



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403191

引用格式:岳志伟,范海燕,袁靖周,等.灯桩在风浪环境中水动力特性及其优化方案[J].科学技术与工程,2025,25(6):2585-2594.

Yue Zhiwei, Fan Haiyan, Yuan Jingzhou, et al. Hydrodynamic characteristics of light beacons in wind-wave environment and optimization scheme[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2585-2594.

灯桩在风浪环境中水动力特性及其优化方案

岳志伟¹, 范海燕¹, 袁靖周¹, 林一鹏¹, 王晨旭^{2*}

(1. 交通运输部南海航海保障中心, 广州 510000; 2. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要 为分析灯桩在风浪环境下的水动力特性,并根据其应力集中点给出优化方案。通过 VOF(volume of fluid)方法求解了灯桩表面在风浪中的压力分布,以及压力造成形变。结果表明:灯桩应力集中位置在灯桩中间支柱的根部,最大位移位置在灯桩顶端;据此研究了两种优化方案,斜柱支撑方案应力集中在支柱的顶部,比优化前减小 32.2%,最大变形量在中部底座处,比优化前减小 40.1%;端部加强方案应力集中在底部,比优化前减小 0.08%,最大变形发生在灯桩顶部,与优化前相比减小了 23.1%。可见支柱斜撑的灯桩结构可以有效地减小结构受到的应力强度,分散了灯桩其他部分受到的风浪的冲击,是更好的结构优化方案。

关键词 灯桩; 群柱结构; 计算流体力学; 水动力

中图分类号 U644.1; **文献标志码** A

Hydrodynamic Characteristics of Light Beacons in Wind-Wave Environment and Optimization Scheme

YUE Zhi-wei¹, FAN Hai-yan¹, YUAN Jing-zhou¹, LIN Yi-peng¹, WANG Chen-xu^{2*}

(1. Southern Navigation Service Center, Maritime Safety Administration, Guangzhou 510000, China;

2. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] To analyze the hydrodynamic characteristics of light beacons in wind-wave environments and propose an optimization scheme based on stress concentration points, the VOF (volume of fluid) method was used to calculate the pressure distribution on the surface of the light beacon under wave and wind conditions and the resulting deformations. The results indicate that stress concentration occurs at the base of the central support of the light beacon, with the maximum displacement at the top of the light beacon. Two optimization schemes were investigated based on these findings. In the slanted support scheme, stress concentration shifted to the top of the support, reducing by 32.2% compared to before optimization. The maximum deformation was at the base in the middle, a 40.1% reduction compared to before optimization. In the end-strengthened scheme, stress concentrated at the bottom, with a reduction of 0.08% compared to before optimization, while the maximum deformation was at the top of the light beacon, which was reduced by 23.1% compared to before optimization. It is evident that the light beacon structure with slanted supports can effectively reduce stress intensity and disperse the impact of wind and waves on other parts of the light beacon, representing a better structural optimization scheme.

[Keywords] light beacon; group pile structure; computational fluid dynamics; hydrodynamics

灯桩是航道中重要的固定助航标志,设置在重要、复杂的水域,具有指示交通功能。为此,灯桩持续稳定的发挥航标效能十分必要,若灯桩受损,会对周边船舶的航行安全、港口业务和经济发展带来一定的影响。恶劣海况下风浪荷载对灯桩结构的破坏是其损毁的主要原因之一,因此,研究灯桩在风浪环境中的水动力特性是保障灯桩安全工作的

必要课题。

灯桩通常由数个桩腿固定在航道底,可归为群柱承台结构。近 50 年来,研究人员对单桩周围波浪作用的模式和机制进行了详细的研究^[1-5]。与单柱相比,由于多个圆柱体之间多个波反射和干涉效应,在多柱情况下评估复杂的波衍射难度较大。而且圆柱体到中心距离也是影响波浪力的重要因素,

收稿日期:2024-04-29; 修订日期:2024-12-16

基金项目:国家自然科学基金(52201414)

第一作者:岳志伟(1982—),男,汉族,河南郑州人,硕士,高级工程师。研究方向:航标理论及设计。E-mail:617437769@qq.com。

*通信作者:王晨旭(1984—),男,汉族,黑龙江齐齐哈尔人,博士,讲师。研究方向:海洋结构物设计制造。E-mail:chenxu.wang@tju.edu.cn。

当圆柱体间隔非常近时,使用势理论的低阶方法无法求解水动力。随着计算机算力突飞猛进,可计算黏性的 CFD (computational fluid dynamics) 方法取得了长足发展。CFD 可以探明基础流动和波动,并生成准确和详细的结果,无须对典型波浪模型进行假设和简化。Mayer 等^[6]为计入黏性效应,使用 Navier-Stokes 方程求解波浪问题。他们给出了两种描述波浪的数值方法,其中 VOF (volume of fluid) 在后来的数值计算中被广泛植入。杨晨等^[7]以 Navier-Stokes 为控制方程,选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 法模拟了三维波浪场中小尺度群桩柱所受波浪力,给出了各桩柱干扰系数与桩柱距的关系。Li 等^[8]开发了用 Navier-Stokes 方程构建三维波浪的方法,使得在计算波浪载荷时引入黏性效应成为较为成熟的数值算法。Jacobsen 等^[9]使用 CFD 软件计算此类问题,是较早的使用 CFD 方法的研究报告。Kamath 等^[10-11]用 CFD 方法分别研究了二维和三维的多柱受波浪力载荷特点。Qu 等^[12]用 $k-\omega$ 湍流模型求解了孤立波加载在群柱承台结构(桥)上的水动力特性,Wen 等^[13]同样用 $k-\omega$ 湍流模型求解了在有风加入的工况下桥桩和桥面的动力响应。Ma 等^[14]采用 CFD 和 DEM (discrete element method) 结合模型求解了双柱受波浪冲刷时的周围流场特性。靳林晓^[15]用 VOF 法研究了桩柱受波浪冲击后的爬升问题。综上可知在 CFD 方法里,应用 Navier-Stokes 方程并通过 VOF 法控制波面的手段已较为成熟,可解决一些较复杂的流场情况。

以往研究者用 CFD 方法对这种多柱排列结构在波浪中的水动力特性做出了大量研究,但针对灯桩的研究尚显不足,尤其缺少完整的、精细化计算以给出准确的水动力载荷分析。这种缺失使灯桩结构设计的改进和优化缺乏科学指导。本文研究针对航道内的灯桩在风浪耦合环境下,采用 CFD 方法对其所受的载荷进行计算,对结构体形变的风险给出评估,并给出优化设计的思路。

