

波浪条件下单桩冲刷大比尺试验研究

宫恩宇¹, 陈松贵², 陈鑫^{1,3}, 张凯豪⁴, 管大为⁵, 郑金海⁵

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 天津水运工程科学研究院, 天津 300456;

3. 中国农业大学 北京市供水管网系统安全与节能工程技术研究中心, 北京 100083;

4. 佛山恒益热电有限公司, 佛山 528100; 5. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210024)

摘要: 发展海上风电技术在国家“双碳”战略中具有重要意义, 单桩冲刷深度的预测是海上风电单桩冲刷研究的热点。受比尺效应的影响, 传统的小比尺物理模型通常会导致冲刷深度预测公式的适用性受到限制。为此, 该文在 1:13 的大比尺物理模型中开展了局部冲刷试验, 研究了不规则波条件下, KC (Keulegan-Carpenter) 为 4~9 时, 单桩周围的平衡冲刷深度和冲刷坑体积。研究发现, 通过改进 KC 的计算方法, 能够提高现有公式在不规则波条件下预测平衡冲刷深度的准确度。此外, 提出了单桩周围局部平衡冲刷深度和冲刷坑体积的公式, 为单桩防护施工时的抛石冗余量估算提供了简便的预测方法。

关键词: 大比尺试验; KC (Keulegan-Carpenter); 平衡冲刷深度; 冲刷坑体积

中图分类号: TV14

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2024)04-0619-07

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.27.003

海上风电单桩基础的存在影响着周边流场, 形成强紊动水流以及漩涡, 进而引起单桩周围的局部冲刷^[1-2]。当冲刷深度达到一定程度时, 单桩基础的稳定性就会受到威胁^[3-6]。近几十年来, 波浪条件下单桩基础受局部冲刷的深度的变化规律^[7]、预测方法^[8]及相关机理^[9]等研究取得了一定的成果。

单桩冲刷深度的预测是海上风电设计中的重要内容, 冲刷深度的估值过高会增加工程成本, 估值过低则可能导致结构的失效^[10]。一些学者已经根据小比尺物理模型单桩冲刷的试验获得了影响冲刷深度的主要参数, 并建立了相关公式。根据衍射参数 D/L (D 为单桩的直径, L 为波浪的波长), 冲刷可分为大直径 ($D/L \geq 0.04$) 和小直径 ($D/L < 0.04$)^[11] 单桩冲刷。对于波浪条件下小直径单桩冲刷, Kobayashi 等^[12] 和 Sumer 等^[13] 认为 KC (Keulegan-Carpenter) 是影响平衡冲刷深度的主要参数。 $KC = UT/D$, U 表示近底水质点特征速度, T 表示谱峰周期。Sumer 等^[13] 利用小比尺的水槽试验得到了关于 $KC > 6$ 的经验公式。Zanke 等^[14] 考虑了泥沙特征对冲刷的影响, 得到了波浪、单向流和往复流

条件下统一的平衡冲刷深度公式。Dogan^[11] 的小比尺水槽试验考虑了相对粗糙床面材料的影响, 从而改进了 Sumer 等^[13] 的公式。

为了方便计算, 一些学者也得到了既适用于大直径又适用于小直径单桩的平衡冲刷深度公式。如 Webb 等^[15] 利用前人的大直径和小直径单桩冲刷深度数据, 对 Sumer 等^[13] 的公式重新进行拟合, 得到了含有新的相关系数的公式。Qi 等^[16] 根据组合波流条件下马蹄形漩涡尺度与平衡冲刷深度的关系, 拓展得到了基于 Froude 数的组合波流条件下的平衡冲刷深度公式, 该公式不仅包括了 $KC < 4$ 的大直径单桩冲刷情况, 也包括了 Sumer 等^[17-18] 研究的 KC 较大的小直径单桩冲刷情况, 并且该公式的简化形式也可适用于纯波条件下的冲刷情况。Raaijmakers 等^[19] 通过改进 Breusers 等^[20] 的纯流条件下的公式, 得到了组合波流条件下的平衡冲刷深度公式, 经验证可适用于一些小 KC 的冲刷情况, 也可以被简化用于波流极限情况即纯波条件下。Dogan^[11] 基于 KC 和 D/L 、改进的 Ursell 数, 得到了适用于大直径和小直径单桩的平衡冲刷深度

