

# 作用于透空圆环墩柱的浅水波绕射 波浪力与波浪渗流力\*

李奇, 黄华, 詹杰民, 张耀中, 郭霖, 许潇楠  
(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 透空结构具有降低海浪作用的功效。该文基于椭圆余弦波一阶分量的浅水波理论和 Biot 渗流固结理论, 分别推导了浅水区固立于可渗透弹性海床上透空圆环墩柱的绕射波浪压力以及由波浪所致海床内渗流压力的数学解, 并据此对墩柱所受绕射波浪力与力矩以及渗流浮托力与倾覆力矩进行了实算。结果表明, 海况条件和结构参数的变化对波浪所引起的各种载荷存在不同的影响效应, 波浪渗流力与波浪直接作用可能具有相同量级。圆环柱外表面的可渗透性对浅水波的直接波浪作用具有明显的减弱效应, 而对渗流倾覆力矩也具有一定的减弱效应。此外, 圆环墩柱内外柱半径比存在优化取值, 以使墩柱达到减载和稳定的双重效果。与 Airy 波浪理论计算结果相比, 浅水波理论的结果能有效反映水波非线性因素的可能影响。

**关键词:** 椭圆余弦波; 绕射; 散射; 波浪力; 波浪渗流力

中图分类号: O353 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2013)03-0023-07

## Shallow Water Wave-induced Diffracted Wave Forces and Wave Seepage Forces on Porous Vertical Circular Cylinder

LI Qi, HUANG Hua, ZHAN Jiemin, ZHANG Yaozhong, GUO Lin, XU Xiaonan

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Porous structures have the property of diminishing wave loads. Based on first order cnoidal wave theory and Biot consolidation theory, the mathematical solutions are derived for shallow water wave diffracted pressure and wave-induced seepage pressure on a porous vertical circular cylinder resting on porous elastic seabed in shallow water, and direct wave force and moment and wave-induced uplift force and overturn moment on the circular cylinder are correspondingly evaluated. The result shows that the variation of ocean condition and structure parameter have different effects on various wave loads, the magnitude of wave-induced seepage loads may have same order of horizontal wave loads, and the permeability of the cylinder surface will lead an obvious reduction in direct wave effects on cylinder and certain reduction in seepage overturn moment on the bottom of cylinder. Furthermore, the suitable choice of the ratio of the cylinder's inside diameter to outside diameter may lead effects of both diminishing wave loads and ensuring stability of circular cylinder. Compared with the results from Airy wave theory, the wave load prediction values from shallow water wave theories can reflect wave nonlinearity effects.

**Key words:** cnoidal wave; diffraction; radiation; wave force; wave-induced seepage force

有关研究表明, 在海洋大尺度离岸结构的设计与建造中, 对部分结构表面加以布孔可以有效改变绕射波浪的作用机制, 结构的可渗透性可以减少波

浪对结构散射现象的复杂性, 进而导致对波浪的一定的吸收作用, 从而降低波浪对结构的总体载荷。另一方面, 对于可渗透海底, 除了考虑绕射波浪的

\* 收稿日期: 2012-06-19

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项资助项目(201005002)

作者简介: 李奇(1987年生), 男, 硕士; 通讯作者: 黄华; E-mail: tsyh1982@163.com

直接作用外, 一般还需考虑海底下孔隙海床中由波浪引起的对固立海工结构底部的渗流作用力<sup>[1]</sup>。目前, 关于结构透空导致波浪减弱现象的研究以及对波浪渗流作用的研究主要限于对 Airy 微幅波作用问题的分析<sup>[2-4]</sup>, 而透空结构的非线性波作用问题仅在理论上给予了初步探讨, 缺乏实算结果说明<sup>[5]</sup>。考虑部分透空结构主要应用于近岸工程, 因而对浅水波作用下透空结构的绕射波作用问题以及波浪渗流作用问题展开研究具有重要的理论和实际意义。

在浅水区, 随着波浪特征要素中波高与水深比以及波长与水深比的适度增大, 波浪运动的非线性影响将明显增加, 继续使用 Airy 微幅波理论对波浪作用进行预测将产生一定误差, 而应用浅水波理论进行波浪作用分析将更趋合理。在一定条件下, 椭圆余弦波将成为浅水波理论计算的主要波型之一。Isaacson 和苏铭德等<sup>[6-7]</sup>分别应用椭圆余弦波一阶绕射理论对单一直柱和双柱进行了波浪力计算与分析。邱大洪利用实验结果验证了椭圆余弦波一阶绕射理论用于双柱问题上的准确性<sup>[8]</sup>。另一方面, Williams<sup>[2]</sup>及付静、黄华等<sup>[9-10]</sup>应用 Airy 微幅波理论, 分别研究了均匀海和二层海中固立透空柱(群)的水波绕射问题。此外, 邱大洪、孙昭晨和黄华等多人应用 Biot 固结理论和 Airy 波理论, 分别对均匀海与二层海中固立的密实圆柱的波浪渗流作用问题进行了相关分析<sup>[11-13]</sup>。

