

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.009

涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验

黄君宝^{1,2},肖厅厅³,孙志林^{1,4},张芝永²,曾 剑²

(1. 浙江大学海洋学院,浙江 舟山 316021;

2. 浙江省水利河口研究院浙江省河口海岸重点实验室,浙江 杭州 310020;

3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550081;4. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要: 针对河口地区桥墩等桩式建筑物在涌潮水流作用下出现的局部冲刷问题,采用物理模型试验对涌潮水流引发桥墩局部冲刷的机理以及局部冲刷坑形态变化进行研究。试验结果表明:涌潮水流引发桥墩局部冲刷过程中桥墩局部切应力逐渐衰减,潮头水流虽然引发较大的床面切应力,但是由于作用时间短,所以只造成大量泥沙起动,在后续快水阶段桥墩局部冲刷迅速发展;涌潮强度和弗劳德数越大,桥墩局部冲刷越强烈;不同截面形式的桥墩,方形桥墩在局部冲刷坑发展过程中,由于涌潮水流下切强度更大,引发了较强的涡系结构,导致迎水面冲刷比侧面绕流冲刷更强烈,圆形桥墩迎水面和侧面冲刷程度相差不大;方形桥墩进行不对称旋转时产生的冲刷深度比对称旋转时大。对试验数据进行多元回归分析后得到涌潮水流引发桥墩局部冲刷的综合计算公式,验证结果表明该公式具有较好的预测精度,与试验值最大误差不超过 12%。

关键词: 涌潮;桥墩;局部冲刷;冲刷机理;经验公式

中图分类号:TV131 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)05-0441-06

Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore

HUANG Junbao^{1,2}, XIAO Tingting³, SUN Zhilin^{1,4}, ZHANG Zhiyong², ZENG Jian²

(1. Ocean College,Zhejiang University,Zhoushan 316021,China;

2. Key Lab. of Estuary and Coast of Zhejiang Province,Zhejiang Inst. of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020,China;

3. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited,Guiyang 550081,China;

4. College of Civil Engineering and Architecture,Zhejiang University, Hangzhou 310058,China)

Abstract: For the local scouring problem caused by the tidal current flow of pile-type buildings such as bridge piers in the estuary area,the physical model is adopted in this study to reveal the mechanism process of local scouring of piers caused by tidal currents and the morphological changes of local scouring pits. The test results show that the local shear stress of the pier is gradually attenuated during the local scouring process of the pier,and the tidal current causes a large bed shear stress. However,due to the short acting time,only a large amount of sediment is started in the initial stage,and in the subsequent stage of fast water,the local scouring of the bridge pier is rapidly developed. The greater the tidal bore intensity and Froude numbers of the tidal height,the stronger the local scouring of the pier. For bridge piers of square shape,in the develop process of local scouring pit,the stronger vortex structure is triggered by the higher shear strength of tidal bore,which makes the water surface flushing more intense than the side flow scouring. The rounded piers have little difference in the water surface and side scouring. Meanwhile,the square piers in the asymmetric rotation scouring have a more scouring depth than that in the symmetric rotation scouring. After the multivariate regression analysis of test data,the comprehensive calculation formula of the local scour of pier caused by the tidal tide is obtained. The formula shows that it has better prediction accuracy and the maximum error with the test value does not exceed 12%.

Key words: tidal bore; pier; local scour; scour mechanical; empirical formula

桥墩局部冲刷一直是国内外学者关注的热点问题,目前已有众多学者从桥墩形式^[1-2]、床沙特性^[3-4]、桥墩布置形式^[5-6]等角度开展了大量的研究工作,但他们的试验条件大多是恒定流条件。涌潮是一种水位、流速急剧变化的涨潮潮波前锋线,其基本形态如图 1 所示(图中 h_0 和 v_0 为天然河道中涌潮生成时上游河道内

基金项目: 国家自然科学基金(51609214)
作者简介: 黄君宝(1978—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事水沙动力学及河口海岸数值模拟研究。E-mail: gzxiaott@163.com
引用本文: 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):441-446.
HUANG Junbao,XIAO Tingting,SUN Zhilin,et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(5):441-446.

