

深水桩基波流力计算方法研究

尹剑锋¹, 徐礼国², 刘清君^{3*}, 洪锦祥², 王登婷³

(1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200; 2. 福建省交通规划设计院有限公司
福建省跨海通道桥隧工程研究中心, 福建 福州 350004; 3. 水利部 交通运输部 国家能源局
南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 深水桩基波流力是影响深远海海上风电和跨海桥梁工程设计的关键因素之一。针对深水区水流流速存在垂向衰减的现状, 提出一种考虑流速分层的桩基波流力计算方法, 并采用美国墨西哥湾海洋测试平台现场实测数据进行验证, 进一步将该方法应用于我国某水深超过 30 m 的海上风电工程, 计算桩基所受的不同重现期波流力, 对比与现行规范方法计算值的差别, 分析水深、风生流对桩基波流力的影响规律。研究表明, 文章计算方法具有可靠的精度, 平均误差为 4%; 现行规范方法可能低估了深水(水深>30 m)桩基波流力和对水底力矩, 尤其对水底力矩规范方法计算值偏小可达 10% 左右; 除波浪要素外, 水深和风生流流速也是影响深水桩基波流力的关键因子, 风生流流速变化对桩基波流力的影响应引起重视。文章提出的计算方法可为深水桩基设计提供技术支撑。

关键词: 波流力; 深水桩基; 海上风电; 跨海桥梁

中图分类号: U6; U652.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)09-0052-07

doi: 10.7640/zggwjs202609008

Calculation method for wave-current forces on deep-water pile foundations

Yin Jianfeng¹, Xu Ligu², Liu Qingjun^{3*}, Hong Jinxiang², Wang Dengting³

(1. Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315200, China; 2. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fujian Engineering Research Center of Cross-Sea Channel Bridge and Tunnel Engineering, Fuzhou, Fujian 350004, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Wave-current forces acting on deep-water pile foundations constitute a critical design consideration for deep-sea offshore wind farms and sea-crossing bridge engineering. In view of the vertical attenuation of current velocity in deep-water environments, this paper develops a stratified-flow-velocity-based analytical method for computing wave-current forces on pile foundations. The proposed methodology is validated against field measurements obtained from the U.S. Gulf of Mexico marine testing platform. Subsequently, the method is applied to a Chinese offshore wind project situated in water depths exceeding 30 m, enabling calculation of wave-current forces on the pile foundation under various return periods. The results are compared with those obtained by current standard methods. The influence of water depth and wind-generated current on wave-current forces of pile foundations is analyzed. The study shows that the calculation method proposed in this paper achieves reliable accuracy with an average error of 4%. The current standard method may underestimate the wave-current forces and base moment of deep-water (water depth>30 m) pile foundations, especially for the base moment, the value calculated by the standard method may be underestimated by approximately 10%. Apart from the wave elements, water depth and wind-generated current velocity are also key factors influencing the wave-current forces of deep-water pile foundations. The impact

收稿日期: 2026-02-01 修回日期: 2026-06-01

基金项目: 福建省交通运输科技项目 (JC202311); 福建交通强省建设试点任务-近海大跨桥梁防灾减灾关键技术研究与应用

作者简介: 尹剑锋 (1978—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 副总经济师, 研究方向为海上风电基础及风机安装施工与技术。

*通讯作者: 刘清君, E-mail: qjliu@nhri.cn

of wind-generated current velocity changes on the wave-current forces of pile foundations should be given due attention. The calculation method proposed in this paper can provide technical support for the design of deep-water pile foundations.

Key words: wave-current forces; deep-water pile foundations; offshore wind power; sea-crossing bridge

0 引言

近年来,我国海上风电工程^[1]、跨海桥梁工程^[2]、海上养殖工程^[3]等从近海向深水发展是一种必然的趋势。如华能阳江三山岛二海上风电场工程平均水深达到 55 m,在建甬舟铁路西堠门特大桥主墩基础区域内水深已达到 60 m。随着水深的增加,强风、巨浪、急流等复杂严酷的海洋环境是基础结构荷载计算面临的难题之一。

