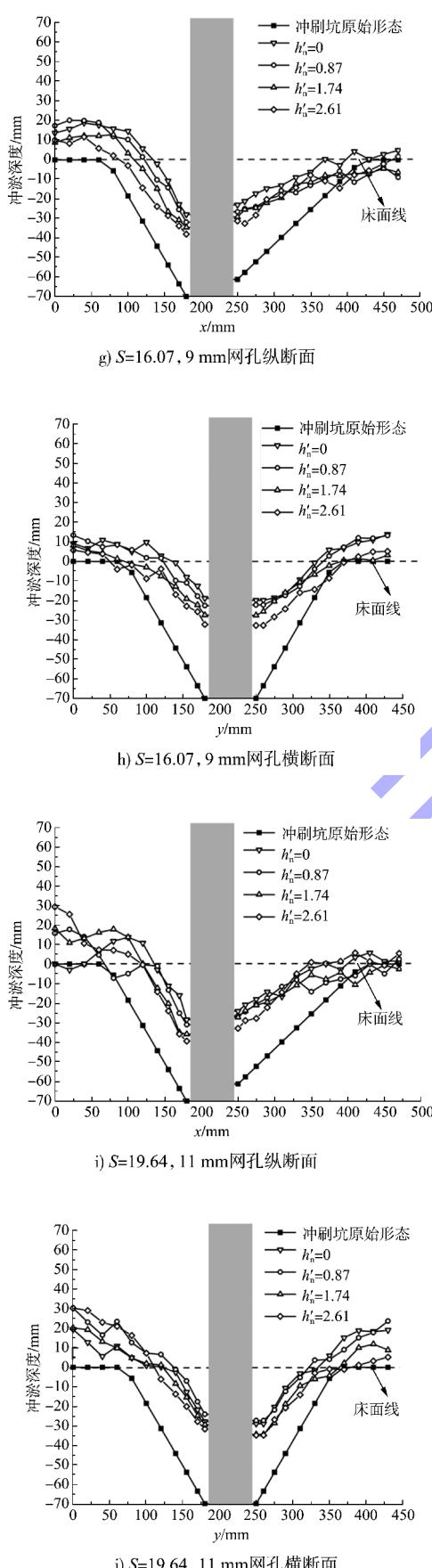


图 6 不同相对孔径网格防护下局部冲坑修复形态

2.3.3 公式参数率定

利用表 2 的试验数据进行多元回归分析, 得到遮蔽系数 ξ 的表达式为:

$$\xi = 0.25Fr^{0.36}\left(\frac{h}{d_n}\right)^{0.94}\left(\frac{d_{50}}{d_n}\right)^{-1.16}\left(\frac{h_n}{d_n} + 8.45\right) - 3.01\varphi^{0.84} \quad (7)$$

从而, 促淤网格防护下最终促淤深度的计算公式可写为:

$$h_s = \left[1 - 0.25Fr^{0.36}\left(\frac{h}{d_n}\right)^{0.94}\left(\frac{d_{50}}{d_n}\right)^{-1.16} \right. \\ \left. \left(\frac{h_n}{d_n} + 8.45\right)^{-3.01}\varphi^{0.84} \right] h_0 - h_n \quad (8)$$

图 7 为促淤网格防护下的最终促淤深度的实测值与拟合值比较, 相对误差在 $\pm 15\%$ 以内, 公式拟合效果良好。

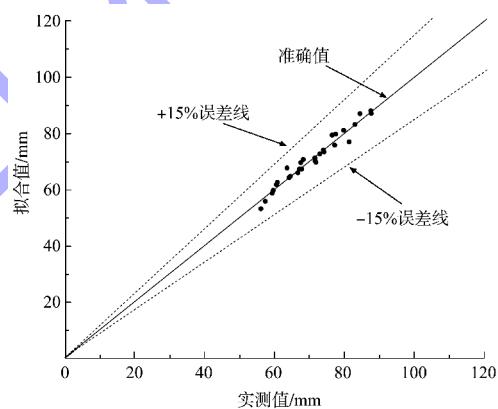


图 7 最终促淤深度实测值与拟合值的比较

冲刷坑修复率 η 则为:

$$\eta = 1 - 0.25Fr^{0.36}\left(\frac{h}{d_n}\right)^{0.94}\left(\frac{d_{50}}{d_n}\right)^{-1.16} \cdot \\ \left(\frac{h_n}{d_n} + 8.45\right)^{-3.01}\varphi^{0.84} - \frac{h_n}{h_0} \quad (9)$$

受试验工况所限, 式(8)(9)反映了来沙条件为中砂, 来流强度 $1.11 < v/v_c < 1.52$ 的浑水冲刷工况, 网格相对孔径 $5 < S < 30$, 相对安装位置 $0 < h'_n < 2.61$ 时的促淤网格防护下的最终促淤深度及冲刷坑修复率公式。

