

湛江某海上风电桩基局部冲刷特征研究

潘冬冬^{1,2}, 李健华^{1,2}, 周川^{1,2}, 王俊^{1,2}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广东 广州 510663)

摘要:海上风电场桩基局部冲刷是工程设计与运行阶段的重要参数之一。基于湛江某海上风电场桩基 3 次现场局部冲刷实测数据, 进行冲刷坑最大深度、冲刷坑半径和冲淤变化特征的分析与研究; 根据桩基局部冲刷经验公式, 采用工程海域实测海洋水文动力学数据进行最大冲刷深度与冲刷半径的计算, 并进行公式计算值的对比与分析。结果表明: 桩基础在防冲刷设施的保护下, 3 次实测最大冲刷深度基本稳定为 4.0 m, 最大冲刷深度与桩径之比为 0.57。而经验公式的最大冲刷深度与桩径之比均超过了 1.1, 说明桩基防冲刷设施取得了一定的效果, 冲刷坑半径的计算值与现场实测值吻合较好。建议海上风电场在运行阶段进一步加强桩基冲刷坑监测与防护。

关键词:海上风电; 桩基; 局部冲刷深度; 冲刷坑半径

中图分类号: TV148

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2020)04-0271-08

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2020.04.005

引用格式: PAN D D, LI J H, ZHOU C, et al. Study on local scour characteristics of wind power pile foundation in offshore wind farm in Zhanjiang[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(4): 271-278. 潘冬冬, 李健华, 周川, 等. 湛江某海上风电桩基局部冲刷特征研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(4): 271-278.

桩基础局部冲刷是一个具有重大实用价值的研究内容, 伴随着国内海上风电场的兴起与发展, 这一研究的重要性日益凸显。由于海洋动力作用的因素众多, 且不同海域的海底地形、底质类型、潮流与波浪作用不尽相同, 使得桩基局部冲刷深度与冲刷范围的研究更加复杂多变。

根据已有研究成果, 桩基局部冲刷主要通过经验公式、物理模型试验和现场地形测量等方法进行研究与分析, 韩海骞^[1]、Wang 和 Herbich^[2]分别通过模型试验的方法提出了 2 个桩基局部冲刷公式, 这 2 个经验公式在实际工程上应用较多, 而且已被《海上风电场工程风电机组基础设计规范》^[3]收录。周益人和陈国平^[4]通过物理模型试验, 研究不规则波作用下的墩柱周围局部冲刷机理, 重点对床面泥沙粒径进行详细分析; 张玮等^[5]和祁一鸣等^[6]利用现场实测数据和物理模型试验等方法研究了江苏近海风电场桩基局部冲刷深度, 通过与实测数据对比, 发现采用叠加波浪作用下的韩海骞公式^[1]进行局部冲刷深度计算更为合理。

本文以湛江某海上风电场某一桩基局部实测地形数据为研究对象, 进行局部最大冲刷深度、冲刷坑半径和冲淤变化特征的分析与研究, 在此基础上, 进一步进行桩基局部冲刷经验公式的计算, 并且与实测值对比分析, 以期为其他同类工程和本风电场运行阶段防冲刷保护提供参考。

1 研究区域概况

1.1 工程概况

湛江某海上风电场位于徐闻县外海海域, 海底地貌属于水下浅滩、水下岸坡地貌单元, 有部分沙洲, 海底

收稿日期: 2020-07-27

资助项目: 广东省自然资源厅基金项目——海上风电项目建设期和运营期环境影响研究—以广东粤电湛江外罗海上风电项目为例 (GDOE[2019]A09)

作者简介: 潘冬冬(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋水文方面研究. E-mail: pandd15@163.com

(李 燕 编辑)

泥面标高一般为-13~-1 m,海底地形复杂,起伏较大,属于近海浅水区域风电场,风电场址与实测桩基位置见图 1。

工程海域潮汐类型为不正规半日潮,年平均海面为 2.13 m,平均高潮位为 2.77 m,平均低潮位为 1.54 m,平均潮差为 1.23 m,最大潮差为 2.69 m。潮流类型为不规则全日潮,表现为明显的往复流特征,全潮测验期间实测最大流速 1.50 m/s。实测年平均有效波高为 1.2 m,平均周期为 4.5 s,常浪向与强浪向均为 E 向。场址表层沉积物中值粒径为 0.14~0.32 mm,平均值为 0.21 mm,并且南部沉积物明显粗于北部。

