

作用于透空复合圆柱的波浪渗流力的解析计算*

陈瑞志, 黄 华, 詹杰民, 朱梦华, 郭宗晓
(中山大学工学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 基于 Biot 渗流固结理论和水波绕射理论, 应用特征函数展开法, 推导了对应透空复合圆柱的绕射波势和波浪引起的海床内渗流压力分布的解析解式, 由此计算了作用于固立透空复合圆柱底部上由波浪渗流压力所导致的浮托力和倾覆力矩, 并与水平和垂直绕射波浪力和力矩进行了相应比较。计算结果表明, 复合柱上部圆柱侧表面的透空性对水平方向的波浪直接作用有明显的减弱效应, 对波浪渗流倾覆力矩也有一定的减弱效应, 而对垂直方向的波浪直接作用及波浪渗流浮托力影响较小。海况条件和复合圆柱几何条件等因素的相对变化对波浪渗流作用均存在一定的影响, 其中对渗流倾覆力矩的影响更为明显。在一定条件下, 波浪渗流作用与绕射波浪作用可以具有相同的量级。

关键词: 透空复合圆柱; 波浪绕射; 波浪力; 海床; 渗流浮托力和倾覆力矩

中图分类号: O353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)03-0001-09

Analytical Calculation of Wave-Induced Seepage Forces on the Porous Compound Vertical Circular Cylinder

CHEN Ruizhi, HUANG Hua, ZHAN Jiemin, ZHU Menghua, GUO Zongxiao
(College of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on Biot seepage consolidation theory and wave diffraction theory, the analytical solutions to the diffracted water wave potentials and the wave-induced seepage pressures referring to porous compound vertical circular cylinder resting on permeable elastic seabed are derived by applying the eigenfunction expansion approach, and then the wave-induced lift force and overturn moment caused by the seepage pressure on the bottom of compound vertical circular cylinder are accordingly evaluated and are compared with direct diffracted wave force and moment. The results demonstrate that the porosity of the lateral surface of the circular column resting on a circular base will lead an obvious reduction in direct horizontal wave loads on compound cylinder and certain reduction in seepage overturn moment on the bottom of compound cylinder, and having slight influence on direct vertical wave loads and wave-induced seepage uplift force on compound cylinder. The variation of ocean condition and structure geometry condition may have some influence on wave-induced seepage loads, especially on seepage moment. In certain condition, wave-induced seepage loads may have same order of magnitude as the direct wave loads.

Key words: porous compound circular cylinder; wave diffraction; wave force; seabed; wave-induced seepage uplift force and moment

大尺度复合型圆柱是海工建筑中常用的结构形式之一, 例如上连圆柱下接圆形沉块的自升式石油

平台便是属于该类结构。此外, 各种海上作业平台的海下支撑结构也常常采用复合圆柱形式, 因此,

* 收稿日期: 2014-08-23

基金项目: 国家海洋公益性行业专项资金资助项目(201005002)

作者简介: 陈瑞志(1987年生), 男; 研究方向: 流体力学; 通讯作者: 黄华; E-mail: tsyh1982@163.com

复合圆柱已成为了类似直柱、浮筒、水下截柱这样的经典海工结构。对波浪与其相互作用的问题展开解析研究具有重要的理论意义和应用价值。MacCamy 和 Fuchs^[1] 最早给出了大尺度密实直立圆柱波浪绕射的解析解。Garret^[2] 随后推导了密实浮筒波浪绕射的数学解。Isaacson^[3] 推广 Garret 方法对密实复合圆柱, 包括水下固立截柱 (即圆柱式沉块) 的波浪作用问题进行了解析研究。

近年来的研究表明, 结构表面布孔可以有效的改变波浪作用机制, 结构的可渗透性对波浪具有一定吸收效应, 从而可以降低波浪对结构的总体载荷。William 等^[4-5] 利用线性波势理论, 研究了均匀海中透空浮筒和圆柱群的波浪绕射问题。李玉成等^[6] 研究了波浪与外壁开孔双柱的相互作用问题。付静和黄华等^[7-8] 对两层海中透空单圆柱和双圆柱的水动力学特性问题进行了深入探讨。