1 数值方法

1.1 控制方程

本文研究选择了时均化的雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 模型,其中速度和压力等流体属性被分解成平均值和涡动(波动)部分。雷诺平均的 N-S 方程和连续方程共同构成了一个闭合的非线性方程组,用来描述复杂的流体运动。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式(1)中: x_i 为空间上的 3 个方向, $i=1,2,3$ 。

同时满足动量方程,即纳维斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式(2)中: \bar{u}_i 为第 i 个方向上的平均速度分量; ρ 为流体密度; \bar{p} 为平均压力; ν 为动力黏性系数; $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力,代表速度波动的相关性,是需要通过模型额外计算的部分。

上述方程是雷诺平均的控制方程。

1.2 湍流模型

在本文研究中,使用 CFD 软件 STAR-CCM+ 选择 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟,包括两个额外的传输方程来表示流动的湍流特性。包括湍动能 k 的湍流动能输运方程,即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3)$$

以及耗散率 ω 的湍流耗散率输运方程,即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中: Γ_k 和 Γ_ω 分别为 k 和 ω 的有效扩散系数; G_k 和 G_ω 分别为 k 和 ω 的生成项; Y_k 和 Y_ω 分别为 k 和 ω 的湍流耗散项; S_ω 为交叉扩散项。

1.3 VOF 方法

VOF 方法是用 CFD 求解波浪的基本方法之一^[6],VOF 方法在流体网格中引入了体积分数 α 这一物理量, α 在 0 和 1 之间取值,当 α 为 0 或 1 时,表示网格中只存在一种流体;当 α 为其他值时,表示网格中存在两种流体,所有这些网格就构成了两相流体的交界面,具体到本文,即为自由表面。引入了体积分数之后,流体密度 ρ 和动力黏性系数 μ 变为

$$\rho = \sum_{q=1}^2 a_q \rho_q \quad (5)$$

$$\mu = \sum_{q=1}^2 a_q \mu_q \quad (6)$$

式中: a_1 和 a_2 体积分别为空气相与水相的体积分,且两者之和为 1。

还满足如下输运方程,即

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i a_q)}{\partial x_i} = 0, \quad q = 1, 2; i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

综上所述,对于本文研究的不可压黏性两相流问题,控制方程组包含连续性方程式(1),RANS 方程式(2),湍流模型方程式(3)和式(4),以及体积

分数输运方程式(7)。它们共同构成一个闭合的方程组。

2 数值模型

利用 STAR-CCM + 软件的 3-CAD-Model 模块建立的灯桩全尺寸模型, 如图 1 所示。需要指出的是, 在此处忽略防护栏及细小的构件的模型。

图 2 为计算域的尺寸图, 由于采用的是形变网格法, 因此存在背景区域、形变区域两个区域, 计算域的主要三维尺度 $80\text{ m} \times 40\text{ m} \times 30.4\text{ m}$, 以原点为基准范围为 $-40\text{ m} < x < 40\text{ m}$, $-20\text{ m} < y < 20\text{ m}$, $-5.4\text{ m} < z < 25\text{ m}$, 需要指出的是, 静水面距离背景区域底部为 5.4 m 。边界条件设置情况如图 3 所示。

网格划分如图 4 所示, 显示了背景区域以及形变区域的网格划分情况, 可以看到, 为了利用 VOF 方法更好地捕捉自由液面形状, 本文研究对静水面附近的网格进行了加密处理, 同时, 为了保证背景网格与形变网格之间插值的准确性, 对于形变区域外围的背景区域也做了网格加密, 并同时采用自适应网格对形变网格与自由液面网格进行自动加密, 这样能更好地捕捉到自由液面的翻卷与形变。计

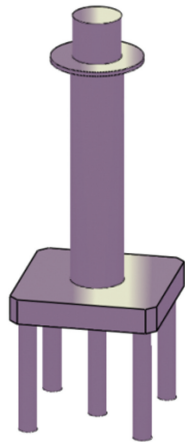


图 1 几何模型
Fig. 1 Geometry model

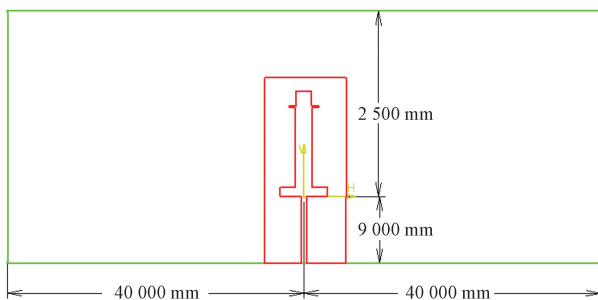


图 2 计算域
Fig. 2 Computational domain

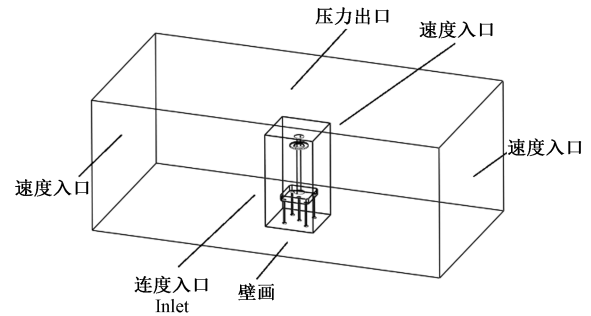


图 3 边界条件
Fig. 3 Boundary conditions

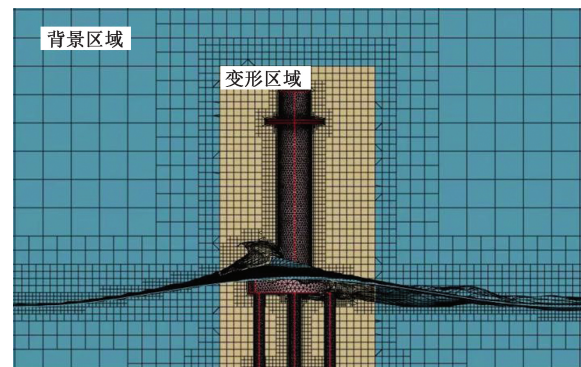


图 4 网格划分
Fig. 4 Mesh details

算域中背景域网格数量为 9.88×10^6 , 重叠域网格数量为 3.14×10^6 。

3 风浪环境中灯桩受力分析

3.1 计算工况

曲线图和柱状图分别如图 1 和图 2 所示, 有多条曲线的需给出图例。根据南海保障中心辖区内永兴岛附近水域环境监测值, 取冬季和夏季平均波高和风速, 如表 1 所示。