1.2 桩基防冲刷保护措施

防冲刷保护采用砂袋与砂被复合的保护方式,砂袋和砂被采用渗透系数不小于 10^{-3} cm/s 的细砂或者中粗砂,粒径约 0.075 mm 的颗粒质量分数大于 85%,黏性颗粒小于 3%。砂被制作时考虑收缩,平均厚度为 0.40 m;砂被与桩基之间的空隙利用砂袋填平。砂被铺设面积约为 1 200 m²,砂袋用量约为 200 m³。桩基防冲刷保护立面图与平面图见图 2。

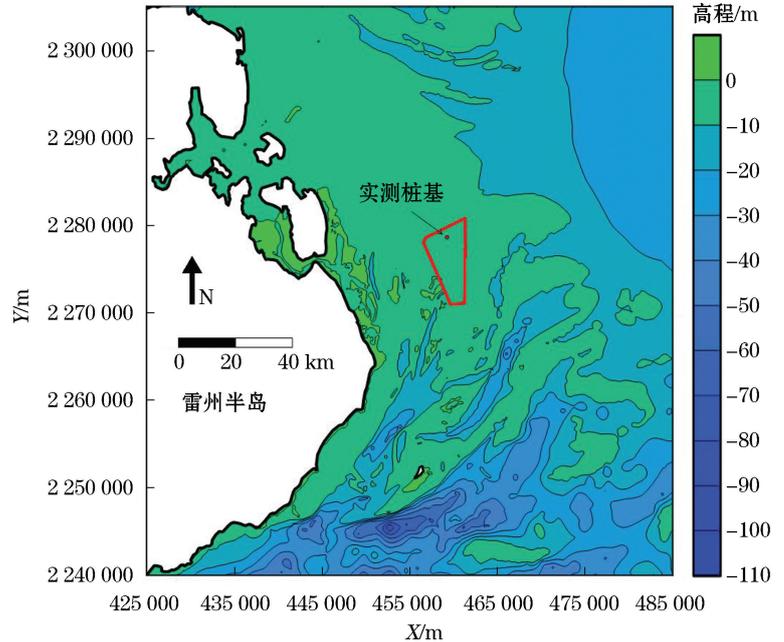
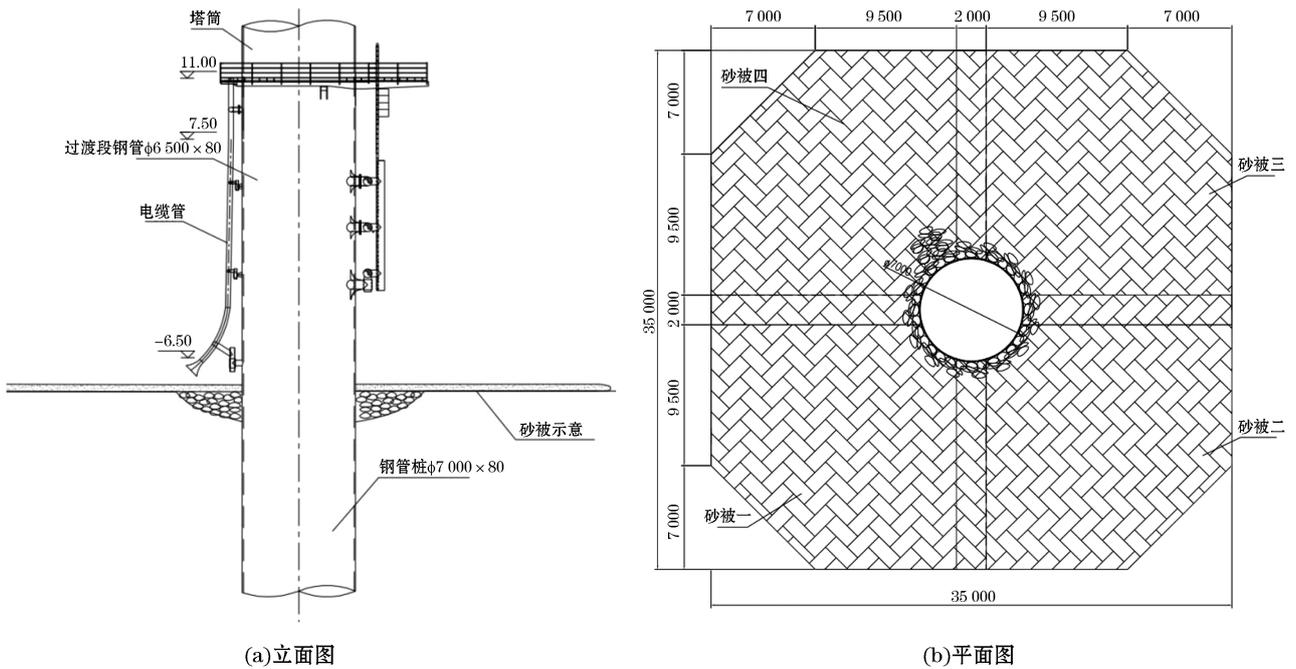


