

文章编号:1005-9865(2020)06-0096-11

基于能量平衡的跨海桥梁钢管桩局部冲深计算

郭 健¹,汪 涛¹,王金权²,吴继熠¹

(1. 浙江工业大学 桥梁工程研究所,浙江 杭州 310032; 2. 宁波市杭州湾大桥发展有限公司,浙江 宁波 315000)

摘 要:综合国内外现有研究成果,分析了桩周流场结构及局部冲刷坑的分布形态,通过三维数值模拟,验证了局部冲刷最大值点出现在桩前,且冲坑坡度近似等于泥沙水下休止角的结论。从国内外规范内局部冲深计算公式中筛选出跨海桥梁钢管桩局部冲刷深度的主要影响因素。基于能量平衡理论,通过来水流速搬运冲刷坑内泥沙过程中的能量守恒,推导了概念清晰、形式简单的局部冲刷深度预测公式。区别于现有多数公式主体结构,该公式为关于局部冲深的一元三次方程,通过水下泥沙休止角来考虑泥沙对冲刷的影响以及冲刷过程中冲刷坑自身深度及范围变化对冲刷产生的影响。利用最小二乘法,结合环杭州湾区域三座跨海大桥的试验及实测数据拟合确定了公式相关参数,并与国内外规范内的公式对比验证,结果表明,该公式精度较高,可为实际工程计算分析提供参考。

关键词:桥墩基础;局部冲刷;能量平衡;冲刷深度预测;水动力分析

中图分类号:U443.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2020.06.011

Calculation of local scour depth of steel pipe pile for sea-crossing bridge based on energy balance theory

GUO Jian¹, WANG Tao¹, WANG Jinquan², WU Jiyi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Ningbo Hangzhou Bay Bridge Development Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Based on the existing research results at home and abroad, the structure of the flow field around the pile and the distribution of local scour holes are analyzed. Through three-dimensional numerical simulation, the conclusion that the maximum point of local scour appears in front of the pile is verified, and the slope of scour hole is approximately equal to the angle of repose of sediment under water. The main factors influencing the local scour depth of steel pipe piles for sea-crossing bridges are selected from the local scour depth calculation formulas in the domestic and overseas codes. Different from the main structure of most existing formulas, the formula in this paper is a cubic equation of one variable for local scour depth. The influence of sediment on scouring is considered through the angle of repose of underwater sediment, and the influence of the change of depth and scope of scour pit on scouring is also considered. By using the least square method, the parameters of the formula are determined by fitting the experimental and on-site test data of three sea-crossing bridges in the area around Hangzhou Bay, and are compared with the formulas in codes. The results show that the formula has high accuracy, which can provide a reference for practical engineering.

Keywords: pier foundation; local scour; energy balance; scouring depth prediction; hydrodynamic analysis

桥墩处于复杂水流环境中,桥墩的阻水效应产生的水流冲击及涡流作用,会引起桥墩周围的剧烈淘沙运

收稿日期:2019-12-18
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0809604);国家自然科学基金项目(U1709207);浙江省重点研发计划项目(2018YFC0809604)
作者简介:郭 健(1973-),男,浙江杭州人,教授级高工,博士生导师,博士,长期从事跨海桥梁防灾减灾及智能监测等领域的研究。
E-mail: Guoj@ zjut.edu.cn

动,在墩周形成局部冲刷坑,在桥梁基础结构-海水波流-软覆盖层三者之间形成动力耦合效应^[1],严重降低桥墩的承载力及稳定性,甚至造成桥梁倒塌。大跨度海域桥梁受随时空变化的潮汐影响^[2],桥墩局部冲刷更为严重。据美国联邦公路署统计,72%的桥毁事故是冲刷造成的^[3]。现有局部冲刷预测公式在计算跨海桥梁钢管桩局部冲深时存在不确定性,高估桥墩局部冲刷深度,会增大桥墩加固防护费用,特别是大跨度跨海桥梁,而低估桥墩局部冲刷深度,会给实际工程设计带来安全隐患^[4]。减少跨海桥梁钢管桩局部冲刷深度预测公式的不确定性可以在不牺牲安全的前提下降低建设成本,同时减少安全隐患。

近几十年来,众多学者在预测桥墩局部冲刷深度方面做了大量研究。Roulund 等^[5]、Melville 等^[6]、Richardson等^[7]、Zhao 等^[8]、马丽丽等^[9]基于数值模拟及室内试验结果,认为局部冲刷最大值出现在墩前,这一观点得到国内外学者普遍认可。Melville 等^[10]、Laursen 等^[11]、Chiew 等^[12]、Pol 等^[13]通过大量试验结果,筛选出影响局部冲刷深度的主要因素,提出了桥墩局部冲刷深度预测公式。我国公路和铁路部门在泥沙起动理论的基础上,制定了 65-1 式。美国联邦公路署 (FHWA)^[14]推荐使用 HEC-18 方程,Timothy 等^[15]在保持 HEC-18 方程结构形式的基础上,建立了适用于非黏性土条件下的优化方程。Bateni 等^[16]、Lee 等^[17]利用神经网络的方法,以现场观测数据为样本进行训练和测试,建立桥墩局部冲刷神经网络模型,以此预测冲深。前苏联的雅罗斯拉夫切夫首先基于能量平衡理论,推导得出桥墩冲刷深度公式。然而由于海域水动力特性的复杂,上述公式对于跨海桥梁钢管桩局部冲深的预测效果并不理想。

在上述研究基础上,考虑墩前冲刷坑内泥沙搬运过程中的能量平衡,以及冲刷过程中冲刷坑本身深度及范围变化对冲刷产生的影响,并根据量纲平衡原则建立二元线性回归模型,采用最小二乘法通过大量数据进行线性拟合,推导出概念清晰、精度较高的跨海桥梁钢管桩局部冲刷深度预测公式。