另一方面, 当结构固立于可渗透海底上时, 波浪将在海底的海床内产生往复的波浪水压力, 而使得海床中土体内的超静孔隙水压上升乃至液化, 形成海床内渗流压力场, 进而引起对结构底部的渗流浮托力和渗流倾覆力矩。邹志利和邱大洪^[9] 给出了固立于有限厚度海床上的圆墩柱的波浪渗流压力分布解析解。邱大洪等^[10] 采用半解析半数值法对双墩柱情形的波浪渗流压力问题进行了分析计算。曾昭奎和黄华等^[11] 对均匀海中透空固立单圆柱的波浪渗流作用问题进行了解析研究, 探讨了结构透空性对波浪渗流作用的影响。黄华等^[12-13] 分别对二层海中密实和透空单圆柱的波浪渗流作用进行了解析计算, 研究了表面波与内波所引起的海底渗流力作用规律。李奇和黄华等^[14] 采用椭圆余弦波理论对浅水中透空单柱波浪渗流作用进行了重新分析与计算, 揭示了波浪非线性因素对渗流力的可能影响。

本文将波浪渗流的固结理论和透空结构的绕射波理论相结合, 通过对特征函数展开法的推广应用, 分别推导了对应透空复合垂直圆柱波浪绕射势和波浪引起的渗流压力的数学解。与直立透空圆柱问题对应的解析解相比, 本文所给解式引入了复杂形式的含第一、二变形 Bessel 函数的多重级数解式。考虑到复合圆柱形式平台结构的底部圆柱内主要用于储油, 而波浪的主要作用集中于自由面附近区域, 因而本文主要选定复合圆柱顶部柱进行结构透空效应分析。此外, 本文对上下圆柱半径相等的特殊情形, 即部分透空直立圆柱的对应问题也进行

了波浪直接作用与波浪渗流作用的相似计算与分析。实算结果反映了结构透空系数、上下柱半径比、底柱高度与水深比、水深与底柱半径比、海床厚度与底柱半径比等各种重要参数变化分别对透空复合圆柱水平与垂直绕射波浪力 (矩), 特别是对绕射波浪引发的作用于对复合圆柱底部的渗流浮托力和倾覆力矩的可能影响。

1 绕射波浪速度势解与波浪力公式

对于大尺度水下结构物, 由于边界层厚度较小, 海水可视为理想不可压缩无粘流体, 且运动无旋, 故波浪作用只需考虑水波绕射影响。再考虑水下结构固立于可渗透弹性海床上, 依据 Biot 固结理论的相关假设^[15], 可设定立于海床上结构与海床间无相对滑动, 海床内土体各向同性、可渗且具有弹性性质, 而海床底部不可渗透, 无变形。由于一般情况下海床内渗流速度远小于海底处波浪场水流速度, 故在绕射波浪场的求解中可不考虑海床内渗流对其的影响, 即波浪势边值问题提法中可保留海底密实固面条件。

如图 1 所示, 设水深为 d , 海床厚度为 h , 透空复合柱顶部圆柱半径为 b , 底部圆柱半径为 a , 底圆柱顶部表面至海底距离为 h_1 。当上下圆柱半径相等时 ($a = b$), 复合圆柱转化为部分透空直柱 (如图 2 所示)。对于图 1 所示透空复合圆柱, 可将绕射波浪场划分为 v_0 , v_1 和 v_2 三个区域, 对于图 2 所示部分透空直柱, 可将波浪场划分为 v_0 和 v_1 二个区域。两种情形下对应的圆柱底部海床内渗流压力场均可划分为 Ω_0 和 Ω_1 二个区域, 其中海床厚度为 h 。