图 1 海上风电场位置

Fig.1 Location map of the offshore wind farm



注:图中尺寸以 mm 为单位,高程以 m 为单位,标高为 1985 国家高程

图 2 桩基防冲刷保护示意图

Fig.2 A schematic diagram of anti-scour protection of pile foundation

2 桩基局部地形测量与分析

2.1 桩基局部地形

桩基局部地形的测量方法为:以桩基础为中心,在 500 m×500 m 的范围内,采用 GPS 星链差分技术配合多波束测深仪组成的自动定位测深系统对桩基局部冲刷深度进行测量。风电桩基的施工时间为 2018 年,分别于 2019 年 4 月、2020 年 4 月和 2020 年 5 月对桩基局部地形进行了 3 次测量。地形图见图 3(1985 国家高程基准)。

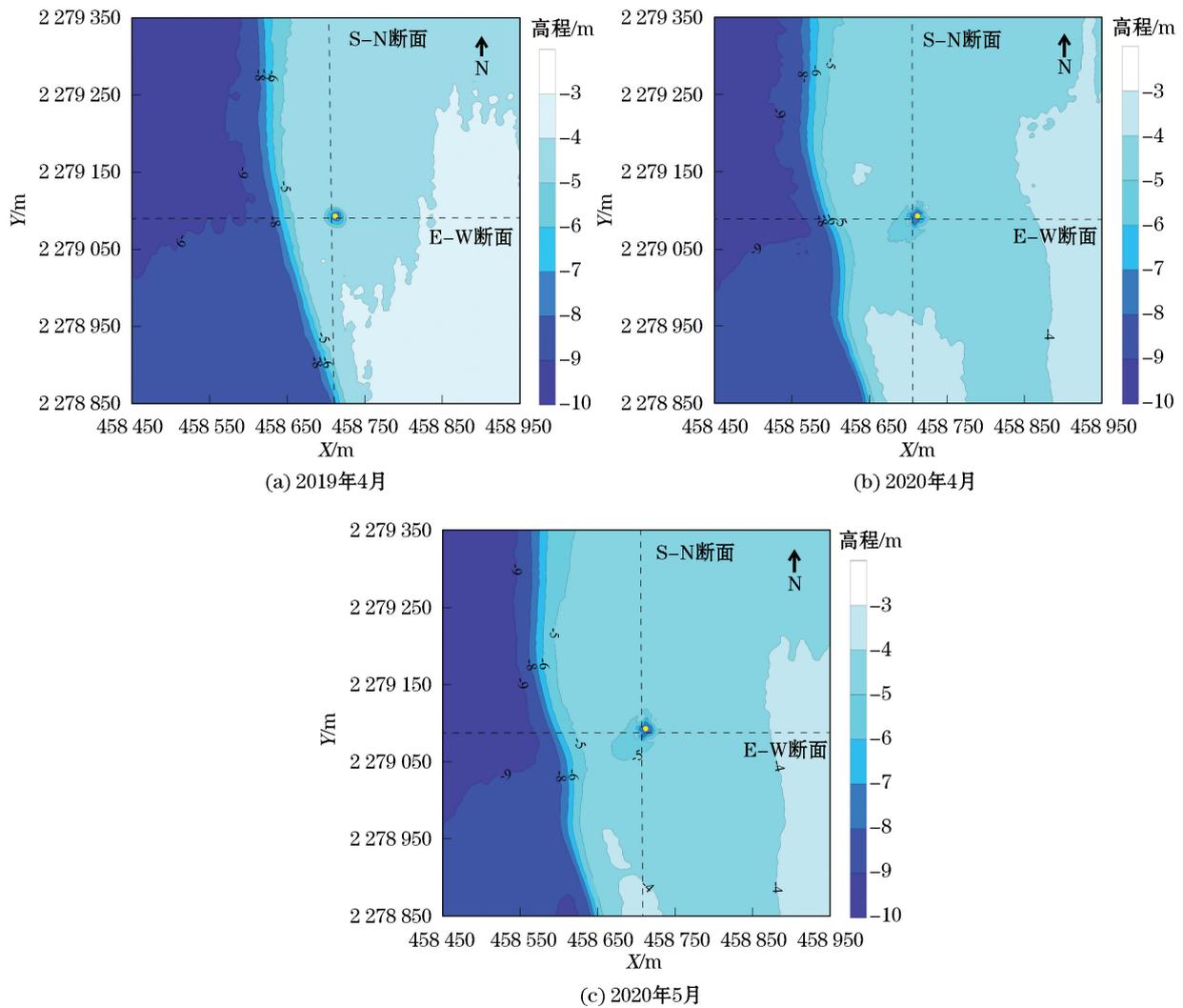


图 3 桩基附近实测地形

Fig.3 Topography measured near the pile foundation

由图 3a 可见,2019 年 4 月桩基周围局部冲刷坑接近于圆形漏斗,冲刷坑半径约为 15 m;地形高程最深为-8 m,最浅为-4 m,冲刷坑的最大深度为 4 m,并且冲刷坑由外往内不断变深。由图 3b 可见,2020 年 5 月桩基周围局部冲刷坑的形状发生了变化,形状不再接近于圆形漏斗,而是一个沿 NE—SW 走向的椭圆形漏斗,并且桩基 NW—NE—SE 方向的冲刷范围较小,范围约为 15 m,而西南方向最大的冲刷范围达到