的水深和径流流速; H 为涌潮高度; v_a 为传播速度)。当外海潮波传播至河口时,下游河口水位 h_1 和流速 v_1 突然暴涨后在河道内产生涌潮并向上传播。涌潮在传播过程中,涌潮水流内部紊动特性强烈,尤其是涌潮以后的水体其水位和流速依旧较大,即俗称的快水阶段,这和常见的恒定流或波浪等的水力特性明显不同,其对桥墩等建筑物局部水动力结构以及泥沙输运等产生的影响机理等也不能完全用恒定流下得出的规律进行解释。

涌潮存在3种典型形态^[7]:(a)强度较小时,涌潮由一系列平行向前推进的波构成波列,通常称为波状涌潮;(b)强度较大时,自由表面破碎严重,形成大量的旋滚,通常称为强旋滚涌潮;(c)涌潮形态介于两者之间,即涌潮潮头轻微破碎但是潮头后续又呈现出波列向前推进时,通常称为弱旋滚涌潮。涌潮水流的水力特性已有大量学者^[8-10]开展了研究,但对于涌潮水流引发的局部冲刷问题的研究成果还很少。Nikeghbali等^[11]对涌潮水流在动床上的传播特性进行数值模拟发现,涌潮潮头内部旋滚对泥沙悬浮过程有明显影响。还有部分学者对与涌潮潮头类似的海啸波引发的局部冲刷问题进行了探索^[12-13],但是这类海啸波多采用溃坝水流的方式或利用多个 N 波进行叠加,缺少涌潮流水的快水作用阶段。因此本文利用能较好复演真实涌潮水流条件的涌潮水槽开展物理模型试验,对涌潮水流引发桥墩局部冲刷的机理以及冲刷坑形态进行分析,再利用试验结果拟合涌潮水流作用下桥墩局部冲刷深度计算公式,以期为实际工程提供参考。

1 试验布置与方案设计

1.1 试验布置

试验在浙江省水利河口研究院六堡实验基地多功能涌潮水槽中进行,水槽长50 m,宽1.2 m,高0.6 m。目前该水槽对涌潮模拟保持高精度复演的能力在国内处于领先水平,其准确性已经得到验证^[14]。为了避免进出口边界水流波动对试验过程的影响,将泥沙层铺设在水槽中部,厚度为0.09 m,选用的无黏性泥沙颗粒中值粒径 d_{50} 为0.32 mm,密度 ρ_s 为2 600 kg/m³,试验桥墩采用有机玻璃材料制成。利用珠江水利科学研究院研发的Bore2010涌潮测控系统调节水槽两端水泵运行频率进而产生涌潮水流,在距离桥墩前后各1 m处分别架设单线钽丝电容式波高仪并配套使用DJ800型多功能采集仪,试验布置和试验所有桥墩形式如图2所示。

试验过程中,首先往水池中加水至试验所需深度,在此过程尽可能保持水槽中水流流速小于泥沙启动流速,并在加水结束后对动床区域重新进行平整处理。然后再根据试验所需条件通过测控设备改变水池两端运行频率,在水槽中产生从下游往上传播的涌潮水流。根据模型比尺及钱塘江涌潮实测资料,拟定试验中当涌潮水流传播经过桥墩6 s后将上游水槽末端闸板自动放平,以此来模拟涌潮流水的快水阶段,从而使涌潮水流到达水槽末端时能直接落入回水池中,以免在水槽中出现潮头反射现象,对试验结果产生影响。

1.2 试验方案设计

涌潮水流作用下无黏性沙面上单桥墩局部冲刷深度 h_s 主要取决于桥墩的几何特征参数、涌潮水流特征参数、床沙特征参数等,因此可以得出:

$$f(D, H, h_0, u, \rho, \mu, g, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, v_c, h_s) = 0$$

(1)

