

大尺度群桩随机波浪力场的降维模拟

刘章军, 董心宇, 张文远

(武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据随机波浪的能量分布特点, 建议了一种随机波浪作用下大尺度桩柱的判别方法。在此基础上, 利用大尺度桩柱波浪力谱, 结合随机函数的降维思想, 提出了大尺度单桩及群桩随机波浪力场的降维模拟方法。数值分析表明, 此方法生成的大尺度桩柱代表性样本的均值、标准差、功率谱密度函数、自相关及互相关函数均与目标值拟合一致, 且模拟精度均高于 Monte Carlo 方法, 模拟效率与 Monte Carlo 方法相当。基于绕射理论和基于 Morison 方程分别对大尺度桩柱进行对比分析, 以考察大尺度桩柱基于 Morison 方程所带来的误差。通过对桩柱在单桩及群桩情况下的模拟结果对比分析, 进而说明群桩效应对桩柱波浪力的影响。

关键词: 随机波浪力; 降维模拟; 绕射理论; 大尺度桩柱

中图分类号: P731.22; O324; TV139.2⁺6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-0849-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.008

引 言

近年来, 随着中国海洋战略的提出, 大型离岸海工建筑物的荷载设计逐渐成为工程界的研究热点。由于海工结构长期处于复杂海况中, 因此, 合理地模拟海工基础性结构在服役期间所承受的波浪力是进行结构荷载设计的基础和前提。其中, 探讨海工基础性结构大小尺度桩柱波浪力模拟的异同对工程结构设计有着重要的参考意义。

在实际工程中, 桩柱的大小尺度由直径与波长之比决定, 比值大于 0.2 的桩柱被称为大尺度桩柱, 反之, 则被称为小尺度桩柱^[1]。计算不同尺度桩柱的波浪力时所采用的原理和公式不尽相同。对于波浪力作用下的大尺度桩柱, 国内外学者多采用绕射理论进行研究。在大尺度单桩方面, MacCamy 等^[2]发展了以绕射理论为基础的波浪力计算方法。邱大洪^[3]基于一阶近似椭圆余弦波理论研究了浅水区非线性波浪对圆柱桩的绕射作用, 改进了作用于大尺度桩柱的波浪力计算公式。王俊杰等^[4]应用波浪力计算公式, 建立了大尺度桩柱波浪力的 Nyström 数值模型。邓莎莎等^[5]以大尺度桥墩为研究对象, 对该桥墩基础所受的波浪载荷进行了数值模拟。在大尺度群桩方面, Spring 等^[6]首先提出了针对群桩结构的矩阵算法。Linton 等^[7]对该方法进行了改进, 简化了群桩波浪力的计算。陶建华等^[8]基于矩阵算

法, 由谱分析法推导得到群桩系数。季新然等^[9]通过物理模型实验模拟了多向不规则波浪与群桩结构的相互作用。小尺度桩柱的波浪力计算则多以 Morison 方程作为理论基础^[10], 该方程由 Morison 于 1950 年提出。毛鸿飞等^[11]基于 Morison 方程, 对大波幅波浪作用下, 非完全淹没水平圆柱的波浪力进行了数值模拟。程永舟等^[12]基于波浪力的数值模拟, 通过波浪水槽试验, 对孤立波作用下垂直桩柱周围的局部冲刷特性进行了分析研究。

然而, 上述研究仅对给定尺度的桩柱进行了受力分析, 并未对桩柱尺度进行判别。实际上, 在工程设计中通常依据设计波长进行大小尺度桩柱的判定, 而设计波长则通常根据工程经验来确定, 这无疑会对工程应用造成困惑。此外, 大小尺度桩柱的判别并非一成不变, 其将随着海况变化而发生改变。因此, 如何选择波浪力计算公式将非常困难。通常, 随机波浪力的模拟多采用传统 Monte Carlo 方法。然而, 传统 Monte Carlo 方法所需的随机变量与样本数量巨大, 导致结构动力计算量大, 且生成的样本无法在概率密度层面上精细地描述随机过程的概率特性, 这为结构精细化的动力反应分析与动力可靠度评价带来挑战。

针对上述研究现状, 本文首先提出了随机波浪力作用下大小尺度桩柱的判别方法; 其次, 引入随机函数降维思想^[13-14], 实现了仅用一个基本随机变量即可精确地模拟大尺度桩柱波浪力随机场的目的; 最后, 考察了基于 Morison 方程计算大尺度桩柱时

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-10-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978543); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020010)。

所带来的误差,以及群桩效应对桩柱波浪力的影响。值得指出的是,由于本文方法生成的代表性样本集合的概率信息完备,因此可与概率密度演化方法^[15-16]相结合,进而实现海工结构在波浪力作用下的精细化动力反应分析与动力可靠性评价。

1 基于绕射理论的大尺度桩柱波浪力谱模型

在海工结构中,当桩柱之间的间距较小时,在波浪荷载的作用下,其受力与单桩有很大差别。桩中心距与桩直径的比值不大于4时,需要考虑周边桩柱对波浪力的影响^[17]。同时,大尺度桩柱对波动场的影响不可忽略,即,当波浪接触到桩柱后,将在柱面产生一个向外扩散的波,在入射波与散射波的叠加达到稳态时,会形成一个新的波动场。