1 桥墩局部冲刷机理

桥墩周围存在着十分复杂的水流结构,包括桩前壅水、下降水流、墩底马蹄形漩涡、墩侧绕流漩涡、墩后尾流漩涡以及床面附近形成的小漩涡(如图 1 所示)。

桥墩的阻水作用引起复杂的三维流态,可将墩前水流分为三层^[18],墩前水面薄层撞击桥墩形成壅高,中层水流在墩前流速为零,产生向下的压力梯度迫使底层水流形成向下射流冲刷床面。向下射流受到河床阻碍同时受中层水流影响,形成向墩前外侧翻滚的马蹄形漩涡,这些中心负压的马蹄形漩涡不断作淘沙运动,将泥沙搬离冲刷坑。Unger 等^[19]、Guan 等^[20]的试验结果表明,向下射流及其转化成的马蹄形漩涡是墩前冲刷坑发展的主要原因。

随着局部冲刷的进行,冲刷坑不断发育变大,坑内水流流速降低,泥沙粗化,坑内泥沙抗冲能力增强,直至与水流冲刷作用平衡,此时局部冲刷达到冲淤平衡状态,冲刷坑的深度及宽度不再增加。Unger 等^[19]、Sheppard 等^[21]、Dey 等^[22]的试验结果表明,达到冲淤平衡状态时的墩前冲刷坑可视为一个坡度等于泥沙休止角的半圆锥体,且局部冲刷的最大值点出现在墩前。

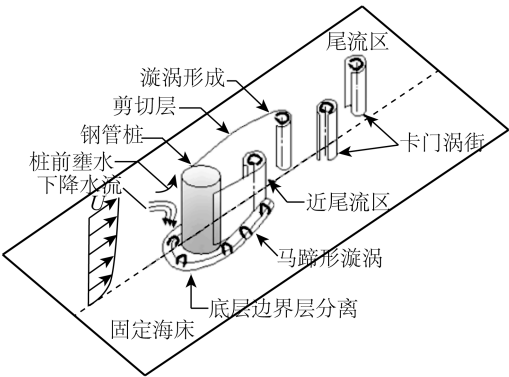


图 1 圆柱形桥墩周围的水流结构
Fig. 1 Flow structure around cylindrical piers

2 已有预测公式的影响因素

我国规范 JTGC30-2002《公路工程水文勘测设计规范》^[23] 推荐采用 1964 年桥渡冲刷学术会议提供的桥墩局部冲刷 65-1 修正式和 65-2 修正式。

桥墩局部冲刷 65-1 修正式表示为:

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

式中: h_b 为桥墩局部冲刷深度, m; V 为墩前行进流速, m/s; K_ε 为墩形系数, 具体取值与墩形及水流攻角相关, 详见文献[23]; B_1 为桥墩计算宽度, m, 对于不同墩形考虑不同取值, 详见文献[23]; $K_{\eta_1} = 0.8(1/\bar{d}^{0.45} + 1/\bar{d}^{0.15})$ 为河床颗粒影响系数, 其中 $\bar{d}$ 为河床泥沙平均粒径, mm; $V_0 = 0.024\ 6(h_p/\bar{d})^{0.14} \sqrt{332\bar{d} + (10 + h_p)/\bar{d}^{0.72}}$ 为河床泥沙起动流速, m/s, 其中 h_p 为一般冲刷后的最大水深, m; $V_0' = 0.462(\bar{d}/B_1)^{0.06} V_0$ 为墩前始冲流速, m/s; $n_1 = (V_0'/V)^{0.25\bar{d}^{0.19}}$ 。

桥墩局部冲刷 65-2 修正式表示为:

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

式中: $K_{\eta_2} = 0.002\ 3/\bar{d}^{2.2} + 0.375\ \bar{d}^{0.24}$ 为河床颗粒影响系数, 其中 $\bar{d}$ 为河床泥沙平均粒径, mm; $V_0 = 0.28 \times (\bar{d} + 0.7)^{0.5}$ 为河床泥沙起动流速, m/s; $V_0' = 0.12(\bar{d} + 0.5)^{0.55}$ 为墩前始冲流速, m/s; $n_2 = (V_0'/V)^{0.23 + 0.19\lg(\bar{d})}$; 其他符号均与 65-1 修正式相同。

美国联邦公路署(FHWA)^[14] 推荐使用 HEC-18 方程预测桥墩局部冲刷深度。HEC-18 方程表示为:

$$\frac{h_b}{h} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (3)$$

式中: h_b 为桥墩局部冲刷深度, m; h 为一般冲刷后的上游水深, m; K_1 为墩形修正系数, 不同于 65-1 式及 65-2 式中的 K_ε , K_1 仅与墩形相关, 详见文献[14]; $K_2 = (\cos\theta + L\sin\theta/a)^{0.65}$ 为水流攻角修正系数, 其中 L 和 a 分别为桥墩横截面的长和宽, $L/a > 12$ 时, 按 $L/a = 12$ 计算, 且 K_2 最大值不大于 5; K_3 为河床条件修正系数, 对清水冲刷、平坦河床、小沙丘(沙丘高度为 0.6~3 m)取 1.1, 对中沙丘(沙丘高度为 3~9 m)取 1.1~1.2, 对大沙丘(沙丘高度大于 9 m)取 1.3; b 为桥墩宽度, m; Fr 为弗劳德常数, $Fr = V/\sqrt{gh}$, 其中 V 为水流行进速度, m/s, g 为重力加速度, m/s²。