50 m,与2019年4月的地形相比,呈现出明显的西南向冲刷加剧的趋势,但是冲刷坑的最大深度没有明显变化。由图3c可见,2020年5月桩基周围局部冲刷坑的形状与最大深度与2020年4月地形相比变化很小,处于稳定状态。

图4为3次实测地形图中2个断面处的剖面图。由图4a可见,冲刷坑呈现出明显的漏斗状,冲刷坑的最大深度变化量很小,基本维持在4 m左右。但是在桩基西侧约100 m存在一个地形变化较大的海底斜坡,由东向西逐渐变深,由2020年与2019年的实测地形相比,斜坡明显向西移动了约50 m,说明此处发生过较大的海床淤积过程。由图4b可见,冲刷坑也呈现出漏斗状,2019年4月冲刷坑的最大深度为3 m左右,而2020年的两次最大冲刷深度接近4 m。

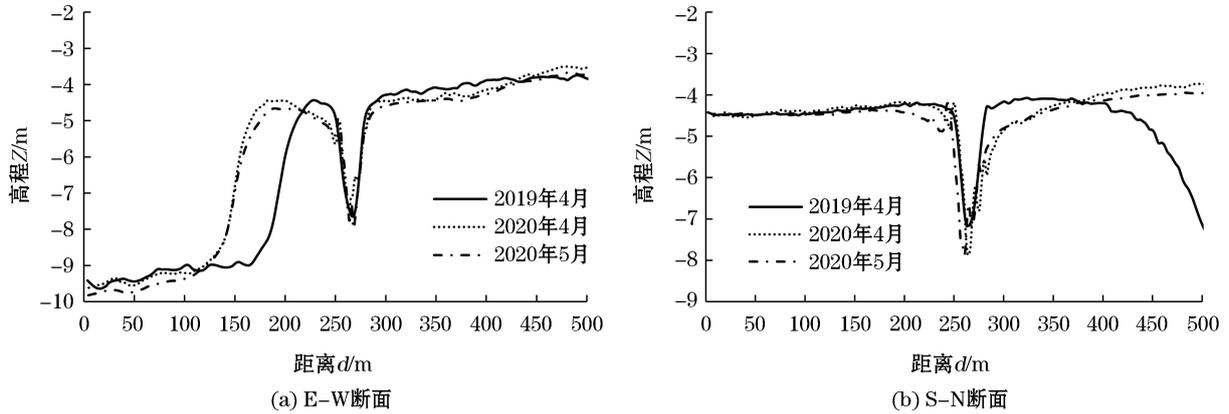


图4 桩基周围海底地形剖面图

Fig.4 Topographic profiles of the seafloor around the pile foundation

2.2 桩基局部冲淤变化特征分析

图5给出了2019年4月至2020年4月的年度冲淤变化图,其中正值表示淤积,负值表示冲刷。由图5a可见,桩基附近500 m范围内发生了较大的冲淤变化过程,尤其是桩基西侧的海底斜坡,最大淤积深度达到

