

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20231341

清水条件下桥墩局部冲刷坑底部粗化效应研究

武煜伦, 吴龙华, 杨校礼, 方陈卓

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在非均匀沙河床上, 桥墩局部冲刷坑底部粗化覆盖层会影响到桥墩的最大局部冲刷深度。通过水槽试验研究分析了单层非均匀沙河床上桥墩局部冲刷坑底部粗化覆盖层的级配、相对粗化度和不均匀程度。结果表明, 粗化覆盖层中泥沙的中值粒径随桥墩局部冲刷深度的增加而增加, 其相对粗化度随来流弗劳德数的增加而增加, 而不均匀程度则随来流弗劳德数的增加而减小。并在此基础上提出了桥墩局部冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的级配计算公式, 并利用实测资料验证了该公式具有良好的适用性和可靠性。

关键词: 桥墩; 最大局部冲刷深度; 粗化覆盖层; 泥沙颗粒级配; 相对粗化度; 不均匀程度

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0125-04

1 引言

桥墩的局部冲刷一直是影响桥梁安全的重要因素, 桥墩的局部冲刷深度与来流条件、桥墩体型、河床泥沙级配等因素相关。目前, 对由一般冲刷所形成的床面粗化覆盖层的泥沙颗粒级配已提出了多种不同的计算方法。如 SHEN H W 等^[1]对爱因斯坦隐暴参数和 Shields 曲线^[2]进行修正, 并结合可随初始床沙级配变化的床面切应力标准差得出河床床面粗化覆盖层泥沙级配计算方法; 李林林等^[3]运用概率分析法推导出河床粗化过程中床面泥沙可悬和可滚概率, 并将其代入床沙级配的概率计算模型中, 从而得出清水冲刷后河床表面粗化覆盖层的泥沙级配。然而对单层非均匀沙河床上桥墩局部冲刷坑底部的粗化覆盖层, 其级配组成尚未有确切的计算方法。为此, 本文利用水槽模型试验观测分析了单层非均匀沙河床上桥墩局部冲刷坑底部的粗化现象, 研究了冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的级配特征, 并结合已有研究成果建立桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层级配的计算公式, 实测资料验证该公式适用性、可靠性较好。

2 试验方案设计

2.1 试验装置与量测

桥墩局部冲刷试验在水槽中开展, 水槽长 12 m, 宽 0.4 m, 高 70 cm, 见图 1(a)。在水槽进水口处设置整流措施以保持来流平顺。试验段设置在进水口下游 5 m 处, 长 2 m, 底部较水槽底面低 20 cm, 用以铺设泥沙和布置桥墩。桥墩用直径 8 cm、高 60 cm 的有机玻璃圆柱进行模拟, 并布置在试验段中央, 见图 1(b); 试验开始时使初始床面与水槽底面保持一致。在水槽末端设置尾门以调节水位, 并利用测针量测水位, 测量精度为 0.1 mm; 进水流量采用电磁流量计测量, 测量等级为 0.2 级。

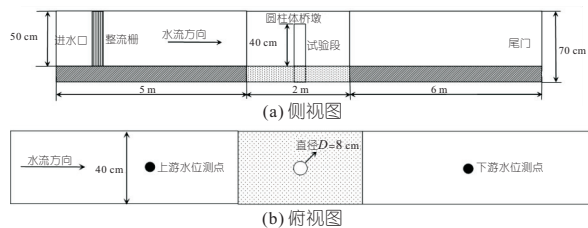


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental set up

桥墩局部冲刷坑地形采用自行开发的多功能测量工作平台装置进行测量, 测量精度达 0.1 mm, 见图 2。首先利用水平和横向轨道调节移动平台和测深针位置, 使得测深针恰好位于测量点的正上方; 然后将测深针的可视电子测针移动至测量点附近, 并调节微动齿轮使可视电子测针接触测量点; 最后根据测量点数据得到该点冲刷深度。

收稿日期: 2023-08-14, 修回日期: 2023-09-12

作者简介: 武煜伦(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学, E-mail: 695958151@qq.com