现假设水体无黏性且不可压缩,波浪做有势运动,群桩结构由 $N = p \times q$ 根桩柱构成,如图1(a)所示,其中 p 代表行数, q 代表列数。为简便计,本文仅考虑直立圆柱桩的情况。对于任意的两个桩柱 i 和 j ,以各自桩柱中心为原点建立局部的极坐标系,桩柱的相对位置及相关参数如图1(b)所示。

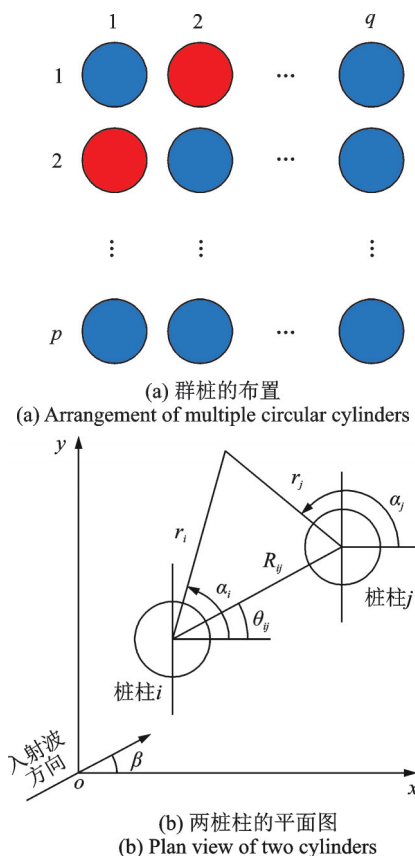


图1 群桩波浪力的计算简图

Fig. 1 Diagram for waves interact with multiple circular cylinders

假设桩柱 i 的中心坐标为 (x_i, y_i) , 桩柱 j 的中心坐标为 (x_j, y_j) , 根据绕射理论,波动场中任意一点的总速度势空间分量为^[7]:

$$\phi = \left(-i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh(\kappa z)}{\cosh(\kappa d)} \right) \left\{ I_i \exp[i\kappa r_i \cos(\alpha_i - \beta)] + \sum_{i=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{i,n} H_n(\kappa r_i) Z_{i,n} e^{ina_i} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$I_i = \exp[i\kappa(x_i \cos \beta + y_i \sin \beta)] \quad (2)$$

$$H_n(\kappa r_i) = J_n(\kappa r_i) + iY_n(\kappa r_i) \quad (3)$$

$$Z_{i,n} = J'_n(\kappa a_i) / H'_n(\kappa a_i) \quad (4)$$

式中 i 为虚数单位, g 为重力加速度, H 为波高, z 是以海底为坐标原点的竖向坐标, ω 为圆频率, d 为静水面处水深, β 为入射波方向; κ 表示波数, 由色散关系 $\omega^2 = g\kappa \tanh(\kappa d)$ 求得; $A_{i,n}$ 为待定系数; $H_n(\kappa r_i)$ 表示 n 阶第一类汉克尔函数; $J_n(\kappa r_i)$ 表示 n 阶第一类贝塞尔函数; $Y_n(\kappa r_i)$ 表示 n 阶第二类贝塞尔函数; $J'_n(\kappa a_i)$ 表示函数 $J_n(\kappa a_i)$ 对变量 κa_i 的一阶导数; $H'_n(\kappa a_i)$ 表示函数 $H_n(\kappa a_i)$ 对变量 κa_i 的一阶导数, a_i 为桩柱 i 的半径。

当该点位于圆柱 i 的表面时, 利用欧拉公式和 Graf 加法定理^[18], 式(1)可以改写为:

$$A_{j,m} + \sum_{i=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{i,n} Z_{i,n} e^{i(n-m)\theta_{ij}} H_{n-m}(\kappa R_{ij}) = -\exp\left[i\kappa(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta) + im\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)\right] \quad (5)$$

式中 m 与 n 均为整数。

在式(5)中, 通过对等号左边的无穷项进行截断, 如取 $2M+1$ 项, 则可得到 $N \times (2M+1)$ 个未知数 $A_{i,n}$ 的联立方程组, 从而求解待定系数 $A_{i,n}$ 。根据文献[7], 本文中直接取 $M=6$ 。

于是, 圆柱 j 周围速度势的空间分量为:

$$\phi(r_j, \alpha_j) = \sum_{n=-M}^M A_{j,n} [Z_{j,n} H_n(\kappa r_j) - J_n(\kappa r_j)] \cdot \left(-i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh(\kappa z)}{\cosh(\kappa d)} \right) e^{ina_j}, \quad r_j < R_{ij} \quad (6)$$