表 1 计算工况

Table 1 Calculating conditions

参数	工况 1	工况 2
波谱类型	五阶 VOF 波	五阶 VOF 波
风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6	6
波高/m	1.8	4
周期/s	5	5
水深/m	5.4	5.4

3.2 水动力结果分析

波浪充分发展后的流场计算情况如图 5 和图 6 所示, 从工况 1 中可以看到此时桩体平台部分基本都被波浪所淹没, 超过平台高度的波浪在冲击到桩体后向反方向产生翻卷, 此时波浪的冲击对桩体的根部会产生较大沿 X 方向的瞬时力, 而工况 2 的情况更加严重, 当波高达到 4 m 后, 波峰到达桩体时,

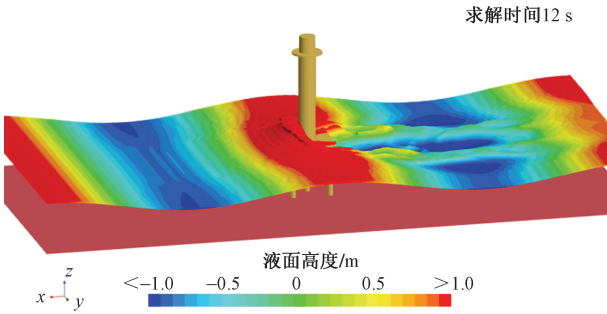


图5 工况1的12 s自由液面

Fig.5 Free fluid surface on 12 s under working condition 1

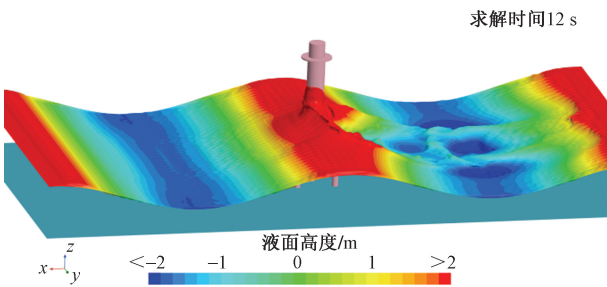


图6 工况1的12 s自由液面

Fig.6 Free fluid surface on 12 s under working condition 2

桩体的下半部分基本都浸没于波浪之中,而波峰会沿着桩体向上爬升,使桩体的浸没面积大幅增加,此时未产生波浪的翻卷现象。

图7和图8所示为沿X方向的速度云图,从工况1中可以看到波浪在受到灯桩的阻碍后,在灯桩的后方形成了短距离的低速区,波峰的背面会形成小范围的高速区域。在工况2时,随着波高的增加,由于狭管效应,波面上方的空气流速大幅增加,形成了大范围的高速区域。

通过上述分析可知,风浪耦合时浪高影响风速,风速随着浪高的将增加而增大。风、浪作用下的灯桩的X向受力时历曲线由图9和图10给出。从图9和图10中可以看到,灯桩的受力随着波浪的冲击呈周期性变化,接近于类似波浪的正弦曲线,波高为1.8 m的工况1在计算稳定后X方向最大受力为454 kN,平均受力为294 kN,而波高为4 m的工况2在计算稳定后X方向最大受力为817 kN,平均受力为385 kN。

由灯桩受力情况可得其表面的压力分布(图11和图12),工况1时由于波浪对灯桩桩体的冲击力较为缓和,此时灯桩桩体压力比较均匀,没有出现受波浪冲击而形成高压区,而此时受波浪整体冲击作用,灯桩根部作为固定端面,在其附近产生了较大的压力。而工况2时由于波浪的幅值有所提高,灯桩桩体受到的瞬时冲击力大幅增加,此时除了灯桩的根部压力较大以外,灯桩桩体的平面的连接处