本文通过对椭圆余弦波的一阶绕射理论和波浪渗流固结理论加以结合与推广应用, 分析了结构表面透空系数、圆环内外径比及水波非线性影响参数等一些新的变化因素对透空圆环墩柱所受波浪作用及波浪渗流作用的可能影响, 揭示了浅水波作用下透空结构绕射波浪力及渗流力的各种变化规律。

## 1 椭圆余弦波对圆环墩柱绕射问题的一阶解

对于固立于浅水区可渗透海床上的大尺度透空圆环墩柱(如图 1 所示, 外侧表面透空、内柱表面密实), 基于 Biot 渗流固结理论, 可假定墩柱底部与海床间无相对滑动, 海床底部不可渗透, 海床内土体各向同性、可渗且具有线弹性性质。考虑到波浪在海床处的水质点速度一般远大于海床内的渗流速度, 故在浅水波绕射问题分析中可认为波浪场不受海床渗透的影响, 从而波浪压力场可按海底不渗透条件而独立求解, 进而再考虑波浪压力场对海床的影响而对渗流压力场进行求解<sup>[1]</sup>。根据浅水

波绕射理论, 在一定条件下(例如  $kd < 0.6$ ,  $H/d > 0.4$ ,  $(H/d)/ka < 3$ )<sup>[6-7]</sup>, 更适合应用椭圆余弦波绕射理论。如图 1 所示, 将流域划分为圆环柱内区和圆柱柱外区, 设  $\Phi$  表示椭圆余弦波绕射波总势, 对应的定解问题提法为:

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{Re}(\varphi) = \Phi_i + \Phi_s = \text{Re}(\varphi_i + \varphi_s) \\ \nabla^2 \varphi &= \nabla^2 \varphi_i = \nabla^2 \varphi_s = 0 \quad (v_j) \end{aligned} \quad (1)$$

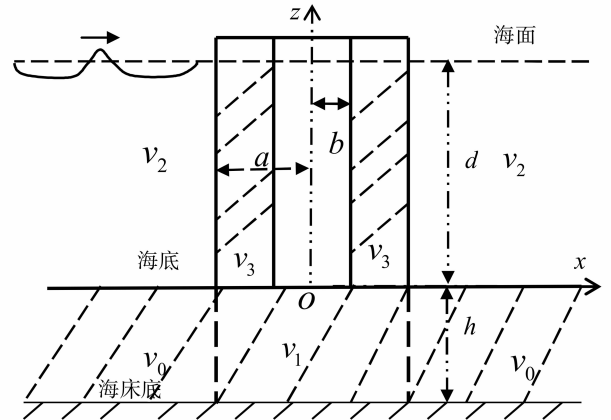


图 1 直立于浅水区可渗透海床上的透空圆环墩柱  
Fig. 1 Porous vertical circular cylinder resting on porous seabed in shallow water

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + g\eta = 0 \quad (z = d + \eta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left( \frac{\partial \varphi_{sn}^{(2)}}{\partial r} - ik_n \varphi_{sn}^{(2)} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial r} \Big|_{r=a} &= \frac{\partial \varphi^{(3)}}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\gamma \rho}{\mu} \left( \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial t} - \frac{\partial \varphi^{(3)}}{\partial t} \right) \Big|_{r=a} \\ \frac{\partial \varphi^{(3)}}{\partial r} \Big|_{r=b} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\varphi_i$  与  $\varphi_s$  分别为入射与散射波势;  $\varphi^{(j)}$  为对应流域  $v_j$  ( $j = 2, 3$ ) 的椭圆余弦波一阶总波势;  $\varphi_{sn}^{(2)}$  为对应外流域  $v_2$  的散射波一阶分量第  $n$  个谐波的波势, 它满足 Sommerfeld 辐射条件式 (4), 而  $k_n$  为对应谐波的波数。式 (5) 为椭圆余弦波一阶分量势在圆柱透空外侧表面和内柱密实表面应满足条件, 其中  $\rho$ 、 $\gamma$  及  $\mu$  分别为海水密度、具有长度量纲的材料系数及流体粘性系数。由椭圆余弦波一阶理论<sup>[6]</sup>, 入射波一阶势解为:

$$\frac{1}{\sqrt{gd}} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = \frac{H}{d} \left( cn^2 q - \frac{\gamma - (\kappa')^2}{\kappa^2} \right) \quad (6)$$

