

内孤立波环境下柱体的受力特性

王寅¹,王玲玲²,计勇¹,席芝橙¹,张雯雯¹

(1. 南昌工程学院水利与生态工程学院,江西 南昌 330099; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对以往孤立波对柱体作用研究多只针对柱体的整体受力开展,少有研究精细获取柱体不同部位受力特性的问题,借助三维大涡模拟(LES)数值波浪水槽,通过提取柱周流场及压强分布,得到柱体所受压差阻力及黏滞力的垂向分布,对柱体在孤立波环境中的受力特性进行了分析,并采用多元线性回归分析,构造综合影响参数分析了柱体受力特性,构建了柱体受力系数经验表达式。结果表明:上下层水体中方柱所受压差阻力约分别为圆柱的1.5倍和3.5倍;作用于柱体上的黏滞力比压差阻力小1或2个数量级,可忽略流体的黏性效应;综合影响参数与相对波幅正相关,与上下水深比负相关。

关键词:内孤立波;柱体;受力特性;大涡模拟;数值波浪水槽

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0017-06

Mechanical properties of cylinders under environment of an internal solitary wave //WANG Yin¹, WANG Lingling², JI Yong¹, XI Zhicheng¹, ZHANG Wenwen¹ (1. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Most previous studies focused on the overall force on a cylinder, and the detailed mechanical characteristics for different parts of a cylinder were less studied. A 3-D numerical wave flume was used to investigate the internal solitary wave forces acting on cylinders by large-eddy simulation (LES). Through analyzing the hydrodynamic characteristics and the pressure distribution around cylinders, the detailed vertical distribution of the pressure drag force and viscous force was obtained. Based on multi-linear regression analysis, the comprehensive impact parameters were constructed to establish an empirical function of the force coefficients for the cylinders. The results show that the pressure drag on a square cylinder is 1.5 times more than that on a circular one in the upper layer, while the pressure drag on a square cylinder is 3.5 times more than that on its circular counterpart in the lower layer. The viscous force is 1 or 2 order of magnitudes smaller than the pressure drag, which means that the viscous force can be ignored. The comprehensive impact parameters show a positive correlation with the relative wave height, and show a negative correlation with the upper and lower water depth ratio.

Key words: internal solitary waves; cylinders; force behaviors; large-eddy simulation; numerical wave flume

内波通常发生于密度稳定分层的水体内部^[1]。在海洋、河口、湖泊等流体系统中,温度、盐度以及其他环境因素引起的密度沿水深方向上的改变,会导致水体密度的分层^[2]。在此类环境中,微弱的外界扰动就可能在密度分界面(密度跃层)上引发携带巨大能量的内波现象。内孤立波是一种特殊的非线性内波,其振幅大、周期短、所携能量大^[3],大振幅内孤立波对近岸及河口复杂水动力环境中工程结构物的安全稳定性有非常大的影响^[4]。内孤立波在传播过程中以密度跃层为界上下水层呈反向流动,由此产生的剪切流所携带的巨大能量会导致异常强大的流速。内孤立波2.1m/s波致流作用下的柱体所承受的最大荷载相当于波长300 m、波高达到18 m的表面波作用^[5],这种强烈的作用力可能对近岸及河口复杂水动力环境中水下立管及水下支撑桩柱的安全稳定性造成严重的威胁^[6]。深入研究内孤立波对水下结构物的作用机理以及结构物内波动力学问题具有非常重要的工程应用价值。

柱体所受水平力可分为压差阻力和摩擦阻力两部分^[7]。压差阻力是由于柱体迎流面和背流面的压差所产生的水平力;摩擦阻力是由于流体黏性作用所产生的水平力,即黏滞力。以往受力研究多只计算出内孤立波对柱体的整体作用力^[8-10],并未考虑在不同分层水体中柱体不同部分受力随水深分布