通讯作者: 吴龙华(1974-), 男, 副教授、硕导, 研究方向为工程水力学, E-mail: jxbywlh2003@hhu.edu.cn

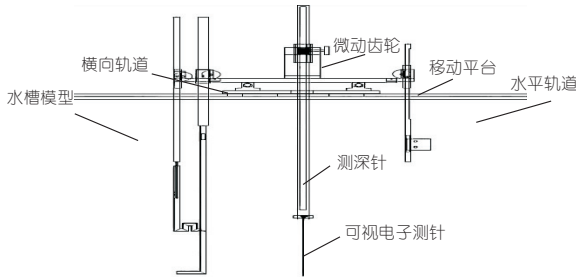


图 2 多功能测量工作平台装置示意图

Fig. 2 Diagram of multifunctional measurement work platform device

2.2 试验工况

试验选取 4 组中值粒径(d_{50s})分别为 0.55、0.77、0.88、1.15 mm 的天然非均匀沙模拟单层河床,分别记为 S-A、S-B、S-C、S-D,级配曲线见图 3。试验工况见表 1(表 1 中 V 为墩前行进流速; Q 为来流流量; h 为上游水深; $\sigma_{mg} = \sqrt{(d_{84.1}/d_{15.9})}$ 为河床泥沙的不均匀程度^[4]。

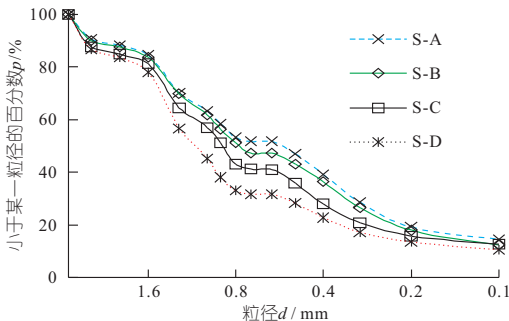


图 3 试验用沙级配曲线

Fig. 3 Experimental sediment gradation curve

表 1 试验工况

Tab. 1 Test working conditions

工况	$V/(m \cdot s^{-1})$	d_{50s}/mm	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	h/m	σ_{mg}
RunA1	0.313	0.55	90	0.2	3.24
RunA2	0.375	0.55	108		3.24
RunA3	0.406	0.55	117		3.24
RunA4	0.438	0.55	126		3.24
RunB1	0.313	0.77	90		3.35
RunB2	0.375	0.77	108		3.35
RunB3	0.406	0.77	117		3.35
RunB4	0.438	0.77	126		3.35
RunC1	0.250	0.88	72		3.44
RunC2	0.281	0.88	81		3.44
RunC3	0.313	0.88	90		3.44
RunC4	0.375	0.88	108		3.44
RunC5	0.406	0.88	117		3.44
RunC6	0.438	0.88	126		3.44
RunD1	0.313	1.15	90		3.59
RunD2	0.375	1.15	108		3.59
RunD3	0.406	1.15	117		3.59
RunD4	0.438	1.15	126		3.59

试验过程中保持来流为清水、恒定流状态,每组工况均保持相同上游水深且冲刷试验历时均超过 12 h,直至桥墩冲刷达到稳定。在达到冲刷稳

定后关闭水槽尾门并停止进流,待水槽试验段内的水自然排干并静置 6 h 后进行地形测量和冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙颗粒采集。当来流流量超过 $115 m^3/h$ 时,冲刷坑形态将受到边壁轻微影响,但对冲刷坑深度及冲刷坑底部粗化覆盖层的影响很小,可忽略不计。

桥墩局部最大冲刷坑呈左右对称结构,且在冲刷坑底部墩前处形成非常明显的粗颗粒覆盖层,见图 4。由于最大冲刷深度在墩前,因此选取冲刷坑底部墩前 x 轴线两侧各 45° 区域为泥沙采样区域,见图 5。进行泥沙颗粒采集时,首先将胶水均匀涂抹在透明保鲜膜上,然后将其轻轻覆盖在桥墩冲刷坑底部床面粗化覆盖层上,静置 1~2 min 后将其取下。重复上述过程,分层收集粗化覆盖层的泥沙颗粒并测算每一层的泥沙级配曲线,当某一层泥沙级配曲线与床沙初始级配曲线的相关系数 $r \geq 0.995$ 时,则该层以上泥沙为粗化覆盖层泥沙。