在式(6)中, 对贝塞尔函数应用 Wronskian 关系式, 并对通过速度势求得的桩柱表面压强进行积分和无因次化, 得到波浪作用于圆柱 j 时波浪荷载的传递函数^[7]:

$$\begin{cases} T_{jx}(z) = -i \frac{2\rho_0 g}{\kappa H'_1(\kappa a_j)} \frac{\cosh(\kappa z)}{\cosh(\kappa d)} (A_{j,-1} - A_{j,1}) \\ T_{jy}(z) = -\frac{2\rho_0 g}{\kappa H'_1(\kappa a_j)} \frac{\cosh(\kappa z)}{\cosh(\kappa d)} (A_{j,-1} + A_{j,1}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 ρ_0 为海水密度。

这样,群桩结构中桩柱 j 任意坐标 z 处的波浪力功率谱密度函数为:

$$S_j(z, \omega) = \left\{ [T_{jx}(z)]^2 + [T_{jy}(z)]^2 \right\} S_\eta(\omega) \quad (8)$$

式中 $S_\eta(\omega)$ 为波高过程的单边功率谱密度函数。

特别地,当结构为大尺度单桩(即 $N=1$)时^[2],待定系数 $A_{j,n} = -i^n$,此时传递函数为:

$$\begin{cases} T_{jx}(z) = \frac{4\rho_0 g}{\kappa H_1'(\kappa a_j)} \frac{\cosh(\kappa z)}{\cosh(\kappa d)} \\ T_{jy}(z) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

2 大尺度桩柱波浪力场的降维模拟

根据随机过程模拟的降维方法,作用于大尺度群桩中第 j 个桩柱上的水平波浪力可表示为^[19-21]:

$$F_j(z, t) = \sum_{k=1}^{N_\omega} \sqrt{S_j(z, \omega_k) \Delta\omega} \left[X_k \cos(\omega_k t) + Y_k \sin(\omega_k t) \right], \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中 $\Delta\omega$ 为频率离散步长; N_ω 为频域离散点数; ω_u 为上限截止频率,且有 $\Delta\omega = \omega_u / N_\omega$; $\{X_k, Y_k\}_{k=1}^{N_\omega}$ 为一组标准的正交随机变量集,满足以下基本条件(必要条件):

$$\begin{aligned} E[X_k] &= E[Y_k] = 0, \quad E[X_k Y_k] = 0, \\ E[X_k X_l] &= E[Y_k Y_l] = \delta_{kl} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $k, l = 1, 2, \dots, N_\omega$; δ_{kl} 为 Kronecker 符号。

在式(11)中,标准正交随机变量集 $\{X_k, Y_k\}_{k=1}^{N_\omega}$ 的概率分布并未给出,故不能直接应用式(10)进行波浪力场的模拟。因此,式(10)通常称为随机过程的源谱表示。通过定义源谱表示式(10)中标准正交随机变量集 $\{X_k, Y_k\}_{k=1}^{N_\omega}$ 的不同随机函数形式,可以得到随机过程模拟的不同公式。在本文中,采用随机相位法来构造如下的标准正交随机变量集:

$$\begin{cases} X_k = \sqrt{2} \cos(\bar{k}\Theta + \alpha) \\ Y_k = \sqrt{2} \sin(\bar{k}\Theta + \alpha) \end{cases} \quad (12)$$

式中 Θ 为基本随机变量,服从 $(0, 2\pi]$ 上的均匀分布; α 为任意的确定性参数,在本文中取 $\alpha = \pi/4$ 。可以验证,式(12)是满足式(11)的基本条件(必要条件)。

在式(12)中, $\bar{k}$ ($\bar{k} = 1, 2, \dots, N_\omega$) 与 k ($k = 1, 2, \dots, N_\omega$) 是一种确定性的一一映射关系,这种一一映射关系可由 MATLAB 工具箱的内置函数,即 `rand('state', 0)` 和 `temp = randperm(N_\omega)` 来实现。 $\bar{k}$ ($\bar{k} = 1, 2, \dots, N_\omega$) 与 k ($k = 1, 2, \dots, N_\omega$) 的一一映射关系即为 $\bar{k} = \text{temp}(k)$,这恰是降维模拟方法的一个充分条件。

个充分条件。

于是,将式(12)代入式(10),即可得到随机波浪力场的降维模拟公式:

$$F_j(z, t) = \sum_{k=1}^{N_\omega} \sqrt{2S_j(z, \omega_k) \Delta\omega} \cos[\omega_k t - \phi_k(\Theta)] \quad (13)$$

式中 $\phi_k(\Theta)$ 为基本随机变量 Θ 的函数,其表达式为:

$$\phi_k(\Theta) = \bar{k} \times \Theta + \alpha \quad (14)$$

通过选取基本随机变量 Θ 的代表性点集,即可得到大尺度桩柱随机波浪力的代表性时程集合,进而结合概率密度演化理论,进行桩柱结构随机波浪力作用下的动力反应分析与可靠度精细化计算。

3 桩柱尺度的判别方法

绕射理论仅适用于直径与波长之比大于 0.2 的大尺度桩柱波浪力计算,但对于随机波浪而言,其波长是一个变量,这将导致桩柱尺度的判别较为困难。因此,可以通过确定其特征频率 $\bar{\omega}$ 的方式来确定其特征波长 $\bar{L}$ 。这样,便可通过特征波长 $\bar{L}$ 来判别其是否属于大尺度桩柱。