情况,因此并不能获知柱体详尽的受力特性。本文借助三维数值波浪水槽,采用大涡模拟(large-eddy simulation, LES)技术模拟内孤立波的产生和传播,通过提取数模计算结果中不同水层柱体表面的压强分布及切向速度,采用微元法积分出柱体在各水层所受压差阻力以及黏滞力,由此获取受力沿水深分布特性,以揭示分层流环境下柱体的受力机理。

1 控制方程及求解方法

1.1 动量输运方程

基于连续性假设,可用 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)描述不可压缩黏性流体三维瞬态运动过程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: ρ 为密度项; t 为时间; x_i, x_j 为笛卡尔坐标系的 3 个方向坐标; u_i, u_j 为笛卡尔坐标系中的 3 个流速分量; p 为压力项; μ 为动力黏性系数; f_i 为 i 方向的单位体积力。

1.2 标量输运方程

采用考虑了两层水体之间的质量交换作用以及对流-扩散影响的标量输运方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_i C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S \quad (3)$$

$$\rho = C + \rho_0 \quad (4)$$

式中: C 为盐度, kg/m^3 ; k 为分子扩散系数; S 为源项; ρ_0 为清水密度, kg/m^3 。

1.3 大涡模拟

大涡模拟技术是对紊流脉动的一种空间平均,通过滤波函数将大尺度的涡和小尺度的涡分离开^[11-14]。过滤后的动量和质量方程可表示为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}^{\text{sgs}}}{\partial x_j} + f_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = k \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \chi_j}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:上划线表示过滤函数; ν 为运动黏度; τ_{ij}^{sgs} 为亚格子应力,表示可解尺度运动与亚格子尺度运动之间的动量输运; χ_j 为亚格子标量扩散通量。

1.4 柱体压差阻力的求解方法

1.4.1 圆柱

如图 1 所示, P 为水深为 y 的截面圆柱表面上

受到的点压强(基于数值模拟结果提取),则该截面圆周所受水平方向的压差阻力 f_c 可定义为

$$f_c = - \int_0^{2\pi} P \cos \theta dl \quad (8)$$

式中: θ 为点压强 P 与 x 轴的夹角, ($^\circ$), 以逆时针为正; l 为弧长, cm 。

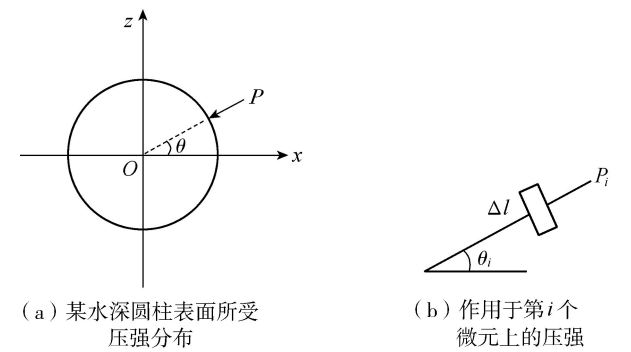


图 1 圆柱压差阻力计算方法示意图

基于微元法,可将式(8)离散为

$$f_c = - \Delta l_i \sum_{i=1}^n P_i \cos \theta_i \quad (9)$$

式中: P_i 为作用在第 i 个微元上的压力, Pa ; θ_i 为第 i 个微元法线延长线与 x 轴的夹角, ($^\circ$), 以逆时针为正; n 为圆周被等分数, 本文取 $n=360$; Δl_i 为第 i 个微元的弧长, $\Delta l_i = 2\pi r/n = 0.087 \text{ cm}$ (r 为圆柱半径, 本文取 $r=5 \text{ cm}$)。

1.4.2 方柱

如图 2 所示,假定水深为 y 的截面方柱表面上受到的点压强为 P ,则该方柱截面所受水平压差阻力 f_s 定义为

$$f_s = f_{s3} - f_{s1} = \sum_{i=1}^{90} P_i \Delta s_i - \sum_{i=1}^{90} P_i \Delta s_i \quad (10)$$