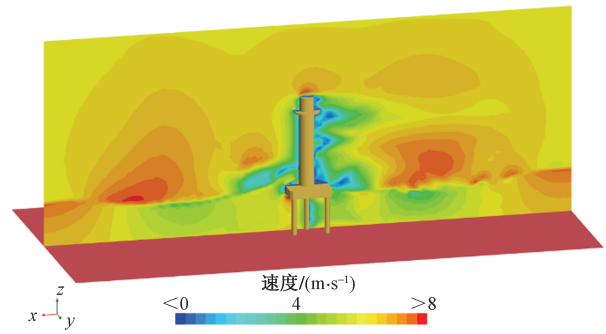


图7 工况1的12 s速度分布

Fig.7 Velocity diagram on 12 s under working condition 1

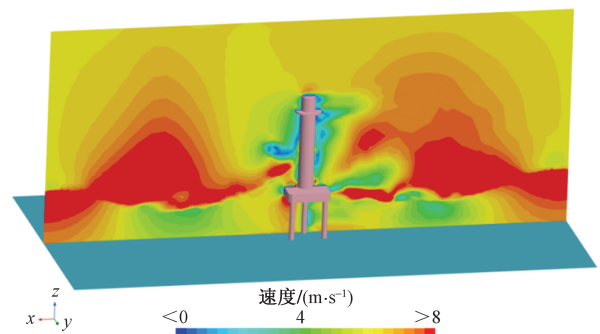


图8 工况2的12 s速度分布

Fig.8 Velocity diagram on 12 s under working condition 2

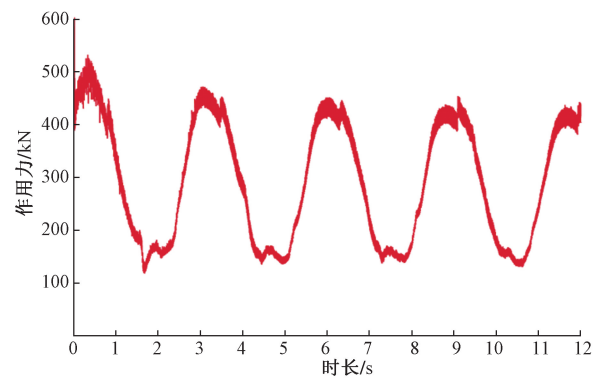


图9 工况1下X方向受力时历曲线

Fig.9 Forces on X direction versus time under working condition 1

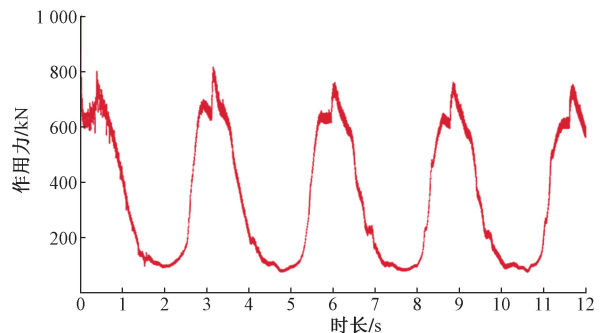


图10 工况2下X方向受力时历曲线

Fig.10 Forces on X direction versus time under working condition 2

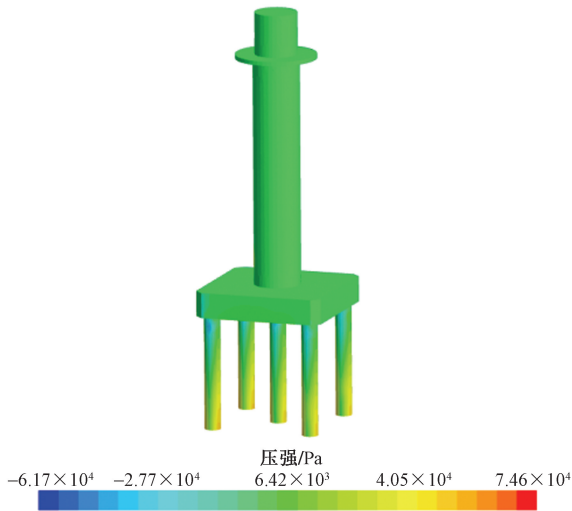


图 11 工况 1 的 12 s 压力分布

Fig. 11 Pressure distribution on 12 s under working condition 1

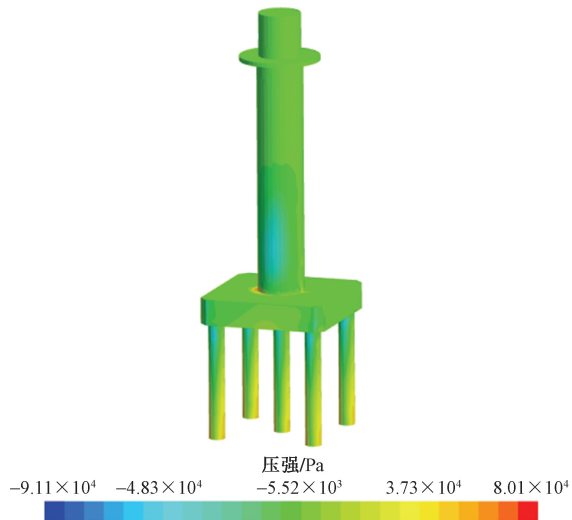


图 12 工况 2 的 12 s 压力分布

Fig. 12 Pressure distribution on 12 s under working condition 2

也因为冲击作用产生了压力集中区。

得到灯桩在风、浪工况下的压力分布计算结果后,可进行下一步灯桩结构有限元分析。

4 灯桩结构有限元分析

首先对灯桩所用材料进行定义,根据袁靖周等^[16]的研究,所设计的灯桩强度不应低于 C30 混凝土,其属性如表 2 所示。

表 2 灯桩材料属性

Table 2 Properties of light beacon materials

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
C30 混凝土	2 400	30 000	0.20

4.1 有限元模型

在定义灯桩的材料属性之后,在 STAR CCM + 中进行网格划分,并进行分析求解,校核工况为波浪冲击工况。

图 13 为灯桩有限元模型,忽略小型结构部分。X 轴正向沿波浪方向。计算模型中主要采用四面体单元模拟,在过渡区域以及固定桩等局部进行网格加密处理,网格单位大小 50 mm,模型共有 9.976×10^4 个单元。

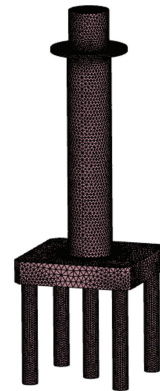


图 13 灯桩有限元模型

Fig. 13 Finite element model of light beacon

4.2 有限元结果分析

引用 3.2 节中灯桩所受的波浪力,将其加载在灯桩有限元模型上,得到结果如图 14 和图 15 所示,在工况 1 条件下,波峰在抵达灯桩时,此时灯桩被波浪冲击,灯桩的支柱根部作为固定端,导致最大应力出现在了底部支柱的根部,为 7.66 MPa,尤其是中间支柱的根部以及顶部都出现了较大应力集中,而平台上方的桩体整体应力并不大。而在工况 2 时,从图 16 中可以看到,桩体的应力情况与工况 1 非常类似,同样在桩体支柱的上下两端出现了应力集中,最大应力为 8.55 MPa,桩体本身在受到波浪冲击后,将力矩传递到了固定端支柱上,使得桩体应力远低于底部的支柱的应力。

如图 16 和图 17 所示,两种工况下,灯桩的最大位移均发生在灯桩顶部,说明振荡力使灯桩产生轻微的振动,振动最大幅度分别为 2.47cm、3.22cm。这种振动将加剧灯桩结构的损坏,特别是对灯桩柱础的结构强度提出考验,设计时应避免振动的发生。同时可以看到,灯桩 5 个柱础各自形变几乎相等,没有较大的分别,这与雷欣欣^[17]的实验结果相同。