自 20 世纪 50 年代, Morison 提出单桩波浪力计算方法以来,国内外学者进行了大量的研究^[4-6],并将 Morison 方程拓展应用至桩基波流力的计算^[7-9]。任佐皋^[7]基于 Morison 方程,通过理论分析提出了孤立单桩波流力计算方法,并通过波浪物理模型试验对其进行了验证。黄河宁^[8]基于线性叠加原理,提出了一种修正的 Morison 方程,实现可直接利用纯波浪和纯水流条件下得到的水动力系数计算波流共同作用力的目的。李玉成等^[9]通过试验研究了串列双桩上的波流力,给出了群桩系数随相对桩距和 KC 数的变化规律。上述研究成果已在我国港口海岸及近海工程中得到应用,并列入了我国规范 JTS 145—2015(2022 年版)《港口与航道水文规范》^[10]。近年,计算流体动力学仿真模拟技术迅速发展,国内外学者对桩基波流力开展了大量的数值模拟仿真研究^[11-13],分析了单桩或群桩结构周围三维流场和波流力变化特性。

然而,上述研究成果无论是基于 Morison 方程的波流力计算公式还是基于 N-S 方程的数值仿真模拟亦或是波浪物理模型试验均假定水流沿垂向均匀分布,忽略流速沿垂向的变化,这对水深不大的情况是合适的。根据对深水(水深>30 m)海域流速监测^[14]与数值分析^[15]表明,海洋水流沿垂向存在一定衰减,底层流速较表层流速可减小 30%,甚至更多。因此现有桩基波流力计算方法对深水情况的适用性还有待进一步验证,同时关于流速衰减对深水桩基波流力的影响规律也有待进一步研究。为此,本文在《港口与航道水文规范》^[10]的基础上,提出一种考虑水流沿垂向变化的深水桩基础波流力计算方法,通过现场实测数据对比验证后,将其应用于我国浙江某深水海上风电工程

桩基波流力分析,以便为今后同类工程提供指导和借鉴。

1 计算方法

《港口与航道水文规范》^[10]给出了桩基直径 D 与波长 L 之比 $D/L \leq 0.2$ 的垂直小直径圆柱的波流力计算公式:

$$p(z, t) = \frac{\gamma}{2g} DC_D |u(z, t) + v| [u(z, t) + v] + \frac{\pi\gamma}{4g} D^2 C_M \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$u(z, t) = \frac{\omega_r H}{2} \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \cos \omega t \quad (2)$$

$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = -\frac{\omega_r^2 H}{2} \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \sin \omega t \quad (3)$$

$$\omega_r = \omega - kv \quad (4)$$

式中: $p(z, t)$ 为作用于高度 z 处断面上的正向波流力, kN/m; $u(z, t)$ 为波浪水质点轨道运动的水平速度, m/s; v 为水深平均水流流速, m/s; C_D 、 C_M 分别为速度力系数和惯性力系数; ω_r 为相对于水流的波浪圆频率, s^{-1} ; ω 为波浪水质点轨道运动圆频率, s^{-1} ; H 为水流中的波高, m, 规则波时取平均波高, 不规则波时取有效波高; k 为水流中的波数, m^{-1} ; d 为水深, m; γ 为水的重度, kNm^3 ; D 为桩基直径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; z 为计算点高度, m, 水底处 $z=0$ m; t 为时间, s。

由于式(1)中 v 为水深平均水流流速, 未能反映水流垂向变化对桩基受力的影响。为此, 在式(1)的基础上, 进一步作以下假定: 1) 在波流共同作用下水质点的速度与加速度为波(与水流相互作用变形后的波)、流各自产生的速度与加速度的矢量和, ω_r 计算仍取水深平均水流流速; 2) 速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 不随水流流速沿垂向衰减而变化; 3) 在一个波周期内, 相对于波浪水质点的轨道运动速度, 水流流速可认为恒定流。进而, 本文提出考虑水流垂向变化的作用于垂直小直径圆柱($D/L \leq 0.2$)的正向波流力计算方法为:

$$p(z, t) = \frac{\gamma}{2g} DC_D |u(z, t) + u_c(z)| [u(z, t) + u_c(z)] + \frac{\pi\gamma}{4g} D^2 C_M \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (5)$$

