

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.009

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. (QI Yi-ming, LU Pei-dong, ZENG Cheng-jie, et al. Experimental studies on local scour of offshore wind turbine pile [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 60-67.)

海上风电桩基局部冲刷试验研究

祁一鸣^{1,2}, 陆培东¹, 曾成杰¹, 陈可锋¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 港口海岸及近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 风电桩基既承担风机自身荷载, 又受到叶片转动的侧向压力, 桩基稳定性至关重要。海上风电桩基不仅受潮汐双向水流和波浪共同作用的影响, 而且桩基尺度介于通常的桥墩和码头桩基之间, 局部冲刷具有一定特殊性。通过建立 1:60 的正态模型, 研究了洋口海域海上风电桩基在波浪、潮流及波流共同作用下的局部冲刷。结果表明: 潮流是控制该海域桩基局部冲刷的主导因素; 往复流作用下的冲刷坑形态呈椭圆形, 最大冲刷深度约为恒定流的 80%; 当波流共同作用时, 由于桩前波浪振荡水流的作用, 泥沙较水流作用时更易起动, 局部冲刷显著增强, 最大冲刷深度为潮流和恒定流作用下的 2.0 与 1.7 倍; 韩海骞公式计算值按照系数 0.75 折算后与波流作用下的桩基冲刷深度试验值较为吻合。根据试验结果, 建议对桩基周边局部冲刷坑进行抛石防护, 确保海上风机的安全稳定。

关键词: 桩基础; 海上风电; 局部冲刷; 正态模型; 波流共同作用

中图分类号: TV148; P752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)06-0060-08

风能是可再生清洁能源, 海上风电对风能利用率高且对人类生产、生活的影响小, 适合沿海城市建设和发展。然而, 海上风电场处于风、波浪、潮流等动力共同作用的海洋环境, 风机基础周围发生局部冲刷, 冲刷坑的形成降低了海上风机的稳定性, 严重的可致失稳、倒塌, 造成重大损失。风机基础除了承受自身的荷载, 还受到风机叶片转动产生的侧向压力^[1], 稳定性要求较高, 因此, 研究海上风电桩基局部冲刷具有重要的工程应用价值。

随着近海及河口地区的码头栈桥和跨江、跨海大桥的建设, 对于潮流作用下的桩基冲刷愈加重视, 潮流作用下的冲刷相对恒定流具有一定的差异性。卢中一等^[2]在研究苏通长江公路大桥桥墩冲刷时从冲刷形态和冲刷深度出发, 研究了单向流与往复流作用下局部冲刷的差异; 高正荣等^[3]在总结长江河口复杂水动力环境下的桥墩局部冲刷后提出了防冲刷工程的关键技术; 韩海骞^[4]则是在杭州湾以及钱塘江河口地区桥梁桥墩的冲刷基础上, 通过现场资料分析、模型试验以及量纲分析等多种方法, 建立了适用于钱塘江河口地区的潮流作用下的墩柱局部冲刷计算式。曾成杰等^[5]通过对比洋口港 LNG 码头栈桥建设前后实测地形资料, 分析沿程桩基局部冲刷的规律并总结强潮流粉砂质海岸因工程建设所引起局部冲刷的一般规律; 类似的还有孙永福等^[6]比较分析了埕岛油田平台桩基周围多年监测地形资料, 预测了最大冲刷深度。

波浪作用下的圆柱周围局部冲刷, 根据圆柱直径与波长相对大小 D/L 分为大尺径和小尺径两种, 国外学者 B. M. Sumer 等^[7]研究发现波浪作用下的桩基冲刷与 KC 数有关, 随着 KC 数的不同, 周围水流中的漩涡随之变化, 产生不同的冲淤形态。国内学者陈国平等^[8], 考虑了桩基冲刷的主要影响因素并通过系列物理模型试验, 提出波浪作用下大尺径圆柱周围最大冲刷深度计算公式; 黄建维^[9]和周益人^[10]分别对波浪作用下的墩式建筑物周围局部冲刷和不规则波作用下的墩柱局部冲刷作了相关研究, 提出了相应的冲刷深度预