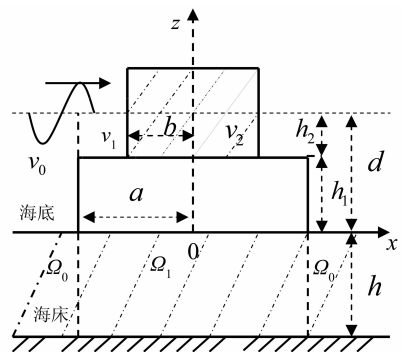


图 1 固立于海底可渗透弹性海床上的透空复合圆柱
Fig. 1 Porous compound vertical circular cylinder resting on permeable elastic seabed

波浪与大尺度复合圆柱相互作用，产生波浪绕射，对应的边值问题可表达为：

$$\Phi = \text{Re}[(\varphi_i + \varphi_s)e^{-i\omega t}] = \text{Re}(\varphi e^{-i\omega t}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi = \nabla^2 \varphi_i = \nabla^2 \varphi_s = 0 \quad (2)$$

$$g \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \omega^2 \varphi = 0 (z = d) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 (z = 0, r > a; z = h_1, 0 \leq r \leq a) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r} = 0 (r = a, 0 \leq z \leq h_1) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial r} = \frac{i\gamma\rho\omega}{\mu}(\varphi^{(2)} - \varphi^{(1)}) = iGk(\varphi^{(2)} - \varphi^{(1)}) (r = b, h_1 \leq z \leq d) \quad (6)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left(\frac{\partial \varphi_s^{(0)}}{\partial r} - ik\varphi_s^{(0)} \right) = 0 \quad (7)$$

式中， φ 、 φ_i 和 φ_s 分别为绕射总波势、入射波势和散射波势， $\varphi^{(j)}$ 为对应波浪场流域 v_j 的水波速度势；式 (7) 为辐射条件。此外， ρ 、 γ 及 μ 分别为海水密度、具有长度量纲的材料系数及流体黏性系数。

$G = \frac{\gamma\rho\omega}{\mu k}$ 为结构透空系数。

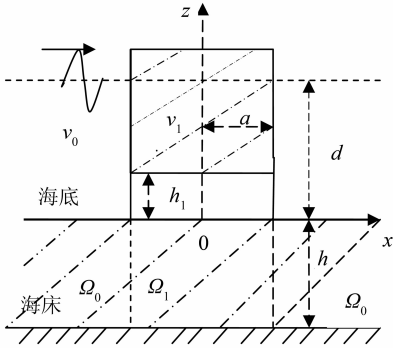


图 2 直立于可渗弹性海床上的部分透空圆柱
Fig. 2 Partial porous circular cylinder resting on permeable elastic seabed

由线性波绕射理论，并推广应用特征函数展开法，可取得波浪流场各区域相关波势解为：

$$\begin{aligned} \varphi^{(0)} &= -\frac{igH}{2\omega \cosh kd} \cdot \\ &\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \beta_n \left[J_n(kr) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka)} H_n^{(1)}(kr) \right] \cosh kz + \right. \\ &\left. \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^{(0)} \frac{K_n(k_m^{(0)} r)}{K_n(k_m^{(0)} a)} \cos k_m^{(0)} z \right\} \cos n\theta \\ &(\beta_0 = 1, \beta_n = 2i^n) \quad (8) \\ \varphi^{(1)} &= \frac{-igH}{2\omega \cosh kd} \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_{nm}^{(1)} \frac{I_n(k_m^{(1)} r)}{I_n(k_m^{(1)} a)} + B_{nm}^{(1)} \frac{K_n(k_m^{(1)} r)}{K_n(k_m^{(1)} a)} \right] \cdot \right. \\ &\left. \cos k_m^{(1)} (z - h_1) \right\} \cos n\theta \quad (9) \end{aligned}$$

(复合圆柱 $a > b > 0$)

$$\varphi^{(1)} = \frac{-igH}{2\omega \cosh kd} \cdot$$

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_{nm}^{(1)} \frac{I_n(k_m^{(1)} r)}{I_n(k_m^{(1)} a)} + B_{nm}^{(1)} \frac{K_n(k_m^{(1)} r)}{K_n(k_m^{(1)} a)} \right] \cdot \right. \\ &\left. \cos k_m^{(1)} (z - h_1) \right\} \cos n\theta \quad (10) \end{aligned}$$