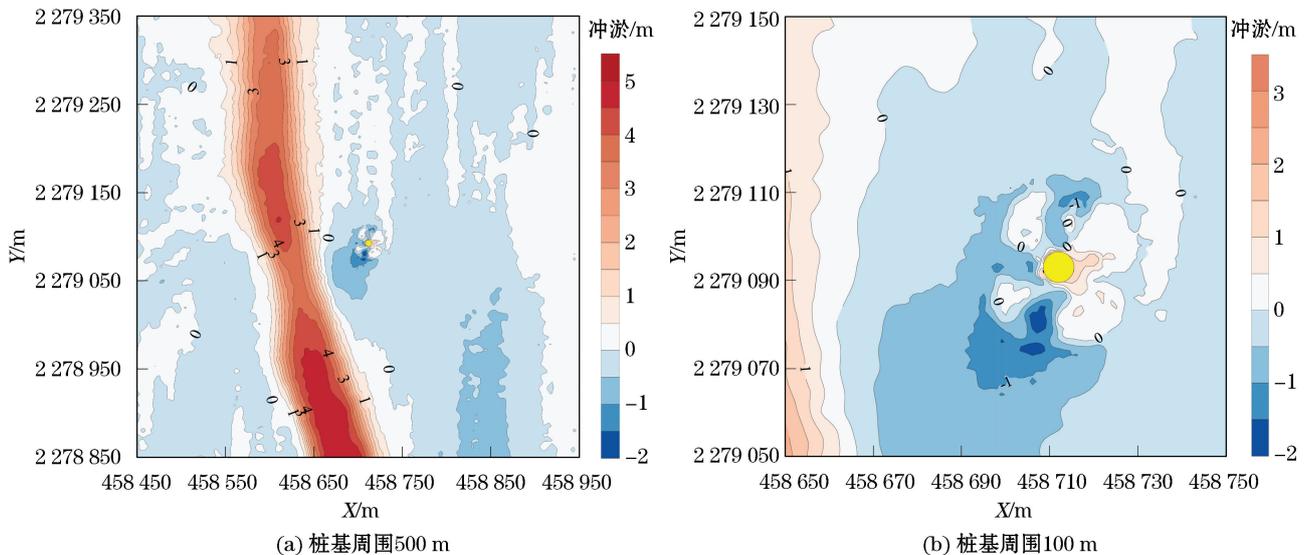


图5 桩基周围年度冲淤变化图

Fig.5 Annual variations of the scouring and silting around the pile foundation

了 5 m 左右,其原因可能与某次或几次极端海洋动力变化相关。图 5b 为桩基周围 100 m 范围局部冲淤变化图,由图可见,桩基西南侧明显发生冲刷,最大冲刷深度超过 2 m,在桩基东侧产生少量淤积,淤积深度约 0.5 m,从冲淤形态上看,桩基附近不冲不淤的形状类似“X”形状,其原因可能是在潮流动力长期作用下形成的冲淤形态。

图 6 给出了 2020 年 4—5 月的月度冲淤变化。由图 6a 可见,桩基附 500 m 范围内没有发生较大的冲淤变化过程,海床基本处于稳定的状态。图 6b 为桩基周围 100 m 范围局部冲淤变化图,由图可见,桩基北侧和东侧发生少量冲刷,冲刷深度约为 1~2 m,其他方向均较稳定,处于不冲不淤状态。综上所述,在正常海洋水动力环境下,桩基局部最大冲刷深度已经达到相对稳定状态。