收稿日期: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作研究与交流项目(51861165102); 国家自然科学基金重点项目(52039005)

作者简介: 宫恩宇(1996—), 男, 博士研究生。

通信作者: 陈松贵, 副研究员, E-mail: chensg1122@163.com

公式。以上公式主要是在小比尺条件下即小比尺水槽试验的基础上建立的。而在大比尺条件下, Chen 等^[21]发现受比尺效应的影响, Sumer 等^[13]提出的公式对大比尺条件下的冲刷深度预测结果偏低; Preperneau 等^[22]也给出了相似的结论; 其他公式的适用性是否也会受到比尺效应的影响, 如何提高现有公式的预测准确度等问题, 有待进一步的研究。

海上风电实际施工过程中, 当风电单桩完成矗立但不能及时采取冲刷防护措施时, 会形成冲刷坑。冲刷坑体积的估算, 对于计算填充所需的抛石或混凝土的体积具有重要意义。目前很少有研究涉及单桩周围冲刷坑体积的变化及相应的影响因素。Link 等^[23]分析了恒定流条件下冲刷坑体积的变化并提出了相应预测公式。Hartvig 等^[24]基于恒定流和不规则波条件下冲刷坑体积的变化, 分析了单桩周围的冲刷和回填过程。Chen 等^[21]对试验后的冲刷坑体积进行了简单拟合得到了相应的预测公式。Welzel 等^[25]基于冲刷坑体积研究了组合波流条件下导管架型结构物周围空间被侵蚀的过程。

目前波浪条件下的单桩冲刷试验主要是在小比尺条件即小比尺水槽试验中进行的, 在大比尺条件

下的试验研究较少。由于大比尺物理模型试验有助于最大限度地减少比尺效应的负面影响, 能更准确地验证模型方法, 因此本文在大比尺水槽中进行了一系列动床冲刷试验, 研究不规则波条件下单桩周围的平衡冲刷深度和冲刷坑体积。

1 试验设置与过程

本试验在天津水运工程研究所大型波流水槽中进行。该水槽为目前全球最大的波浪水槽。水槽长度、宽度和深度分别为 450、5 和 8 m, 一端配有活塞式造波机, 另一端安装了消波装置以处理波反射。在水槽中间区域底部设置长度为 35 m、宽度为 5 m 的沙层, 其中单桩周围区域沙层厚度为 2.3 m, 沿水槽纵向长度为 15 m, 以此模拟 1 种可充分侵蚀的沙床。泥沙的中值粒径 $d_{50}=0.1$ mm, 不均匀系数 $\sigma_g=\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.8>1.3$, 为非均匀沙。在所有试验中, 水深 h 保持在距离沙床表面上方 2.08 m 的恒定水平。将直径 0.5 m 的钢管安装在试验段内中心位置作为单桩, 钢管顶部距沙床表面 5.7 m, 钢管底部被混凝土块固定在沙床表层以下 1.7 m 的位置, 以避免在试验过程中发生摇动, 如图 1 所示。

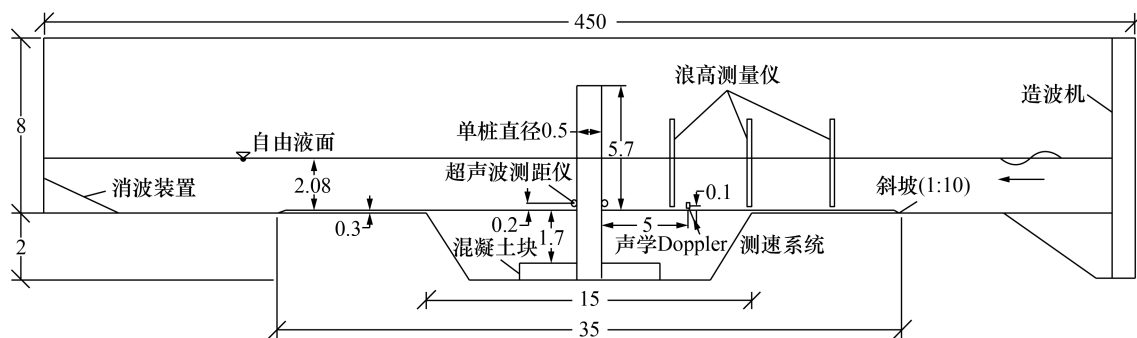


图1 波浪水槽物理模型(单位: m)