韩海骞等^[24] 利用水槽试验以及河口海湾地区的相关研究成果, 提出了适用于潮流条件下的局部冲刷深度计算公式。韩海骞公式表示为:

$$\frac{h_b}{h} = 17.4 k_1 k_2 \left(\frac{B}{h} \right)^{0.326} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0.167} Fr^{0.628} \quad (4)$$

式中: h_b 为桥墩的局部冲刷深度, m; h 为全潮最大水深, m; B 为全潮最大水深条件下平均阻水宽度, m; d_{50} 为河床泥沙的平均中值粒径, mm, 可根据河床取样资料的泥沙粒配曲线查得; Fr 为水流弗劳德数, $Fr = u/\sqrt{gh}$, u 为全潮最大流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; k_1 为基础桩平面布置系数, 条带型 $k_1 = 1.0$, 梅花型 $k_1 = 0.862$; k_2 为基础桩垂直布置系数, 直桩 $k_2 = 1.0$, 斜桩 $k_2 = 1.176$ 。

综合以上四式及国内外众多局部冲深计算公式及研究结果, 对于跨海桥梁钢管桩, 局部冲刷深度的主要影响因素包括三个方面: 水流动力特征(水流行进流速 V , 重力加速度 g , 行进水深 H , 弗劳德数 Fr); 桥墩特征(桥墩宽度 b); 床沙特征(泥沙粒径 d , 密度 ρ_s)。故关于跨海桥梁钢管桩局部冲刷深度 h_b 的函数式可

表示为:

$$h_b=f(V,g,H,Fr,b,d,\rho_s)$$

(5)

3 局部冲刷深度预测公式

为了得到局部冲刷坑的整体分布形态,采用 Flow-3d 软件建立三维数值模型。根据浙江省河海测绘院对杭州湾跨海大桥桩基局部冲刷的观测资料,选取近年来冲刷增幅显著的匝道桥区域 ZD18 号桩,建立三维数值模型。

Flow-3d 自带的冲刷模块采用基于 Mastbergen 和 Berg^[25]研究的经验输沙模型。泥沙运动方程包括推移质输沙率方程和悬移质输沙方程。

推移质输沙率方程:

$$g_b=\rho_n\beta\left[\frac{\tau-\tau_{cr}}{gd(\rho_n-\rho)}\right]^{3/2}\left[g\left(\frac{\rho_n-\rho}{\rho}\right)d^3\right]^{1/2}$$

(6)

悬移质输沙方程:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t}+\nabla\left\{C_s\left[\bar{u}+\frac{g}{\|g\|}((10.36^2+1.046d_*^3)^{1/2}-10.36)\frac{v_f}{d}c_s\right]\right\}=\nabla\cdot\nabla(DC_s)$$

(7)

式中: g_b 为床面单宽推移质输沙率; ρ_n 为泥沙密度; ρ 为水密度; β 为推移质系数; d 为泥沙直径; d_* 为泥沙无量纲颗粒直径; C_s 为悬沙质量密度; $\bar{u}$ 为水沙混合物速度; c_s 为悬沙体积浓度; D 为扩散系数; τ 为床面剪切力; τ_{cr} 为临界床面剪切力。

湍流模型选取 LES 模型模拟三维水流的流动,采用嵌套网格对墩周局部加密,网格总数为 1 368 640,形状为均匀六面体,模拟时间步长为 0.001 s,模拟时间为 1 800 s。其余模型具体参数设置见表 1,边界条件设置见图 2。

表 1 模型参数设置
Tab. 1 Parameters setting of model

湍流模型	桩径/m	流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	泥沙粒径/mm	泥沙密度/(kg·m ⁻³)
LES 模型	2.2	2.223	13.61	0.049	2 710

湍流模型	水下休止角/(°)	床面粗糙高度	网格类型	网格总数
LES 模型	30	2.5d ₅₀	正六面体	1 368 640

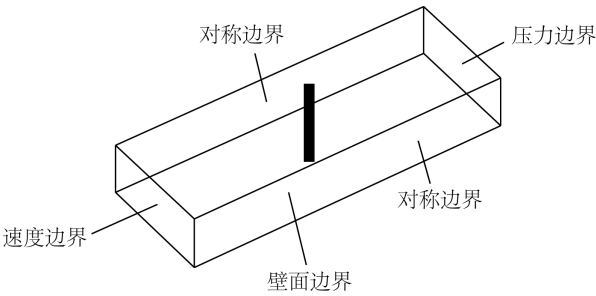


图 2 模型边界条件设置
Fig. 2 Boundaries setting of model

局部冲刷坑整体形态分布见图 3,与 Melville^[26]试验所得结果大致吻合,冲刷坑纵向及侧向坡度约等于泥沙休止角(30°),局部冲刷最大值点出现在墩前。

基于能量平衡理论,推导局部冲刷深度预测公式。由于墩前向下射流及马蹄形漩涡是墩前冲刷坑形成的主要原因,故可认为,墩前水体的动能等于搬运墩前泥沙所需的能量。由于实际冲刷情况较为复杂,作出了以下简化与假定^[27],排除不必要因素的干扰:

- 1) 桥墩局部冲刷是在一般冲刷完成的基础上进行的,以下公式中的水深及流速均是一般冲刷完成后的

水深及流速。

- 2) 局部冲刷完成后的墩前冲刷坑形态为一个高为 h_b , 上底半径为 R , 下底半径为 r 的半圆台体。
- 3) 将被冲走的泥沙看成整体, 其质心位于距圆台形冲刷坑上表面 $1/3h_b$ 处。
- 4) 圆台形冲刷坑侧壁坡度等于泥沙的水下休止角 φ 。