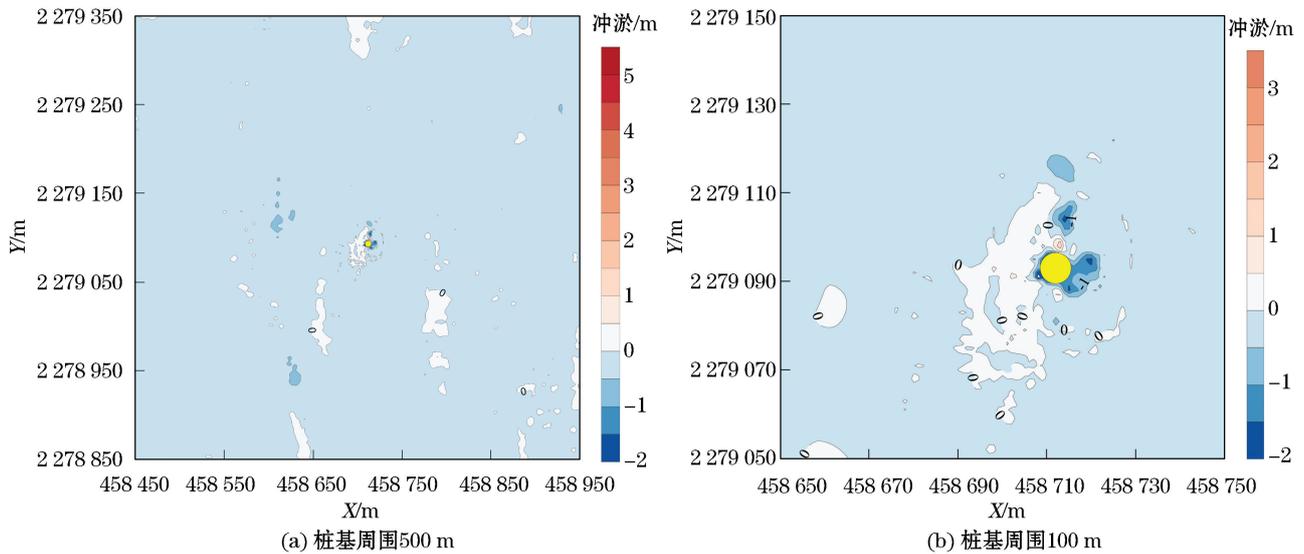


图 6 桩基周围月度冲淤变化图

Fig.6 Monthly variations of the scouring and silting around the pile foundation

3 桩基局部冲刷公式及应用

3.1 桩基局部冲刷公式

3.1.1 韩海骞公式

韩海骞通过物理模型试验数据,经过量纲分析得到潮流作用下桩基础局部冲刷深度计算公式^[1],通常简称其为韩海骞公式:

$$\frac{h_b}{h} = 17.4K_1K_2 \left(\frac{B}{h}\right)^{0.326} \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0.167} F_r^{0.628}, \quad (1)$$

$$F_r = \frac{u}{(gh)^{0.5}}, \quad (2)$$

式中: h_b 为潮流作用下桩基础最大冲刷深度(m); h 为全潮最大水深(m); B 为最大水深条件下平均阻水宽度(m); d_{50} 为泥沙中值粒径(m); F_r 为弗汝德(Froude)参数; u 为全潮最大流速(m/s); K_1 为基础桩平面布置系数; K_2 为基础桩处布置系数。

韩海骞公式适用于单纯水流条件下的强潮流作用时的局部冲刷计算,而实际海域中存在波浪共同作用,根据《港口航道与水文规范》^[7]中波浪水质点平均流速公式计算波浪对局部冲刷的影响,再进行潮流流速的叠加,从而得到波浪共同作用下的最大流速,波浪水质点平均流速计算公式为

$$u = \frac{\pi H}{T \sinh(kh)}, \quad (3)$$

式中: u 为波浪水质点的平均流速(m/s); H 为有效波高(m); h 为水深(m); k 为波数, T 为波周期(s)。

3.1.2 王汝凯公式

Wang 和 Herbich^[2]在波浪水槽中做了波流共同作用下的普遍冲刷试验和孤立桩周围沙基冲刷试验。通过量纲分析得到相对冲刷深度的经验公式,通常简称为王汝凯公式:

$$\lg\left(\frac{S_{ul}}{h}\right) = -1.293 + 0.1917 \lg \beta, \quad (4)$$

$$\beta = N_f \frac{H}{L} U_r N_s N_{rp} = \frac{H^2 L V^3 D [V + (1/T - V/L) HL / 2h]^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] \nu g^2 h^4 d_{50}}, \quad (5)$$

$$N_f = \frac{V^2}{gh}, U_r = \frac{HL^2}{h^3}, N_s = \frac{V_{fw}^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] g d_{50}}, N_{rp} = \frac{VD}{\nu}, \quad (6)$$

式中: S_{ul} 为桩基础最大冲刷深度(m); N_f 为水流的 Froude 数的平方; U_r 为 Ursell 数; N_s 为颗粒 sediment 数; N_{rp} 为桩的雷诺数; D 为桩径; L 为波长(m); V 为行进流速(m/s); V_{fw} 为波流合成速度(m/s); h 为行进水深(m); g 为重力加速度(m/s²); ρ_s 为泥沙干密度(kg/m³); ρ 为水密度(kg/m³); d_{50} 为泥沙中值粒径(mm); ν 为水的运动黏滞系数(m²/s)。