式中: D ——桥墩阻水宽度; ρ ——水流密度; μ ——水的动力黏滞系数; g ——重力加速度; σ_g ——标准差; v_c ——床面泥沙启动流速。

如果不考虑泥沙层的影响,假定床面泥沙均匀,则可忽略式中 d_{50} 、 σ_g 、 ρ_s 、 v_c 的影响,式(1)可简化为

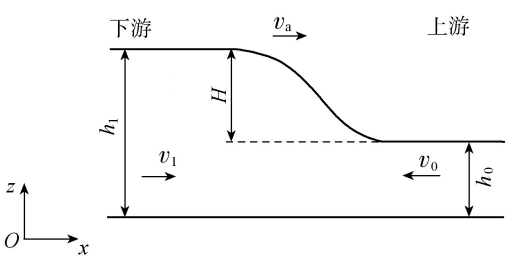
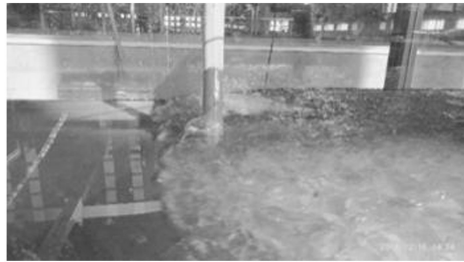


图1 涌潮水流基本形态
Fig.1 Basic layout of tidal bore



(a) 试验布置



(b) 桥墩形式

图2 物理试验模型布置

Fig.2 Model layout of physical test

$$f(D,H,h_0,u,\rho,\mu,g,h_s)=0 \tag{2}$$

选取 D,u,μ 为基本变量,利用 Buckingham- π 定理可得:

$$f\left(\frac{H}{D},\frac{h_0}{D},\frac{\rho u D}{\mu},\frac{g D}{u^2},\frac{h_s}{D}\right)=0 \tag{3}$$

式中: $\rho u D/\mu$ ——雷诺数项,由于桥墩局部冲刷过程为紊流过程,因此可忽略该项的影响。 $g D/u^2$ 项可用弗劳德数 Fr 表示,于是式(3)可简化为

$$f\left(\frac{H}{D},\frac{h_0}{D},Fr,\frac{h_s}{D}\right)=0 \tag{4}$$

从而涌潮水流作用下桥墩局部冲刷深度可以表示为无量纲形式:

$$\frac{h_s}{D}=k\left(\frac{H}{D}\right)^x\left(\frac{h_0}{D}\right)^yFr^z \tag{5}$$

在本次试验结果中随机选取 50 组数据对式(5)进行参数率定,最终得到的表达式为

$$\frac{h_s}{D}=0.947\left(\frac{H}{D}\right)^{0.837}\left(\frac{h_0}{D}\right)^{-0.392}Fr^{0.06} \tag{6}$$

从式(6)可以发现涌潮作用下桥墩局部冲刷深度取决于涌潮参数的组合,因此本次试验主要控制 h_0 和 H ,根据黄静等^[15]对钱塘江地区涌潮特性的分析,结合水槽模拟能力确定具体试验方案为 $h_0=0.03\sim 0.08\text{ m},H=0.04\sim 0.10\text{ m}$ 。

2 结果分析

2.1 涌潮作用下桥墩局部冲刷机理

研究表明,床面泥沙起动可以用临界希尔兹数 θ_{cr} 来确定。当床面希尔兹数 $\theta>\theta_{cr}$ 时泥沙起动。而 θ 与床面切应力成正比,因此可以尝试对涌潮水流作用下床面切应力变化情况进行分析,从而对涌潮水流作用下桥墩局部的冲刷过程进行探索。由于试验过程中对床面切应力的测量存在一定困难,所以首先借助于数值模拟对涌潮水流作用下、定床条件下桥墩局部切应力分布进行分析,采用的数值模拟方法与张芝永等^[4]一致,其准确性已得到验证。为了更好地描述涌潮水流作用下桥墩局部切应力的变化,引入切应力放大系数 α :

$$\alpha=\tau/\tau_0$$

式中: τ ——桥墩局部床面切应力; τ_0 ——无桥墩时的床面切应力。

图 3 为 $h_0=0.05\text{ m},H=0.04\text{ m}$ 涌潮条件下桥墩局部床面切应力放大系数变化示意图,涌潮方向与 x 正向一致。涌潮潮头刚到桥墩附近时,桥墩两侧床面切应力最大,迎水面切应力放大,随后最大切应力区在潮头绕流过程中逐渐向两侧外移;涌潮潮头水流绕流过程中最大切应力区由桥墩两侧逐渐转移到桥墩背水面