式中,  $q = K(\kappa)(kx - \omega t)/\pi; \gamma = E(\kappa)/K(\kappa); K(\kappa)$  和  $E(\kappa)$  分别为第一、二类完全椭圆积分;  $\kappa'^2 = 1 - \kappa^2$ ;  $cnq$  为雅克比椭圆函数。另量  $\kappa$  由方程  $\kappa^2 K^2(\kappa) = 3\pi^2 H/4k^2 d^3$  确定。对上式积分, 并将涉及  $cnq$  的积分项进行傅里叶级数展开, 可得:

$$\begin{cases} \frac{k}{\sqrt{gd}} \varphi_i = \frac{H}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{in} e^{in(kx - \omega t)} = \\ \frac{H}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{in} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(nkr) \cos m\theta \right] e^{-in\omega t} \\ A_n = \frac{2\pi^2}{\kappa^2 K^2(\kappa)} \left( \frac{nb^n}{1 - b^{2n}} \right) \\ b = e^{-\frac{K(\kappa')}{K(\kappa)}}, \beta_m = (2 - \delta_{0m}) i^m \end{cases} \quad (7)$$

进一步应用特征函数法并结合物面条件, 可解得椭圆余弦波一阶总绕射波势为:

$$\begin{cases} \frac{k\varphi^{(2)}}{\sqrt{gd}} = k \frac{\varphi_i + \varphi_s^{(2)}}{\sqrt{gd}} = \frac{H}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{in} \\ \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} [\beta_m J_m(nkr) + A_{nm}^{(2)} H_m^{(1)}(nkr)] \cos m\theta \right\} e^{-in\omega t}, \\ \frac{k\varphi^{(3)}}{\sqrt{gd}} = \frac{H}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{in} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} B_{nm}^{(3)} [J_m(nkr) - \right. \\ \left. \frac{J'_m(nkb)}{H_m^{(1)'(nkb)}} H_m^{(1)}(nkr)] \cos m\theta \right\} e^{-in\omega t} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $J_m(x)$  和  $H_m^{(1)}(x)$  分别为  $m$  阶第一类 Bessel 函数和  $m$  阶第一类 Hankel 函数。另有

$$\begin{aligned} A_{nm}^{(2)} &= \frac{iG\beta_m \left[ \frac{D_{nm} J'_m(nka)}{C_{nm}} - J_m(nka) \right] - \beta_m J'_m(nka)}{H_m^{(1)'(nka)} + iG \left[ H_m^{(1)}(nka) - \frac{D_{nm} H_m^{(1)'(nka)}}{C_{nm}} \right]} \\ B_{nm}^{(3)} &= \frac{\beta_m J'_m(nka) + A_{nm}^{(2)} H_m^{(1)'(nka)}}{J'_m(nka) - \frac{J'_m(nkb)}{H_m^{(1)'(nkb)}} H_m^{(1)'(nka)}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $G = \frac{\gamma\rho\omega}{\mu k}$  为透空系数。且有:

$$\begin{aligned} C_{nm} &= J'_m(nka) - \frac{J'_m(nkb)}{H_m^{(1)'(nkb)}} H_m^{(1)'(nka)} \\ D_{nm} &= J_m(nka) - \frac{J'_m(nkb)}{H_m^{(1)'(nkb)}} H_m^{(1)}(nka) \end{aligned} \quad (10)$$

进一步可给出圆环柱径向表面所受总水平波浪力  $F_h$  和力矩  $M_h$  分别为:

$$\begin{cases} F_a = \text{Re}(f_a), f_a = - \int_0^d dz \int_0^{2\pi} p_a a \cos \theta d\theta = \\ \int_0^d dz \int_0^{2\pi} \rho \frac{\partial(\varphi^{(2)} - \varphi^{(3)})}{\partial t} \Big|_{r=a} a \cos \theta d\theta \\ F_b = \text{Re}(f_b), f_b = - \int_0^d dz \int_0^{2\pi} p_b a \cos \theta d\theta = \\ \int_0^d dz \int_0^{2\pi} \rho \frac{\partial\varphi^{(3)}}{\partial t} \Big|_{r=b} b \cos \theta d\theta \\ F_h = F_a + F_b = \text{Re}(f_a + f_b) \\ M_a = \text{Re}(m_a), m_a = - \int_0^d z dz \int_0^{2\pi} p_a a \cos \theta d\theta = \frac{d}{2} f_a \\ M_b = \text{Re}(m_b), m_b = - \int_0^d z dz \int_0^{2\pi} p_b b \cos \theta d\theta = \frac{d}{2} f_b \\ M_h = M_a + M_b = \frac{d}{2} F \end{cases} \quad (11)$$