3.1.3 桩基局部冲刷范围

冲刷坑的范围可以用冲刷坑半径表示,其计算公式^[3]为

$$r = \frac{D}{2} + \frac{S}{\tan \varphi}, \quad (7)$$

式中: r 为冲刷坑半径(m); S 为冲刷坑的最大深度(m); φ 为土体内摩擦角(°)。

3.2 局部冲刷公式参数敏感性分析

3.2.1 全潮最大流速

工程海域全潮测验实测流速成果表明,各测点最大流速介于 1.2~1.5 m/s。图 7 对比了局部冲刷公式在不同流速作用下的最大冲刷深度。由图 7 可见,桩基局部最大冲刷深度随流速的增大而增大;韩海骞公式在叠加了波浪作用下的冲刷深度后比未叠加时增大了 7%~12%;王汝凯公式计算值比韩海骞公式计算值偏大 20%~40%,并且随着流速的增大,冲刷深度增大值更加显著。

3.2.2 中值粒径

根据场址底质调查结果,表层沉积物中值粒径为 0.14~0.32 mm,平均值为 0.21 mm,并且南部沉积物明显粗于北部。图 8 对比了局部冲刷公式在不同中值粒径条件下的最大冲刷深度。由图 8 可见,韩海骞公式冲刷深度计算值随粒径的增大而增大,在叠加了波浪作用下的冲刷深度后比未叠加时增大了 8%;王汝凯公式冲刷深度计算值随粒径的增大而减小,并且其敏感性较大。原因为韩海骞公式主要针对钱塘江的桩基础,中值粒径取值范围较广;而王汝凯公式是波流共同作用下孤立桩的冲刷试验,适用于无黏性的细砂与中粗砂。

3.3 局部冲刷实测值与计算值对比与分析

根据 2019 年现场实测数据及相关资料,用于桩基局部冲刷计算的部分参数见表 1。桩基局部冲刷实测值与 3 个经验公式计算值的对比结果见表 2。在砂袋与砂被复合保护下,桩基实测最大局部冲刷深度为 4.0 m,最大冲刷深度与桩径之比为 0.57。3 个经验公式的最大冲刷深度与桩径之比均超过了 1.1,由王汝凯公式计算的桩径之比达到了 1.64。桩基的冲刷坑半径的公式计算值与现场实测值吻合较好,尤其是韩海骞公式的计算结果与实测值基本一致。3 个经验公式是在不同环境条件下总结得到的,均有各自的适用条件,

在工程设计上有着广泛的应用。由于本文实测桩基采取了有效的防冲刷设施,改善了桩基周围的局部水动力条件,所以冲刷深度明显小于各经验公式的计算值。

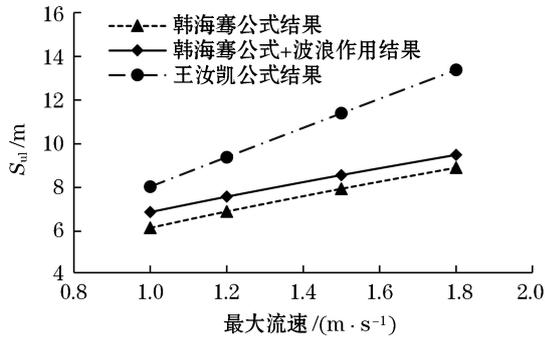


图7 最大流速的影响

Fig.7 The influence of maximum flow velocity

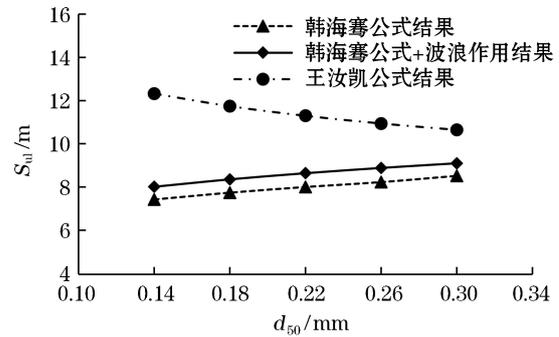


图8 中值粒径的影响

Fig.8 The Influence of median diameter

表1 局部冲刷公式相关参数表

Table 1 Table of parameters related to the local scour formula

桩径 D/m	水深 h/m	最大流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	有效波高 H/m	平均周期 T/s	中值粒径 d_{50}/mm	泥沙干密度 $P_s/(kg \cdot m^{-3})$	运动黏滞系数 $\nu/(m^2 \cdot s^{-1})$	土体内摩 擦角 $\varphi/(\circ)$
7.0	10.7	1.5	1.2	4.5	0.21	2 650	$1.05e^{-6}$	32

表2 局部冲刷公式计算值与实测值对比

Table 2 Comparison between values calculated by using local scour formula and measured in-situ

冲刷坑指标	实测值(防冲刷保护)	韩海骞公式计算结果	韩海骞公式+波浪作用结果	王汝凯公式计算结果
最大冲刷深度/m	4.0	7.9	8.6	11.5
最大冲刷深度/ D	0.570	1.130	1.230	1.640
冲刷坑半径/m	15.0	15.5	16.3	20.8