波浪冲击时在 1.8 m 波高工况下灯桩最大应力为 7.66 MPa,位置在灯桩中间支柱的根部,整体最大位移量约为 2.47cm,位置在灯桩顶端。波浪冲击

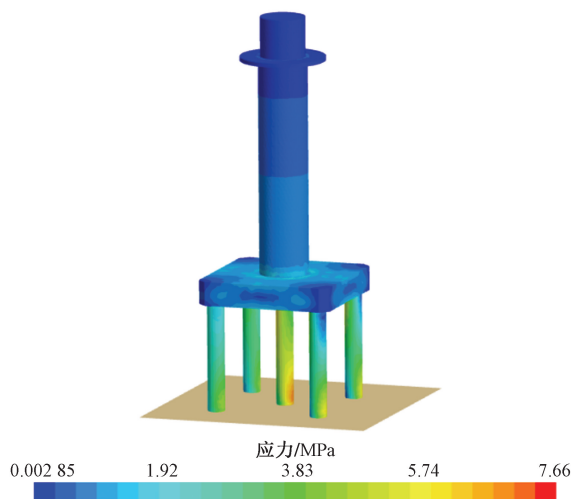


图 14 工况 1 下灯桩应力云图

Fig. 14 Stresses diagram on light beacon under working condition 1

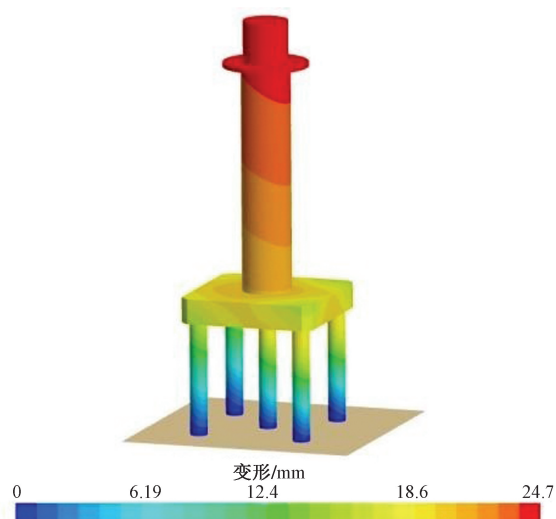


图 16 工况 1 下灯桩形变

Fig. 16 Deformation of light beacon under working condition 1

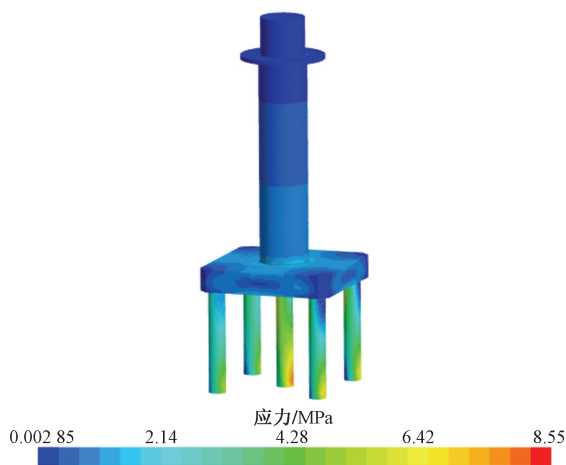


图 15 工况 2 下灯桩应力云图

Fig. 15 Stresses diagram on light beacon under working condition 2

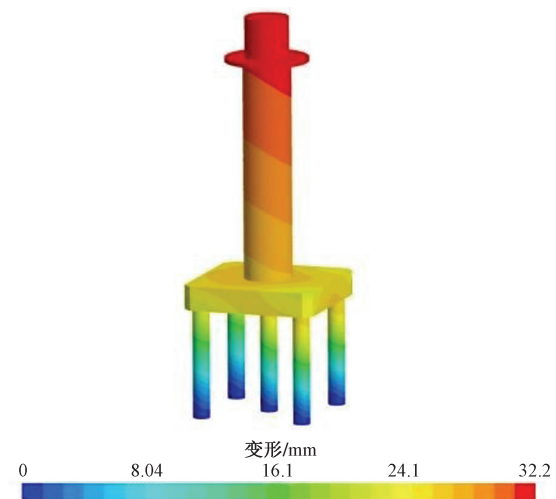


图 17 工况 2 下灯桩形变

Fig. 17 Deformation of light beacon under working condition 2

时在 4 m 波高工况下灯桩最大应力为 8.55 MPa, 位置在灯桩中间支柱的根部, 整体最大位移量约为 3.22 cm, 位置在灯桩顶端。通过有限元直接计算, 灯桩在波浪冲击工况下, 最大应力值小于材料屈服强度。在灯桩设计时应减小振动幅度, 避免共振的发生。以上有限元分析给出了灯桩结构中应力集中位置, 可为灯桩结构优化提供参考。

5 灯桩结构优化研究

通过对灯桩在风浪耦合的环境中的结构应力研究发现灯桩应力集中点在支柱的底部, 由于底部受到较大的应力, 造成桩身整体振动, 威胁结构安全。由于局部应力过大和振动幅度过大都可能造成结构的损坏, 特别是后者, 一旦引发共振, 则结构将被较大程度的破坏。因此优化方案主要针对

两个问题: 一是减小应力集中处的受力, 二是降低结构振动幅度。研究给出两种优化方案, 分别是对灯桩底部支柱进行倾斜优化后的模型和对灯桩底部支柱的两端采用圆台进行加固后的模型, 如图 18 所示。

为验证优化模型的可靠性, 取永兴岛附近水域历年监测出现的最大波高值 9 m。其计算域如图 19 所示。

5.1 水动力结果分析

优化结构的数值求解过程, 如图 20 所示。

如图 21 所示, 通过对灯桩在风、浪工况下的 X 方向受力进行了分析, 可得到优化前的灯桩受力最大值约为 3 332 kN, 平均值为 1 116 kN, 支柱斜撑的灯桩受力最大值约为 3 339 kN, 平均值为 933 kN, 支柱两端加固灯桩受力最大值约为 3 312 kN, 平均值