收稿日期: 2015-07-02

基金项目: 南京水利科学研究院研究生论文基金资助项目(LS21504); 南京水利科学研究院院基金资助项目(Y213004)

作者简介: 祁一鸣(1990—), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事海岸工程泥沙研究。E-mail: qymnhri@163.com

报公式。在波浪与水流共同作用下,大连理工大学陈海鸥^[11]通过大量试验模拟桩基冲刷,并对试验结果进行量纲分析和回归计算得出冲刷深度的计算公式;曲立清等^[12]采用系列模型延伸法研究了波流共同作用下大型桥墩局部冲刷,提出不应将波、流动力作用效果进行简单相加的观点。

风电桩基在波浪、潮流共同作用下产生局部冲刷,与桥墩局部冲刷在墩形、直径以及所处水流环境方面差异较大,与码头栈桥的“群桩效应”相比也有很大区别,在桩基础的直径大小、所处海洋动力环境方面具有一定的特点。在单纯水流或者单纯波浪作用下的桩基局部冲刷研究成果较多,也有少部分波流共同作用下大直径圆柱冲刷研究,如人工岛周围局部冲刷等,鲜有波流共同作用下对海上风电桩基等小直径圆柱局部冲刷进行模拟试验研究。本文通过建立正态比尺的物理模型,对波浪和潮流共同作用下的海上风电单桩基础局部冲刷进行试验研究,将试验结果和经验式计算值对比分析,并提出相应的冲刷防护建议。

1 海域概况

风电场所在海域位于辐射沙洲南部(图1),其南侧受东海前进潮波控制,北侧受两大潮波辐合的影响,潮汐流场相对复杂,风电场区无沙洲和水下沙脊直接掩护,受外海波浪的影响比较直接。

研究海域潮汐属正规半日潮,平均高潮位 6.07 m,平均低潮位 1.46 m,平均潮面 3.93 m,平均涨潮历时 6 h 27 min,平均落潮历时 5 h 57 min。该地区-20 m 以深海域潮流运动具有一定的旋转特征,浅水区潮流往复流特征明显;-10 m 左右水深海域潮流流速的强弱分布差异较小,往复流特征明显,平均流速 0.6~0.7 m/s,最大流速约 1.0 m/s;风电场内涨、落潮平均流速变化不大,涨潮平均流速 0.54~0.78 m/s,落潮平均流速 0.42~0.76 m/s。该海域年平均代表波高小于 1 m,强浪向为 NE,有效波高为 4.2 m;波浪数学模型计算结果表明,NE 向 50 年一遇大浪自外海向近岸传播过程中,3 m 波高的等波高线与-10 m 等深线接近;在风电场海域东侧观测站显示,2010 年波浪年平均周期 T_m 为 3.52 s,最大为 7.72 s。



图1 海上风电场位置

Fig. 1 Position diagram of offshore wind farm

2 物理模型试验

为了研究洋口海域海上风电场在波浪、水流及波流共同作用下风电基础局部冲刷情况,需同时模拟潮汐水流和波浪两种动力及泥沙运动,在模型相似方面满足潮汐水流运动相似、波浪运动相似和泥沙运动相似。

2.1 模型设计

浅水二维非恒定流流带切向和法向的运动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{v^2}{C^2 h} = 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial n} + \frac{1}{g} \frac{\partial v_n}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{v^2}{R} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

二维悬沙扩散方程式:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \omega \frac{\partial S}{\partial z} \quad (2)$$

式中: l, n 分别为沿流带切向和法向水平坐标; v, v_n 分别为 l, n 的流带平均速度; ζ, h 分别为水位和水深; R 为流带的曲率半径; C 为谢才系数; t, g 分别为时间和重力加速度; S 为体积比含沙量; V 为水流平均流速; ω 为泥沙沉速; ε 为泥沙紊动扩散系数; x, z 为水平坐标和垂直坐标。