在距离单桩上游 5 m 且沙床表面上方 0.1 m 的位置安装了声学 Doppler 测速系统, 以监测底部的流速。在水槽上游的侧壁上安装了 3 个电容式浪高测量仪记录波浪参数。以上 2 种仪器的采样频率均为 20 Hz。使用 12 台水下单点超声波测距仪对单桩周围 12 个点的冲刷过程进行实时监测, 仪器采样频率为 1 Hz, 测距范围为 3.5~110.0 cm, 紧贴桩壁等角度沿 12 个径向方向、距离沙床表面上方 0.2 m 均匀分布。每次测试结束后, 利用三维激光扫描仪测量冲刷坑的体积。扫描范围为距单桩中心下游为 7 m、上游为 2 m, 左右宽度均为 5 m 的矩形区域, 该区域内的深度测量精度约为 1 mm。

本文进行了 4 次测试, 只考虑不规则波条件, 采用联合北海波浪计划 (Joint North Sea Wave Project, JONSWAP) 频谱进行模拟。所有工况的有效波高 $H_{1/3}$ (波高按大小顺序排序后, 取前 1/3 的平均值) 为 0.73~0.88 m; 谱峰周期 T_p (波能密度最大时对应的周期) 为 3.51~7.78 s; KC 均为 4~9; D/L 为 0.017~0.037, 且均在动床冲刷条件下完成。本文利用相对平衡冲刷深度 S/D 和相对冲刷坑体积 V/D^3 分别作为评价平衡冲刷深度 S 和冲刷坑体积 V 的指标, 测试条件和结果如表 1 所示。

表 1 测试条件和结果

工况	$H_{1/3}/m$	T_p/s	$U/(m \cdot s^{-1})$	KC	D/L	S/D	V/D^3
1	0.73	3.51	0.57	4.0	0.037	0.16	0.15
2	0.88	4.09	0.55	4.5	0.033	0.34	1.12
3	0.56	7.78	0.45	7.0	0.017	0.48	2.13
4	0.76	7.50	0.60	9.0	0.019	0.70	4.58

2 平衡冲刷深度

在纯波条件下,小直径单桩周围的平衡冲刷深度主要取决于 KC。Sumer 等^[13]提出了预测平衡冲刷深度的经验公式:

$$S/D = 1.3[1 - \exp(-0.03(KC - 6))], KC \geq 6. \quad (1)$$

本文利用不同波和比尺条件下的 S/D 实测值验证式(1)的准确性,实测数据来自开展小比尺水槽规则波试验的文[11, 13, 26],开展大比尺水槽规则波试验的文[27],以及本文开展的大比尺水槽不规则波试验。结果表明,在前人研究中,无论是在规则波还是不规则波条件下,无论是大比尺水槽还是小比尺水槽试验,实测值的分布趋势基本与式(1)预测的一致;但本文试验的实测值明显大于预测值,如图 2 所示。

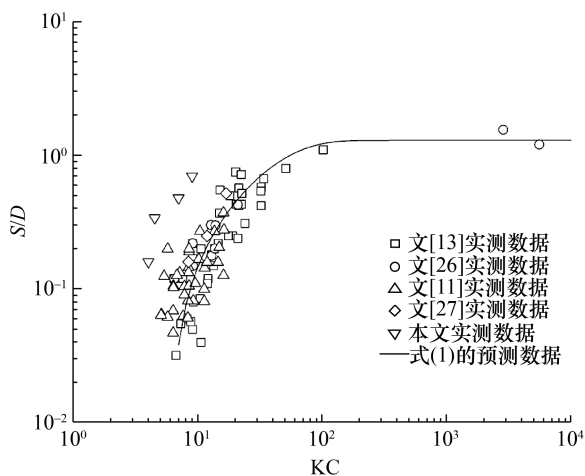


图 2 不同波和比尺条件下的 S/D 实测值与预测曲线的对比

为了进一步验证相关公式的准确性,本文对小直径单桩的平衡冲刷深度公式进行了总结。Zanke 等^[14]根据文[13]的冲刷理论,引入泥沙特征因素参数 U_c ,得到了如下公式:

$$S/D = 2.5 \left(1 - 0.5 \frac{U_c}{U} \right) X_{rel}. \quad (2)$$

其中: X_{rel} 为大 KC 与小 KC 之间的过渡函数, U_c 为水流条件下泥沙起动的水深平均流速。 X_{rel} 与 U_c 的表征形式如下:

$$X_{rel} = \frac{X_{eff}}{1 + X_{eff}}, \quad (3)$$

$$X_{eff} = 0.03(1 - 0.35U_c/U)(KC - 6);$$

$$U_c = 1.4(2\sqrt{sgd_{50}} + 10.5\nu/d_{50}). \quad (4)$$

其中: X_{eff} 为半个波周期内的泥沙相对位移, s 为相对密度, g 为重力加速度, ν 为运动黏滞系数。

Dogan^[11]利用大直径和小直径单桩的冲刷深度数据,分析了平衡冲刷深度和 KC、 D/L 与改进后的 Ursell 数间的关系,分别得到了式(5)、(6)和(7)。 $S/D = 1.3[1 - \exp(-0.022(KC - 4))], KC \geq 4;$

$$S/D = 0.0037 \frac{KC^{2/3}}{\sqrt{D/L}}; \quad (6)$$

$$S/D = 0.75[1 - \exp(-0.015U_{rp}^{0.6})], U_{rp} \leq 10^5. \quad (7)$$

其中 U_{rp} 为改进后的 Ursell 数, $U_{rp} = \frac{H^3 L^2}{h^3 D^2}$, H 为波高。

式(5)根据小比尺条件下不同泥沙粒径的大量动床冲刷试验数据对式(1)进行了改进。式(6)和(7)代表 2 种对大直径和小直径单桩均适用的相对平衡冲刷深度公式。

除此之外,Webb 等^[15]在式(1)的基础上对大直径、小直径单桩的冲刷深度数据进行了重新拟合,更新了相关的系数值,得到

$$S/D = 1.3[1 - 0.99\exp(-0.022(KC - 0.1))]. \quad (8)$$

Raaijmakers 等^[19]和 Qi 等^[16]提出的波流条件下的平衡冲刷深度公式可以简化为纯波条件的公式:

$$S/D = 1.5 \tanh\left(\frac{h}{D}\right) K_w K_h, \quad (9)$$

$$\lg(S/D) = -0.8\exp(0.14/Fr_a) + 1.11. \quad (10)$$

其中: K_w 为波浪作用的修正因子,在纯波条件下 $K_w = 1 - \exp(-0.012KC)$; K_h 为桩高修正系数, $K_h = (h_p/h)^{0.67}$, h_p 为桩高; Froude 数 $Fr_a = U_a/\sqrt{gD}$; U_a 是 1/4 周期内的近底水质点平均轨迹速度,在纯波条件下可以简化为 $U_a = 2U/\pi$ 。

利用文[27]以及本文试验数据,对比验证式(1)、(2)、(5)~(10)在大比尺试验中规则波与不规则波条件下的适用性,结果如图 3 所示。在规则波条件下,各公式预测出的最大冲刷深度分布在 50% 的误差范围内;在不规则波条件下,式(7)和(10)的预测值并不随实测值增大而增大。结合表 1 和图 2 可知,增大的实测值对应着增大的 KC

值,而式(7)和(10)的预测值并不符合该趋势,说明这2个公式在不规则波条件下不适用。这是因为这2个公式分别未考虑 U (与泥沙起动有关)和波浪非线性的影响。此外,在不规则波条件下,各公式的预测值基本不分布在50%的误差线内,说明相比规则波条件,不规则波条件下各公式的预测准确度有待提高。

Preperneau等^[22]曾通过大比尺水槽试验表明式(1)低估了在不规则波下的冲刷深度,并建议采用波的最大轨迹速度 U_{\max} 和平均波周期 T_m 代替文[17]采用的 U 和 T_p 来表征 KC ,再通过式(1)计算平衡冲刷深度,则结果将与大比尺水槽的试验值吻合。因此,本文使用 $KC=U_{\max}T_m/D$ 对 S/D 分别