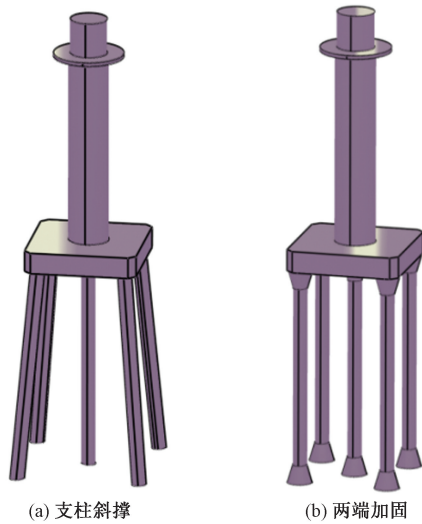


图 18 优化模型
Fig. 18 Optimized models

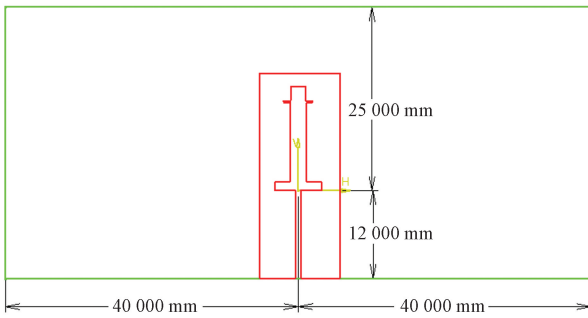


图 19 计算域
Fig. 19 Computational domain

为 1 091 kN。由于波高的数值较大,迎浪方向的灯桩底座面以及支柱上沿均由于波浪冲击产生了较大的压力,三种结构形式受波浪冲击的最大压力面相当。

5.2 应力及形变分析

有限元计算过程与前文一致,如图 22(a)所示,优化前灯桩应力集中点在桩腿底部,最大可达 23.9 MPa。如图 22(b)所示,斜柱支撑的灯桩应力集中在桩身支柱的顶部,最大应力为 16.2 MPa,比优化前减小 32.2%。如图 22(c)所示,端部加强的灯桩支柱应力集中在底部,最大达 22.1 MPa,比优化前减小 0.08%。从图 22 可以发现,在灯桩支柱改变支撑角度后灯桩桩身受到的应力大幅减小,并且最大应力集中在支柱的顶端,也就是整个灯桩结构的中间位置,相比优化前力臂更短,利于减小其屈曲挠度。尽管支柱端部加强的设计在所受应力上与优化前相比只有轻微的减小,但应力集中在加强部位,不能凭应力未明显减小而认定其优化效果不佳,需要考察整个灯桩结构的变形量而确定是否

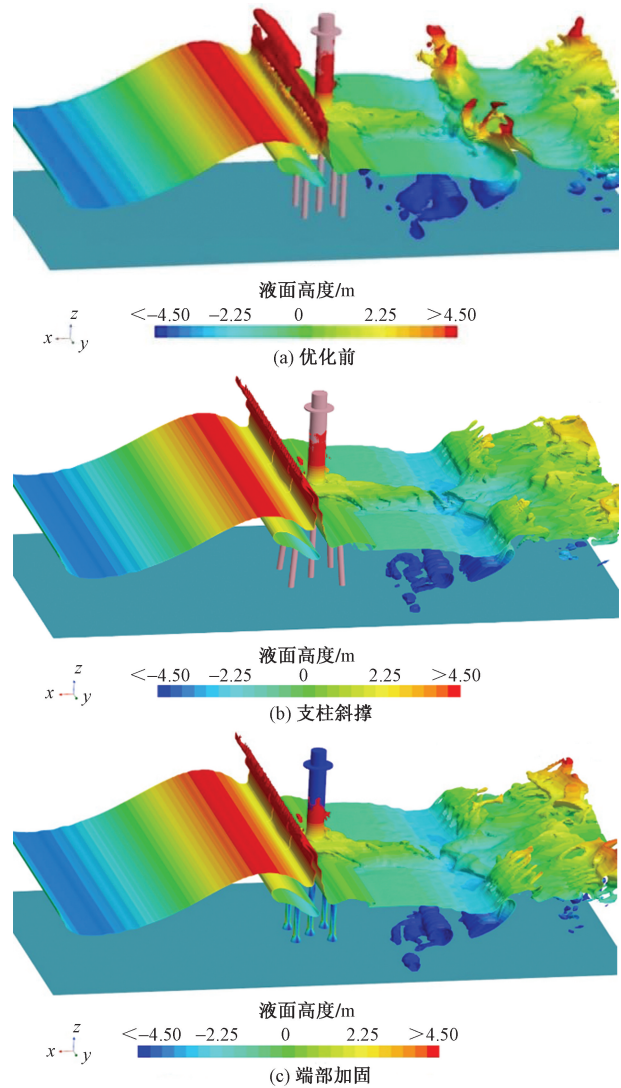


图 20 波高 9 m 时自由液面
Fig. 20 Free fluid surface at wave height 9 m

起到优化作用。

如图 23(a)所示,灯桩优化前最大变形在其顶部,最大值达到 4.84 cm,在强风浪中,受力造成变形从支柱底部向上逐渐增大,灯桩顶部最大,说明位移是自下而上的传递。因为波浪是周期性变化的能量传递,波浪力随着波浪的起伏承振荡变化,这样就会造成灯桩的振动,相当于以灯桩支柱底部为原点,灯桩顶部为端点的钟摆形晃动。如果振动频率与材料自身频率吻合,形成共振,将存在较大的结构安全隐患。

如图 23(b)所示,支柱斜撑时灯桩最大变形量在其中部底座处,最大为 2.9 cm,相比优化前减小 40.1%。由于最大位移处在灯桩中部,说明支柱与基座连接有效的缓冲了灯桩的晃动幅度,把振动的传递阻隔在基座处,从基座往上,变形幅度逐渐降低。这种优化设计可以使灯桩的最大变形发生在