3 讨论

促淤网格能显著修复桩周已有冲刷坑, 其促淤修复率受网格安装位置、网孔孔径等的影响较

大。本研究的促淤网格安装位置及网孔孔径、来流速度、水深、泥沙粒径等的变化范围有限，且试验采用的桩径单一。因此，还需扩大网格安装位置、来流条件、泥沙粒径等的试验范围。另外，当泥沙为黏性时，由于颗粒很细，促淤网格可能增加冲刷坑内小尺度涡体的数量，进而影响冲刷坑内的淤积规律。此外，还需要考虑桩墩振动对促淤网格的促淤修复效果的影响^[17]。

促淤试验还表明，在流速、水深等条件不变的情况下，无论原始冲刷坑深度有多大，到达冲淤平衡状态时冲刷坑的底部高程几乎相同，即冲刷坑均会被网格促淤填充到同一高度，只是达到该冲淤平衡的耗时不同。本文中的原始冲刷深度统一按 HEC-18 公式取值，可能会与实际工程中的原始冲刷深度有偏差。另外，因沙波对促淤网格边缘有掏空效应，促淤网格必须安装在沙波波谷以下，故原冲刷坑修复率只能小于 100%。且随着促淤网格的安装位置降低，原冲刷坑的修复率减小。因此，促淤网格须安装在沙波波谷以下尽可能高的位置。

4 结论

1) 促淤网格覆盖对桩墩周围现有的冲刷坑具有良好的促淤修复效果，主要受促淤网格安装高度、网格的网孔大小等影响，来流强度的影响较小。

2) 为提高促淤网格的稳定性和对冲刷坑的促淤修复效果，促淤网格应安装在沙波波谷位置以下尽可能高的位置，以获得尽可能大的促淤量，增大网格的促淤深度。

3) 当网格相对孔径 $S < 12.50$ 时，网格安装位置以下的冲刷坑将被泥沙基本填平；当 $S > 12.50$ 时，促淤网格的安装位置对促淤修复的高度影响较小，促淤修复率仍达 65% 左右。

4) 针对本文试验条件范围，提出了最终促淤深度计算公式，可为今后对促淤网格的深入研究与工程应用提供参考。

参考文献：

- [1] 郭健,蒋兵.近 30 年桥梁基础冲刷研究进展及关键问题[J].中国公路学报,2020,33(7):1-16.
- [2] MONTALVO C, COOK W, KEENEY T. Retrospective analysis of hydraulic bridge collapse [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2020, 34(1): 04019111.
- [3] 秦泗凤.近期中国桥梁水毁事故回顾与分析[J].中外公路,2022,42(1): 133-138.
- [4] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers[J]. Journal of hydraulic engineering, 1992, 118 (9): 1260 -1269.
- [5] KHADEMGAHAEINY GH, ABRISHAMI J, ZARRATI A R, et al. Riprap design at bridge piers with limited scouring[J]. Sharif University of technology, 2020, 27(2): 588-595.
- [6] AKIB S. Reducing bridge pier scour using gabion mattresses filled with recycled and alternative materials[J]. Eng, 2020, 1(2): 188-210.
- [7] PAROLA A C, MAHAVADI S K, BROWN B M, et al. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour [J]. Journal of hydraulic engineering, 1996, 122(1): 35-40.
- [8] PANDEY M, AZAMATHULLA H M, CHAUDHURI S, et al. Reduction of time-dependent scour around piers using collars[J]. Ocean engineering, 2020 (1): 107692. 1-107692. 15
- [9] GRIS R B. Sheath for reducing local scour in bridge piers[C]// International Conference on Scour & Erosion, San Francisco: ASCE, 2010: 987-996.
- [10] WANG C, LIANG F, YU X. Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups [J]. Natural hazards, 2017, 85(3): 1417-1435.
- [11] 李彪.长江中游护滩工程边缘防冲促淤水草垫结构试验[J].水运工程, 2017(10): 171-178.
- [12] 王欣霖,张诚.仿生型柔性促淤护滩结构在汉江河口段航道整治工程中的试验研究[J].水运工程, 2022(3): 129-133.
- [13] 喻国良.河床与海床泥沙截留、促淤积防冲刷的装置: CN200510026599. 7[P]. 2005-10-26.
- [14] 赵寒燕.中性网格对圆桩局部冲刷的水动力弱化及防护效果研究[D].上海: 上海交通大学, 2022.
- [15] ARNESON L A, ZEVENBER L W, LAGASSE P F, et al. Evaluating scour at bridges[R]. Washington: Federal Highway Administration, 2012.
- [16] MEYER-PETER E, MULLER R. Formulas for bed-load transport [C]//Proceedings of the 2nd meeting of the international association for hydraulic structures research, Delft: IAHR, 1948: 39-64.
- [17] 孙慧,张民曦,喻国良,等.桥墩振动对其局部冲刷的影响[J].水利水电技术, 2019, 50(7): 137-143.

(本文编辑 王传瑜)