式中: $u_c(z)$ 为考虑沿垂向变化的设计水流流速, m/s。

则作用于整个桩上的总波流力 $F(t)$ 为:

$$F(t) = \int_0^{d+\eta} p(z, t) dz \quad (6)$$

$$\eta = \eta_{\max} \cos \omega t \quad (7)$$

式中: $F(t)$ 为作用于整个桩上的总波流力, kN; η 为波面在静水面以上的高度, m; $\eta_{\max}$ 为波峰在静水面以上的高度, m, 可根据《港口与航道水文规范》^[10] 中图 10.3.2-1 确定。

式(5)中设计水流流速 $u_c(z)$ 是波流力计算的关键, 宜根据工程区实测资料统计分析确定。当实测资料不足时, 可通过潮流设计流速和风生流设计流速矢量合成计算得到, 流向角取合成后的角度。

$$u_c(z) = u_{\text{tide}}(z) + u_{\text{wind}}(z) \quad (8)$$

式中: $u_{\text{tide}}(z)$ 为潮流设计流速, m/s; $u_{\text{wind}}(z)$ 为风生流设计流速, m/s。

潮流流速沿垂向分布的研究较为成熟, 现场实测结果表明潮流流速沿垂向分布服从 1/7 定律的指数型分布^[16]。

$$u_{\text{tide}}(z) = \begin{cases} \bar{u}_{\text{tide}} \left(\frac{z}{0.32d} \right)^{1/7} & 0 < z/d \leq 0.5 \\ 1.07 \bar{u}_{\text{tide}} & 0.5 < z/d \leq 1.0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\bar{u}_{\text{tide}}$ 为水深平均潮流流速, m/s。

风生流流速较为复杂, 目前并无风生流垂向分布的实测数据。国际电工委员会(IEC, International Electrotechnical Commission)在其制定的国际标准^[17]中指出风生流自静水面以下线性衰减, 最大作用深度为 20 m, 20 m 以下深度范围内的风生流流速为 0; 而挪威船级社(DNV, Det Norske Veritas)在其制定的指南^[18]中指出, 风生流沿垂向线性衰减, 最大作用深度为 50 m。我国学者任华堂等^[19]针对台湾海峡风生流的数值计算研究认为水深大于 50 m 时, 由于受底摩擦的影响, 风生流流速急剧减小至 0。此外, 考虑到按最大作用深度 50 m 进行结构设计更偏安全, 故本文风生流最大作用深度取 50 m。

风生流设计流速 $u_{\text{wind}}(z)$ 计算方法^[18]为:

当 $d \leq 50$ m 时,

$$u_{\text{wind}}(z) = u_{\text{wind0}} \left(1 + \frac{z-d}{50} \right) \quad z \leq d \leq 50 \quad (10)$$

当 $d > 50$ m 时,

$$u_{\text{wind}}(z) = \begin{cases} u_{\text{wind0}} \left(1 + \frac{z-d}{50} \right) & d-50 \leq z \leq d \\ 0 & 0 \leq z \leq d-50 \end{cases} \quad (11)$$

$$u_{\text{wind0}} = K U_{\text{wind}} \quad (12)$$

式中: u_{wind0} 为静水面处风生流流速, m/s; K 为风因子系数, $0.024 \leq K \leq 0.030$; U_{wind} 为平均海面上 10 m 处的 10 min 平均风速, m/s。

2 方法验证

尽管国外已经开展了多次单桩波浪力的现场观测, 但其观测水深基本都在 10 m 以内, 且为平常天气条件下的波浪力, 因此对本文的指导作用有限。为验证本文计算方法的可靠性, 作者收集了美国卡门飓风期间墨西哥湾内深水区康诺克测试平台(Conoco test structure)波流力的现场实测数据^[20]。康诺克测试平台位于路易斯安那州近海 54 m 水深处, 为六腿钢质桩式平台, 单根桩腿直径为 1.02 m。由于桩腿之间的距离大于 4 倍桩径, 且连接杆件均为细长结构, 故不考虑群桩效应。按结构构件阻水体积计算得到测试平台的等效直径约为 5.2 m。测量内容包括风、波浪、水流、风速、波流力等。本文选取波况稳定时段的测试平台所受的总波流力实测值作为验证数据。实测波高、波周期、风速以及测试平台所受的总波流力见表 1。此时段内实测水深平均流速在 0.6~0.7 m/s 之间。为安全计, 本文取平均流速为 0.7 m/s。结合表 1 中的实测风速, 按式(10)和式(11)计算, 得到考虑风生流影响的静水面处风生流流速约为 1.03 m/s, 此值与 Forristall^[21]的分析结果基本一致, 表明本文关于静水面处风生流流速的计算方法是可靠的。