根据式(1)(2)可得:重力相似(流速比尺) $\lambda_v = \lambda_h^{1/2}$;泥沙起动相似(起动流速比尺) $\lambda_{v_0} = \lambda_v$;泥沙淤积部位相似的沉速比尺 $\lambda_\omega = \lambda_h^{3/2}/\lambda_l$;泥沙悬浮相似的沉速比尺 $\lambda_\omega = \lambda_\varepsilon/\lambda_l$ 。

桩基局部冲刷属于三维问题,垂向水流及马蹄形旋涡是决定冲刷深度及形态的主要因素,根据模拟对象并考虑试验场地以及生流、生波系统的能力,试验采用几何比尺为1:60的正态模型(表1),即: $\lambda_l = \lambda_h = 60$ 。水力学中 $\varepsilon = KV_* d/6$, K 为卡门常数, V_* 为摩阻流速,则有

$$\lambda_v = \lambda_{v_0} = \lambda_\omega = \lambda_{V_*} = \lambda_h^{1/2} = \lambda_l^{1/2} \quad (3)$$

分析了邻近海域LNG栈桥码头的冲刷状况,潮流是码头及栈桥桩基冲刷的主导因素,模型沙的选择以水流泥沙起动相似为主。根据泥沙起动流速比尺确定模型沙粒径时需用同一起动公式或起动曲线来描述原型和模型的泥沙起动,风电场所处海域-5~0 m,-10~-5 m,-15~-10 m区域底质中值粒径分别为0.076,0.042和0.029 mm,选用由李昌华^[13]在大量现场和试验资料基础上总结得出的该粒径范围的泥沙起动公式 $V_0 =$

$$0.12 \left(\frac{h}{d_{95}} \right)^{\frac{1}{6}} \frac{\Delta\omega}{(\rho_s \rho - 1)^{\frac{1}{3}} d} \quad (\text{cm/s}),$$

得到满足泥沙起动相似要求的粒径比尺 $\lambda_d = \lambda_h^{-\frac{2}{7}} \lambda_\omega^{\frac{6}{7}} \lambda_{\rho_s - \rho}^{-\frac{2}{7}}$,经不同密度及

不同粒径的模型沙试算,确定采用密度为1.35 g/cm³,干密度为0.7 g/cm³的煤粉为模型沙。另据张红武天然沙水下休止角公式($\varphi = 35.4d^{0.04}$)计算和圆筒中颗粒沉降法测定,该模型沙进行桩基局部冲刷试验与天然沙水下休止角相等。煤粉作为模型沙絮凝现象较严重,但对于以推移质为主的桩基局部冲刷试验影响较小,而煤粉密度小且稳定,起动流速小,能较好满足起动相似条件。物理模型采用比尺如下:几何比尺1:60,流速和时间比尺1:7.75,波长和波高比尺1:60,波速和波周期比尺1:7.75,泥沙粒径比尺1:1.15,泥沙密度和干密度比尺分别为1:1.96和1:1.67。

模型试验水深为16.7 cm模拟现场-10 m水深区域,波周期采用2010年全年平均波周期3.5 s,按照比尺确定直径 $D=11$ cm的圆柱为单桩基础模型,开展了常浪1.2 m、强浪3 m和极端浪高4.8 m的波浪作用,涨、落潮最小和最大平均流速0.54和0.78 m/s的水流作用以及呈60°夹角的波浪和水流共同作用的风电桩基局部冲刷试验研究。

模型布置在长50 m,宽30 m的试验厅内。模型生潮系统由两套双向泵系统控制,一套控制模型与周边调节水库之间的进出水量,以实现模型与现场相似的潮位变化过程;另一套控制模型东、西边界的进出流量,以实现模型与现场相似的涨、落潮流过程。模型中的波浪运动采用推板式造波机,依据该海域潮流主流向和强浪向的相互关系,造波机与水流方向呈60°夹角,布置在强浪向,推板长12 m(图2)。