图 4 桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层 (RunC6)

Fig. 4 Armor layer at the bottom of maximum local scour pit of pier (RunC6)

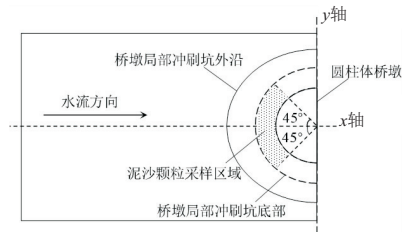


图 5 采样区域示意图

Fig. 5 Diagram of sampling area for sediment particles

3 清水条件下桥墩局部冲刷坑底部粗化效应研究

3.1 泥沙颗粒级配

各工况下桥墩最大局部冲刷深度 h_b 见表 2,桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层颗粒级配曲线见图 6。由图 6 可看出,在冲坑稳定后,与初始床沙级配相比,冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的粗化现象十分显著。各工况下粗化覆盖层的中值粒径 d_{50c} 见表 3。由表 3 可看出,随来流流量的增大,冲刷稳定后底部粗化覆盖层的中值粒径也在逐渐增大。

表 2 桥墩局部冲刷试验结果

Tab. 2 Test results of local scour on bridge piers

工况	$V/(m \cdot s^{-1})$	d_{50c}/mm	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	h_b/cm
RunA1	0.313	0.55	90	6.02
RunA2	0.375	0.55	108	9.47
RunA3	0.406	0.55	117	10.25
RunA4	0.438	0.55	126	11.68
RunB1	0.313	0.77	90	5.58
RunB2	0.375	0.77	108	8.67
RunB3	0.406	0.77	117	9.81
RunB4	0.438	0.77	126	10.99
RunC1	0.250	0.88	72	3.76
RunC2	0.281	0.88	81	4.22
RunC3	0.313	0.88	90	5.03
RunC4	0.375	0.88	108	7.25
RunC5	0.406	0.88	117	9.21
RunC6	0.438	0.88	126	9.85
RunD1	0.313	1.15	90	4.12
RunD2	0.375	1.15	108	6.17
RunD3	0.406	1.15	117	7.15
RunD4	0.438	1.15	126	8.76

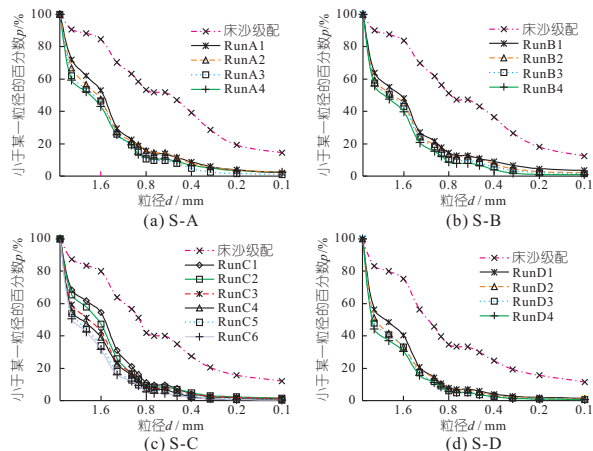


图 6 桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙颗粒级配曲线
Fig. 6 Sediment particle gradation curve of the armor layer at the bottom of the pier scour pit

表 3 各工况冲刷坑底部粗化覆盖层的中值粒径
Tab. 3 Median particle size of the armor layer at the bottom of the scour pit

工况	$V/(m \cdot s^{-1})$	d_{50c}/mm	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	d_{50c}/mm
RunA1	0.313	0.55	90	1.55
RunA2	0.375	0.55	108	1.70
RunA3	0.406	0.55	117	1.80
RunA4	0.438	0.55	126	1.92
RunB1	0.313	0.77	90	1.70
RunB2	0.375	0.77	108	1.91
RunB3	0.406	0.77	117	2.00
RunB4	0.438	0.77	126	2.13
RunC1	0.250	0.88	72	1.58
RunC2	0.281	0.88	81	1.76
RunC3	0.313	0.88	90	1.88
RunC4	0.375	0.88	108	2.12
RunC5	0.406	0.88	117	2.25
RunC6	0.438	0.88	126	2.39
RunD1	0.313	1.15	90	2.13
RunD2	0.375	1.15	108	2.39
RunD3	0.406	1.15	117	2.51
RunD4	0.438	1.15	126	2.62