表 1 测试平台实测总波流力与本文方法计算值对比

Table 1 Comparison between measured total wave-current forces of test platform and calculated values by the proposed method

波高/ m	波周期/s	风速/ (m·s ⁻¹)	总波流力实 测值/kN	总波流力本 文计算值/kN	总波流力相 对误差/%
10.15	9.6	20.0	2 722	2 192	-19
6.92	8.4	20.0	1 094	1 337	22
9.39	9.0	20.0	2 291	1 967	-14
8.53	9.1	20.0	1 899	1 686	-11
5.79	8.3	20.0	1 134	1 234	9
7.13	10.2	20.0	1 156	1 354	17
7.59	7.4	20.0	1 214	1 498	23
7.25	9.0	20.0	1 197	1 378	15
8.69	9.2	20.0	1 819	1 691	7

注: 总波流力相对误差为负值表示本文方法计算值小于实测值。

根据表层流速分析参数和表 1 中波浪参数, 采用本文方法得到的测试平台总波流力计算值与现场实测值的对比情况见表 1。由表 1 可知, 本文方法波流力计算值与现场实测值基本一致, 平均相对误差为 4%, 且计算值普遍略大于试验值, 即本文方法的计算结果略偏于安全。

尽管国内外学者已经开展了大量的桩基波流力物理模型试验和数值模拟研究工作, 但这些研究多是采用沿水深不变的均匀流速, 深水单桩实测数据极度匮乏。本文研究采用了导管架平台的等效单桩数据进行验证, 虽然两者在结构动力特性上存在差异, 但在波流力静力等效方面, 现阶段该数据仍具有较高的参考价值, 未来可进一步开展针对性的物理模型试验与现场观测验证。

3 工程应用及分析

本次海上风电工程位于浙江海域, 工程海域水深 25.0~35.0 m。风机基础采用高桩承台结构形式, 其中承台始终处于水面以上, 单桩直径为 3.0 m。由于高桩承台结构波流力的确定需以单桩波流力计算作为基础, 因此单桩波流力的计算十分关键, 故本文仅对单桩基础波流力计算进行研究。本工程不同重现期的设计参数波高、风速、流速如表 2 所示。

表 2 基本设计参数
Table 2 Basic design parameters

重现期 标准	波高/ m	波周 期/s	风速/ (m·s ⁻¹)	水深平均潮流 流速/(m·s ⁻¹)	静水面处风生 流流速/(m·s ⁻¹)
100 a 一遇	13.02	16.36	35.5	0.85	1.07
50 a 一遇	11.96	15.44	32.1	0.85	0.96
5 a 一遇	7.92	11.91	20.7	0.85	0.62

注: 表中水深平均潮流流速为水深平均潮流可能最大流速, 根据实测流速调和分析得到。

水深按工程区平均水深 30 m 计, 根据本文方法计算得到的波流力沿垂向分布见图 1。由图 1 可知, 波流力沿垂向随计算点相对高度 z/d 的增

大而增大, 水底处的波流力仅为水面处的 20%~30%左右, 半倍水深处($z/d=0.5$)的波流力可达到水面处的 60%左右。根据图 1 中波流力的垂向分布, 可进一步计算得到桩基所受的总波流力和对于水底力矩。

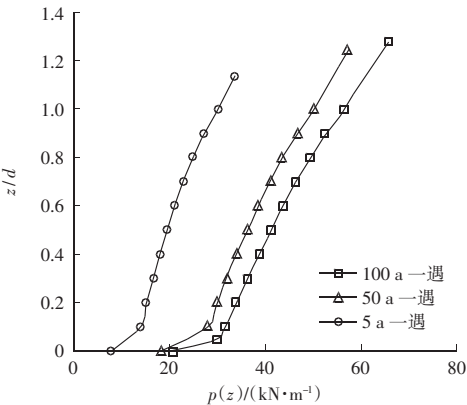


图 1 不同重现期波流力沿垂向分布
Fig. 1 Vertical distribution of wave-current forces for different return periods