2.2 冲刷验证

由于风电场所处海域无工程实践活动,无现场实测资料,而该海域北侧西太阳沙洋口港LNG码头栈桥(图3)沿程发生局部冲刷,-10 m处涨落潮平均流速分别为0.69和0.92 m/s,所处的滩槽格局和水沙环境基本类似,故采用洋口港LNG码头栈桥建设后桩基局部冲刷的现场资料对本次物理模型试验冲淤加以验证。从2009年4月(工程建设期间)—2010年7月(工程建设后)对栈桥沿程进行4次水下地形监测^[5],较好地反映了现场栈桥桩基的局部冲淤变化,-10 m水深附近的B1,B2,G1,G2共4个栈桥桩基实测最大冲刷深度分别为6.3,5.9,4.2和3.8 m,并对这4个桩基按1:60的几何比尺进行了正态模型试验,试验最大冲刷深度分别为6.6,5.7,4.3和4.0 m,冲淤形态与实测地形也较为一致(图4)。

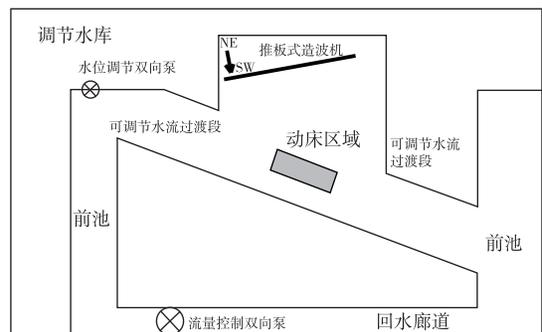


图2 试验平面布置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental layout

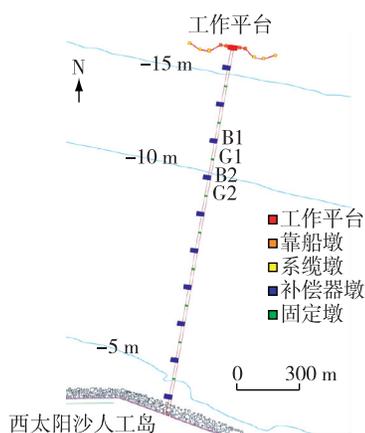


图3 LNG接收站码头及栈桥平面布置

Fig. 3 Layout of LNG station trestle

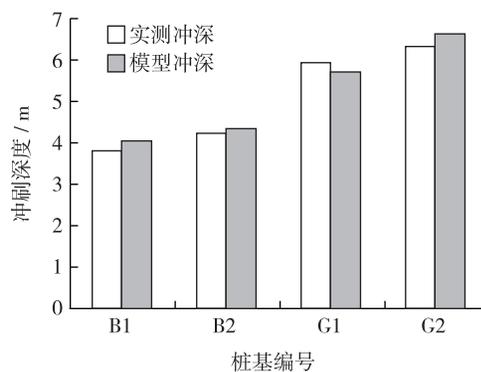


图4 LNG码头栈桥实测冲深和模型结果

Fig. 4 Measured and model results of trestle piers of LNG station

3 桩基局部冲刷试验结果及分析

试验模拟了海上风电单桩基础在波浪、水流以及波流共同作用下的局部冲刷,围绕桩基周围局部冲刷最大深度和冲刷形态两方面开展研究,并对试验结果进行分析和讨论。

3.1 波浪作用

波浪作用下,风电桩基局部最大冲刷深度随波数的增加而增大,研究^[14]表明:在波浪作用初期,局部冲刷快速发展,随后逐渐趋缓,直至波数达6 000~7 000左右时达到冲淤平衡,冲刷深度不再加深(图5)。桩基迎浪侧出现半圆形冲刷坑,最大冲刷深度从1.2 m波高作用下的0.30 m增至4.8 m波高作用下的0.96 m,冲刷范围随波高增加从2.4 m增至6.0 m,圆柱后方发生泥沙淤积,淤积厚度约为最大冲刷深度的30%左右。桩基迎浪侧反射波与前进波叠加后形成波能更大的驻波,造成桩基前侧半圆形区域冲刷,两侧为波浪散射冲淤过渡区,背侧则为波浪掩护轻微淤积区。波浪作用产生的振荡水流随着波高增大,其在底部合成的水质点速度增加,泥沙运动愈加激烈,冲刷深度和冲刷范围有所增加。