## 2 波浪渗流压力解及相应的渗流力解

如图 1 所示, 对海床内渗流场分区, 设区域  $v_0$  中波浪所引起的渗流压力为  $P^{(0)} = \text{Re}(p^{(0)})$ , 区域  $v_1$  中为  $P^{(1)} = \text{Re}(p^{(1)})$ , 根据 Biot 的渗流压力场固结理论<sup>[1]</sup>, 对应  $P^{(j)}$  的边值问题可表达为:

$$\begin{cases} \nabla^2 p^{(0)} = C_s \frac{\partial p^{(0)}}{\partial t}, \nabla^2 p^{(1)} = C_s \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} \\ \frac{\partial p^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (z = 0, r \leq a) \\ \frac{\partial p^{(0)}}{\partial z} = \frac{\partial p^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (z = -h) \\ p^{(0)} = p^{(1)}, \frac{\partial p^{(0)}}{\partial z} = \frac{\partial p^{(1)}}{\partial z} \\ (r = a, -h \leq z \leq 0), p^{(0)} = p_w(z=0, r > a) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $C_s = \frac{\rho g}{k_s} (n_0 \beta_f + \frac{1}{G} \frac{1-2\nu}{2-2\nu})$  为与海土变形和孔隙水压缩性相关的综合特性系数, 其中  $k_s$  为渗透系数,  $\beta_f$  为孔隙流体的压缩系数,  $n_0$  为海床的孔隙率,  $G$ 、 $\nu$  分别为海床土介质的剪切模量和泊松比。另外, 由椭圆余弦波绕射波势解式 (8), 可得到  $v_0$  与  $v_2$  交界海底处压强分布式为:

$$\begin{aligned} P_w &= \text{Re}(p_w), p_w = \rho g H \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \cdot \\ &\left\{ \sum_{m=0}^{\infty} [\beta_m J_m(nkr) + A_{nm}^{(2)} H_m^{(1)}(nkr)] \cos m\theta \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

现求解  $p^{(0)}$  和, 推广应用特征函数法, 可取:

$$p^{(0)} = \rho g H \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} e^{-in\omega t} + \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \cos m\theta J_m(nkr) + A_{nm}^{(2)} H_m^{(1)}(nkr) \cos m\theta \right] + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml} H_m^{(1)}(k_{2l}r) \sin(l + \frac{1}{2}) \frac{l\pi z}{h} \cos m\theta \right] \right\} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} p^{(1)} &= \rho g H \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \cdot \\ &\left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} B_{nml} J_m(k_{3l}r) \cos \frac{l\pi z}{h} \cos m\theta \right] (C_s \neq 0) \\ p^{(1)} &= \rho g H \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} [B_{nm0} (\frac{r}{a})^m + \right. \\ &\left. \sum_{l=1}^{\infty} 2B_{nml} \frac{I_m(\frac{l\pi r}{h})}{I_m(\frac{l\pi a}{h})} \cos \frac{l\pi z}{h}] \cos m\theta \right\} (C_s = 0) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中,  $I_m(x)$  为  $m$  阶第一类变形 Bessel 函数,  $A_{nml}$  与  $B_{nml}$  为可定系数, 需由  $v_0$  与  $v_1$  交界面匹配条件并借助傅氏级数展开法加以确定, 该条件为:

$$p^{(0)} = p^{(1)}, \frac{\partial p^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} (r = a, -h \leq z \leq 0)$$

另外, 三个相关参数分别为:

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{n^2 k^2 - in\omega C_s} \\ k_{2l} &= \sqrt{in\omega C_s - (l + 1/2)^2 (\pi/h)^2} \\ k_{3l} &= \sqrt{i\omega n C_s - (l\pi/h)^2} \end{aligned}$$

进一步设圆柱底面上所受渗流波浪浮托力和倾覆力矩分别为  $F_v = \text{Re}(f_v)$  及  $M_v = \text{Re}(m_v)$ , 依据海工结构最大荷载安全设计原则, 可取  $C_s = 0$  [11-13], 即可设海床不变形及孔隙水不压缩, 相应可得:

$$f_v = \int_0^a \int_0^{2\pi} p^{(1)}|_{z=0} r dr d\theta = \pi a^2 H \rho g \cdot$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \left[ B_{n00} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{4B_{n0l}}{l\pi} \frac{h}{a} \frac{I_1(\frac{l\pi a}{h})}{I_0(\frac{l\pi a}{h})} \right] \quad (16)$$

$$m_v = \int_0^a \int_0^{2\pi} p^{(1)}|_{z=0} r^2 \cos \theta dr d\theta = \rho g H \pi a^3 \cdot$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-in\omega t} \left[ \frac{B_{n10}}{4} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2B_{n1l}}{l\pi} \frac{h}{a} \frac{I_2(\frac{l\pi a}{h})}{I_1(\frac{l\pi a}{h})} \right] \quad (17)$$