3.1 本文方法与现行规范方法结果对比

《港口与航道水文规范》^[10]给出了单桩正向波流力和力矩的计算方法(以下简称规范方法)。采用规范方法与本文方法计算得到不同重现期的正向总波流力和力矩值见表 3。由表 3 可知, 对于正向总波流力, 本文方法计算值与规范方法计算值较为接近, 且本文方法计算值略大于规范值, 两者相差均在 4%以内; 对于对水底力矩, 本文方法计算值与规范方法计算值相差较大, 且本文方法计算值大于规范值, 两者平均相差为 10%。造成此差别的原因是规范方法中水流流速取平均流速, 忽略了流速分层的差别, 导致上层($z>0.5d$)水深范围内低估了水流流速的影响, 使得规范方法波流力计算值小于本文方法计算值(见图 2); 而在下层($z<0.5d$)水深范围内又高估了水流流速的影响, 使得规范方法波流力计算值大于本文方法计算值(见图 2)。

表 3 本文方法与规范方法计算结果对比
Table 3 Comparison of calculation results between the proposed method and the standard method

重现期 标准	本文方法		规范方法		相对误差/%	
	正向总波流力/kN	对水底力矩/(kN·m)	正向总波流力/kN	对水底力矩/(kN·m)	正向总波流力	对水底力矩
100 a 一遇	1 756	38 188	1 692	34 225	3.8	11.6
50 a 一遇	1 456	30 930	1 422	28 122	2.4	10.0
5 a 一遇	714	14 222	706	13 137	1.1	8.3

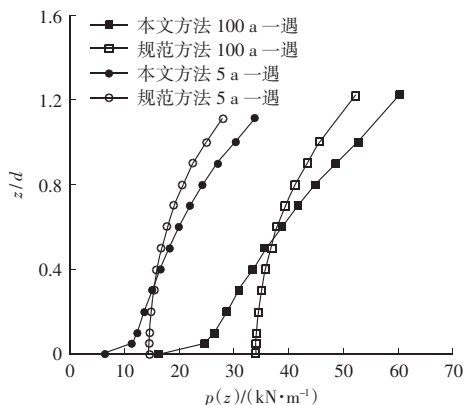


图2 不同方法波流力沿垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of wave-current forces for different methods

实际中,沿深度方向流速往往存在衰减,尤其对于水深较大的海域。故对于水深较大的条件下,规范方法会低估波流力和对水底力矩,尤其对水底力矩。

3.2 水深对桩基波流力的影响分析

由3.1节可知,水深是影响桩基波流力分布的重要参数。为方便将研究成果更好地指导工程实践,对桩基所受总波流力和水深进行无量纲化处理,其中 $F/(\gamma H D d)$ 为相对总波流力, d/L 为相对水深。桩基所受相对总波流力随相对水深的变化如图3所示。图3中各计算条件见表4。由图3

可以看出随着相对水深 d/L 的增大,相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 呈逐渐减小的趋势,在一定的相对水深范围内,如 $d/L \leq 0.25$,相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 逐渐趋于稳定值。这主要是由于波浪能量主要集中在静水面附近一定深度范围内,随着深度的增加波浪水质点轨道运动速度和加速度迅速减小,基本不再受波浪作用,即由波浪引起桩基受力部分趋于稳定。同时,由风生流流速和潮流流速引起的桩基受力部分增加也十分有限。由图3还可知,相对风生流流速 $u_{wind0}/\bar{u}_{tide}$ 也是影响相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 随相对水深 d/L 变化的关键因子。