基于式(1)、(2)、(5)、(6)、(8)和(9)进行了预测,并与实测值进行了比较。结果表明,除式(8)和(9)以外,其余公式的预测值大部分不分布在50%的误差范围内(见图4a)。事实上,Preperneau等^[22]模拟的是整个风暴潮的连续过程,其中包括了不同波能情况下的冲刷回填,实质上是研究考虑比尺效应影响下冲刷回填后的平衡冲刷深度计算问题。Sumer等^[18]认为无论最初有或无冲刷坑的波浪冲刷试验,都可以用相同 KC 通过式(1)计算平衡冲刷深度。但本文试验结果显示,针对最初床面有冲刷坑情况下,计算冲刷回填后的平衡冲刷深度的方法,并不适合最初床面平整的情况。

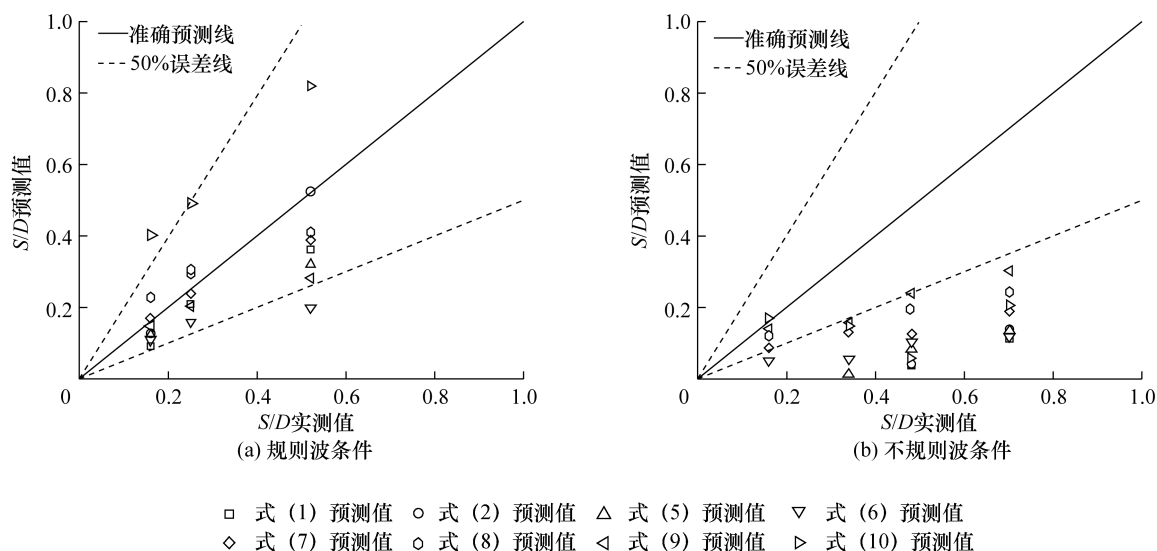


图3 大比尺试验中不同波条件下 S/D 预测值与实测值的对比

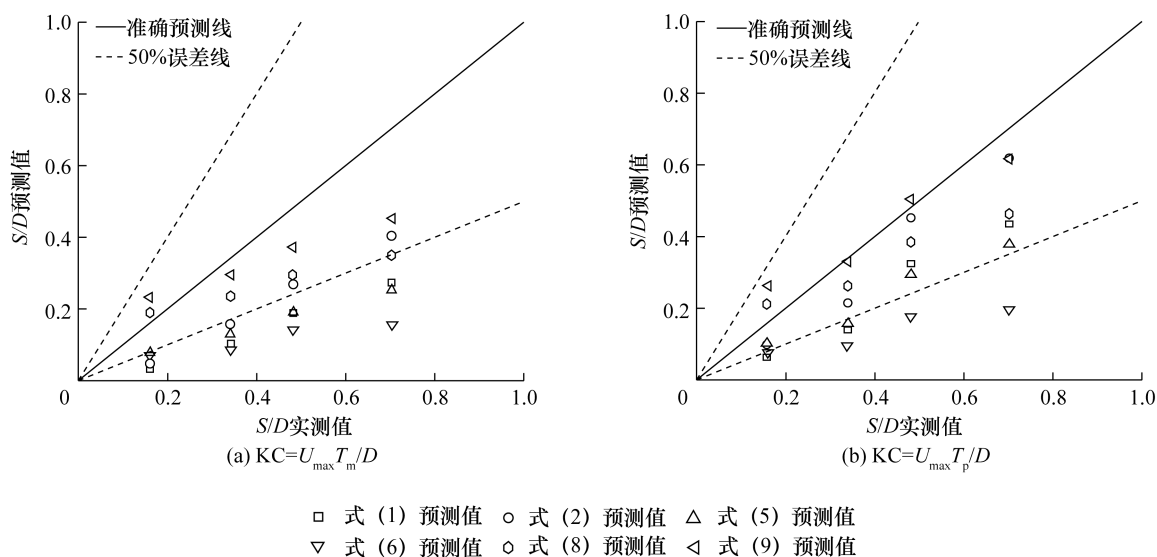


图4 不同 KC 值计算方法下 S/D 预测值与实测值的对比

为了提高各公式的整体准确度,本文使用 $KC=U_{\max} T_p/D$ 对 S/D 分别基于式(1)、(2)、(5)、(6)、(8)和(9)进行了预测,由于预测值都是随着 KC 的增大而增大,而 U_{\max} 、 T_p 计算出的 KC 已经是不同组合条件下的最大 KC ,因此该预测值也是可预测值的最大值,结果如图 4b 所示。对比图 4a 和 4b 可以看出,利用 U_{\max} 、 T_p 表征 KC 而计算出的预测值更接近实测值,表明在不规则波条件下的小直径单桩冲刷试验中,使用 $KC=U_{\max} T_p/D$ 可以提高各公式的准确性。但是式(1)和(6)的预测值整体上仍未进入 50% 的误差范围内。

3 冲刷坑体积