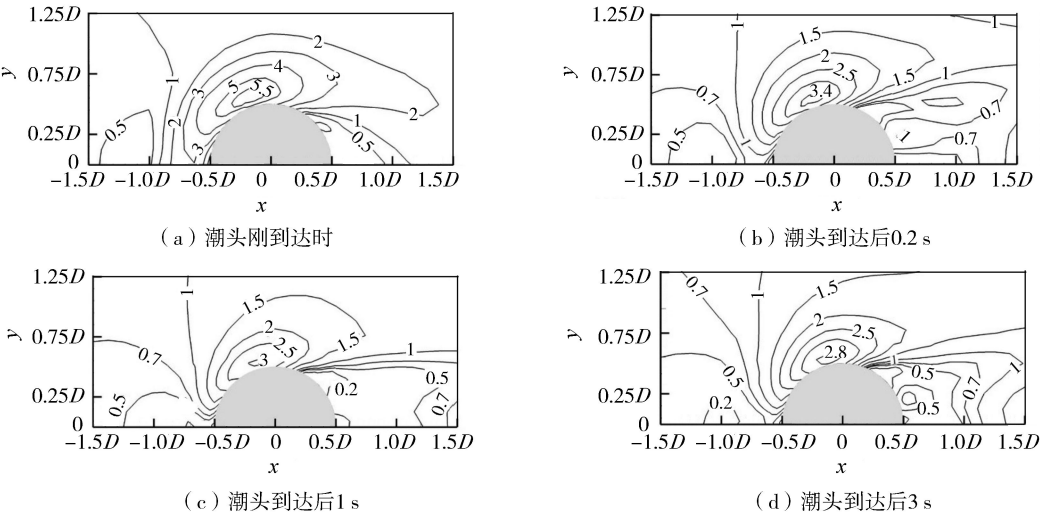


图 3 桥墩局部床面切应力放大系数变化

Fig.3 Amplification factor change of shear stress in local bed of bridge pier

侧后方;潮头传播经过桥墩一段时间后,在紧随而来的快水作用下,桥墩局部床面切应力放大系数明显不如潮头水流作用阶段大,随着作用时间的增加,切应力放大系数逐渐衰减。从图3可以发现,涌潮水流作用于桥墩局部过程中,桥墩两侧切应力放大系数明显较大。

对于涌潮水流引发桥墩局部冲淤而言,潮头水流蕴含较大流速且内部水质点紊动强烈。当潮头水流传播至桥墩附近时,首先在桥墩两侧床面产生较大的切应力,此时冲刷坑开始逐渐发展。但要说明的是由于潮头水流传播速度较快,对冲刷过程产生的作用时间较短,涌潮水流作用下桥墩局部冲刷过程主要发生在快水水流阶段。涌潮水流在遇到桥墩阻碍时,表层水体受桥墩阻水作用及下层水流的顶托作用,会在桥墩迎水面出现局部垂向滞流,滞流向上运动,在表面形成漩涡的上升流和沿桥墩表面向下运动冲击床面的下潜流,两股水流的分离点称为驻点。上升流沿桥墩表面向上抬升,抬升过程中在表层水体处形成与来流方向相反的旋滚涌波,抬高到一定高度后由于重力作用又沿桥墩表面向下运动,这就是俗称的弓形波。下潜流向下冲刷床面的过程中,由于桥墩局部水体在不同流层之间存在速度差,在液体本身黏滞性和速度差的作用下,在墩前底部产生一种向下翻滚的马蹄涡结构,冲刷过程中冲刷坑内涡结构在绕流水流作用下形成横轴环状漩涡带,在涡结构作用下局部冲刷进一步发展,水面水体紊动过程中夹杂大量泥沙运动,形成明显的混浊带。