式中: f_{s_j} 为作用在方柱截面第 j ($j=1, 2, 3, 4$) 条边上的压力, N ; P_i 为方柱各边第 i 个微元上的压力, N ; Δs_i 为第 i 个微元的边长, $\Delta s_i = 4s/m = 0.11 \text{ cm}$ (s 为方柱周长, 本文取 $s=10 \text{ cm}$; m 为方柱周长被等分数, 本文取 $m=360$)。

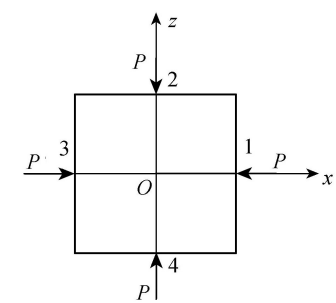


图 2 方柱压差阻力的计算方法示意图

1.5 柱体黏滞力的求解方法

1.5.1 圆柱

如图 3 所示,可将距离圆柱表面最近一层网格

上某微元 a 的切向速度 u_τ 和径向速度 u_γ (基于数值模拟结果提取) 定义为

$$u_\tau = u_z \cos \theta - u_x \sin \theta \tag{11}$$

$$u_\gamma = u_z \sin \theta + u_x \cos \theta \tag{12}$$

式中: u_x 、 u_z 分别为该微元的 x 方向和 z 方向速度, cm/s ; θ 为微元 a 与 x 轴的夹角, $(^\circ)$, 以逆时针为正。则某微元 i 所受水平方向上的黏滞力 $\Delta f_{\tau i}$ 为

$$\Delta f_{\tau i} = - \frac{\partial u_{\tau i}}{\partial \gamma} \mu \Delta l_i \sin \theta_i \tag{13}$$

式中: $u_{\tau i}$ 为第 i 个微元上的切向速度, cm/s ; $\frac{\partial u_{\tau i}}{\partial \gamma}$ 为切向速度的法向梯度, $\text{cm}/(\text{s} \cdot \text{cm})$; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $\mu = \nu \rho$, 其中 ρ 为流体密度。

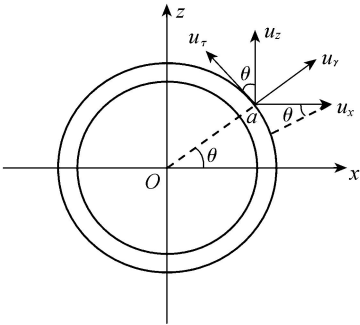


图3 圆柱黏滞力计算方法示意图

基于微元法, 圆柱表面所受水平方向上的黏滞力 f_{τ} 为

$$f_{\tau} = \sum_{i=1}^n \Delta f_{\tau i} \tag{14}$$

1.5.2 方柱

如图4所示, 沿用上述圆柱黏滞力的计算方法, 可求得水深为 y 的截面方柱表面所受水平方向上的黏滞力 f_{τ} :

$$f_{\tau} = f_{\tau 2} + f_{\tau 4} = \sum_{i=1}^{90} \Delta f_{\tau i} + \sum_{i=1}^{90} \Delta f_{\tau i} \tag{15}$$

其中 $\Delta f_{\tau i} = \frac{\partial u_{xi}}{\partial \gamma} \mu \Delta s_i$ 式中: $f_{\tau j}$ 为作用在方柱截面第 j 条边上的黏滞力, N ; u_{xi} 为第 i 个微元上 x 方向的速度, cm/s ; $\frac{\partial u_{xi}}{\partial \gamma}$ 为 x 方