这主要是因为在水位保持不变的情况下,随来流流量的增大,流速也将相应增大,冲刷坑内被挟带至下游的泥沙颗粒粒径进一步增大,从而使冲刷坑内遗留下来的泥沙中值粒径增大。

3.2 相对粗化度及不均匀程度

为分析桥墩局部最大冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙相较于初始床沙的粗化程度,定义相对粗化度 C 为:

$$C = \sqrt{(d_{50c} - d_{50s}) / d_{50s}} \quad (1)$$

来流弗劳德数 Fr 定义为:

$$Fr = V / \sqrt{gh} \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度, m/s^2 。

不同来流条件下相对粗化度 C 与来流 Fr 关系曲线见图 7。由图 7 可看出,相对粗化度 C 随 Fr 的增加而增加。表明随 Fr 的增大,冲刷坑内能被水流挟带至下游的最大泥沙颗粒粒径随之也变大,从而使得冲刷坑内粗化覆盖层泥沙的粗化更为显著。另外,在相同来流条件下(弗劳德数相同),在床沙 A 上桥墩局部冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的相对粗化度要比在床沙 D 上大。这是由于在相同来流条件下,对于水流所能挟带至下游的最大泥沙颗粒粒径 d_m ,在床沙 A 中小于 d_m 的泥沙颗粒所占比例相对更高,从而造成该工况下桥墩局部冲刷坑内粗化覆盖层的相对粗化度更大。

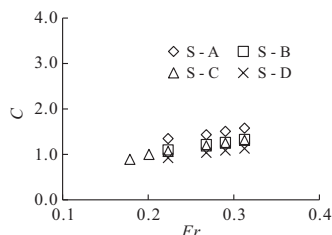


图 7 相对粗化度 C 与来流 Fr 关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between relative coarseness C and incoming flow Fr

不同工况下桥墩局部冲刷坑内粗化覆盖层泥沙的不均匀程度 σ_{mg} 随来流 Fr 的变化见图 8。由图 8 可看出,随来流 Fr 的增加,粗化覆盖层的 σ_{mg} 逐渐减小。这表明随水流条件的增强,粗化覆盖层内泥沙的非均匀程度逐渐降低并趋于均匀。

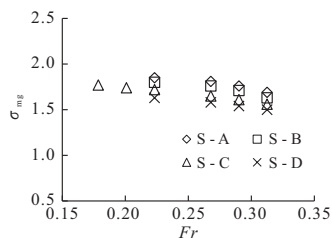


图 8 粗化覆盖层 σ_{mg} 与来流 Fr 关系曲线

Fig. 8 Relationship curve armor layer σ_{mg} and incoming flow Fr

4 桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层级配计算

何文社^[4]按照运动状态与流速及起动概率的关系分别定义了泥沙弱动、中动、普遍及强烈运动四种运动状态,并从临界无量纲切应力参数表达式中得出在弱动标准下泥沙颗粒的最大起动粒径 d_{cmax} 为:

$$d_{\text{cmax}} = \tau / [0.02(\gamma_s - \gamma)] \quad (3)$$

式中, τ 为水流切应力, $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; γ_s 为泥沙重度, N/m^3 ; γ 为水的重度, N/m^3 。