快水水流阶段流速波动明显并逐渐衰减,水流在与桥墩相互作用的过程中,桥墩前方驻点不停上下波动,导致弓形波上下翻滚(图4),在此过程中形成大量涡结构加剧了局部水流紊动。在涡结构内部存在较大的压力梯度,在压力梯度作用下一方面水流牵动马蹄涡等横向或前后摆动,另一方面对床面泥沙产生抽吸作用,导致桥墩局部冲刷坑迅速发展。从墩前冲刷坑内卷起的悬浮泥沙裹挟于涌潮水流中向桥墩背水侧运动,绕流后的水流在背水面相汇碰撞后挟沙能力下降,导致泥沙颗粒沉积形成明显的淤积带。但是水流相汇后在正常水流的裹挟下又会继续向前紊动扩散,并在桥墩背水面出现立轴状尾涡,这部分尾涡对淤积带泥沙起一定的抽吸作用,因此在淤积带中部出现明显的输沙通道。随着涌潮水流过程的进行,快水阶段水流流速逐渐衰减,水流挟沙能力下降,导致从墩前冲刷坑内被卷起的泥沙随水流的运动逐渐开始沉积,从而在冲刷坑中可以发现从迎水面到背水面出现一定的冲刷淤积坡度。

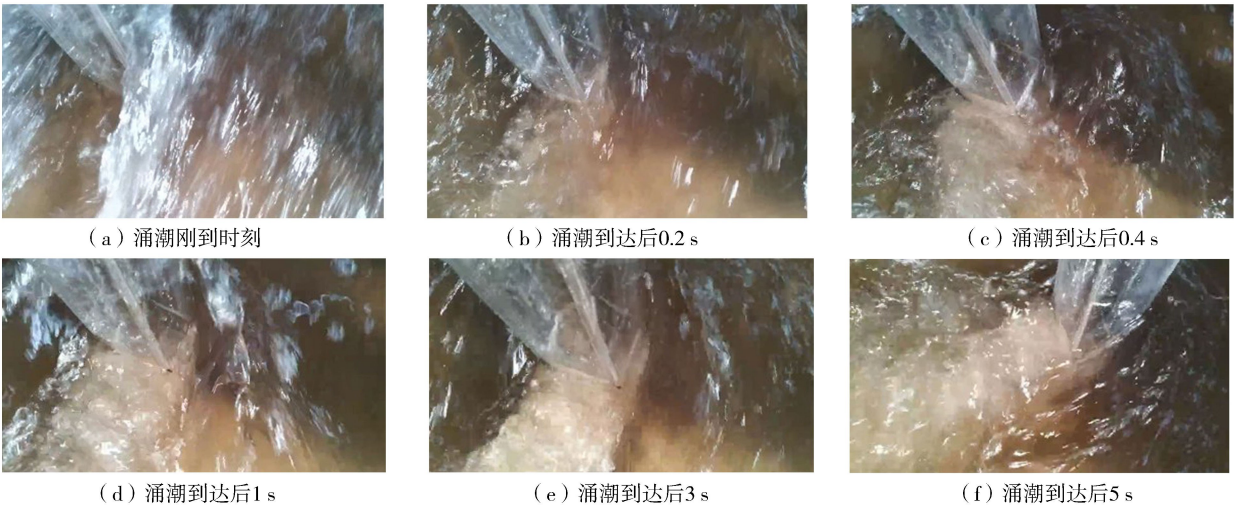


图4 涌潮过程中水面波动

Fig.4 Water surface fluctuation during tidal bore process

2.2 涌潮作用下桥墩局部冲淤影响因素

2.2.1 涌潮参数 h_0 和 H

试验过程中 h_0 和 H 为研究变量。对不同试验值条件下桥墩局部冲淤特征的演变情况进行分析,定义 h_s/D 为无量纲冲刷深度, R/D 为无量纲冲刷坑半径, h_0/D 为无量纲潮前水深, H/D 为无量纲涌潮高度。单因素影响下得到的桥墩局部 h_s/D 和 R/D 变化情况如图5所示。

从图5可以看出,在其余条件保持不变时,涌潮作用下桥墩局部冲刷深度和冲刷坑半径随 h_0 的增大而减小,随 H 的增大而增大。局部冲刷现象产生的主要原因在于泥沙颗粒在水流作用下受力不平衡,泥沙颗粒开始起动并被裹挟于水流中离开原地向前运动形成冲刷。涌潮水流传播过程中水体内部流速不停发生变