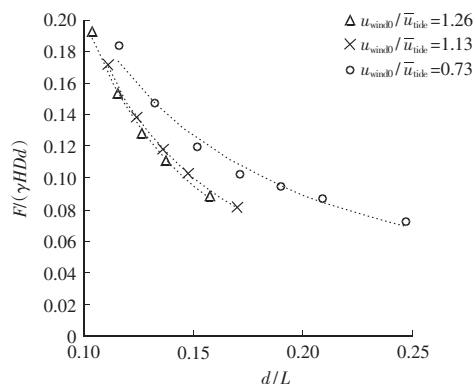


图3 相对总波流力随相对水深的变化

Fig. 3 Variation of relative total wave-current forces with relative water depth

表4 水深影响分析计算参数

Table 4 Calculation parameters for water depth influence analysis

重现期标准	波高/m	波周期/s	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水深平均潮流流速 $\bar{u}_{tide}$ / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	静水面处风生流流速 $u_{wind0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	相对风生流流速 $u_{wind0}/\bar{u}_{tide}$	水深 d/m
100 a 一遇	13.02	16.36	35.5	0.85	1.07	1.26	25, 30, 35, 40, 50
50 a 一遇	11.96	15.44	32.1	0.85	0.96	1.13	25, 30, 35, 40, 50
5 a 一遇	7.92	11.91	20.7	0.85	0.62	0.73	16, 20, 25, 30, 35, 40, 50

3.3 风生流对桩基波流力的影响分析

风生流流速是影响桩基波流力的因素之一,图4显示了3种相对水深条件下的桩基相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 随相对风生流流速 $u_{wind0}/\bar{u}_{tide}$ 的变化规律。图4中各计算条件见表5。需要说明的是表5中水深 d 为特定水深,并非对应的波浪重现期标准水深。这主要是为了使相对水深 d/L 的变化尽量覆盖更大的范围,故在100 a一遇波浪作用时水深取25 m(此时 $d/L=0.104$),若水深取30 m(此时 $d/L=0.116$),则与50 a一遇波浪作用时的 $d/L=0.124$ 十分接近。

由图4可知,随着相对风生流流速 $u_{wind0}/\bar{u}_{tide}$ 的增大,相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 呈线性比例增大

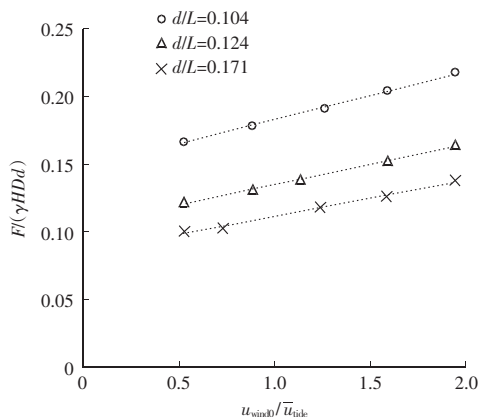


图4 相对总波流力随相对风生流流速的变化

Fig. 4 Variation of relative total wave-current forces with the relative wind-generated current velocity

表 5 风生流影响分析计算参数

Table 5 Calculation parameters for wind-generated current influence analysis

重现期标准	波高/m	波周期/s	水深 d /m	波长 L /m	水深平均潮流流速 $\bar{u}_{\text{tide}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	d/L	静水面处风生流流速 $u_{\text{wind0}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
100 a 一遇	13.02	16.36	25	240.1	0.85	0.104	0.45, 0.75, 1.07, 1.35, 1.65
50 a 一遇	11.96	15.44	30	242.4	0.85	0.124	0.45, 0.75, 0.96, 1.35, 1.65
5 a 一遇	7.92	11.91	30	175.3	0.85	0.171	0.45, 0.62, 1.05, 1.35, 1.65

的变化规律。当静水面处风生流流速 u_{wind0} 约为水深平均潮流流速 $\bar{u}_{\text{tide}}$ 的半倍时, 即 $u_{\text{wind0}}/\bar{u}_{\text{tide}}=0.53$, 则相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 在 0.10~0.17 之间, 具体数值与相对水深 d/L 有关。随着风生流流速的增大, 当静水面处风生流流速 u_{wind0} 与水深平均潮流流速 $\bar{u}_{\text{tide}}$ 大小相当时, 即 $u_{\text{wind0}}/\bar{u}_{\text{tide}}=1.00$, 则 $F/(\gamma H D d)$ 增大至约 0.11~0.18, 相对总波流力增大了约 6%~10%。当静水面处风生流流速 u_{wind0} 进一步增大到约为水深平均潮流流速 $\bar{u}_{\text{tide}}$ 的 2 倍时, 即 $u_{\text{wind0}}/\bar{u}_{\text{tide}}=1.94$, 则 $F/(\gamma H D d)$ 增大至 0.14~0.22, 相对总波流力增大了 29%~40%。由此可见, 风生流流速变化对桩基波流力的影响不容小觑, 工程中应引起重视。