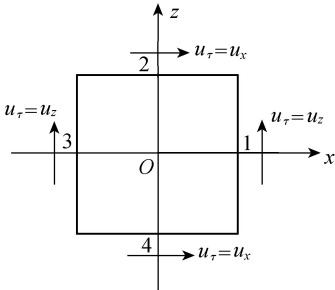


图4 方柱黏滞力计算方法示意图

向速度的法向梯度, $\text{cm}/(\text{s} \cdot \text{cm})$ 。

2 数学模型

建立三维数值波浪水槽如图5所示, 水槽长 12 m 、宽 0.6 m 、高 0.8 m , 柱体周围水平网格和水槽垂向网格划分方法如图6、图7所示。

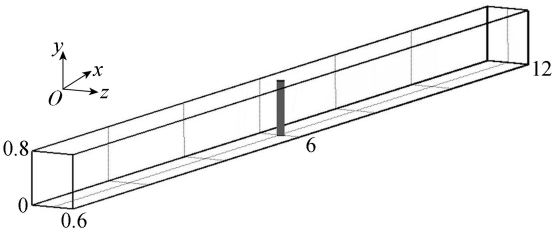


图5 三维数值波浪水槽示意图(单位: m)

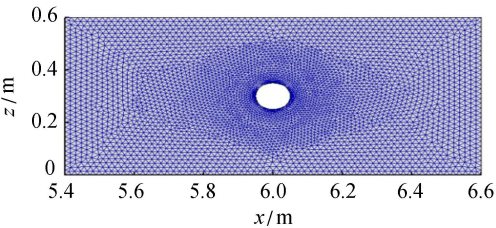


图6 柱体周围水平网格划分方法

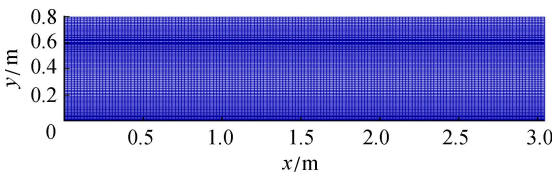


图7 垂向网格划分方法

定义在数值模拟中柱体所受的无量纲水平合力 F' 的计算公式^[15] 为

$$F' = \frac{F}{\rho g A H} \tag{16}$$

式中: F 为数值模拟中计算所得的柱体所受水平力合力, N ; A 为柱体的迎风面积, cm^2 ; H 为水槽总水深, cm ; g 为重力加速度, m/s^2 。

内孤立波传播本身是一种瞬态运动, 波在传经柱体过程中, 柱体受力在每一时刻都在变化。因此, 选取的计算特征时刻为各工况下柱体所受水平力达到其峰值所对应的时刻(受力最不利时刻), 即图8中无量纲水平合力幅值 $F'_{\max}$ 对应的时刻。图8给出了无量纲波幅 $\eta_0/H = 0.026, 0.044, 0.054, 0.098$

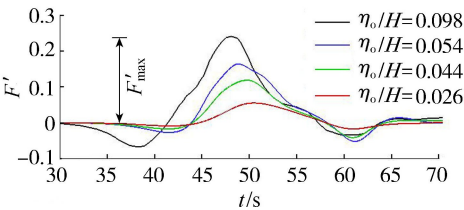


图8 不同波幅时柱体的 F' 随时间 t 的变化过程

(η_0/H 为内孤立波传播 4 m 波形稳定后的相对波幅)时,计算所得的柱体所受内孤立波无量纲水平合力 F' 随时间 t 的变化曲线。

2.1 计算工况

数值模拟采用的波形为下凹型,参数设定及工况选定具体为:上层为清水,密度 $\rho_1=0.998\text{ g/cm}^3$,水层厚度 $h_1=0.2\text{ m}$;下层为盐水,密度 $\rho_2=1.017\text{ g/cm}^3$,水层厚度 $h_2=0.6\text{ m}$,总水深 $H=0.8\text{ m}$,设定 4 种工况 N1、N2、N3、N4,相对波幅 η_0/H 分别为 0.026、0.044、0.054 和 0.098。如图 9 所示,采用重力塌陷法制造内孤立波^[16],图中造波区两侧密度跃层高度差 h_0 称为阶跃高度,造波区长度 L_0 称为阶跃长度。