最终得到在一般清水冲刷条件下形成的床面粗化层泥沙级配计算公式,级配百分数 p_i 为:

$$\left\{ \begin{aligned} p_i &= \frac{(d_i d_{\text{cmax}})^{1/2} p_{0i}}{\sum_{i=1}^m d_i p_{0i} + \sum_{i=m+1}^n (d_i d_{\text{cmax}})^{1/2} p_{0i}} \times 100\% \\ & \quad d_i \geq d_{\text{cmax}} \\ p_i &= \frac{d_i p_{0i}}{\sum_{i=1}^m d_i p_{0i} + \sum_{i=m+1}^n (d_i d_{\text{cmax}})^{1/2} p_{0i}} \times 100\% \\ & \quad d_i < d_{\text{cmax}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中, p_i 为床沙粗化覆盖层中粒径为 d_i 的颗粒百分数; p_{0i} 为初始床沙中粒径为 d_i 的颗粒所占百分数; m 为初始床沙级配中,从假设最小粒径所对应的分组数为 1 开始,至最大起动粒径 d_{cmax} 所对应的泥沙颗粒分组数, $1 \leq m \leq n$; n 为初始床沙级配总分组数。

由于式(4)是在河床一般冲刷条件下得到的,并未考虑桥墩局部冲刷坑的影响,因此无法利用该式直接计算桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的级配。为此,本文结合贝叶斯概率公式形式并综合考虑桥墩最大局部冲刷深度、水流条件及初始床沙级配等因素的影响,重新构建适用于计算桥墩冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙级配的计算公式。在弱动标准下,级配百分数 p_i 为:

$$\left\{ \begin{aligned} p_i &= \frac{d_i^k d_{\text{cmax}}^{k-1} p_{0i}}{\sum_{i=1}^m d_i p_{0i} + \sum_{i=m+1}^n d_i^k d_{\text{cmax}}^{k-1} p_{0i}} \times 100\% \\ & \quad d_i \geq d_{\text{cmax}} \\ p_i &= \frac{d_i p_{0i}}{\sum_{i=1}^m d_i p_{0i} + \sum_{i=m+1}^n d_i^k d_{\text{cmax}}^{k-1} p_{0i}} \times 100\% \\ & \quad d_i < d_{\text{cmax}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中 $k = 140d_{50s}/h + 1.2h_b/h + 0.45$

为验证式(5)的适用性和可靠性,将冲刷坑底部粗化覆盖层的泥沙级配实测曲线与利用式(4)、(5)计算的结果进行对比,见图 9。

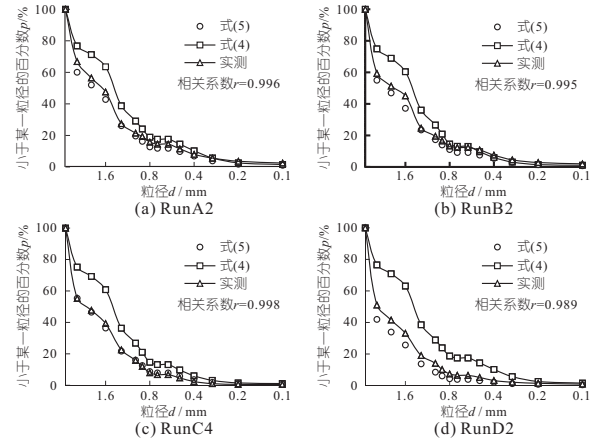


图 9 粗化覆盖层的泥沙级配计算结果与实测结果对比
Fig. 9 Comparison between formula calculation results and actual measurement results

由图 9 可看出,利用式(5)计算得到的冲刷坑底部粗化覆盖层级配曲线与实测级配曲线基本吻合,数据序列相关系数达到 0.985 以上。而式(4)计算得到的相应级配曲线与实测级配曲线则存在显著的偏离。因此,式(5)在试验情况下具有更好的适用性和可靠性。

5 结论

a. 本文通过水槽试验研究了单层非均匀沙河床上桥墩最大局部冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙的级配特性,发现相对粗化度随来流 Fr 的增加而增加。在相同来流条件下,床沙初始中值粒径同相对粗化度呈反比。不均匀程度随来流 Fr 的增大而减小,粗化覆盖层泥沙组成趋于均匀。

b. 提出了桥墩局部冲刷坑底部粗化覆盖层泥沙级配计算公式,并利用实验资料验证了该公式具有较高计算精度。由于受试验资料数据限制,该公式在其他条件下的适用性和可靠性有待进一步的验证。

参考文献:

[1] SHEN H W, LU J Y. Development and prediction of bed armoring[J]. Journal of hydraulic engineering, 1983, 109(4): 611-629.
[2] SHIELDS A. Anwendung der aechlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung [J]. Verschanstalt fue wasserbau und schiffbam, 1936.