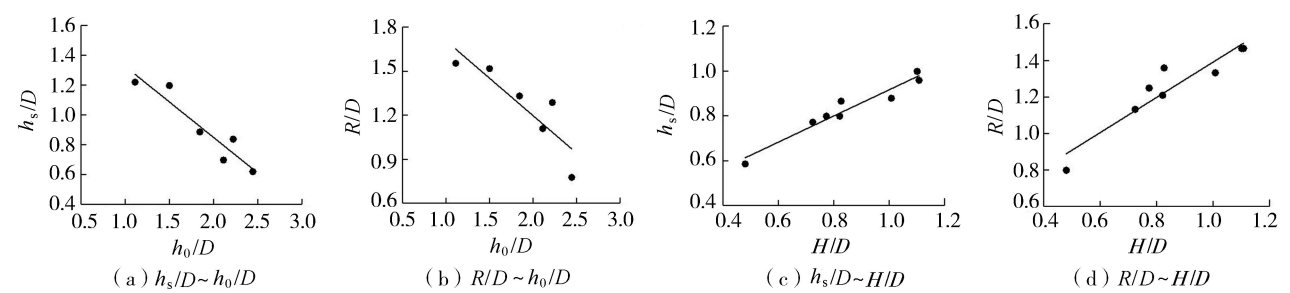


图 5 涌潮参数对桥墩局部冲刷的影响

Fig.5 Influence analysis of tidal parameters on local scour of piers

化, H 一定时 h_0 越小或 h_0 一定时 H 越大产生的涌潮水流在传播过程中对涌潮水流内部的扰动越大,即水流内部流速紊动越强,从水力学理论出发可知水流对泥沙颗粒产生的切应力随水流流速的增大而增大。

2.2.2 阻水宽度 D

选择 4 种直径不同的圆形截面桥墩作为研究对象,4 种桥墩 C1、C2、C3、C4 的直径分别为 32 mm、45 mm、55 mm 和 75 mm。图 6 分别为涌潮水流条件相同时 4 种桥墩局部冲刷深度变化示意图,可以发现当桥墩截面形式一致时,桥墩阻水宽度越大其冲刷深度越大。出现这种现象的原因是当桥墩阻水宽度越大时,涌潮水流在桥墩迎流面下切强度越大,对沙床的冲击作用更强,同时在冲刷过程中由于下切水流强烈紊动并作用于涡结构,在冲刷坑内引发更大的床面切应力,造成泥沙大量起动悬浮,因此形成的冲刷程度也就越大。

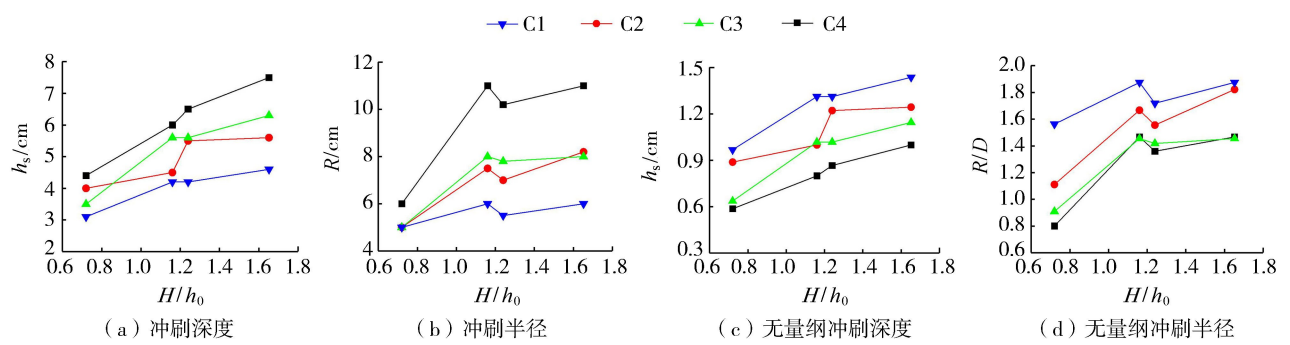


图 6 阻水宽度对桥墩局部冲刷的影响

Fig.6 Influence analysis of water blocking width on local scour of piers

3 涌潮引发桥墩局部冲刷深度计算公式

将式(6)的计算值与剩余随机 18 组工况下的试验值进行计算和对比,结果如图 7 所示。由图 7 可以发现计算值和试验值拟合良好,最大误差不超过 12%。从公式形式上可以发现,涌潮水流引发的桥墩局部冲刷深度与桥墩宽度、涌潮强度 H/h_0 、 Fr 成正比,桥墩宽度对冲刷深度的影响已有大量学者进行了论证,涌潮强度和 Fr 越大说明涌潮水流具备的流速和紊动特性也较强,在桥墩局部引发的涡结构以及床面切应力越大,从而导致冲刷程度也越大,这也和分析得到的结论相吻合,因此可认为本文建立的公式在试验设置的模型比尺下具有良好的适用性。