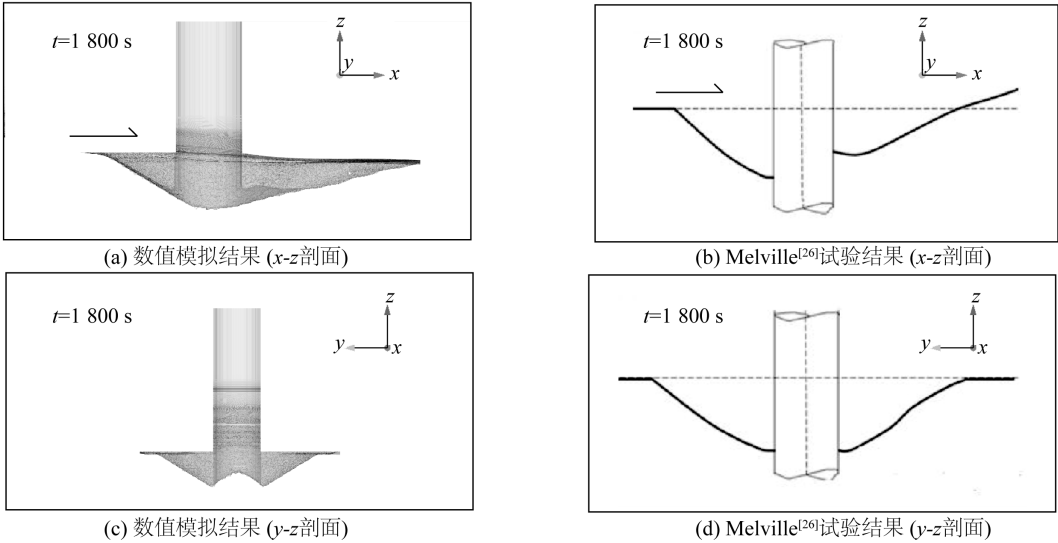


图 3 冲刷坑形态对比

Fig. 3 Comparison of the shapes of local scour holes

基于以上简化及假设,冲刷坑深度计算图如图 4 所示。

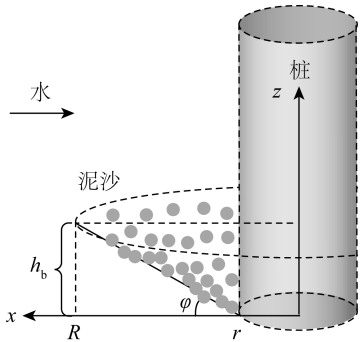


图 4 局部冲刷坑计算图

Fig. 4 Local scour calculation figure

墩前被冲走的泥沙体积等于：

$$V_{\text{泥沙}} = \frac{1}{2}(V_{\text{圆台}} - V_{\text{圆柱}}) = \frac{1}{6}\pi h_b(R^2 + r^2 + R \cdot r) - \pi r^2 h_b$$

(8)

将 $R = \frac{h_b}{\tan\varphi} + \frac{b}{2}$, $r = \frac{b}{2}$ 代入式(8)可得：

$$V_{\text{泥沙}} = \frac{1}{6}\pi h_b\left(\frac{h_b}{\tan\varphi} + \frac{b}{2}\right)^2 - \frac{1}{6}\pi \frac{b \tan\varphi}{2} \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \frac{1}{2}\pi h_b \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

(9)

简化后得：

$$V_{\text{泥沙}} = \frac{\pi h_b^2}{\tan\varphi} \left(\frac{b}{4} + \frac{h_b}{6 \tan\varphi}\right)$$

(10)

根据张红武等^[28]提出的天然沙水下休止角公式对泥沙粒径及水下休止角的关系进行描述,可表示为：

$$\varphi = 32.5 + 1.27d$$

(11)

其中, d 为泥沙中值粒径, mm。

则搬运墩前冲刷坑内泥沙所作的功 W 可表示为:

$$W = (\rho_s - \rho) V_{\text{泥沙}} g \cdot \frac{1}{3} h_b \quad (12)$$

其中, ρ_s 为泥沙密度, ρ 为水密度, g 为重力加速度。

墩前水体(下降水流、马蹄形漩涡)搬运墩前泥沙的有效动能 E 可表示为^[29]:

$$E = \frac{1}{2} m (V^2 - V_0'^2) = \frac{1}{2} \rho b H R (V^2 - V_0'^2) \quad (13)$$

其中, V_0' 为始冲流速,若无实测资料, $V_0' = 1/2 V_0$, V_0 为泥沙起动流速, $V_0 = (H/d)^{0.14} \sqrt{17.6ad + 6.05 \times 10^{-7} (10 + H)/d^{0.72}}$, $a = (\rho_s - \rho)/\rho$, 为泥沙水下相对密度^[29], 水深 H 及泥沙粒径 d 的单位均为 m。

基于能量平衡理论,搬运墩前冲刷坑内泥沙所作的功 W 等于墩前水体的有效动能 E , 故可得:

$$\frac{2}{3} \pi \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) h_b^2 \left(\frac{b}{2} + \frac{h_b}{3 \tan \varphi} \right) = \frac{b H (V^2 - V_0'^2)}{g} \quad (14)$$

将泥沙水下相对密度 $a = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ 代入上式并简化整理得:

$$\left(\frac{h_b}{b} \right)^2 = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{1}{a} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{h_b}{3 \tan \varphi}} \right) \left(\frac{H}{b} \right) \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right) \quad (15)$$

即:

$$\left(\frac{h_b}{b} \right)^2 = f_1(a) f_2 \left(\frac{h_b}{b \tan \varphi} \right) f_3 \left(\frac{H}{b} \right) f_4 \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right) \quad (16)$$