### 3 算例与分析

实算中, 对所算的最大水平波浪力和力矩分别按因子  $\rho g H a d$  和  $\rho g H a d^2$  进行无量纲化。其中引入水波非线性影响参数  $\lambda = (4\kappa^2/3\pi^2)K^2(\kappa) = H/k^2 d^3$ , 它能更有效反映波浪特征与水深的相对变化导致水波非线性特征效应变化而产生的对波浪力的可能影响。此外对所算的最大波浪渗流浮托力和倾覆力矩分别按因子  $\rho g \pi (H/2) a^2$  和  $\rho g \pi (H/2) a^3$  进行无量纲化。在与水平波浪力和力矩比较时, 须将无量纲因子分别转化为  $\rho g H a d$  和  $\rho g H a d^2$ , 为此可设  $\alpha = (\pi/2)(a/d)$ , 它表示浮托力与波浪力两种无量纲力的比例因子, 而渗流倾覆力矩与波浪水平力矩两种无量纲力矩的比例因子相应为  $(2/\pi)\alpha^2$ 。

图 2 表明, 对于浅水长波或半径相对较小的墩柱,  $ka$  取值一般相对较小, 此时最大无量纲水平波浪力和力矩 (最大无量纲水平力矩为力的 0.5 倍) 随着非线性影响参数  $\lambda$  的增大而增大。当  $ka$  取值较大时, 情形相反。图 3 表明, 椭圆余弦波一阶绕射理论对最大波浪力的估值明显高于浅水条件下 Airy 波理论 ( $\lambda \rightarrow 0$ ) 所算结果, 说明在一定浅水条件下, 椭圆余弦波绕射理论对透空结构所受波浪作用的估算将更趋合理和安全。

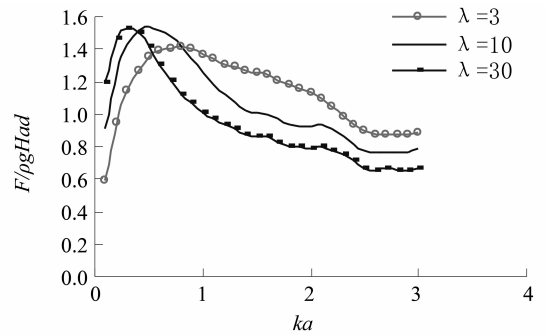


图 2 最大无量纲水平波浪力 ( $b/a = 0.5, G = 1$ )

Fig. 2 Dimensionless horizontal wave force

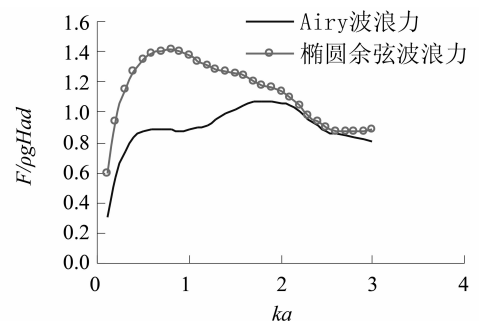


图 3 最大无量纲波浪力比较 ( $b/a = 0.5, G = 1, \lambda = 3$ )

Fig. 3 Comparison of dimensionless wave forces

图 4 表明，与密实圆柱 ( $G = 0$ ) 相比，圆环柱表面透空对波浪作用有明显降低效应，但当透空系数增大到一定值时，波浪力的变化较小，说明结构表面应当适度透空。图 5 表明，随着圆环墩柱内外柱半径比  $b/a$  的减小 (透空内域增大)，墩柱的最大水平波浪力 (矩) 随之减小，对于透空圆柱 ( $b/a = 0$ )，波浪力减至最小，不过，随着半径比的不断减小，波浪力减小效应明显趋弱，说明半径比可以进行适度取值，以达到墩柱减载和相对稳定的双重效果。