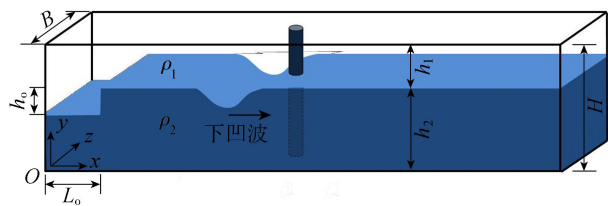


图 9 重力塌陷法造波示意图

2.2 数值模拟方法和边界条件

三维数值波浪水槽中下凹型内孤立波的形成和传播采用大涡模拟技术模拟;利用 SIMPLE 算法对流速-压力项进行耦合,以保证质量守恒,并由此得到压力场;利用二阶中心差分格式及隐式格式分别对空间和时间进行离散。造波区端边(图 9 中的左边壁)、数值水槽底部以及柱体壁面均采用无滑移固壁边界,水槽两侧采用滑移固壁边界。为了使内波不发生反射,水槽右端采用 Sommerfeld 辐射型边界^[17];顶部采用“刚盖”假定,以此忽略表面波的影响^[17]。

2.3 数学模型验证

采用与文献[18-19]相同的方法验证了建立的数学模型,比较了不同波幅情况下,圆柱和方柱模型试验与数值模拟中内孤立波作用力的时历曲线。结果表明模型试验与数值模拟结果吻合较好,验证了建立的数学模型的可靠性,可用于后续试验的模拟。

3 模拟结果与分析

内孤立波环境下的速度场和压力场与密度均一流环境区别较大,在内孤立波作用下柱体受力三维特性更加明显^[18]。准确剖析柱周流场及柱表压强分布是科学研究和预测近岸及河口地区桩柱受力的必要条件。柱体所受水平力可分为压差阻力和摩擦阻力(黏滞力)两部分,这两类力求解的基本思路:①在柱身沿垂直(y)方向每隔一定距离截取 1 个断面,基于模拟结果在每个断面上沿柱周向选取 360 个点,并提取这些点的压强值及流速值(得到柱周

的压强分布及流速分布);②采用微元法,通过积分不同断面柱周的压强分布和流速分布可分别得到圆柱及方柱的压差阻力 f (式(9)(10)) 和黏滞力 f_τ (式(14)(15))。

3.1 柱体压差阻力沿水深的分布

定义柱体在水深 y 处所受无量纲水平压差阻力 f' 为

$$f' = \frac{f}{\rho g A H} \tag{17}$$

不同水深 y 处圆柱和方柱的无量纲水平压差阻力 f'_c 、 f'_s 如表 1 所示,由此可得到柱体水平压差阻力的垂向分布。相同波幅的内波环境下,以密度跃层为界的上下水层,方柱所受到的压差阻力总体大于圆柱;在上层水体中方柱受力约为圆柱的 1.5 倍;在下层水体中方柱受力约为圆柱的 3.5 倍。

3.2 柱体黏滞力沿水深的分布

定义柱体在水深 y 处所受无量纲水平黏滞力 f'_τ 为

$$f'_\tau = \frac{f_\tau}{\rho g A H} \tag{18}$$

不同水深 y 处圆柱和方柱的无量纲水平黏滞力 $f'_{c\tau}$ 、 $f'_{s\tau}$ 如表 1 所示,由此可得到柱体水平黏滞力的垂向分布。由表 1 可知,方柱和圆柱所受黏滞力均较小,比压差阻力小 1 个数量级以上,最大相差 2 个数量级。说明黏滞力对柱体总水平力的贡献很小,实际研究中可忽略流体的黏性效应,仅考虑压差阻力的作用。该结论与密度均一流环境下的结果类似:压差阻力占总水平合力的 95% 以上^[7],说明黏性作用在两种流体环境下都较微弱。