区别于现有多数公式主体结构,所建立的公式为关于局部冲刷深度 h_b 的一元三次方程。公式右侧 $f_1(a)$ 表征泥沙密度对冲刷深度的影响; $f_2[h_b/(b \tan \varphi)]$ 表征冲刷坑自身深度及范围对冲刷深度的影响; $f_3(H/b)$ 表征深宽比对冲刷深度的影响; $f_4[(V^2 - V_0'^2)/(gb)]$ 表征桥墩弗劳德数对冲刷深度的影响。

由于在上式推导过程中做出了一定假设,且实际冲刷情况十分复杂,存在许多不可判断的参数影响,故通过冲刷试验数据及现场观测数据对公式的系数及指数进行调整修正。将式(15)中 $3/(2\pi a)$ 表示为 K , 并根据量纲平衡改写成:

$$\frac{h_b^3}{3b^3 \tan \varphi} + \frac{h_b^2}{2b^2} = K \left(\frac{H}{b} \right)^m \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right)^n \quad (17)$$

将上式两边同时取对数得到多元线性方程:

$$\ln \left(\frac{h_b^3}{3b^3 \tan \varphi} + \frac{h_b^2}{2b^2} \right) = \ln K + m \ln \left(\frac{H}{b} \right) + n \ln \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right) \quad (18)$$

依上式建立二元回归模型 $Z = b + mX + nY$, 其中 $Z = \ln \left(\frac{h_b^3}{3b^3 \tan \varphi} + \frac{h_b^2}{2b^2} \right)$, $X = \ln \left(\frac{H}{b} \right)$, $Y = \ln \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right)$,

$b = \ln K$ 。

选取试验及现场观测数据总计 55 组对上式进行拟合,这些数据包括环杭州湾区域的三座跨海大桥的试验数据及现场观测数据^[30-32],见图 5,三座跨海大桥均邻近杭州湾海域,潮差大、涨落潮流速急,地质条件为淤泥质海床,其中嘉绍大桥水深 8~25 m,行进流速 6.05~6.70 m/s,起动流速 0.51~0.75 m/s,泥沙类型为细粉土,粒径范围 0.02~0.4 mm,中值粒径 0.065 mm,桩径 0.75~30 m;杭州湾大桥水深 10~25 m,行进流速 1.42~3.46 m/s,起动流速 0.57~0.84 m/s,泥沙类型为细颗粒悬浮泥沙,粒径范围 0.004~0.016 mm,中值粒径 0.049 mm,桩径 5.2~29.2 m;金塘大桥水深 4.5~23 m,行进流速 1.76~3.33 m/s,起动流速 0.74~1.11 m/s,泥沙类型为粉砂,粒径范围 0.003 7~0.013 4 mm,中值粒径 0.027 mm,桩径 0.8~27.4 m,典型桩基础结构形式见文献[31]。

采用最小二乘法,通过 Matlab 对以上方程进行线性拟合得, $m = 0.731$, $n = 1$, $b = 2.431$ 。具体拟合参数见

表 2。具体的数据拟合分布情况见图 6。

表 2 数据拟合参数及优度分析
Tab. 2 Goodness of fit

模型	R	R^2	调整后的 R^2	标准误差
1	0.937 1	0.878 2	0.934 6	1.286 0

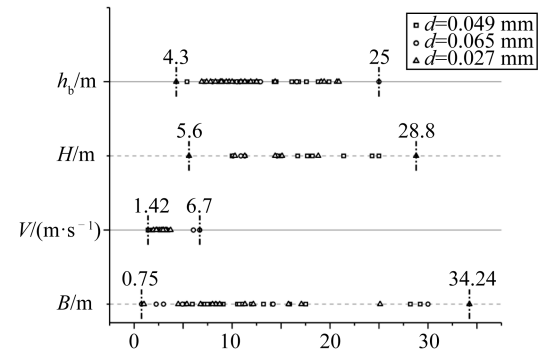


图 5 试验及现场观测数据分布

Fig. 5 Experimental and on-site test data distribution

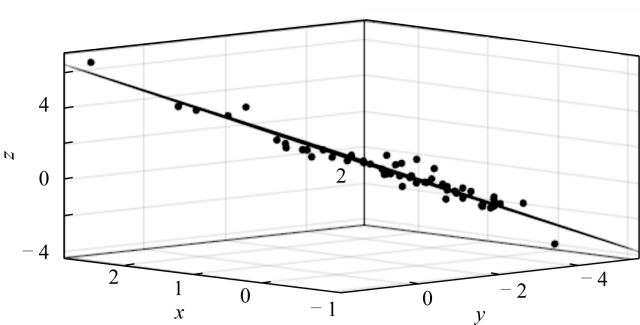


图 6 数据拟合

Fig. 6 Data fitting

可见线性拟合效果较好,所得局部冲刷深度预测公式为:

$$\frac{h_b^3}{3b^3 \tan \varphi} + \frac{h_b^2}{2b^2} = 11.37 \left(\frac{H}{b} \right)^{0.731} \left(\frac{V^2 - V_0'^2}{gb} \right) \quad (19)$$

式中: h_b 为局部冲刷深度,m; b 为阻水宽度,m,对单桩取桩直径,对群桩取桩群垂直水流方向的分布宽度; φ 为泥沙水下休止角,($^\circ$); H 为全潮最大水深,m; V 为全潮最大流速,m/s; V_0' 为始冲流速,m/s,若无实测资料,按式 $V_0' = (1/2) (H/d)^{0.14} \sqrt{17.6ad + 6.05 \times 10^{-7} (10 + H)/d^{0.72}}$ 确定, $a = (\rho_s - \rho)/\rho$; g 为重力加速度。所得公式计算值与实测值相关性见图 7,相对误差控制在 $-30\% \sim +26\%$ 以内。