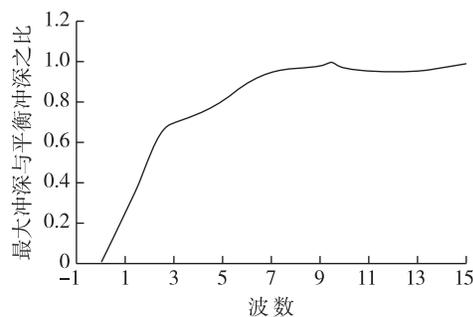


图5 波浪作用下桩基最大冲刷深度随波数变化

Fig. 5 Development of local scour with wave numbers

3.2 水流作用

风电场所处海域位置受到潮汐水流的作用,桩基周围发生冲刷,冲刷坑形态呈椭圆形,桩基前后两侧冲刷范围小,冲刷深度大,左右两侧冲刷范围大,冲刷深度小。最大冲刷深度随潮流流速的增大从1.56 m增至1.74 m,与冲刷坑范围从9.6 m扩至11.4 m的变化趋势一致。为全面认识水流作用下桩基的局部冲刷,又对恒定流作用下的桩基冲刷进行了试验研究,结果表明:单向水流作用下桩前半圆形区域和桩基斜后方两侧区域冲刷严重,正后方区域少量淤积,冲刷区域呈马蹄型,最大冲深位置在桩基前侧和左、右两侧。最大冲刷深度和冲刷坑范围随着来流流速增加分别从1.92 m增加至2.22 m以及从15.6 m扩大至17.4 m,该海域潮流作用导致的风电桩基础局部最大冲深约为恒定水流作用下的0.8倍,冲刷范围约0.6倍。单向水流作用下桩基前侧和两侧形成马蹄形旋涡,导致该区域冲刷深度较大,冲刷坑形态呈马蹄形(图6);潮流作用下桩基前后侧反复遭受严重冲刷,但由于往复水流双向输沙影响,最大冲刷深度比恒定流作用时小。

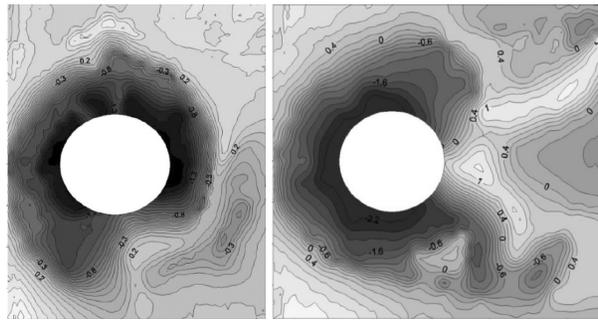


图6 往复流、恒定流作用下的局部冲刷(单位:m)

Fig. 6 Local scour under the action of reciprocating flow and one-way flow (unit: m)

3.3 波流共同作用

波浪与潮流共同作用时,桩基周围环形区域均发生冲刷并形成冲刷坑,冲刷范围为 11.8~13.5 m,最大冲刷深度为 2.94 和 3.42 m,最大冲深位于桩基迎流侧和左、右两侧。波浪与恒定流共同作用时,桩基周围冲刷坑呈马蹄形,冲刷坑范围为 21.1~24.6 m,最大冲刷深度为 3.30 和 3.84 m,最大冲深位置在桩基前侧和左右两侧。在洋口海域 3 m 波浪和 0.54, 0.78 m/s 潮流共同作用下的海上风电桩基最大冲刷深度是同样大小的波浪与恒定流共同作用下的 90%,冲刷坑范围约为 60%。在该海域自然状况下,桩基受到波流共同作用,冲刷深度和范围比单纯水流和波浪作用的叠加效果更大,波浪作用使桩基周围泥沙往复振荡,运动的泥沙颗粒随着水流发生位置变化,从而形成冲刷坑(图7)。