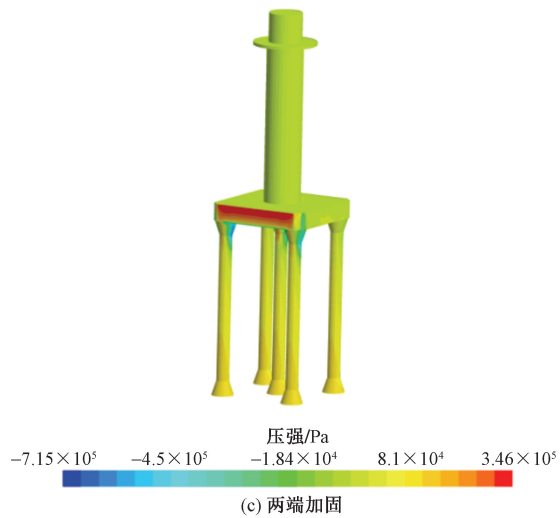
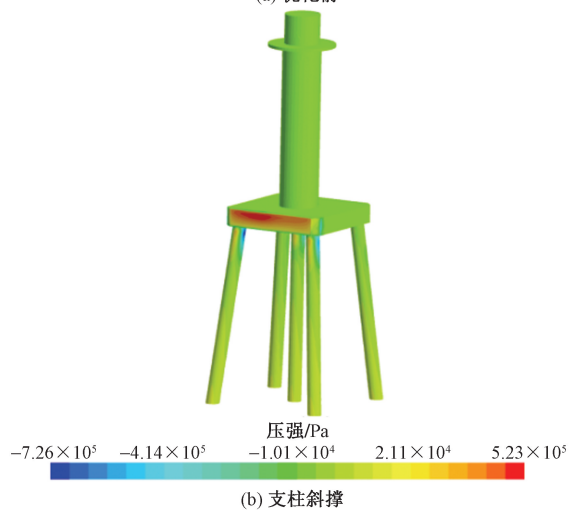
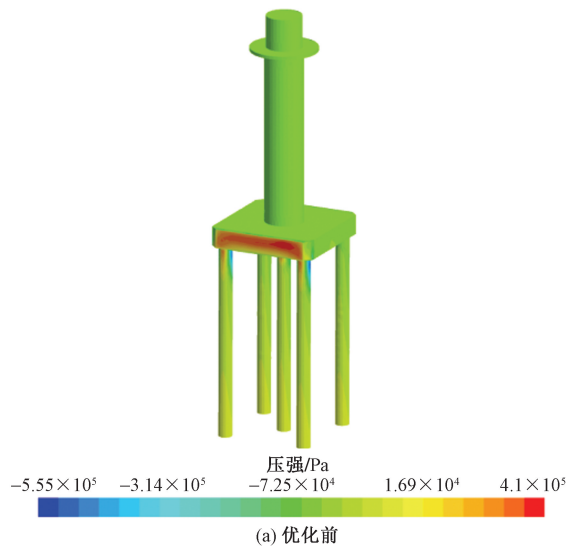


图 21 12 s 压力分布

Fig. 21 Pressure distribution on 12 s

结构最强的基座处,可较大程度的降低灯桩振动,并且较之优化前,振动半径减小一半,有效地提高了灯桩的结构强度。

如图 23(c) 所示,在加固支柱后,灯桩的变形量

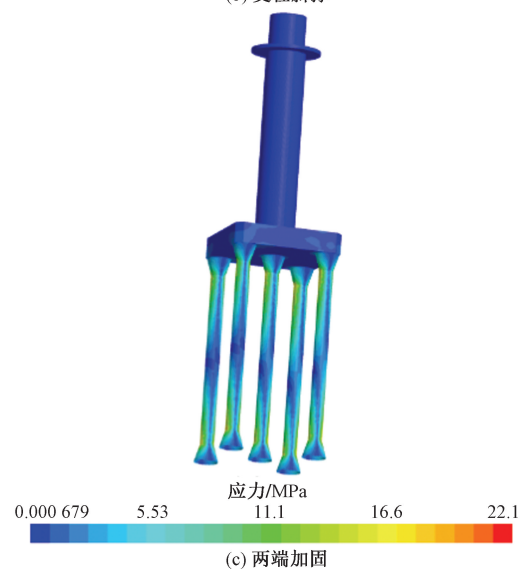
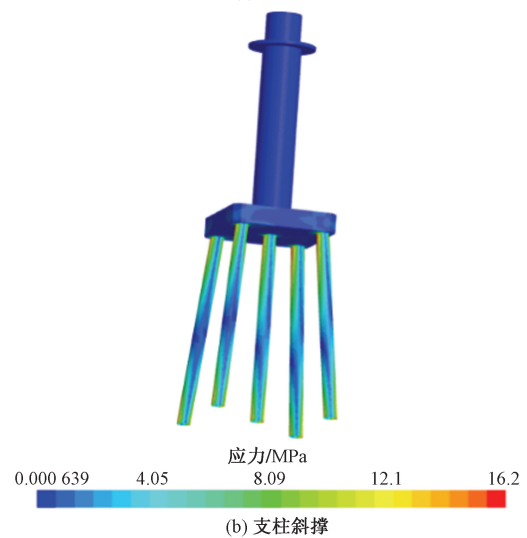
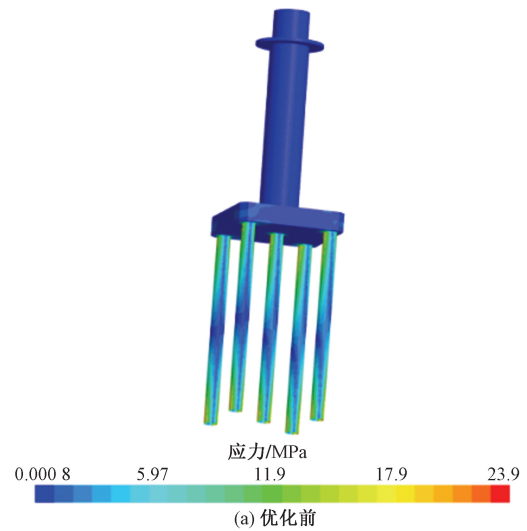