对于窄谱波浪,其能量主要集中于波浪谱中心位置处。因此,本文采用波浪谱重心处的频率作为特征频率 $\bar{\omega}$,其计算如下:

$$\bar{\omega} = \frac{m_1}{m_0} \quad (15)$$

式中 m_0 和 m_1 分别为 0 阶与 1 阶谱矩,即:

$$m_r = \int_0^\infty \omega^r S_\eta(\omega) d\omega, \quad r = 0, 1 \quad (16)$$

根据特征频率 $\bar{\omega}$,利用色散关系,即可得到与特征频率 $\bar{\omega}$ 对应的特征波长 $\bar{L}$ 为:

$$\bar{L} = \frac{2\pi g}{\bar{\omega}^2} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\bar{L}}\right) \quad (17)$$

这是一个超越方程,可以用 MATLAB 中 `fsolve` 函数进行数值求解。

这样,可以给出判别大尺度桩柱的量化公式如下:

$$\begin{cases} \frac{D}{\bar{L}} \leq 0.2, & \text{小尺度桩柱} \\ \frac{D}{\bar{L}} > 0.2, & \text{大尺度桩柱} \end{cases} \quad (18)$$

为了进一步说明式(18)的合理性,本文利用式(18)对文献[22-23]中桩柱的尺度进行判别,所得结果与相应的文献一致。此外,对于同一桩柱,其尺度并非是一成不变的,也会随着海况的变化而发生改变。图2给出了不同直径桩柱随风速 $v_{19.5}$ 的尺度变

化情况。其中,波高谱采用 Pierson - Moskowitz 谱^[24]:

$$S_{\eta}(\omega)=\frac{\alpha g^2}{\omega^5}\exp\left[-\beta\left(\frac{g}{v_{19.5}\omega}\right)^4\right]\quad(19)$$

式中 无因次常数 $\alpha=8.1\times10^{-3}$, $\beta=0.74$, $v_{19.5}$ 为海面上 19.5 m 高度处的平均风速。

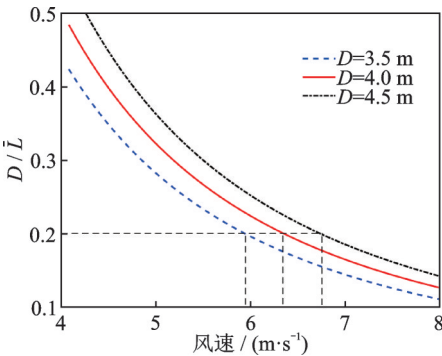


图 2 桩柱尺度随风速变化情况
Fig. 2 Cylinder scale varying with wind speed

由图 2 可知,桩柱直径越大,使桩柱尺度发生改变所需的临界风速也越大,即风速的变化会影响桩柱尺度的判别。因此,在应用中,首先需要根据桩柱直径和风速对桩柱尺度进行判别,在此基础上,利用绕射理论或 Morison 方程进行随机波浪力的降维模拟。

4 工程算例

4.1 数值模拟分析

为了说明本文建议的降维模拟方法的有效性,首先考虑群桩的特例,即大尺度单桩的随机波浪力场模拟,其参数取值如表 1 所示。

表 1 模拟参数的取值

Tab. 1 Calculation parameters and corresponding values			
桩柱直径 D/m	静水面处水深 d/m	海水密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	模拟持时 T/s
4	20	1030	1000
风速 $v_{19.5}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	频率截断项数 N_{ω}	频率步长 $\Delta\omega/\text{s}^{-1}$	时间步长 $\Delta t/\text{s}$
6.17	1024	0.00628	0.488

利用本文所提降维模拟方法生成 610 条随机波浪力代表性样本集合。图 3 给出了 $z=20\text{ m}$ 处随机波浪力的第 400 条和第 500 条代表性样本,它们具有随机波浪力的典型特征。

在模拟精度方面,图 4 为 $z=12\text{ m}$ 处随机波浪力的自相关函数比较,图 5 为 $z=12\text{ m}$ 和 $z=15\text{ m}$