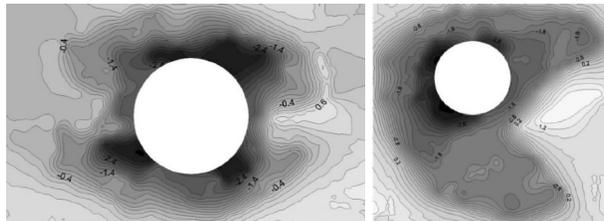


图7 波浪与往复流、恒定流共同作用下的局部冲刷(单位:m)

Fig. 7 Local scour under the joint action of wave, alternating flow and steady flow (unit: m)

波浪与潮流共同作用下风机基础最大冲刷深度为 3.42 m,冲刷范围为 13.5 m,为了应对强潮流环境下风机基础的局部冲刷,同时为避免大规模防护工程对滩槽地形改变带来的负面影响,确保冲刷坑形成后风机的安全稳定,除了在桩基结构设计中预留冲刷储备深度,还可在冲刷坑基本达到稳定后对冲刷坑 15 m 范围内进行抛石至原海床面高度进行防护。

3.4 局部冲刷公式计算

根据试验模拟的海上风电场桩基的特点,对常见的局部冲刷深度计算公式进行对比分析:

(1) 韩海骞公式^[4]

$$\frac{h_{\max}}{h} = 17.4k_1k_2 \left(\frac{B}{h} \right)^{0.326} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0.167} Fr^{0.628} \quad (4)$$

式中: h_{\max} 为潮流作用下桥墩最大冲刷深度; k_1, k_2 为桩基平面、垂直布置系数,根据风电场桩基设计均取 1; B 为全潮最大水深下平均阻水宽度; h 为全潮最大水深; d_{50} 为河床泥沙中值粒径; Fr 为水流弗汝德数, $Fr = u/\sqrt{gh}$, u 为全潮最大流速, g 为重力加速度。

(2) 公路工程水文勘测设计规范 65-1 修正式^[15]

当 $v \leq v_0$ 时, $h_s = k_\xi k_{\eta 1} B_1^{0.6} (v - v'_0)$

$$\text{当 } v > v_0 \text{ 时, } h_s = k_\xi k_{\eta_1} B_1^{0.6} (v_0 - v'_0) \left(\frac{v - v'_0}{v_0 - v'_0} \right)^{n_1}$$

$$v_0 = 0.0246 \left(\frac{h_p}{\bar{d}} \right)^{0.14} \sqrt{332\bar{d} + \frac{10 + h_p}{\bar{d}^{0.72}}}, \quad k_{\eta_1} = 0.8 \left(\frac{1}{\bar{d}^{0.45}} + \frac{1}{\bar{d}^{0.15}} \right)$$

$$v'_0 = 0.462 \left(\frac{\bar{d}}{B_1} \right)^{0.06} v_0, \quad n_1 = \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0.25\bar{d}^{0.19}}$$

其中: h_s 为局部冲刷深度; k_ξ 为墩形系数,本研究中对圆柱墩取 1.0; B_1 为桥墩计算宽度,对圆桩取直径; h_p 为一般冲刷后的最大水深; \bar{d} 为床面泥沙平均粒径,本次计算中取中值粒径; k_{η_1} 为河床颗粒影响系数; v 为墩前进行流速; v_0 为泥沙起动流速; v'_0 为墩前泥沙起动流速。

考虑到以上两种公式均为单纯水流作用下的桥墩冲刷经验公式,而本试验中考虑到波浪作用,故依据《海港水文规范》采用以下公式计算波浪水质点平均流速:

$$V = 0.2HC/h \quad (5)$$

式中: V 为波浪水质点平均流速; H 为波高; h 为当地水深; C 为波速。

各公式计算结果如表 1 所示,韩海骞公式适用于强潮流河口地区桥墩冲刷,与试验模拟海域水沙环境相似,其计算值按系数 0.75 进行折减,与模型试验值吻合较好,但其适用流速范围为 1.4~8.0 m/s,风电场海域最大流速不足 1.4 m/s,故利用该公式计算的结果有待进一步研究;65-1 修正式计算值与试验值相差较大,其公式是通过内陆河道桥墩局部冲刷总结得到,且桥墩阻水宽度较大,不适用于近海风电场小直径桩基局部冲刷计算。两公式未折减的计算值均比模型试验值偏大,但变化趋势一致,可能是由于计算中仅给定表层泥沙粒径,无法进行分层计算,而试验中表层泥沙冲刷殆尽后,下层泥沙较表层更难冲刷所致。