4 问题及讨论

本文提出的深水桩基波流力计算方法是基于 Morison 公式, 因此仅适用于 $D/L \leq 0.2$ 的垂直小直径桩(柱)的波流力计算。而对于 $D/L > 0.2$ 的大尺度结构, 需考虑结构物对波浪场的影响, 波浪力计算基于绕射理论^[22], 计算过程更为复杂。对于深水群桩结构, 群桩系数也是今后研究需解决的问题之一。

现有研究普遍认为速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 与雷诺数 Re 、 KC 数密切相关, 即与水流流速有关。然而, 为方便工程应用, 本文忽略了水流流速沿垂向衰减对速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 的影响, 这可能是影响本文方法计算精度的原因之一, 下阶段可对此作进一步研究, 建立随水深变化的速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 。

对于风生流流速沿垂向分布的变化, 目前并无实测数据作为验证。尽管近年我国已开展了多个深远海海上风电场水文测验工作, 但由于测量的水流流速均为大、中、小潮期间的平常天气条件下的流速, 且该流速中包括了潮流、风生流、密度流等, 尚无法合理有效地分离出风生流。关于风生流流速的垂向分布以及最大作用深度还有待作进一步研究, 必要时需对式(10)一式(12)进行修正。

5 结语

随着海上风电和跨海桥梁向深远海发展, 深水基础波流力是结构设计面临的难题之一。实际中, 海水水流速度沿垂向往往存在衰减现象, 而现行规范中桩基波流力的计算方法并未考虑水流的衰减。对此本文提出一种考虑流速分层的深水桩基波流力计算方法, 并通过美国墨西哥湾海洋测试平台现场实测数据进行了验证, 进一步将该方法应用于我国某深水海上风电工程, 计算了桩基所受的不同重现期波流力, 对比了与现行规范方法计算值的差别, 分析了相对水深、风生流流速对桩基波流力的影响规律, 主要结论如下:

1) 与现场实测数据对比分析表明, 本文提出的深水桩基波流力计算方法是可行的, 平均误差为 4%, 本文方法计算值普遍略大于实测值。

2) 相较于本文方法, 现行《港口与航道水文规范》中桩基波流力和对水底力矩计算值偏小, 在本次计算范围内, 波流力偏小 4% 以内, 而对相对水底力矩偏小可达到 10% 左右。导致偏小的主要原因是规范方法中水流流速取平均流速, 低估了上层($z > 0.5d$)水深范围内水流流速的影响, 同时高估了下层($z < 0.5d$)水深范围内水流流速的影响。

3) 相对水深 d/L 和相对风生流流速 $u_{\text{wind0}}/\bar{u}_{\text{tide}}$ 是影响深水桩基相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 的关键因子。相对总波流力 $F/(\gamma H D d)$ 随相对水深 d/L 的增大而减小, 随相对风生流流速 $u_{\text{wind0}}/\bar{u}_{\text{tide}}$ 的增大而增大。

参考文献:

[1] 耿大洲, 查浩, 黄洁亭, 等. 迈向深水远岸的海上风电关键技术展望与思考[J]. 水力发电, 2024, 50(11): 66-73.
Geng D Z, Zha H, Huang J T, et al. The prospect of key technologies of offshore wind power towards deep-water and off-coast areas[J]. Water Power, 2024, 50(11): 66-73.

[2] 高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 等. 我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1-4.
Gao Z Y, Ruan H S, Qin S Q, et al. Technical status, challenges, and solutions of marine bridge engineering[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 1-4.

[3] 李华军, 刘福顺, 杜君峰, 等. 海洋工程发展趋势与技术挑战[J].