目前为止,很少有研究系统地分析实验室和工程现场的冲刷坑体积。冲刷坑体积通常随着平衡冲刷深度的增加而增加。基于文[11, 14, 15, 19]中描述平衡冲刷深度、冲刷坑体积与 KC 的函数,对式(5)、(2)、(8)和(9)进行非线性回归,分别得到以下 4 种冲刷坑体积计算公式:

$$V/D^3 = 39.738 \{1.3 - 1.3 \exp[-0.02(KC-4)]\}^{2.241} = 39.738 f^{2.241}(KC); \quad (11)$$

$$V/D^3 = 10.506 \left[2.5 \left(1 - 0.5 \frac{U_c}{U_{\max}} \right) X_{\text{rel}} \right]^{1.785} = 10.506 f^{1.785}(KC); \quad (12)$$

$$V/D^3 = 62.057 \{1.3 - 1.287 \exp[-0.022(KC-0.1)]\}^{3.387} = 62.057 f^{3.387}(KC). \quad (13)$$

$$V/D^3 = 19.695 \left[\tanh\left(\frac{h}{D}\right) K_w K_h \right]^{3.042} = 19.695 f^{3.042}(KC). \quad (14)$$

图 5 为式(11)~(14)计算的冲刷坑体积预测值和实测值。4 个公式的预测值分布在 25% 误差范围内的概率分别为 50%、75%、50% 和 50%, 因此式(12)可以作为合理估计冲刷坑体积的预测公式。在海上风电建设工程现场,往往在完成矗立单桩之后,铺设防护措施之前,冲刷坑就已经形成,但在现有行业规范中并没有对冲刷坑体积进行系统的统计或预测。因此,式(12)的建立具有较强的现实意义和实用价值。

4 结 论

本文通过大比尺物理模型试验,对不规则波条件下的单桩局部冲刷进行研究,结果表明:前人研究的平衡冲刷深度公式在规则波条件下具有较好的适用性,而在不规则波条件下的预测值普遍小于实