(部分透空直柱，即复合圆柱中 $a = b$)

$$\begin{aligned} \varphi^{(2)} &= \frac{-igH}{2\omega \cosh kd} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^{(2)} \frac{I_n(k_m^{(1)} r)}{I_n(k_m^{(1)} b)} \cdot \\ &\cos k_m^{(1)} (z - h_1) \cos n\theta \quad (11) \end{aligned}$$

(复合圆柱 $a > b > 0$)

其中 $k_m^{(0)}$ 和 $k_m^{(1)}$ 满足如下色散关系：

$$k_m^{(0)} \text{tg} k_m^{(0)} d = -\frac{\omega^2}{g} = -k \tanh kd, k_0^{(0)} = -ik \quad (12)$$

$$\begin{cases} k_m^{(1)} \text{tg} k_m^{(1)} (d - h_1) = -\frac{\omega^2}{g} \\ k_0^{(1)} = -ik_1, k_1 \tanh k_1 (d - h_1) = \frac{\omega^2}{g} \end{cases} \quad (13)$$

式中， k 为入射波数； $J_n(x)$ 为 n 阶第一类 Bessel 函数， $H_n^{(1)}(x)$ 为 n 阶第一类 Hankel 函数， $I_n(x)$ 、 $K_n(x)$ 分别为 n 阶第一类和第二类变形 Bessel 函数； $A_{nm}^{(0)}$ 、 $A_{nm}^{(1)}$ 、 $B_{nm}^{(1)}$ 和 $A_{nm}^{(2)}$ 为待定系数。与固立全透空同径圆柱绕射波势解相比较，复合透空圆柱波势解引入了含变形 Bessel 函数的特征函数基本解的二重无穷级数的复杂解式。为取得各待定系数的联立代数方程组，除了需要利用下柱径向密实物面条件和上柱径向透空透空物面条件外，对于一般复合圆柱 ($a > b > 0$)，还需应用波浪场外流域 v_0 与内流域 v_1 交界处径向表面匹配条件：

$$\begin{cases} \varphi^{(0)} = \varphi^{(1)}, \\ \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial r} \quad (r = a, h_1 \leq z \leq d) \end{cases} \quad (14)$$

再利用关于 z 变量的函数系 $\{\cos k_m^{(0)} z, 0 \leq z \leq d\}$ 和 $\{\cos k_m^{(1)} (z - h_1), h_1 \leq z \leq d\}$ 之正交性，作傅氏余弦级数展开，即可得到未知系数 $A_{nm}^{(0)}$ 的无限维代数方程组，进而再求得其它各未知系数。实算表明，进行适度有限维运算即可满足计算精度要求。

进一步设绕射波作用于透空复合圆柱的水平总波浪力和力矩分别为： $F_h = \text{Re}(f_h)$ ， $M_h = \text{Re}(m_h)$ ；总垂直波浪力和力矩分别为： $F_{v1} =$

$\text{Re}(f_{v1}), M_{v1} = \text{Re}(m_{v1})$ 。引入动压公式

$$P_j = -\rho \left(\frac{\partial \Phi^{(j)}}{\partial t} \right) = \text{Re}(p_j) \quad (j = 0, 1, 2) \quad (15)$$

式中, P_j 为对应流域 v_j 的波浪动压强。对于一般复合圆柱 ($a > b > 0$) (如图 1 所示), 可得

$$f_h = - \int_0^{h_1} dz \int_0^{2\pi} p_0|_{r=a} a \cos \theta d\theta - \int_{h_1}^d dz \int_0^{2\pi} (p_1|_{r=b} - p_2|_{r=b}) b \cos \theta d\theta \quad (16)$$

$$m_h = \int_0^{h_1} z dz \int_0^{2\pi} p_0|_{r=a} a \cos \theta d\theta + \int_{h_1}^d z dz \int_0^{2\pi} (p_1|_{r=b} - p_2|_{r=b}) b \cos \theta d\theta \quad (17)$$

$$f_{v1} = - \int_b^a \int_0^{2\pi} p_1|_{z=h_1} r dr d\theta - \int_0^b \int_0^{2\pi} p_2|_{z=h_1} r dr d\theta \quad (18)$$

$$m_{v1} = - \int_b^a \int_0^{2\pi} p_1|_{z=h_1} r^2 \cos \theta dr d\theta - \int_0^b \int_0^{2\pi} p_2|_{z=h_1} r^2 \cos \theta dr d\theta \quad (19)$$