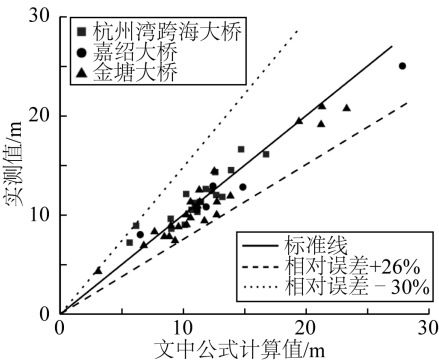


图 7 桥梁局部冲刷深度实测值和计算值相关性

Fig. 7 Local scours measured values and calculation values

4 公式验证与比较

另行选取 36 组数据作为验证数据集,分为两组,组 1 包括 Sheppard 等^[21]、Al-Shukur^[33]、Ahmad 等^[34]、Ettema 等^[35]搜集的试验及实测资料以及瓯江大桥部分试验及现场实测数据,共计 16 组,泥沙粒径范围为 0.255~0.7 mm;组 2 包括某强潮海湾跨海大桥^[36]、苏通大桥^[37]、妈屿跨海大桥^[37]、某跨江大桥^[38]、杭州湾跨海大桥的试验及运营期间现场观测数据,共计 20 组,泥沙粒径范围 0.008~0.2 mm。分别运用我国规范内 65-1 修正式及 65-2 修正式,美国规范内 HEC-18 方程,以及文中公式对组 1 内数据进行计算,具体计算过程及结果见表 3 和图 8;由于 65-1 修正式、65-2 修正式、HEC-18 方程在淤泥质海床条件下表现出失效性,运用韩海骞公式及文中公式对组 2 内数据进行计算,具体计算过程及结果见表 4 和图 9。

表 3 桥梁局部冲刷计算公式误差分析(组 1)
Tab. 3 Error analysis of local scour depth formula (group 1)

桥名	b/m	$V/$ $(m \cdot s^{-1})$	D/mm	H/m	h_b/m				相对误差 $\delta/(%)$				
					实测	65-1	65-2	HEC-18	文中 公式	65-1	65-2	HEC-18	文中 公式
明尼苏达州 某大桥	4.1	2.0	0.600	22.4	6.2	7.57	7.39	6.27	6.88	22.09	19.19	1.13	10.96
	4.7	1.8	0.600	16.7	6.5	7.35	6.85	6.30	6.11	13.08	5.38	-3.08	-6.00
路易斯安那 州某大桥	4.3	3.2	0.300	11.9	7.0	16.79	11.95	7.27	8.41	139.85	70.71	3.86	20.14
	4.3	2.9	0.300	9.8	7.7	15.16	10.49	6.79	7.40	96.88	36.23	-11.82	-3.89
	4.3	2.1	0.300	9.3	3.8	10.69	7.44	5.87	5.68	181.31	95.78	54.47	49.47
明尼苏达州 某大桥	5.3	1.6	0.480	11.8	4.6	7.55	5.01	6.18	5.22	64.13	8.91	34.35	13.47
	5.4	1.4	0.480	9.5	4.2	6.58	4.39	5.73	4.41	56.67	4.52	36.43	5.00
	5.5	1.1	0.480	8.7	3.1	5.00	3.55	5.17	3.51	61.29	14.52	66.77	13.22
密苏里州 某大桥	2.8	1.9	0.700	14.3	4.3	5.42	5.15	4.51	5.13	26.05	19.77	4.88	19.30
	2.8	2.0	0.700	15.1	3.8	5.74	3.54	4.64	5.41	51.05	-6.84	22.11	42.36
	2.8	1.2	0.700	12.9	3.8	3.12	3.06	3.65	3.45	-17.89	-19.47	-3.95	-9.21
	2.8	1.1	0.700	11.0	4.3	2.81	2.71	3.44	3.07	-11.16	-11.39	-20	-28.60
	2.9	2.3	0.700	14.6	4.0	6.89	3.89	5.02	6.05	72.25	-2.75	25.5	51.25
温州瓯江 大桥	5.5	1.5	0.255	4.11	4.6	9.21	5.55	5.34	3.67	100.22	20.65	16.09	-20.21
	5.5	2.0	0.255	4.11	4.9	12.63	7.54	6.04	4.66	157.75	53.87	23.27	-4.89
	5.5	2.5	0.255	4.11	6.6	16.05	9.53	6.65	5.59	143.18	44.39	0.76	-15.30

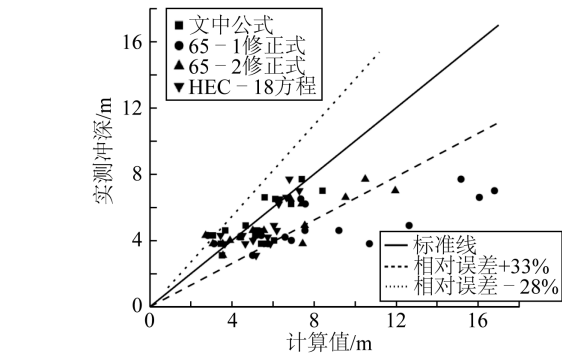


图 8 桥梁局部冲刷计算公式误差分析(组 1)
Fig. 8 Error analysis of local scour depth formula (group 1)

依图 8,对于泥沙粒径为 0.255~0.7 mm 的验证数据集组 1,相较于我国规范内 65-1 修正式及 65-2 修正式,该公式的精度有明显提高,相对误差控制在-28%~+33%以内。如图 9 所示,对于泥沙粒径为 0.008~0.2 mm 的验证数据集组 2,该公式在计算苏通大桥、杭州湾跨海大桥、妈屿跨海大桥、某跨江大桥局部冲深时均展现出良好适用性,相对误差控制在-22%~+34%以内,与韩海骞公式相似,计算某强潮海湾跨海大桥局部冲深时,相对误差在-47%~-30%,这可能是该公式未能充分考虑强潮影响所致。以上验证结果表明,该公式的适用范围广,且精度较高。