4 结 论

a. 通过在涌潮水槽中进行动床冲刷试验,发现涌潮水流在引发桥墩局部冲刷过程中,潮头水流作用阶段桥墩局部切应力比快水阶段强,桥墩两侧切应力放大系数比桥墩后方大。桥墩迎水面冲刷坑发展主要由马蹄涡结构引发,桥墩两侧冲刷坑发展是由较大流速引发床面切应力增加和涡系结构共同作用造成的,涌潮水流作用下桥墩局部冲刷过程主要发生在快水阶段。

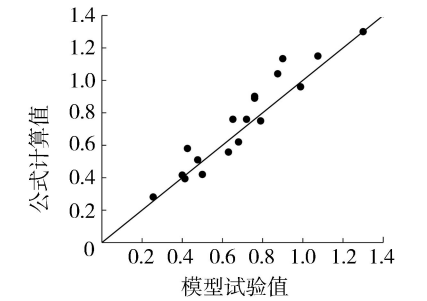


图 7 h_s/D 计算值和试验值对比

Fig.7 Comparison of calculated and experimental values of h_s/D

b. 涌潮水流作用下桥墩局部冲刷深度随潮前水深 h_0 的增大而减小,随涌潮高度 H 和桥墩阻水宽度 D 的增大而增大。

c. 对试验数据进行量纲分析和多元回归得到的计算公式具有较好的预测精度,可为相关工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] MURTAZA G, HASHMI H N, NAEEM U A, et al. Effect of bridge pier shape on scour depth at uniform single bridge pier[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2018, 37(3): 539-544.
- [2] TSENG M, YEN C, SONG C C S. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 34(3): 207-227.
- [3] CHAVAN R, KUMAR B. Experimental investigation on flow and scour characteristics around tandem piers in sandy channel with downward seepage[J]. Journal of Marine Science and Application, 2017, 16(3): 313-322.
- [4] 张芝永, 拾兵. 泥沙局部冲淤二维数值模拟仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(2): 145-150. (ZHANG Zhiyong, SHI Bing. Two-dimensional numerical simulation on local mud & sand erosion and deposition[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(2): 145-150. (in Chinese))
- [5] BOZKUS Z, ÖZALP M Ç, DINCER A E. Effect of pier inclination angle on local scour depth around bridge pier groups[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5413-5421.
- [6] ATAIE-ASHTIANI B, BEHESHTI A A. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(10): 1100-1104.
- [7] LENG X, CHANSON H. Turbulent advances of a breaking bore: preliminary physical experiments[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 62: 70-77.
- [8] LENG X, CHANSON H. Unsteady velocity profiling in bores and positive surges[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 54: 136-145.
- [9] CHANSON H. Undular tidal bores: effect of channel constriction and bridge piers[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2011, 11(4): 385-404.
- [10] LI Y, PAN D, CHANSON H, et al. Tidal bore progressing on a small slope[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 513-518.
- [11] NIKEGHBALI P, OMIDVAR P. Application of the SPH method to breaking and undular tidal bores on a movable bed[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2018, 144: 040170402.
- [12] TONKIN S, YE H, KATO F, et al. Tsunami scour around a cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 496: 165-192.
- [13] PAN C, HUANG W. Numerical modeling of tsunami wave run-up and effects on sediment scour around a cylindrical pier[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(10): 1224-1235.
- [14] HUANG J, PAN C, KUANG C, et al. Experimental hydrodynamic study of the Qiantang River tidal bore[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(3): 481-490.
- [15] 黄静, 潘存鸿, 陈刚, 等. 涌潮的水槽模拟及验证[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 1-8. (HUANG Jing, PAN Cunhong, CHEN Gang, et al. Experimental simulation and validation of the tidal bore in the flume[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 1-8. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-10 编辑: 胡新宇)