对于部分透空圆柱 ($a = b$), 如图 2 所示, 可得

$$f_h = - \int_0^{h_1} dz \int_0^{2\pi} p_0|_{r=a} a \cos \theta d\theta - \int_{h_1}^d dz \int_0^{2\pi} (p_0|_{r=a} - p_1|_{r=a}) a \cos \theta d\theta \quad (20)$$

$$m_h = \int_0^{h_1} z dz \int_0^{2\pi} p_0|_{r=a} a \cos \theta d\theta + \int_{h_1}^d z dz \int_0^{2\pi} (p_1|_{r=a} - p_0|_{r=a}) a \cos \theta d\theta \quad (21)$$

$$f_{v1} = - \int_0^a \int_0^{2\pi} p_1|_{z=h_1} r dr d\theta \quad (22)$$

$$m_{v1} = - \int_0^a \int_0^{2\pi} p_1|_{z=h_1} r^2 \cos \theta dr d\theta \quad (23)$$

2 波浪渗流压力解及渗流力公式

将海床内的渗流场划分为 Ω_1 和 Ω_0 内外两个区域 (如图 1 和图 2 所示)。设 P_w 为波浪引起的海底处的总动水压力, 有 $P_w = \text{Re}(p_w)$, 其中 $p_w = p_i + p_s$, p_i 和 p_s 分别对应入射波动压和散射波动压, 且有

$$p_w = \frac{\rho g H e^{-i\omega t}}{2 \cosh kd} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \beta_n \left[J_n(kr) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka)} H_n^{(1)}(kr) \right] + \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^{(0)} \frac{K_n(k_m^{(0)} r)}{K_n(k_m^{(0)} a)} \right\} \cos n\theta \quad (24)$$

再设海床内渗流区域 Ω_0 和 Ω_1 对应的波浪渗流压力为 $P^{(j)} = \text{Re}(p^{(j)})$ ($j = 0, 1$), 引入 Biot 波浪渗流固结理论^[12], 渗流场压力对应边值问题提法为

$$\nabla^2 p^{(j)} = C_s \frac{\partial p^{(j)}}{\partial t} \quad (j = 0, 1) \quad (25)$$

$$p^{(0)} = p_w \quad (z = 0, r \geq a) \quad (26)$$

$$\frac{\partial p^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (z = 0, r < a) \quad (27)$$

$$\frac{\partial p^{(0)}}{\partial z} = \frac{\partial p^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (z = -h) \quad (28)$$

式 (25) 为孔隙水压控制方程; C_s 为涉及海床多孔土介质参数及孔隙水压缩性的综合特性系数, 其算式为: $C_s = \frac{\rho g}{k_s} (n_0 \beta_f + \frac{1}{G_0} \frac{1-2\nu}{2-2\nu})$, 式中 k_s 为渗透系数; β_f 为孔隙流体的压缩系数, n_0 为海床的孔隙率, G_0 与 ν 分别为海床土介质的剪切模量和泊松比。

推广固立直柱问题渗流压力的特征函数解法^[11], 分别求解 $p^{(0)}$ 和 $p^{(1)}$, 可得

$$p^{(0)} = \frac{\rho g H e^{-i\omega t}}{2 \cosh kd} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\beta_n \cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} \left[J_n(kr) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka)} H_n^{(1)}(kr) \right] + \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^{(0)} \frac{\cos k_{1m}(z+h) K_n(k_m^{(0)} r)}{\cos k_{1m} h K_n(k_m^{(0)} a)} + \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} H_n^{(1)}(k_{2m} r) \sin\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi z}{h} \right\} \cos n\theta \quad (29)$$