表 1 圆柱和方柱的无量纲化水平压差阻力

y/m	f'_c	f'_s	$f'_{c\tau}$	$f'_{s\tau}$
0	0	0	0	0
0.1	0.090	0.520	-0.0096	0.0207
0.2	0.133	0.556	-0.0096	0.0216
0.3	0.179	0.631	-0.0096	0.0234
0.4	0.249	0.709	-0.0010	0.0252
0.5	0.184	0.741	-0.0131	0.0036
0.6	0.810	0.791	0.0335	-0.0257
0.7	0.728	0.902	0.0337	-0.0103
0.8	0.617	0.791	0.0337	-0.0071

3.3 单柱受力的量化分析

大量研究结果表明,柱体受力会随着内孤立波波幅的增大而增大^[20]。除波幅因素外,上下水层厚度 h_1 、 h_2 同样决定了内孤立波的传播特性^[21]。由此推断水深比 h_1/h_2 也可能是柱体受力的敏感性参数。本文综合考虑相对波幅 η_0/H 和水深比 h_1/h_2 对圆柱受力的影响规律,以此定量分析在分层流环境下柱体受力峰值系数与 η_0/H 和 h_1/h_2 的相关关系。不

同工况计算所得的 $F'_{\max}$ 详见表 2, 计算时上下水层密度差 $\Delta\rho = 0.019\text{ g/cm}^3$ 保持不变, $0.231 \leq h_1/h_2 \leq 0.778$, $0.034 \leq \eta_0/H \leq 0.158$ 。

表 2 柱体受力量化分析工况设置及相关参数

工况	h_1/cm	h_2/cm	h_1/h_2	η_0/H	$F'_{\max}$
G1	15	65	0.231	0.034	0.0899
G2	15	65	0.231	0.075	0.2931
G3	15	65	0.231	0.103	0.5236
G4	15	65	0.231	0.121	0.6106
G5	15	65	0.231	0.158	1.1890
G6	20	60	0.333	0.034	0.0646
G7	20	60	0.333	0.075	0.2198
G8	20	60	0.333	0.103	0.3383
G9	20	60	0.333	0.121	0.4107
G10	20	60	0.333	0.158	0.6987
G11	25	55	0.455	0.034	0.0540
G12	25	55	0.455	0.075	0.1385
G13	25	55	0.455	0.103	0.2167
G14	25	55	0.455	0.121	0.2390
G15	25	55	0.455	0.158	0.3694
G16	30	50	0.600	0.034	0.0382
G17	30	50	0.600	0.075	0.0750
G18	30	50	0.600	0.103	0.1594
G19	30	50	0.600	0.121	0.1855
G20	30	50	0.600	0.158	0.2612
G21	35	45	0.778	0.034	0.0200
G22	35	45	0.778	0.075	0.0420
G23	35	45	0.778	0.103	0.0860
G24	35	45	0.778	0.121	0.1066
G25	35	45	0.778	0.158	0.1485

分析表 2 中数据发现, 圆柱 $F'_{\max}$ 与 η_0/H 和 h_1/h_2 均具有较强的相关性。通过多元线性回归以 h_1/h_2 和 η_0/H 为自变量、 $F'_{\max}$ 为因变量进行相关性分析可知: $F'_{\max}$ 与 h_1/h_2 为负相关, 与 η_0/H 正相关, 其最优线性拟合关系为

$$F'_{\max} = -0.88h_1/h_2 + 3.72\eta_0/H + 0.34 \quad (19)$$

但拟合优度 R^2 仅有 0.3。以式 (19) 计算 $F'_{\max}$ 值为横坐标, 真值 $F'_{\max}$ 为纵坐标绘图, 发现其具有指数特征, 因此定义综合影响系数:

$$m = -0.88h_1/h_2 + 3.72\eta_0/H + 0.34 \quad (20)$$

进一步用真值 $F'_{\max}$ 与 m 进行对数拟合, 即可得到

$$F'_{\max} = 0.05e^{4.18m} \quad (21)$$

此时 $R^2=0.957$, 拟合优度高 (图 10)。综合影响系数 m 虽是拟合过程中得到的, 但其具有一定的物理意义: 内孤立波相对波幅越大、上下水层厚度差距越大, 则 m 值越大, 对应柱体受力越大。 m 为两参数 η_0/H 和 h_1/h_2 对柱体受力的影响提供了量化的指标, 且 m 与 η_0/H 正相关, 与 h_1/h_2 负相关 (式 (20))。综上可知, 柱体受力在不同分层条件下均随相对波幅 η_0/H 的增大而增大; 而在同一波幅条件下, 水深比 h_1/h_2 越大, 柱体受力越小。

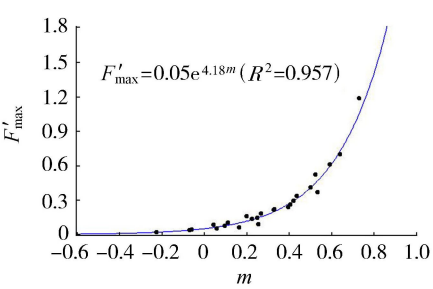


图 10 $F'_{\max}$ 与 η_0/H 和 h_1/h_2 的相关关系

4 结 论

- a. 波幅相同时, 以密度跃层为界, 方柱于上下水层中所受到的压差阻力均大于圆柱; 上层水体中方柱受力约为圆柱的 1.5 倍; 下层水体中方柱受力约为圆柱的 3.5 倍。
- b. 作用于柱体上的黏滞力比压差阻力小 1 或 2 个数量级, 因此可忽略流体的黏性效应, 只考虑压差阻力的作用效果。
- c. 受力峰值系数与相对波幅及水深比具有较强的相关性, 且与综合影响参数呈明显的指数分布关系, 两者拟合优度为 0.957, 拟合优度高。受力峰值系数与相对波幅正相关, 与水深比负相关。

参考文献:

[1] KURKINA O, ROUVINSKAYA E, TALIPOVA T, et al. Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 185: 44-54

[2] COLOSI J A, KUMAR N, SUANDA S H, et al. Statistics of internal tide bores and internal solitary waves observed on the inner continental shelf off point Sal CA [J]. Journal of Physical Oceanography, 2017, 48(19): 1-64.

[3] 杨帆, 朱仁庆, 陈旭东, 等. 内孤立波作用下水下潜器的载荷特性数值分析 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(9): 26-31. (YANG Fan, ZHU Renqing, CHEN Xudong, et al. Numerical simulation for the load of internal solitary waves acting on a submerged body [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(9): 26-31. (in Chinese))

[4] WANG X, ZHOU J F, WANG Z, et al. A numerical and experimental study of internal solitary wave loads on semi-submersible platforms [J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 298-308.

[5] DU T, SUN L, ZHANG Y, et al. An estimation of internal soliton forces on a pile in the ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 2007, 6(2): 101-106.

[6] XU W, LIN Z Y, YOU Y X, et al. Numerical simulations for the load characteristics of internal solitary waves on a vertical cylinder [J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(9): 1071-1085.