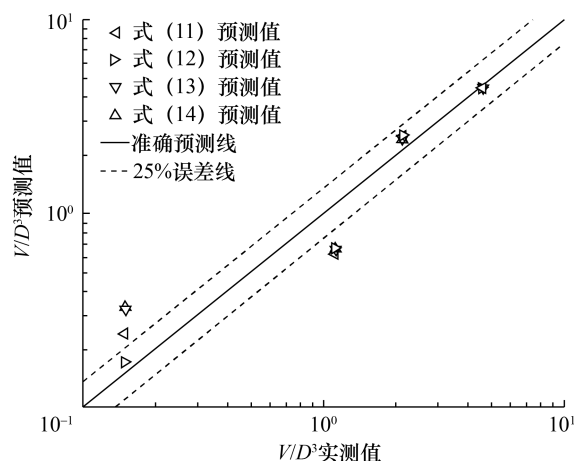


图 5 冲刷坑体积预测值与实测值

测值。本文通过改进 KC 的计算方法,有效提高了各公式在不规则波条件下的预测准确度;以现有平衡冲刷深度公式为基础提出了局部冲刷坑体积预测公式,为单桩防护施工时抛石冗余量的估算提供了简便快捷的预测方法。

参考文献 (References)

- [1] CHEN G, LI X B, SUN B, et al. Effect of incoming boundary layer thickness on the flow dynamics of a square finite wall-mounted cylinder [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(1): 015105.
- [2] QI W G, LIU J, GAO F P, et al. Quantifying the spatiotemporal evolution of the turbulent horseshoe vortex in front of a vertical cylinder [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(1): 015110.
- [3] WARDHANA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2003, 17(3): 144-150.
- [4] IMAM B M, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Causes and consequences of metallic bridge failures [J]. *Structural Engineering International*, 2012, 22(1): 93-98.
- [5] DU S, WANG Z, WANG R, et al. Effects of flow intensity on local scour around a submerged square pile in a steady current [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(8): 085126.
- [6] REHMAN K, WANG Y C, WASEEM M, et al. Tree-based machine learning models for prediction of bed elevation around bridge piers [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(8): 085105.

- [7] SUMER B M, FREDSE J. The mechanics of scour in the marine environment [M]. London: World Scientific, 2002.
- [8] WHITEHOUSE R. Scour at marine structures: A manual for practical applications [M]. London: Thomas Telford, 1998.
- [9] GUAN D W, XIE Y X, YAO Z S, et al. Local scour at offshore windfarm monopile foundations: A review [J]. *Water Science and Engineering*, 2022, 15(1): 29–39.
- [10] 梁森栋. 海洋环境中结构基础冲刷防护措施及预警模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- LIANG S D. Study on Scour Countermeasures and Forecasting for Structure Foundations in Marine Environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [11] DOGAN M. The equilibrium depth of wave scour around both slender and large piles [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109474.
- [12] KOBAYASHI T, ODA K. Experimental study on developing process of local scour around a vertical cylinder [M]. Kobe: Coastal Engineering, 1995.
- [13] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTIANSEN N. Scour around vertical pile in waves [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1992, 118(1): 15–31.
- [14] ZANKE U C E, HSU T W, ROLAND A, et al. Equilibrium scour depths around piles in noncohesive sediments under currents and waves [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(10): 986–991.
- [15] WEBB B M, MATTHEWS M T. Wave-induced scour at cylindrical piles: Estimating equilibrium scour depth in a transition zone [J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2436(1): 148–155.
- [16] QI W G, GAO F P. Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current [J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(5): 1030–1039.
- [17] SUMER B M, FREDSE J. Scour around pile in combined waves and current [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127(5): 403–411.
- [18] SUMER B M, PETERSEN T U, LOCATELLI L, et al. Backfilling of a scour hole around a pile in waves and current [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2013, 139(1): 9–23.
- [19] RAAIJMAKERS T, RUDOLPH D. Time-dependent scour development under combined current and waves conditions-laboratory experiments with online monitoring technique [C]// *Proceedings 4th International Conference on Scour and Erosion*. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2008: 152–161.
- [20] BREUSERS H N C, NICOLLET G, SHEN H W. Local scour around cylindrical piers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1977, 15(3): 211–252.
- [21] CHEN S G, GONG E Y, ZHAO X, et al. Large-scale experimental study on scour around offshore wind monopiles under irregular waves [J]. *Water Science and Engineering*, 2022, 15(1): 40–46.
- [22] PREPERNAU U, GRÜNE J, Schmidt-Kopenhagen R, et al. Large-scale model tests on scour around slender monopile under live-bed conditions [C]// *Proceedings of the 2nd International conference on the Application of Physical Modeling to Port and Coastal Protection*. Bari: The American Society of Civil Engineers, 2008: 2–5.
- [23] LINK O, ZANKE U. On the time-dependent scour-hole volume evolution at a circular pier in uniform coarse sand [C]// *Proceedings 2nd International Conference on Scour and Erosion*. Singapore: The American Society of Civil Engineers, 2004.
- [24] HARTVIG P A, THOMSEN J M C, FRIGAARD P, et al. Experimental study of the development of scour and backfilling [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2010, 52(02): 157–194.
- [25] WELZEL M, SCHENDEL A, SCHLURMANN T, et al. Volume-based assessment of erosion patterns around a hydrodynamic transparent offshore structure [J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3089.
- [26] KAWATA Y, TSUCHIYA Y. Local scour around cylindrical piles due to waves and currents combined [J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1988, 1(21): 97.
- [27] CHEN B, LI S W. Experimental study of local scour around a vertical cylinder under wave-only and combined wave-current conditions in a large-scale flume [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(9): 04018058.