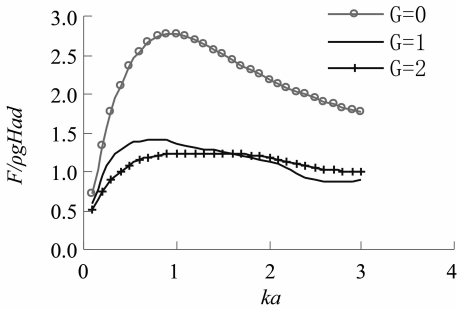


图 4 最大无量纲水平波浪力 ( $b/a = 0.5, \lambda = 3$ )  
Fig. 4 Dimensionless horizontal wave force

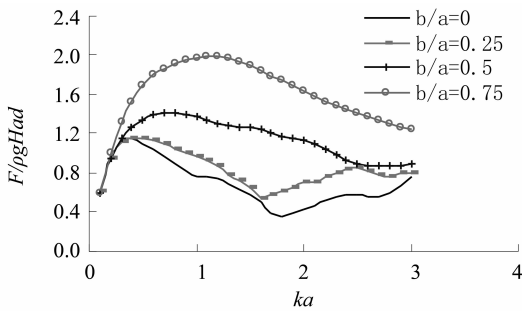


图 5 最大无量纲水平波浪力 ( $G = 1, \lambda = 3$ )  
Fig. 5 Dimensionless horizontal wave force

图 6 和图 7 表明，对应不同的  $\lambda$  取值，浮托力随  $ka$  的增大而单调减小，而倾覆力矩对应的变化趋势为先增后减，说明波浪渗流力与力矩的关系不同于波浪力与力矩的关系，后者在变化趋势保持一致。此外，浮托力随参数  $\lambda$  变化不大，而直接影响墩柱稳定性的倾覆力矩随参数  $\lambda$  的变化较为明显，且变化趋势与水平力的变化趋势 (即水平力矩变化趋势) 类似。

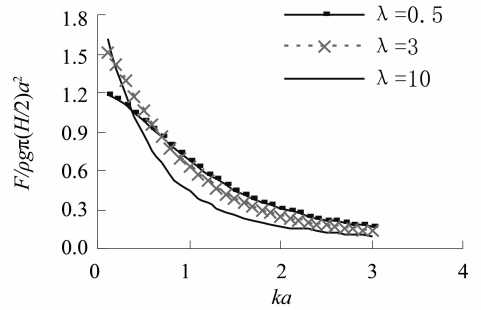


图 6 最大无量纲浮托力 ( $b/a = 0.5, G = 1, h/a = 1$ )  
Fig. 6 Dimensionless seepage lift force

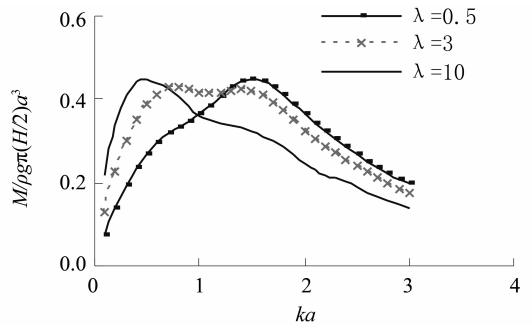


图 7 最大无量纲倾覆力矩 ( $b/a=0.5, G=1, h/a=1$ )  
Fig. 7 Dimensionless seepage overturn moment

图 8 和图 9 表明，在一定  $ka$  取值范围内圆柱表面透空对浮托力和倾覆力矩均有一定的减弱作用，其中对直接影响墩柱稳定性的倾覆力矩的减弱效应更趋明显，说明立于浅水区可渗透海底上的海工墩柱受浅水波绕射作用时，结构表面透空对波浪渗流力的影响是趋于良性的。

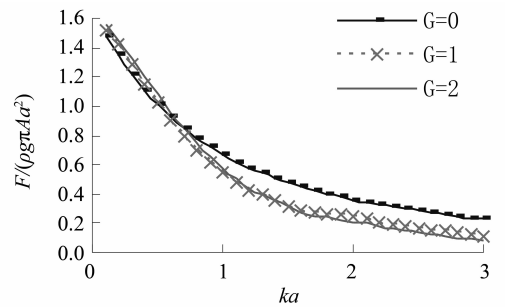


图 8 最大无量纲浮托力 ( $b/a = 0, h/a = 1, \lambda = 3$ )  
Fig. 8 Dimensionless seepage lift force

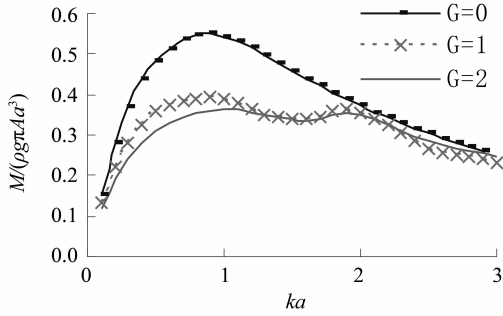


图 9 最大无量纲倾覆力矩 ( $b/a = 0, h/a = 1, \lambda = 3$ )  
Fig. 9 Dimensionless seepage overturn moment