$$p^{(1)} = \frac{\rho g H e^{-i\omega t}}{2 \cosh kd} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} B_{nm} J_n(k_{3m} r) \cos \frac{m\pi z}{h} \cos n\theta \quad (C_s \neq 0) \quad (30)$$

$$p^{(1)} = \frac{H \rho g e^{-i\omega t}}{2 \cosh kd} \sum_{n=0}^{\infty} \left[B_{n0} \left(\frac{r}{a} \right)^n + \sum_{m=1}^{\infty} 2B_{nm} \frac{I_n\left(\frac{m\pi r}{h}\right)}{I_n\left(\frac{m\pi a}{h}\right)} \cos \frac{m\pi z}{h} \right] \cos n\theta \quad (C_s = 0) \quad (31)$$

式中, A_{nm} 和 B_{nm} 为待定系数; 式 (29) 中加入了含第二类变形 Bessel 函数的特征函数二重级数的特解。另有 $k_1 = \sqrt{k^2 - i\omega C_s}$, $k_{1m} = \sqrt{i\omega C_s + (k_m^{(2)})^2}$, $k_{2m} = \sqrt{i\omega C_s - (m + \frac{1}{2})^2 (\frac{\pi}{h})^2}$, $k_{3m} = \sqrt{i\omega C_s - (\frac{m\pi}{h})^2}$ 。

利用渗流区域 Ω_0 和 Ω_1 在径向界面处渗流压力的匹配条件:

$$\begin{cases} p^{(0)} = p^{(1)}, \\ \frac{\partial p^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} \end{cases} \quad (r = a, -h \leq z \leq 0) \quad (32)$$

再利用关于 z 变量的函数系 $\{\cos \frac{m\pi z}{h}, -h \leq z \leq 0\}$

和 $\{\sin(\frac{1}{2} + m) \frac{\pi z}{h}, -h \leq z \leq 0\}$ 之正交性, 作傅

氏级数展开，即可得到未知系数 A_{nm} 的无限维代数方程组，进而再求得未知系数 B_{nm} 。实算表明，进行适度有限维运算即可满足计算精度要求。

进一步设透空复合圆柱底部所受波浪渗流浮托力和倾覆力矩分别为 $F_{v2} = \text{Re}(f_{v2})$ 和 $M_{v2} = \text{Re}(m_{v2})$ ，依据墩柱底部最大波浪渗流荷载安全设计原则，可取 $C_s = 0$ [9,12]，即可设海床不变形及孔隙水不压缩，相应推导可得：

$$f_{v2} = \int_0^a \int_0^{2\pi} p^{(1)}|_{z=0} r dr d\theta = \frac{H\rho g a \pi e^{-i\omega t}}{\cosh kd} \cdot \left[B_{00} \frac{a}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2B_{0m}}{I_0\left(\frac{m\pi a}{h}\right)} \frac{I_1\left(\frac{m\pi a}{h}\right)}{\frac{m\pi}{h}} \right] \quad (33)$$

$$m_{v2} = \int_0^a \int_0^{2\pi} p^{(1)}|_{z=0} r^2 \cos \theta dr d\theta = \frac{H\rho g e^{-i\omega t} a^2 \pi}{2 \cosh kd} \left[\frac{aB_{10}}{4} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2B_{1m}}{I_1\left(\frac{m\pi a}{h}\right)} \frac{I_2\left(\frac{m\pi a}{h}\right)}{\frac{m\pi}{h}} \right] \quad (34)$$

3 算例与分析

3.1 一般透空复合圆柱

本文首先针对图 1 所示的一般透空复合圆柱典型结构对象进行实算。在具体计算中，对波浪力和波浪引起的渗流浮托力均按因子 $\rho g \pi A a^2$ 无量纲化，对波浪力矩和波浪引起的渗流倾覆力矩均按因子 $\rho g \pi A a^3$ 进行无量纲化，其中 A 为波幅。为方便计，图中以符号 F 统一代表波浪力或渗流浮托力幅值，以符号 M 统一代表波浪力矩或渗流倾覆力矩幅值。取 $G = \gamma \rho \omega / \mu k$ 为结构透空系数，则 $G = 0$ 对应密实复合圆柱情形（对于部分透空直柱， $G = 0$ 对应密实直柱情形）。