- [7] 汪超. 方柱涡致振动及减阻机理的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
 - [8] XIE J, XU J C, CAI S Q. A numerical study of the load on cylindrical piles exerted by internal solitary waves [J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27 (8): 1252-1261.
 - [9] SI Z J, ZHANG Y L, FAN Z S, et al. A numerical simulation of shear forces and torques exerted by large-amplitude internal solitary waves on a rigid pile in South China Sea [J]. Applied Ocean Research, 2012, 37: 127-132.
 - [10] CAI S Q, XU J C, CHEN Z, et al. The effect of a seasonal stratification variation on the load exerted by internal solitary waves on a cylindrical pile [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33 (7): 21-26.
 - [11] 徐振山, 陈永平, 张长宽, 等. 波流环境中射流的大涡数值模拟 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (2): 239-245. (XU Zhenshan, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan, et al. Large eddy simulation of a jet in wave-current environment [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 239-245. (in Chinese))
 - [12] 胡彬, 水庆象, 王大国, 等. 特征线算子分裂有限元的圆柱绕流大涡模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (2): 27-32. (HU Bin, SHUI Qingxiang, WANG Daguo, et al. Large eddy simulation of flow around circular cylinder combined with characteristic-based operator-splitting finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (2): 27-32. (in Chinese))
 - [13] 鲁俊, 王玲玲, 曹小红. 横流中射流及其温度标量输运大涡模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (2): 26-31. (LU Jun, WANG Lingling, CAO Xiaohong. Large eddy simulation of jets with and without temperature scalar in a current [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (2): 26-31. (in Chinese))
 - [14] WANG F F, WU S Q, ZHU S L. Numerical simulation of flow separation over a backward-facing step with high Reynolds number [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12 (2): 145-154.
 - [15] WEI G, DU H, XU X H, et al. Experimental investigation of the generation of large-amplitude internal solitary wave and its interaction with a submerged slender body [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2014, 57 (2): 301-310.
 - [16] HSIEH C M, HWANG R R, HSU R C, et al. Flow evolution of an internal solitary wave generated by gravity collapse [J]. Applied Ocean Research, 2014, 48: 277-291.
 - [17] ZHU H, WANG L L, TANG H W. Large-eddy simulation of the generation and propagation of internal solitary waves [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57 (6): 1128-1136.
 - [18] 王玲玲, 王寅, 魏岗, 等. 内孤立波环境下圆柱和方柱受力特征: II. 数值模拟 [J]. 水科学进展, 2017, 28 (4): 588-597. (WANG Lingling, WANG Yin, WEI Gang, et al. Force behaviors of circular and square cylinder in internal solitary waves environment: II. numerical study [J]. Advances in Water Science, 2014, 57 (6): 1128-1136. (in Chinese))
 - [19] 王玲玲, 王寅, 魏岗, 等. 内孤立波环境下圆柱和方柱受力特征: I. 物理实验 [J]. 水科学进展, 2017 (3): 111-119. (WANG Lingling, WANG Yin, WEI Gang, et al. Force behaviors of circular and square cylinder in internal solitary waves environment: I. experimental investigation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (3): 111-119. (in Chinese))
 - [20] WANG Y, WANG L L, ZHU H, et al. A numerical study of the forces on two tandem cylinders exerted by internal solitary waves [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1-15.
 - [21] YIN W M, GUO H Y, LIAO F L, et al. Analysis of horizontal forces on vertical cylinders under internal solitary waves in different depths [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48 (9): 125-131.
(收稿日期: 2019-05-16 编辑: 熊水斌)
-

(上接第 10 页)

- [13] 梁斌, 成官文, 朱宗强, 等. 柳州市区柳江河段水环境容量研究 [J]. 水资源保护, 2008, 24 (增刊 1): 27-29. (LIANG Bin, CHENG Guanwen, ZHU Zongqiang, et al. Study on water environmental capacity of the Liuzhou River reach of Liuzhou urban area [J]. Water Resources Protection, 2008, 24 (Sup1): 27-29. (in Chinese))
- [14] 葛蕴. 苏州市古城区河网水流数值模拟可视化研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [15] 生态环境部环境规划院. 全国地表水水环境容量核定技术复核要点 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2004.
- [16] 梁秀娟, 刘耀莹, 张文静, 等. 室内模拟试验确定横向扩散系数的研究: 以吉林市第二松花江某江段为例 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2004, 34 (4): 560-565. (LIANG Xiujuan, LIU Yaoying, ZHANG Wenjing, et al. The study of determining the transverse diffusion coefficient of river through the indoor simulation experiments [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34 (4): 560-565. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-05-05 编辑: 刘晓艳)