Large-scale experimental study on scour around monopile under the action of waves

GONG Enyu¹, CHEN Songgui^{2*}, CHEN Xin^{1,3}, ZHANG Kaihao⁴, GUAN Dawei⁵, ZHENG Jinhai⁵

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Tianjin Research Inst. for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

3. Beijing Eng. Research Center of Safety and Energy Saving Technol. for Water Supply
Network System, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

4. Foshan Ever Profit Power Plant Co., Ltd., Foshan 528100, China;

5. Key Lab. of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: [Objective] The development of offshore wind power technology is of great importance to China's dual carbon strategy, and the estimation of scour depths is a widely studied topic in the study of scour around offshore monopiles. The scale effect usually limits the applicability of the scour depth estimation equation obtained from traditional small-scale physical models. Thus, by analyzing the applicability of the existing scour depth prediction formulae under different scale conditions, this study aims to obtain a method to improve the estimation accuracy of scour depth formulae and derive a concise formula to calculate the scour hole volume according to the relationship between the scour hole volume and scour depth. [Methods] Large-scale (1:13) experiments were conducted to study the maximum equilibrium scour depth and local scour volume around a monopile under irregular waves. The Keulegan - Carpenter (KC) numbers ranged from 4 to 9. According to the large-scale test data, the scour depth formulae under the actions of regular waves and irregular waves were compared in terms of applicability. The self-limitation of the formulae was analyzed, the influence of the KC number definition on the calculation of equilibrium scour depth was examined, and the different KC number definitions under irregular waves were compared in terms of applicability. Furthermore, through the analysis of the relationship between the scour hole volume and the scour depth, the factors affecting scour hole volume were determined, and according to this analysis, a formula for determining the scour hole volume was derived. [Results] The large-scale experimental results show that: 1) The estimation of the scour depth by the existing formulae can be guaranteed to be within the deviation range of $\pm 50\%$ under regular waves, whereas it fell below the deviation line of 50% under irregular waves. 2) The depth of a backfilled scour hole for a given KC is different from the scour depth obtained with an initially flat bed and with the same KC. 3) The maximum orbital velocity of the wave and peak wave period are used to redefine the KC number and applied to each formula. Moreover, the estimation accuracy is significantly improved, and predictions of the formulae were within the deviation range of $\pm 50\%$, except for some formulae with limited applicability. 4) The KC number is an important factor affecting the scour hole volume. The formula for predicting the scour hole volume based on the existing equilibrium scour depth formula is within the deviation range of $\pm 25\%$. [Conclusions] Through the analysis of large-scale experimental data and previous data, the limitations of traditional scour depth formulae obtained using small-scale experiments are demonstrated under irregular waves. The estimation accuracy of the existing formula under irregular waves can be improved by improving the KC number calculation method. Additionally, according to the results of three-dimensional terrain scanning, the relationship between the local scour volume around a monopile and the existing equilibrium scour depth formulae is derived. Overall, this study provides a concise and convenient method for estimating the protection material amount around monopile.

Key words: large-scale test; KC number; equilibrium scour depth; scour hole volume

(责任编辑 刘婉琪)