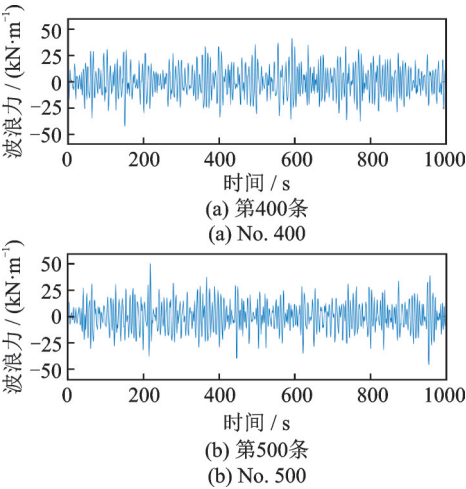


图 3 随机波浪力代表性样本
Fig. 3 Representative samples of random wave force

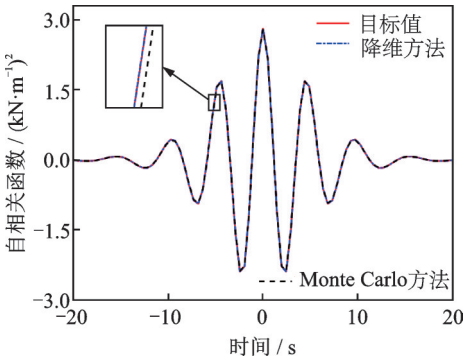


图 4 自相关函数比较
Fig. 4 Comparison of auto-correlation functions

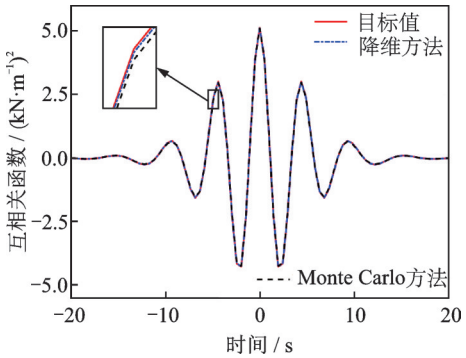


图 5 互相关函数比较
Fig. 5 Comparison of cross-correlation functions

之间的互相关函数比较。可见,采用本文方法模拟的随机波浪力自(互)相关函数拟合效果要好于 Monte Carlo 方法,初步验证了降维模拟方法的有效性。图 6,7 为模拟的均值,标准差与目标值比较(以 $z=12\text{ m}$ 为例),图 8 为 $z=12\text{ m}$ 处随机波浪力的功率谱密度函数在有效频率 $0.9\sim2.5\text{ rad/s}$ 范围内与目标值的比较。其中,有效频率指提供频谱总能量 99.9% 的频谱范围。表 2 为随机波浪力样本均值误差,标准差误差及功率谱误差的具体结果,从表 2 可以看出,本文方法的均值、标准差及功率谱密度函数

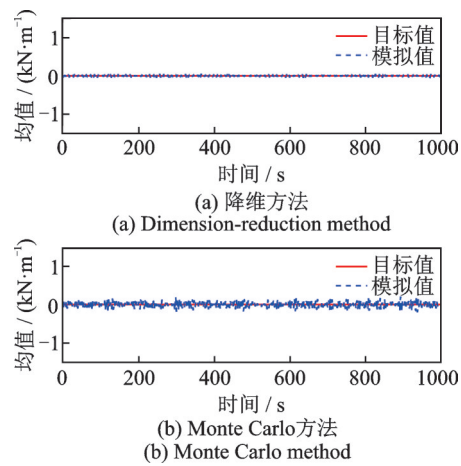


图 6 均值的比较

Fig. 6 Comparison between simulated mean values and target value

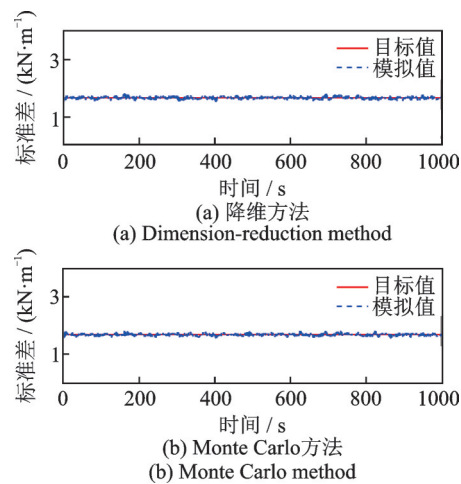


图 7 标准差的比较

Fig. 7 Comparison between simulated standard deviations and target value

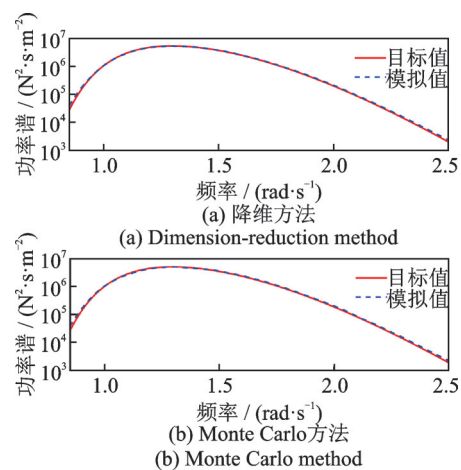


图 8 功率谱的比较

Fig. 8 Comparison between simulated power spectrum and target value

均与目标值拟合一致,进一步验证了本文方法的有效性。且其均值误差、标准差误差及功率谱误差均小于 Monte Carlo 方法。在模拟效率方面,采用本文

表 2 模拟精度比较			
Tab. 2 Comparison of simulation accuracy			
模拟方法	均值 误差/%	标准差 误差/%	功率谱 误差/%
降维模拟方法	0.90	2.10	4.34
Monte Carlo 方法	3.03	2.27	5.69

方法生成单条样本耗时 6.467 s, Monte Carlo 方法为 6.623 s。可见,本文方法在模拟效率方面与 Monte Carlo 方法大致相当,但本文方法的模拟精度更高,体现了其优越性。