表 1 局部冲刷公式计算值和模型最大冲刷深度结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results and model results of local scour

不同工况	模型最大冲深/m		韩海骞公式计算值/m			65-1 修正式计算值/m
折减系数	1.0	1.0	0.80	0.75	0.70	1.0
波流共同作用	3.30	4.46	3.57	3.35	3.12	11.05
	3.84	5.10	4.08	3.83	3.57	14.28

4 结 语

(1) 拟建风电场区的如东洋口海域,潮流是控制桩基局部冲刷的主导因素,波浪单独作用下冲刷坑形态为半圆型,3 m 波高作用的最大冲刷深度约为潮流作用时的 40%。

(2) 潮流作用下的冲刷深度和范围均随流速增加而增大,涨、落潮强度相当,双向水流冲刷效果明显,冲刷坑形态呈椭圆形,最大冲刷深度和冲刷范围分别约为恒定流作用下的 80% 和 60%。

(3) 波浪与潮流共同作用下的风电桩基局部冲刷形态与潮流作用时基本相似,由于波浪作用引起的桩前振荡水流使底质泥沙发生往复振荡,在水流作用下易发生输移,局部冲刷明显增强,波流共同作用下的最大冲刷深度是单纯水流作用时的 2.0 和 1.7 倍。

(4) 韩海骞公式计算值,特别是按系数 0.75 折减后,与模型试验值较好吻合,但公式适用性有待进一步研究;而 65-1 修正式计算值与模型试验值相差较大,不适用于该海域风电桩基局部冲刷计算。

(5) 波流作用下的风电桩基局部冲刷最大深度为 3.42 m,冲刷范围为 13.5 m,为确保冲刷坑形成后风机的安全稳定,除了在桩基结构设计中预留冲刷储备深度,还可在冲刷坑基本达到稳定后对冲刷坑 15 m 范围内进行抛石至原海床面高度进行防护。

参 考 文 献:

- [1] 陆培东, 曾成杰, 王艳红, 等. 中广核如东 150MW 海上风电场示范项目海床冲淤及局部冲刷专题研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所报告, 2014. (LU Pei-dong, ZENG Cheng-jie, WANG Yan-hong, et al. Monographic study of seabed erosion and siltation and local scour of CGN Rudong 150MW offshore wind farm demonstration project[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [2] 卢中一, 高正荣, 黄建维, 等. 苏通长江公路大桥桥墩基础的局部冲刷[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中). 北京: 海洋出版社, 2011: 1300-1304. (LU Zhong-yi, GAO Zheng-rong, HUANG Jian-wei, et al. The local scour of Sutong Yangtze River highway bridge pier foundation[C]//Chinese Marine Engineering Society. Beijing: China Ocean Press, 2011: 1300-1304. (in Chinese))
- [3] 高正荣, 黄建维, 卢中一. 长江河口跨江大桥桥墩局部冲刷及防护研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. (GAO Zheng-rong, HUANG Jian-wei, LU Zhong-yi. Local scour and protection of the Yangtze River estuary across the bridge piers[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [4] 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 Hai-qian. Research on local scour at bridge piers under tidal current action[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [5] 曾成杰, 陆培东, 王艳红, 等. 洋口港 LNG 码头栈桥沿程桩基局部冲刷分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 18-23. (ZENG Cheng-jie, LU Pei-dong, WANG Yan-hong, et al. Research on local scour around the trestle piers of LNG station at Yangkou port[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 18-23. (in Chinese))
- [6] 孙永福, 宋玉鹏, 孙惠凤, 等. 潮流作用下海洋平台桩基冲刷过程及冲刷深度计算[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(2): 178-183. (SUN Yong-fu, SONG Yu-peng, SUN Hui-feng, et al. Calculation of scour process and scour depth around an offshore platform pile foundation under the actions of tidal current[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(2): 178-183. (in Chinese))
- [7] SUMER B M, FREDSOE J. Hydrodynamics around cylindrical structures[J]. Coastal Engineering, 1998, 34(3-4): 313.
- [8] 陈国平, 左其华, 黄海龙. 波浪作用下大尺径圆柱周围局部冲刷[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 47-58. (CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long. Local scour around cylinder under wave action[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(1): 47-58. (in Chinese))
- [9] 黄建维, 郭颖. 波浪作用下海上墩式建筑物周围局部冲刷的试验研究[J]. 海洋工程, 1994, 12(4): 29-41. (HUANG Jian-wei, GUO Ying. Experimental study on local scour around the sea pier structures under wave action[J]. The Ocean Engineering, 1994, 12(4): 29-41. (in Chinese))
- [10] 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(5): 17-23. (ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping. Study on local scour around a pier under the action of irregular wave[J]. Journal of Sediment Research, 2007(5): 17-23. (in Chinese))
- [11] 陈海鸥. 波流共同作用下海床上直立大直径圆柱建筑物周围的局部冲刷研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002. (CHEN Hai-ou. Study on local scour around under the joint action of wave and current of large diameter cylinder structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese))
- [12] 曲立清, 周益人, 杨进先. 波流共同作用下大型桥墩周围局部冲刷实验研究[J]. 水运工程, 2006(4): 23-27. (QU Li-qing, ZHOU Yi-ren, YANG Jin-xian. Experimental study on local scour around bridge piers by wave and current[J]. Port and Waterway Engineering, 2006(4): 23-27. (in Chinese))
- [13] 李昌华, 吴道文, 夏云峰. 平原细沙河流动床泥沙模型试验的模型相似律及设计方法[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 1-8. (LI Chang-hua, WU Dao-wen, XIA Yun-feng. Similarity criteria and design method of hydraulic models with a movable bed for plain rivers carrying fine sediment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(1): 1-8. (in Chinese))
- [14] 陈国平, 左其华, 黄海龙. 波浪作用下桩柱周围局部冲刷研究[J]. 海洋工程, 2000(4): 21-26. (CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long. Local scour around cylinder under wave action[J]. The Ocean Engineering, 2000(4): 21-26. (in Chinese))
- [15] 河北省交通规划设计院. 公路工程水文勘测设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (Hebei Traffic Planning Design Institute. Hydrological specifications for survey and design of highway engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))

Experimental studies on local scour of offshore wind turbine pile

QI Yi-ming^{1,2}, LU Pei-dong¹, ZENG Cheng-jie¹, CHEN Ke-feng¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Institute of Port, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The foundation of a wind turbine pile is the load of the wind turbine itself and the lateral pressure of the blade rotation, and the stability of a pile foundation is very important. The offshore wind turbine pile is not only influenced by the tidal current and wave interaction, but also the scale of the pile foundation, which is usually between the pier and the pile foundation, and its local scour has some particularity. By establishing a normal model of 1:60, the local scour of the offshore wind turbine pile foundation under the action of wave, tidal current and wave current is studied. The research results show that: ①the tidal current is the dominant factor in controlling the local scour of the pile foundation in the sea area; ②under the action of the alternating flow, the shape of the scour hole is oval, and the maximum scour depth is about 0.8 of the steady flow; ③under the wave-current interaction, due to the role in the front of the pile wave oscillating flow, sediment is easier to move than the current action, the local scour is significantly enhanced, and the maximum scour depth is 2.0 and 1.7 times under the action of tidal current and constant flow; ④the calculated values given by the Han Hai-qian formula are in good agreement with the experimental values of the scour depth of the pile foundation under the influence of the coefficient 0.75. According to the test results, it is suggested that the riprap protection of local scour around the pile foundation pit should be done in order to ensure the security and stability of the offshore wind turbine.

Key words: pile foundation; offshore wind turbine; local scour; normal model; wave-current interaction