图 10 和图 11 表明, 随半径比增大 (透空内域缩小) 浮托力和倾覆力矩在  $ka$  的一定取值范围内呈增大趋势, 这与半径比对绕射波浪力 (矩) 的影响效应相似, 只是变化的幅度相对较小一些。结合半径比变化对绕射波浪力 (矩) 的影响结果, 再次说明通过对墩柱半径比加以调控可达到使墩柱透空减载的同时又确保安全稳定的工程要求。

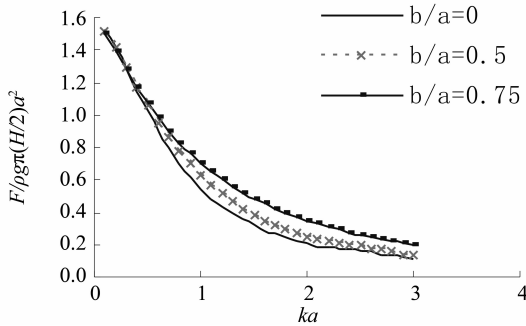


图 10 最大无量纲浮托力 ( $G = 1, h/a = 1, \lambda = 3$ )  
Fig. 10 Dimensionless seepage lift force

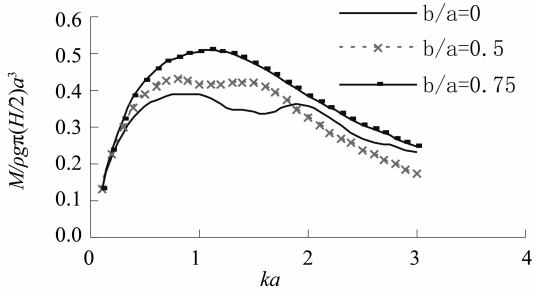


图 11 最大无量纲倾覆力矩 ( $G = 1, h/a = 1, \lambda = 3$ )  
Fig. 11 Dimensionless seepage overturn moment

图 12 与图 13 表明, 在一定参数条件下, 对墩柱稳定性有直接影响的最大渗流倾覆力矩值与波浪力矩值较为接近, 说明近岸工程中浅水波对结构的

直接作用与波浪引起的渗流作用可能具有相同量级, 因此在浅水区海工墩柱的设计上对浅水波诱导的渗流力影响应给予特别重视。

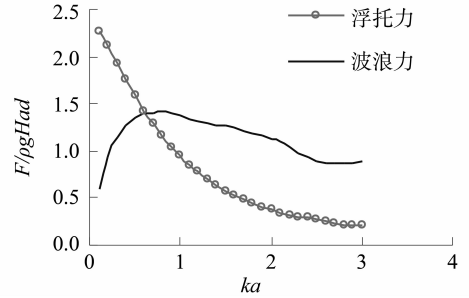


图 12 波浪力与浮托力比较  
( $G=1, h/a=1, \lambda=3, \alpha=1.5$ )

Fig. 12 Comparison of wave forces with lift force

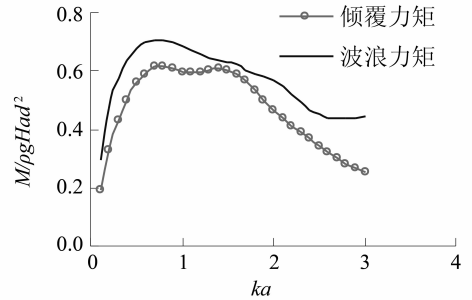


图 13 力矩比较 ( $G = 1, h/a = 1, \lambda = 3, \alpha = 1.5$ )  
Fig. 13 Comparison of wave moment with overturn moment

图 14 和图 15 表明, 尽管由椭圆余弦波理论所算最大无量纲浮托力与浅水条件下 Airy 波理论所算结果相差不大, 但椭圆余弦波理论所算最大无量纲倾覆力矩明显高于 Airy 波理论的对应结果。考虑到影响海工结构稳定性的主要因素为倾覆力矩, 因此, 从渗流作用的角度同样可以看到, 在一定条件下应用椭圆余弦波理论相对更为合理和安全。