4.2 大尺度桩柱计算公式对比分析

为了考察大尺度桩柱基于 Morison 方程带来的误差。现以 4.1 中桩柱模型和波浪力参数为例,分别基于绕射理论和 Morison 方程对大尺度桩柱进行计算,并将两者的结果进行对比,分析基于 Morison 方程计算大尺度桩柱所带来的误差。图 9 为 $z=18$ m 处基于绕射理论和 Morison 方程所生成的第 400 条随机波浪力代表性样本比较。

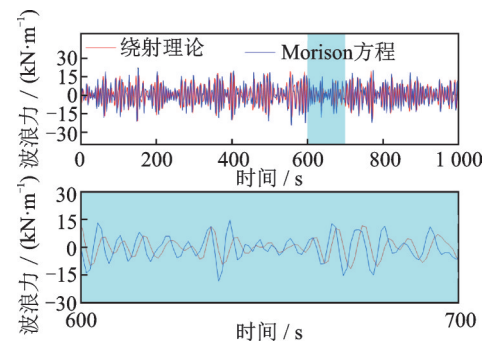


图 9 $z=18$ m 处随机波浪力代表性样本的比较

Fig. 9 Comparison of representative sample of random wave force at $z=18$ m

从图 9 可知,在桩柱 $z=18$ m 处,基于 Morison 方程计算得到的桩柱波浪力明显偏大。为进一步分析两种计算公式的差异性,通过对 610 条随机波浪力代表性样本的统计分析,图 10 给出了桩柱不同位置处基于两种计算公式得到的最大波浪力均值对比。

从图 10 可以看出,在大尺度桩柱竖直方向上存在某一临界点,在该临界点以下,基于绕射理论模拟的最大波浪力均值大于基于 Morison 方程模拟的结果,在该临界点以上,则小于基于 Morison 方程模拟的结果。

图 11 为两种计算公式得到最大波浪力均值的相对误差随海况(即特征波长 $\bar{L}$)的变化情况,其中,相对误差 ϵ 计算如下:

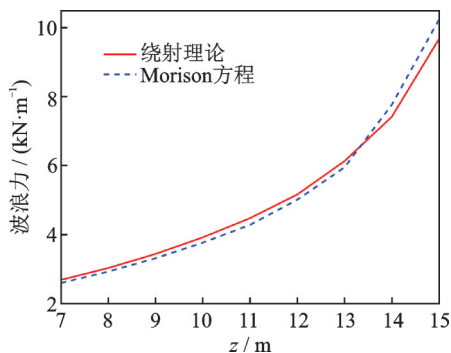


图10 桩柱不同位置处最大波浪力均值的比较

Fig. 10 Comparison of maximum wave force at different positions of the cylinder

$$\epsilon = \frac{S_{\max} - L_{\max}}{L_{\max}} \times 100\% \quad (20)$$

式中 $S_{\max}$ 为基于 Morison 方程得到的最大波浪力均值, $L_{\max}$ 为基于绕射理论得到的最大波浪力均值。

由图 11 可知, 当 $S_{\max}$ 小于 $L_{\max}$ 时, 随着 z 的增大, 相对误差 ϵ 的绝对值将随之减小, 当 $S_{\max}$ 大于 $L_{\max}$ 后, 随着 z 的增大, 相对误差 ϵ 也将随之增大。同时, 随着特征波长 $\bar{L}$ 的增大, 相对误差 $\epsilon=0$ 时所对应的 z 值也将随之增大。

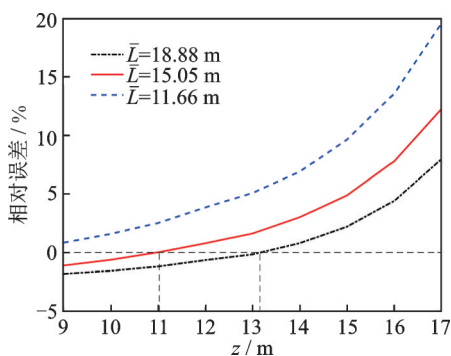


图11 在3种海况下桩柱不同位置的差值比

Fig. 11 The difference ratio of cylinder at different positions under three sea conditions

4.3 群桩效应影响分析

为了说明大尺度群桩效应对随机波浪力场模拟的影响, 现基于绕射理论对平行于波向的串列三桩 ($N=3 \times 1$) 和其中某一单桩 ($N=1$) 分别进行随机波浪力场的降维模拟。群桩的排列及波浪的作用方向如图 12 所示, 其中桩柱模型和波浪参数均与上文相同, 桩的中心距为 8 m。

图 13 给出了 $z=12$ m 处 1 号桩按单桩和群桩情

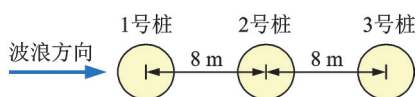


图12 串列三桩位置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of three cylinder positions