- 海岸工程, 2022, 41(4): 283–300.
- Li H J, Liu F S, Du J F, et al. Development trend and technical challenges of ocean engineering[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 283–300.
- [4] 俞聿修, 张宁川. 不规则波作用于垂直桩柱上的正向力[J]. 海洋学报: 中文版, 1988(5): 609–617.
- Yu Y X, Zhang N C. The in-line wave force exerted by irregular waves on vertical piles[J]. Haiyang Xuebao, 1988(5): 609–617.
- [5] 杨正己, 左其华, 苏伟东. 作用于群桩上的波浪力[J]. 水利水运科学研究, 1992(3): 231–243.
- Yang Z J, Zuo Q H, Su W D. Wave forces on multipile piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 1992(3): 231–243.
- [6] 姚文伟. 桩基结构物波浪力的工程计算方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Yao W W. An engineering approach for computation of wave loads on pile-slab structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] 任佐皋. 波浪和水流对孤立桩柱共同作用力的计算[J]. 海洋学报: 中文版, 1983(3): 376–390.
- Ren Z G. Calculation of the combined force exerted by waves and water flow on a single pile[J]. Haiyang Xuebao, 1983(3): 376–390.
- [8] 黄河宁. 计算孤立桩柱上波流共同作用力的修正的 Morison 方程[J]. 海洋学报: 中文版, 1991(2): 290–294.
- Huang H N. The modified Morison equation for calculating the wave-current force on a single pile[J]. Haiyang Xuebao, 1991(2): 290–294.
- [9] 李玉成, 王凤龙. 作用于串列双桩柱列上的波流力[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1992(2): 141–149.
- Li Y C, Wang F L. Wave-current forces on bipiles in tandem array [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1992(2): 141–149.
- [10] JTS 145—2015(2022 年版) 港口与航道水文规范[S].
- JTS 145—2015(2022 ed.) Code of hydrology for harbour and waterway[S].
- [11] 彭耀. 海上固定式风机基础波流荷载数值模拟与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- Peng Y. Numerical study of wave-current loads acting on foundation of fixed offshore wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [12] 肖海珠, 魏凯, 胡楷宇, 等. 西堠门公铁两用大桥高桩承台基础波流荷载特性研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 27–35.
- Xiao H Z, Wei K, Hu K Y, et al. Research on wave-current force characteristics of foundation consisting long piles and pile cap in Xihoumen Rail-cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 27–35.
- [13] 洪陈凯. 跨海桥梁深水基础波流荷载特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
- Hong C K. Research on mechanical properties of wave-current loads on deep-water foundation of sea-crossing bridges[D]. Ningbo: Ningbo University, 2023.
- [14] 费岳军, 史军强, 堵盘军, 等. 冬季舟山外海定点实测海流资料分析[J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 648–656.
- Fei Y J, Shi J Q, Du P J, et al. Analysis of the mooring current data near Zhoushan Islands[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(6): 648–656.
- [15] 葛黎丽, 屈衍, 张志旭, 等. 南海深水风、浪、流多年一遇重现期极值的推算[J]. 中国海上油气, 2009, 21(3): 207–210.
- Ge L L, Qu Y, Zhang Z X, et al. The calculation of the extreme wind, wave and current for return periods in the deep water area of the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(3): 207–210.
- [16] 邹志利. 海岸动力学[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Zou Z L. Coastal hydrodynamics[M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [17] IEC 61400-3-1: 2019 Wind energy generation systems: Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines[S].
- [18] DNVGL-ST-0437: 2016 Loads and site conditions for wind turbines[S].
- [19] 任华堂, 刘钦政, 吴辉碇. 台湾海峡三维风海流的数值模拟[J]. 海洋预报, 2002(4): 24–32.
- Re H T, Liu Q Z, Wu H D. Numerical simulation of 3D wind current in Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2002(4): 24–32.
- [20] Bea R G, Pawsey S F, Litton R W. Measured and predicted wave forces on offshore platforms[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1991, 117(5): 511–532.
- [21] Forristall G Z. Three-dimensional structure of storm-generated currents[J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(18): 2721–2729.
- [22] 肖宇. 跨海大桥基础结构波流力计算方法[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(2): 59–64, 91.
- Xiao Y. Calculation method for wave current forces of foundation structures of cross-sea bridges[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(2): 59–64, 91.