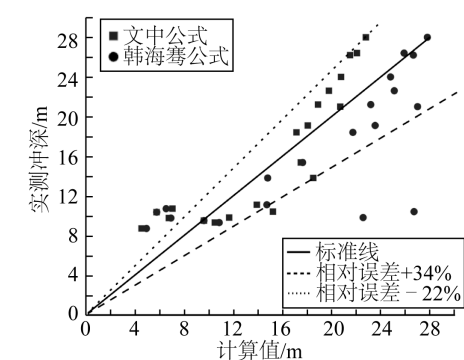


图 9 桥梁局部冲刷计算公式误差分析(组 2)
Fig. 9 Error analysis of local scour depth formula (group 2)

表 4 桥梁局部冲刷计算公式误差分析(组 2)

Tab. 4 Error analysis of local scour depth formula (group 2)

桥名	b/m	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	D/mm	H/m	h_b/m		相对误差 $\delta/(\%)$		
					实测	韩海骞公式	文中公式	韩海骞公式	文中公式
某强潮海湾跨海大桥	17.5	1.82	0.011	7.77	9.76	6.93	6.76	-28.99	-30.73
	9.9	2.23	0.011	6.64	10.7	6.54	7.06	-38.89	-33.98
	8.1	2.03	0.011	6.21	10.35	5.77	5.76	-44.22	-44.32
	7.4	1.66	0.011	5.65	8.7	4.94	4.54	-43.21	-47.77
苏通大桥	48.1	3.4	0.16	24.3	28	27.8	22.8	-0.71	-18.60
	48.1	3.18	0.16	24.3	26.2	26.66	21.5	1.74	-17.91
	48.1	2.89	0.16	24.3	22.6	25.1	19.79	11.08	-12.45
	48.1	2.61	0.16	24.3	19.1	23.55	18.07	23.28	-5.40
	48.1	3.28	0.12	24.3	26.4	25.91	22.07	-1.87	-16.40
	48.1	3.06	0.12	24.3	24	24.8	20.77	3.33	-13.44
	48.1	2.75	0.12	24.3	21.2	23.2	18.91	9.39	-10.82
	48.1	2.48	0.12	24.3	18.4	21.74	17.15	18.12	-6.82
	围堰	68	3.03	0.16	19	21	20.71	28.57	-1.38
	匝道墩	2.20	4.63	0.049	18.55	9.5	9.62	1.26	1.26
杭州湾跨海大桥	中引桥	28.21	2.98	0.049	24.3	15.36	17.65	14.91	14.00
	北通航孔	10.25	2.42	0.049	21.4	9.3	10.86	10.51	16.77
	南通航孔	24.80	2.39	0.049	24.3	11.1	14.73	13.93	32.70
妈屿跨海大桥	24.50	3.80	0.008	27.0	13.8	14.81	18.51	7.32	34.13
某跨江大桥主桥墩	55	1.7	0.2	23.42	9.81	22.57	11.67	130.07	18.96
	55	1.82	0.2	44.92	10.4	26.71	15.23	156.83	46.44

5 结 语

结合前人研究成果分析桥墩局部冲刷机理,认为向下射流及其转化成的马蹄形漩涡是桩前冲刷坑发展的主要原因,并利用 Flow-3d 建立三维数值模型验证了局部冲刷最大值点出现在桩前,且冲坑坡度近似等于泥沙水下休止角(30°)的结论。

基于以上分析结果,在做出一定合理假设的前提下,考虑墩前冲刷坑内泥沙搬运过程中的能量平衡,建立了概念清晰、精度较高的跨海桥梁钢管桩局部冲刷深度预测公式。公式系数由环杭州湾区域三座跨海大桥的 55 组试验数据及现场观测数据拟合得到;另行搜集包括苏通大桥、杭州湾跨海大桥、妈狱跨海大桥、瓯江大桥在内的 36 组国内外试验及实测数据,根据泥沙粒径分为两组,验证该公式在泥沙粒径范围为 0.255~0.7 mm 及 0.008~0.2 mm 的海床条件下的精度,并与 65-1 修正式、65-2 修正式、HEC-18 方程、韩海骞公式对比分析。结果表明,该公式相对误差控制在-28%~+34%以内,较 65-1 修正式、65-2 修正式精度有明显提高,对处于水深、流速大、泥沙粒径小的特殊环境下的跨海桥梁钢管桩基础冲深预测展现出较好的适用性,能为公路桥梁技术人员提供一定参考。

参考文献:

- [1] 郭健. 跨海大桥建设的主要技术现状与面临的挑战[J]. 桥梁建设, 2010(6): 66-69. (GUO Jian. Current principal technique status and challenges to be confronted in construction of sea-crossing bridges[J]. Bridge Construction, 2010(6): 66-69. (in Chinese))
- [2] 潘存鸿, 郑君, 陈刚, 等. 杭州湾潮汐特征时空变化及原因分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(3): 1-11. (PAN Cunhong, ZHENG Jun, CHEN Gang, et al. Spatial and temporal variations of tide characteristics in Hangzhou Bay and cause analysis[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 1-11. (in Chinese))
- [3] RICHARDSON E V, HARRISON L J, RICHARDSON J R, et al. Evaluating scour at bridges[R]. Washington, D C: FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1993.
- [4] 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. (ZHU Zhiwen, YU Peng. Comparative study between Chinese code and US code on calculation of local scour depth around bridge piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 36-43. (in Chinese))
- [5] ROULUND A, SUMER B M, FREDSON J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 534: 351-401.
- [6] MELVILLE B W, RAUDKIVI A J. Flow characteristics in local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1977, 15(4): 373-380.
- [7] RICHARDSON J E, PANCHANG B G. Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 124(5): 530-540.
- [8] ZHAO M, CHENG L, ZHOU T. Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(8): 709-721.
- [9] 马丽丽, 国振, 王立忠, 等. 单向流条件下单桩桩周冲刷过程特征试验研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 136-146. (MA Lili, GUO Zhen, WANG Lizhong, et al. Scour characteristics at the periphery of a vertical pile under steady flow[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1): 136-146. (in Chinese))
- [10] MELVILLE B W, SUTHERLAND A J. Design method for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(10): 1210-1226
- [11] LAURSON E M, TOCH A. Scour around bridge piers and abutments[R]. Iowa: University of Iowa, 1956.
- [12] CHIEW Y M, MELVILLE B W. Local scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 1986, 25(1): 15-26.
- [13] POL B, PANAYIOTIS D, DANCEY C L, et al. Quantitative spatio-temporal characterization of scour at the base of a cylinder[J]. Water, 2017, 9(3): 227.
- [14] RICHARDSON E V, DAVIS S R. Evaluating scour at bridges, fourth edition[R]. Washington, D C: FHWA-NHI-01-001, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 2001.
- [15] TIMOTHY C, CAROL M, DONALD C, et al. Developing a family of curves for the HEC-18 scour equation[J]. International Journal of Geosciences, 2012, 3(2): 297-302.
- [16] BATENI S M, BORGHEI S M, JENG D S. Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20(3): 401-414.
- [17] LEE T L, JENG D S, ZHANG G H, et al. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(3): 378-386.
- [18] 阚译. 桥渡冲刷[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. (KAN Yi. Scour at bridge crossing[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [19] UNGER J, HAGER W H. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers[J]. Experiments in Fluids, 2007, 42(1): 1-19.
- [20] GUAN D, CHIEW Y M, WEI M, et al. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier[J]. International Journal of Sediment Research, 2018: S1001627917303815.
- [21] SHEPPARD D M, ODEH M, GLASSER T. Large scale clear-water local pier scour experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(10): 957-963.
- [22] DEY S, BARBHUIYA A K. Time variation of scour at abutments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(1): 11-23.
- [23] JTG C30-2002, 公路工程水文勘测设计规范[S]. 2002. (JTG C30-2002, Hydrological specifications for survey and design of highway engineering[S]. 2002. (in Chinese))

- [24] 韩海骞, 熊绍隆, 孙志林. 潮流作用下桥墩局部冲刷深度计算公式的建立与验证[J]. 泥沙研究, 2016(1): 9-13. (HAN Haiqian, XIONG Shaolong, SUN Zhilin. Local scour equation at bridge piers under tidal current action [J]. Journal of Sediment Research, 2016(1): 9-13. (in Chinese))
- [25] MASTBERGEN D R, BERG J H V D. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons[J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 625-637.
- [26] MELVILLE B W. Local scour at bridge sites[D]. Auckland: The University of Auckland, 1975.
- [27] 王飞. 砂质河床桥墩局部冲刷深度预测及数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. (WANG Fei. Prediction of equilibrium scour depth and numerical simulation of local scour around piers in sandy riverbed[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [28] 张红武, 汪家寅. 沙石及模型沙水下休止角试验研究[J]. 泥沙研究, 1989(3): 90-96. (ZHANG Hongwu, WANG Jiayin. Experimental study on the angle of repose of sandstone and model sand under water[J]. Journal of Sediment Research, 1989(3): 90-96. (in Chinese))
- [29] 张佰战, 李付军. 桥墩局部冲刷计算研究[J]. 中国铁道科学, 2004(2): 49-52. (ZHANG Baizhan, LI Fujun. Study on calculation of local scour of pier[J]. China Railway Science, 2004(2): 49-52. (in Chinese))
- [30] 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: 567-575.
- [31] 韩海骞. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. (HAN Haiqian. Research on local scour at bridge piers under tidal current action [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [32] 韩海骞, 牛有象, 熊绍隆, 等. 金塘大桥桥墩附近的海床冲刷[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 101-106. (HAN Haiqian, NIU Youxiang, XIONG Shaolong, et al. Seabed scour near the piers of the Jintang Bridge [J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 101-106. (in Chinese))
- [33] AI-SHUKUR A H K, OBEID Z H. Experimental study of bridge pier shape to minimize local scour[J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2016, 7(1): 162-171
- [34] AHMAD N, MOHAMED T, ALI F H, et al. Clear-water local scour at wide piers in shallow-water flow[J]. Water Practice & Technology, 2014, 9(3): 331-343.
- [35] ETTEMA R, KIRKIL G, MUSTE M. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(1): 33-40.
- [36] 刘谨, 刘芳亮, 冯良平, 等. 某跨海大桥桥墩基础冲刷试验研究[J]. 公路, 2012(10): 61-66. (LIU Jin, LIU Fangliang, FENG Liangping, et al. Experimental study on scour of pier foundation of a sea crossing bridge[J]. Highway, 2012(10): 61-66. (in Chinese))
- [37] 卢中一. 苏通长江公路大桥桥墩基础的局部冲刷[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 2011: 683-687. (LU Zhongyi. Local scour of pier foundation of Sutong Yangtze River Highway Bridge [C]//Proceedings of the 15th China Ocean Engineering Symposium. 2011: 683-687. (in Chinese))
- [38] 房世龙, 杨国巍. 跨江大桥主桥墩局部冲刷试验研究[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2010, 9(4): 64-68. (FANG Shilong, YANG Guowei. Experimental study on local scour of main piers of river crossing bridge [J]. Journal of Nantong Vocational and Technical Shipping College, 2010, 9(4): 64-68. (in Chinese))