图 22 灯桩应力云图

Fig. 22 Stresses diagram on light beacon

大幅度减小,最大为 3.72 cm,与优化前相比减小了 23.1%。变形量依然是从支柱底部向上逐渐增大,最大变形发生在灯桩顶部。计算结果说明尽管端

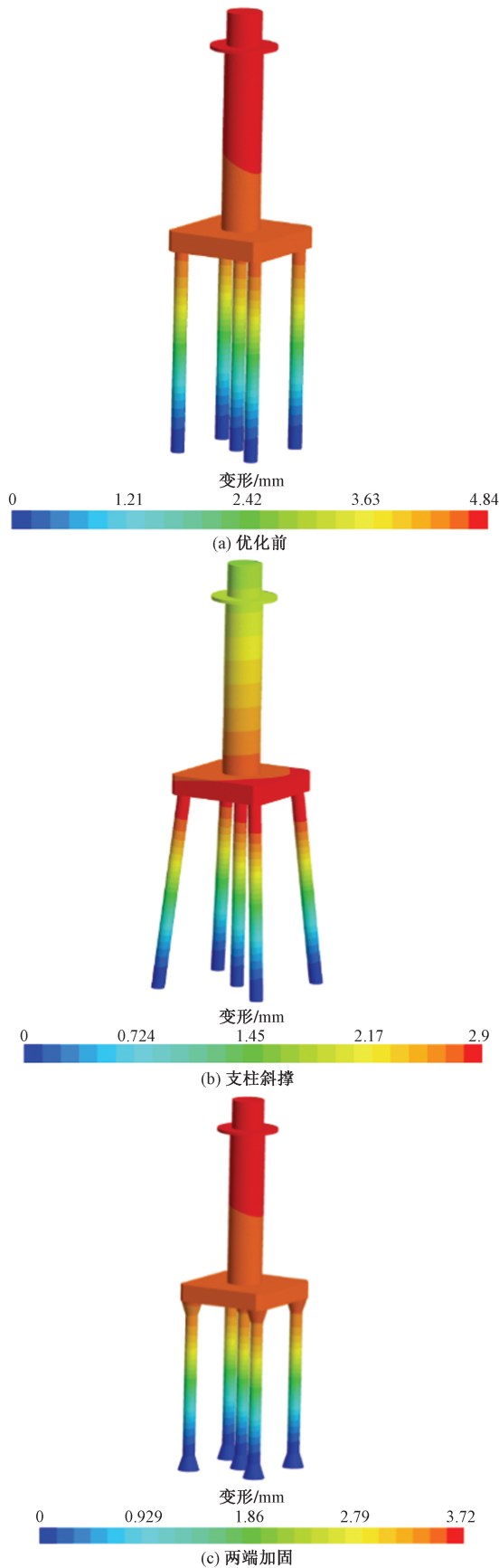


Fig. 23 Deformation of light beacon

部加固使灯桩变形量减小,但振动依然是自下而上的传递,优化效果不如斜撑支柱的方案。

6 结论

应用 VOF 方法对风耦合环境中灯桩的水动力特性进行了分析,并根据及由风浪引起的应力集中和形变量,对灯桩结构特点进行优化方案研究,得出如下结论。

(1)在 1.8 m 和 4 m 波高工况下,灯桩最大应力分别为 7.66 MPa 和 8.55 MPa,位置在灯桩中间支柱的根部。整体最大位移量约为 2.47 cm 和 3.22 cm,位置在灯桩顶端。

(2)两种优化方案中斜柱支撑的灯桩应力集中在支柱的顶部,最大应力为 16.2 MPa,比优化前减小 32.2%。支柱端部加强的灯桩支柱应力集中在底部,最大达 22.1 MPa,比优化前减小 0.08%。

(3)支柱斜撑灯桩最大变形量在其中部底座处,最大为 2.9 cm,相比优化前减小 40.1%,此种结构把振动的传递阻隔在基座处,从基座往上,变形幅度逐渐降低。支柱加固灯桩变形量最大为 3.72 cm,与优化前相比减小了 23.1%,变形从支柱底部向上逐渐增大,最大变形发生在灯桩顶部。

综上所述,支柱斜撑的灯桩结构可以有效地减小结构受到的应力强度,在降低灯桩振动幅度的同时将最大振幅和最大受力处都集中在结构强度最强的基座处,分散了灯桩其他部分受到的风浪的冲击,是更好的结构优化方案。

参 考 文 献

- [1] Sumer B M, Fredsøe J, Christiansen N. Scour around vertical pile in waves[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1992, 118(1): 15-31.
- [2] 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.
- [3] Schendel A, Welzel M, Schlurmann T, et al. Scour around a monopile induced by directionally spread irregular waves in combination with oblique currents[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 161. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103751.
- [4] 赵强, 蒋光彪, 胡江涛. 低雷诺数下附属棱柱的圆柱绕流减阻[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(9): 3468-3474.
Zhao Qiang, Jiang Guangbiao, Hu Jiangtao. Drag reduction of flow past a circular cylinder attached prisms at low Reynolds number[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(9): 3468-3474.
- [5] 陈帆, 钟文杰, 万德成. 倾斜圆柱入水砰击的流场数值分析[J]. *中国造船*, 2022, 63(4): 167-174.
Chen Fan, Zhong Wenjie, Wan Decheng. Numerical analysis of flow fields of water entry impact of inclined cylinders[J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(4): 167-174.
- [6] Mayer S, Madsen P A. Simulation of breaking waves in the surf

- zone using a Navier-Stokes solver [C]//Coastal Engineering Conference. Sydney: ICCE, 2000. DOI:10.1061/40549(276)72.
- [7] 杨晨, 刘长根, 陶建华. 用三维时变雷诺方程模型模拟小尺度组合桩柱上的波浪力[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(6): 781-788.
Yang Chen, Liu Changgen, Tao Jianhua. Simulation of wave forces on small-diameter cylinders by using 3D unsteady Reynolds equation [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(6): 781-788.
- [8] Li B, Fleming C A. Three-dimensional model of Navier-Stokes equations for waterwaves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2001, 127(1): 16-25.
- [9] Jacobsen N G, Fuhrman D R, Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam © [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [10] Kamath A, Chella M A, Bihs H, et al. CFD investigations of wave interaction with a pair of large tandem cylinders[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 738-748.
- [11] Kamath A, Alagan Chella M, Bihs H, et al. Evaluating wave forces on groups of three and nine cylinders using a 3D numerical wavetank[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015, 9(1): 343-354.
- [12] Qu K, Wen B H, Yao Y, et al. Numerical study on hydrodynamic characteristics of movable coastal bridge deck under joint action of solitary wave and current [J]. Ocean Engineering, 2022, 262. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.112143.
- [13] Wen B H, Qu K, Lan G Y, et al. Numerical study on hydrodynamic characteristics of coastal bridge deck under joint action of regular waves and wind [J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110450.
- [14] Ma H, Zhang S, Li B. Numerical investigation of local scour around twin piles under steady current using CFD-DEM coupling method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 164. DOI:10.1016/j.compgeo.2023.105805.
- [15] 靳林晓. 垂荡运动圆柱波浪爬升和波浪荷载的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Jin Linxiao. Numerical simulation of wave run-up and wave load on heaving cylinder [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] 袁靖周, 岳志伟, 李凤山. 浅析沿海航标灯塔桩基础选型 [J]. 珠江水运, 2017(11): 83-84.
Yuan Jingzhou, Yue Zhiwei, Li Fengshan. Analysis of pile foundation selection for coastal beacon lamp tower [J]. Pearl River Waterage, 2017(11): 83-84.
- [17] 雷欣欣. 群桩在波浪作用下的水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Lei Xinxin. Research on hydrodynamic performance of pile array under wave action [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.