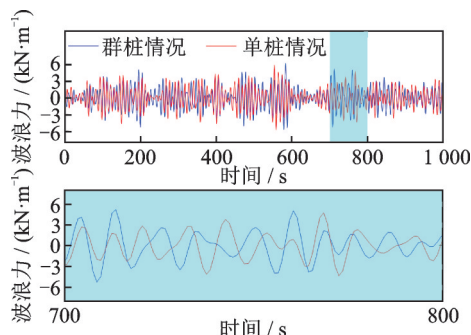


图13 1号桩在单桩情况与群桩情况下随机波浪力代表性样本比较

Fig. 13 Comparison of representative samples of random wave force of 1st cylinder in single pile case and pile group case

况下第 400 条随机波浪力代表性样本的比较。从图中可见, 1 号桩在群桩情况下的波浪力最大值大于单桩情况。事实上, 通过对 610 条代表性样本的统计分析, 可得 1 号桩在群桩情况下的最大波浪力均值也大于单桩情况。因此, 对于 1 号桩, 群桩效应将会使波浪力在总体上偏大。

同样地, 对 2 号和 3 号桩进行类似的群桩影响分析, 可知群桩效应会使 2 号桩波浪力在总体上略偏大, 而使 3 号桩波浪力在总体上偏小。

图 14 给出了在群桩情况下, 桩柱 $z=12$ m 处 1 号桩与 3 号桩第 400 条随机波浪力代表性样本比较, 显然 1 号桩受到的波浪力明显大于 3 号桩, 且通过对 610 条代表性样本的统计分析, 可知 1 号桩受到的最大波浪力均值比 3 号桩大 10.35%, 该结论与文献[8]谱分析法得到的群桩系数结果相似, 进一步验证了本文方法的正确性。

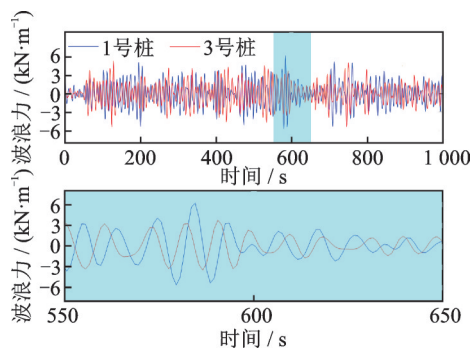


图14 1号桩与3号桩随机波浪力代表性样本比较

Fig. 14 Comparison of representative samples of wave force between 1st cylinder and 3rd cylinder

5 结论

本文首先根据波高过程的功率谱密度函数, 建议了不规则波浪作用下桩柱大小尺度的判别方法。

然后,基于绕射理论推导了大尺度桩柱随机波浪力的功率谱密度函数,并引入随机函数的降维思想,实现了随机波浪力场的降维模拟。最后,探讨了大尺度桩柱基于Morison方程所带来的误差,以及群桩效应对桩柱波浪力的影响。通过数值分析,可得以下结论:

(1)本文方法实现了仅用一个基本随机变量即可精细地模拟大尺度群桩随机波浪力场,极大地减少了随机变量的数量。而且,相对于传统Monte Carlo方法,本文方法具有更高的精度,并能够与概率密度演化方法结合来实现海工结构的动力反应与可靠度精细化分析,因此具有明显的优势。

(2)大尺度桩柱在竖直方向上存在某一临界点,在该临界点以下,采用Morison方程计算桩柱时会导致波浪力偏小,在该临界点以上,则会导致波浪力偏大,且该临界点随着特征波长 $\bar{L}$ 的增加而向桩顶移动。

(3)当单向不规则波浪作用于群桩结构时,沿着波浪传播方向,群桩效应将使第1桩柱的波浪力在总体上比单桩情况偏大。后面的桩柱由于受到前面桩柱的遮蔽,其波浪力逐渐减小。

参考文献:

- [1] 港口与航道水文规范:JTS 145—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: Chinese Communications Press, 2015.
- [2] MacCamy R C, Fuchs R A. Wave forces on piles: a diffraction theory [R]. Technical Report 69, US Army Coastal Engineering Research Center, Beach Erosion Board Technical Memorandum, 1954: 1-17.
- [3] 邱大洪. 浅水区孤立墩上的非线性波浪力[J]. 水利学报, 1989 (4): 22-32.
Qiu Dahong. The nonlinear wave force on a circular cylinder in shallow water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989 (4): 22-32.
- [4] 王俊杰,王连堂. 大尺度墩柱上的波浪力的Nyström数值模型[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 124-128.
Wang Junjie, Wang Liantang. Nyström mathematical model of wave force on large scale cylinder [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 124-128.
- [5] 邓莎莎,沈火明,刘浪,等. 基于绕射理论的大尺度桥墩波浪力计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53 (2): 266-271.
Deng Shasha, Shen Huoming, Liu Lang, et al. Research of calculation method for wave forces acting on large-scale bridge piers based on diffraction theory [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53 (2): 266-271.
- [6] Spring B H, Monkmeyer P L. Interaction of plane waves with vertical cylinders [C]. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen, 1974: 1828-1847.
- [7] Linton C M, Evans D V. The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 215: 549-569.
- [8] 陶建华, 窦新玉. 群墩上的随机波浪力[J]. 计算物理, 1992, 9(7): 393-394.
Tao Jianhua, Dou Xinyu. Random water wave forces on group cylinders [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1992, 9(7): 393-394.
- [9] 季新然, 邹丽, 柳淑学, 等. 多向不规则波浪作用下群墩结构所受波浪力的实验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 238-243.
Ji Xinran, Zou Li, Liu Shuxue, et al. Experimental study on the multidirectional wave force on an array of cylinders [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 238-243.
- [10] Morison J R, Johnson J W, Schaaf S A. The force exerted by surface waves on piles [J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [11] 毛鸿飞, 陈洪洲. 非完全淹没水平圆柱上波浪力特征的数值模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 749-759.
Mao Hongfei, Chen Hongzhou. Numerical simulation on characteristics of wave forces on an incompletely submerged horizontal circular cylinder [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 749-759.
- [12] 程永舟, 姜松, 龚维亮, 等. 孤立波作用下淹没垂直桩柱局部冲刷试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 255-263.
Cheng Yongzhou, Jiang Song, Gong Weiliang, et al. Experimental study on local scour around the submerged vertical circular cylinder under solitary wave action [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 255-263.
- [13] Liu Z J, Liu W, Peng Y B. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 45: 115-126.
- [14] Liu Z J, Liu Z X, Peng Y B. Dimension reduction of Karhunen-Loeve expansion for simulation of stochastic processes [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 408: 168-189.
- [15] 李杰, 陈建兵. 随机结构非线性动力响应的概率密度演化分析[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 716-722.
Li Jie, Chen Jianbing. The probability density evolution method for analysis of dynamic nonlinear response of stochastic structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(6): 716-722.

- [16] 李杰, 陈建兵. 随机动力系统中的概率密度演化方程及其研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 170-188.
Li Jie, Chen Jianbing. Advances in the research on probability density evolution equations of stochastic dynamical systems [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(2): 170-188.
- [17] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
Yu Yuxiu. Random Wave and Its Applications to Engineering [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992.
- [18] 王敏, 刘齐建, 刘欢, 等. 基于 Graf 加法定律的竖向受荷双桩动力响应解析研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2532-2539.
Wang Min, Liu Qijian, Liu Huan, et al. Dynamic response of two vertically loaded piles based on the Graf's addition theorem [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2532-2539.
- [19] 刘章军, 刘玲. 随机海浪过程模拟的随机函数方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(20): 1-6.
Liu Zhangjun, Liu Ling. Simulation of stochastic ocean states by random function methods [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(20): 1-6.
- [20] 刘章军, 刘磊, 汪峰. 基于本征正交分解的波浪力随机场降维模拟[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 98-104.
Liu Zhangjun, Liu Lei, Wang Feng. POD-based dimension reduction simulation of stochastic wave force field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 98-104.
- [21] 吕康玄, 刘章军. 随机波浪力连续场的降维模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020 (5): 9-15.
Lü Kangxuan, Liu Zhangjun. Dimension-reduction simulation for continuous random wave force field [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020 (5): 9-15.
- [22] 张昊宸, 柳淑学, 李金宣, 等. 多向不规则波作用下九桩群桩效应试验研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(6): 17-26.
Zhang Haochen, Liu Shuxue, Li Jinxuan, et al. Experimental study on piles grouping effect of side by side 9 piles under the action of multi-directional irregular waves [J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(6): 17-26.
- [23] 季新然, 任智源, 柳淑学, 等. 多向波浪作用下大尺度墩柱所受波浪力的试验研究[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 574-582.
Ji Xinran, Ren Zhiyuan, Liu Shuxue, et al. Experimental study on the wave force loads on a large-scale cylinder by multidirectional waves [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 574-582.
- [24] Pierson W J, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii [J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(24): 5181-5190.

Dimension-reduction simulation for large scale multiple circular cylinders random wave force field

LIU Zhang-jun, DONG Xin-yu, ZHANG Wen-yuan

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the energy characteristics of random waves, a method for judging large-scale circular cylinders subjected to random waves is suggested. On this basis, the dimension-reduction simulation method for random wave force field in terms of large-scale single circular cylinder and multiple circular cylinders is derived utilizing the power spectral density function of random wave force and the random function-based dimension-reduction idea. Numerical analysis shows that the relative errors of mean, standard deviation, power spectrum, auto-correlation functions and cross-correlation functions generated by the proposed dimension-reduction method are all in good agreement with the corresponding target values. Moreover, comparison indicates that the simulation accuracy of the proposed dimension-reduction method is higher than that of Monte Carlo method, and the simulation efficiency is equivalent to Monte Carlo method. Meanwhile, large-scale circular cylinders are compared and analyzed based on diffraction theory and Morison equation to investigate the errors caused by large-scale cylinders based on Morison equation. Through the comparisons and analysis of the simulation results of cylinder in the case of single cylinder and cylinder group, the influence of cylinder group effect on wave force is explained.

Key words: random wave force; dimension-reduction simulation; diffraction theory; large-scale cylinders

作者简介: 刘章军(1973—), 男, 教授。电话: (027)87194698; E-mail: liuzhangjun73@aliyun.com。