[5] 李有发, 杨西梅, 何鹏飞. 浅谈南水北调 SG9 标曹骂沟渡槽槽身 C50 预应力泵送混凝土施工质量控制[J]. 四川水力发电, 2014, 33(1):81-84.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010(2015 年版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB 50176-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范:

SL191-2008[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[10] 曹为民, 王长德, 夏富洲, 等. 南水北调工程若干关键技术研究与工程应用(2006BAB04A05): 大流量预应力渡槽设计和施工技术研究[R]. 武汉大学, 河海大学, 南水北调中线干线工程建设管理局, 2010.

[11] 宁交贤, 何思龙. 高温应变电测技术研究的现状和发展[J]. 力学与实践, 1982(3): 24-27.

[12] 黄远智, 邢毅. 聚氨酯硬泡体防水保温材料在工程上的应用[J]. 建筑技术, 2009, 40(7): 607-608.

[13] 杜聘, 杨军. 聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 138-142.

[14] 李文超. 渡槽保温材料的制备与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.

Simulation and Experimental Study of Temperature Stress of Aqueduct Wall Plate

LI Bin¹, ZHANG Pei-lin¹, WANG Hong-ji², HE Qi-yu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Central-southern Safety and Environment Technology Institute Co., LTD., Wuhan 430051, China)

Abstract: Based on the temperature load on the wall slab of a large aqueduct when the temperature suddenly drops, the temperature self-confinement stress of the upper surface of the concrete slab was tested and analyzed. The temperature difference between upper and lower surfaces of concrete slabs at different cooling rates and the self-constrained principal stress of concrete slab surface temperature at 1 h at a cooling rate of 10 °C/h were measured. The accuracy of finite element modeling was verified by comparing the numerical value of concrete transient temperature stress simulated by finite element method with the experimental test data. On this basis, the influence of cooling rate on transient temperature and stress field of aqueduct was analyzed. The impact of different insulation materials on surface temperature and stress field of aqueduct was discussed. The results show that the temperature tensile stress on the aqueduct surface will increase at a faster rate with the increase of the ambient temperature decreasing rate. Compared with the external surface temperature stress of the aqueduct without insulation measures, the tensile stress of the external surface temperature of the U-shaped aqueduct was reduced by 83%, 80% and 68%, respectively, when the polyurethane, polystyrene board and vitrified microbeads with 2mm thickness were adopted. Considering the cost and construction technology, vitrified microbead insulation materials are more suitable as thermal insulation materials on the outer surface of aqueducts.

Key words: aqueduct; concrete; self-confining stress; cooling rate; numerical simulation



(上接第 128 页)

[3] 李林林, 夏军强, 周美蓉, 等. 基于起动概率的清水冲刷后河床粗化覆盖层级配的计算方法[J]. 应用

基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1281-1293.

[4] 何文社. 非均匀沙运动特性研究[D]. 成都:四川大学, 2002.

Research on Coarsening Effect of Local Scour Pit Bottom on Bridge Piers Under Clear Water Conditions

WU Yu-lun, WU Long-hua, YANG Xiao-li, FANG Chen-zhuo

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the non-uniform sand river bed, the armor layer at the bottom of the bridge pier local scour pit will affect the maximum local scour depth of the bridge pier. Through a flume model experiment, the sediment gradation, relative coarseness, and non-uniformity of the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier were studied. The results indicate that the median particle size of the sediment in the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier increases with the increase of the local scour depth on the bridge pier, and its relative coarsening degree increases with the increase of the Froude number, while the degree of non-uniformity decreases with the increase of the Froude number. A formula for calculating sediment particle grading in the armor layer at the bottom of the local scour pit on the bridge pier has been proposed. The applicability and reliability of the proposed formula is verified by the measured data.

Key words: bridge pier; maximum local scour depth; armor layer; sediment particle grading; relative coarseness; non-uniformity