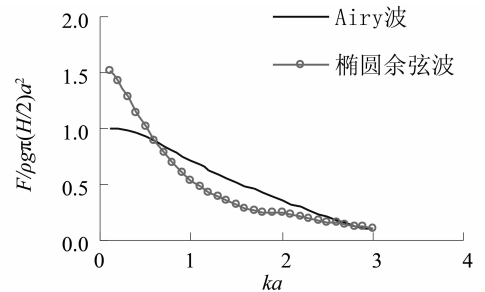


图 14 浮托力比较 ( $b/a=0, G=1, h/a=1, \lambda=3$ )  
Fig. 14 Comparison of seepage uplift forces

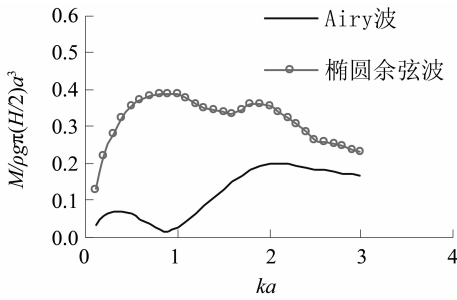


图15 倾覆力矩比较 ( $b/a=0, G=1, h/a=1, \lambda=3$ )

Fig. 15 Comparison of seepage overturn moment

## 4 结论

本文将椭圆余弦波一阶理论有效引入到对浅水区透空墩柱的绕射波浪作用和波浪渗流作用的数学分析与计算之中, 取得了浅水波作用下透空圆环单柱绕射波浪场和渗流压力场的解析解式, 并据此对墩柱所受波浪力及渗流力进行了实算。结果表明, 圆环柱外表面的适度透空对浅水波浪的直接作用和波浪渗流作用均有减弱效应, 而前者的减弱效果更为明显, 此外, 对渗流倾覆力矩的减弱效应较浮托力更为明显。一定条件下, 波浪渗流力与波浪直接作用力可能具有相同量级。而圆环墩柱内外柱半径比可适当取值, 从而满足墩柱减载和稳定的双重要求。与 Airy 波浪理论计算结果相比, 在一定条件下椭圆余弦波理论因计入了水波非线性因素的可能影响而更为合理和安全。

## 参考文献:

[1] 邱大洪. 波浪渗流力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 193-203.

[2] WILLIAMS A N, LI W. Water wave interaction with an array of bottom-mounted surface-piercing porous cylinders [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27(8): 841-866.

[3] 曾昭銮, 黄华, 詹杰民, 等. 固立于可渗透海床上透空型圆柱的波浪渗流力[J]. *中北大学学报: 自然科学版*, 2010(4): 327-330.

[4] 邹志利, 邱大洪. 可渗可压缩海床上墩柱底面波浪渗流压力的计算[J]. *海洋工程*, 1993, 11(4): 47-58.

[5] 黄华, 詹杰民. 可渗透结构的非线性水波绕射作用问题[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(1): 25-28.

[6] ISAACSON M de St Q. Shallow wave diffraction around large cylinder [J]. *Journal of Waterway Port Coastal And Ocean Div.*, ASCE, 1977, 103(WW1): 69-82.

[7] 苏铭德, 潘宇. 浅水中群柱受力状况的理论研究[J]. *应用数学与力学*, 1987, 8(4): 367-376.

[8] 邱大洪, 周援衡, 贾影. 浅水区圆柱墩群上的非线性波浪力[J]. *海洋工程*, 1991, 9(1): 47-58.

[9] 付静, 黄华, 朱庆勇. 二层流体中透空大直径桩柱的波浪特性分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(3): 14-18.

[10] 付静, 黄华, 詹杰民, 等. 二层海洋中波浪对透空圆柱群的绕射作用分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(S2): 76-80.

[11] 孙昭晨, 邱大洪. 作用于可渗可压缩海床上的墩柱底面上的波浪力[J]. *海洋学报*, 1989, 11(3): 364-371.

[12] 邱大洪, 陈健. 抛石基床上圆柱墩底部的波浪浮托力[J]. *海洋学报*, 1994, 16(1): 114-123.

[13] 黄华, 曾昭銮, 詹杰民, 等. 二层海中立于可渗透海床上的大直径墩柱的波浪渗流力[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(2): 36-41.

(上接第22页)

[12] 刘华强, 殷宗泽. 膨胀土边坡稳定分析方法研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1545-1549.

[13] 傅旭东, 茜平一, 刘祖德. 边坡稳定可靠性的随机有限元分析[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 413-418.

[14] 王洋, 汤连生, 杜赢中. 地下水渗流对基坑支护结构上水土压力的影响分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2003, 42(2): 107-110.

[15] 邓东平, 李亮. 水力条件下具有张裂缝临河边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1835-1847.

[16] 王洋, 汤连生, 高全, 等. 水土作用模式对残积红粘土力学性质的影响分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(1): 128-132.