综上,虽然桩基础周围的砂袋与砂被复合防冲刷设施取得了一定的效果,但是伴随着已经形成的冲刷坑,在极端海洋动力作用下,工程海域的海床稳定性较差,桩基周围可能会发生进一步冲刷。所以,在工程运行阶段,建议定期开展桩基础局部冲刷深度监测,防止冲刷坑进一步加深导致桩基失稳。

4 结 论

本文根据湛江某海上风电场桩基3次现场局部冲刷实测数据,进行冲刷坑最大深度、冲刷坑半径和冲淤变化特征的分析,研究结果表明:

1) 桩基在砂袋与砂被复合保护下,局部冲刷坑呈现出明显的圆形漏斗状,冲刷坑的最大深度变化量较小,基本维持在4 m左右,最大冲刷深度与桩径之比为0.57,冲刷坑半径为15 m。在正常海洋动力条件下,认为桩基局部最大冲刷深度已经达到相对稳定状态。

2) 通过2020年与2019年实测桩基周围地形对比,2020年的桩基础西侧斜坡明显向西移动了约50 m,说明此处发生过较大的海床淤积过程,工程海域海床稳定性较差,在极端海况下容易发生整体性变化。

3) 通过桩基局部冲刷经验公式计算值与现场实测值对比可知,经验公式计算的最大冲刷深度与桩径之比均超过了1.1,明显高于实测值,说明桩基防冲刷设施取得了一定的效果,冲刷坑半径的计算值与现场实测值吻合较好。

4) 建议海上风电场在运行阶段定期进行桩基冲刷坑监测与防护。

参考文献 (References):

- [1] HAN H Q. Research on local scour at bridge piers under tidal current action[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 韩海骞. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] WANG R K, HERBICH J B. Combined current and wave produced scour around a single pile[R]. Texas, USA: Texas Engineering Experiment Station, 1983.
- [3] China Renewable Energy Engineering Institute. Code for design of wind turbine generator system foundations for offshore wind power projects: NB/T 10105—2018[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019: 105-107. 水利水电规划设计总院. 海上风电场工程风电机组基础设计规范: NB/T 10105—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 105-107.
- [4] ZHOU Y R, CHEN G P. Study on local scour around a large circular cylinder under irregular wave action[J]. Journal of Sediment Research, 2007, 1(5): 17-23. 周益人, 陈国平. 不规则波作用下墩柱周围局部冲刷研究[J]. 泥沙研究, 2007, 1(5): 17-23.
- [5] ZHANG W, PU X, LIAO Y D, et al. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 105-109. 张玮, 濮勋, 廖迎娣, 等. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 105-109.
- [6] QI Y M, LU P D, ZENG C J, et al. Experimental studies on local scour of offshore wind turbine pile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 60-67. 祁一鸣, 陆培东, 曾成杰, 等. 海上风电桩基局部冲刷试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 60-67.
- [7] CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Code of hydrology for harbor and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd. 2015: 74-75. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2015: 74-75.

Study on Local Scour Characteristics of Wind Power Pile Foundation in Offshore Wind Farm in Zhanjiang

PAN Dong-dong^{1,2}, LI Jian-hua^{1,2}, ZHOU Chuan^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Local scour of a pile foundation in offshore wind farm is one of the important parameters in engineering design and operational stage. Based on the local scour data measured in-situ 3 times at a pile foundation in an offshore wind farm in Zhanjiang, the maximum depth and radius of scour pits and the changing characteristics of scouring and silting are analyzed and studied. The maximum depth and radius of the scouring are calculated according to the empirical formula of local scour of pile foundation and by using marine hydrodynamic data measured in the engineering sea area, and then the calculated values are compared and analyzed. The results indicate that under the protection of scour-proofing facilities, the maximum scour depth of the pile foundation measured in-situ 3 times is stabilized basically at 4.0m and the ratio of maximum scour depth to pile diameter is 0.57. The ratio of the maximum scour depth to the pile diameter calculated by using the empirical formula is greater than 1.1, indicating that the scour-proofing facilities for the pile foundation have a certain effect. The values calculated for the scour pit radius are in good agreement with those measured in-situ. It is therefore suggested that during the operational stage of an offshore wind farm the monitoring and protection of the scour pits of the pile foundation should be enhanced further.

Key words: offshore wind power; pile foundation; local scour depth; radius of scour pit

Received: July 27, 2020