图 3 结果表明，随着透空系数从零值而增大，复合圆柱所受总水平波浪力及力矩明显减小，说明复合圆柱上部柱的局部透空即可有效减少波浪对圆柱整体的水平荷载。当透空系数增大到一定程度时，波载减小效应趋弱，说明对结构的透空适度即可。此外，随着绕射参数 ka 的增加，无量纲水平波浪力（矩）幅值呈现先增后减的态势。图 4 表明，透空系数变化对复合圆柱垂直总波浪力（矩）的平均影响不大，其中当 ka 较小时，透空系数的增大将小幅增加垂直波浪力，而当 ka 较大时，透空系数的增加对垂直波浪力将有所减小。透空系数的增加对垂直波浪力矩的影响平均而言具有小幅降

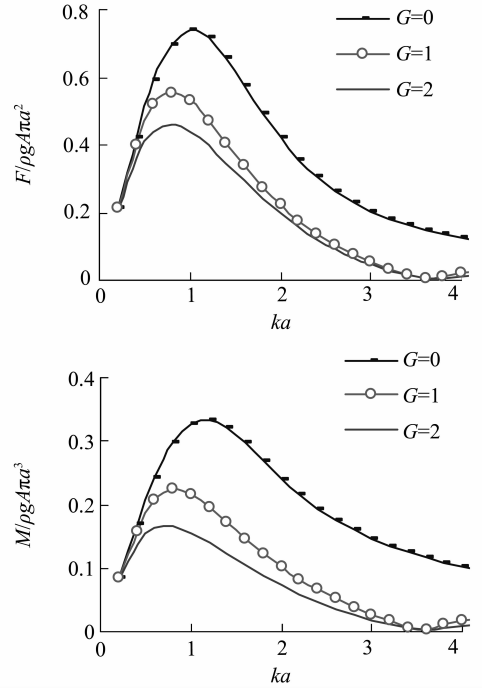


图 3 无量纲水平波浪力和力矩幅值
($b = 0.5a, d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 3 Dimensionless horizontal wave force and moment

低效应。随绕射参数 ka 的增加，无量纲垂直波浪力幅值单调下降，而力矩幅值呈先增后减态势。

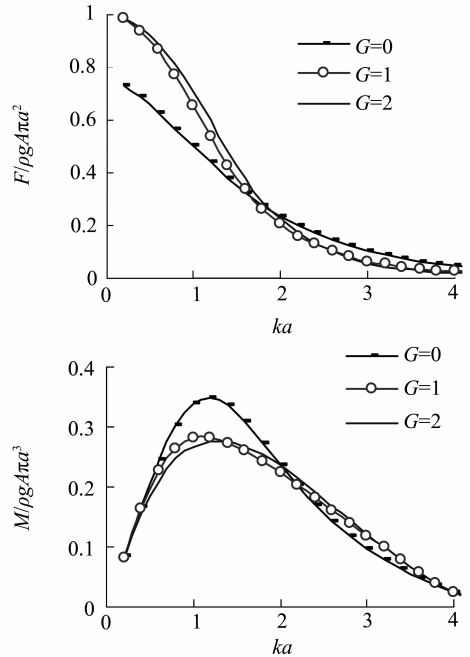


图 4 无量纲垂直波浪力及力矩幅值
($b = 0.5a, d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 4 Dimensionless vertical wave force and moment

图 5 表明, 相对于水平波浪力和水平波浪力矩, 透空系数变化对复合圆柱底部所受波浪渗流压力引起的浮托力及倾覆力矩的影响明显较小一些。随透空系数增大, 在 ka 的一定取值范围内时, 复合圆柱底部所受浮托力和倾覆力矩均有所减小, 其中倾覆力矩减弱效应更明显一些。随绕射参数 ka 的增加, 无量纲浮托力幅值单调下降, 而倾覆力矩幅值呈先增后减态势。

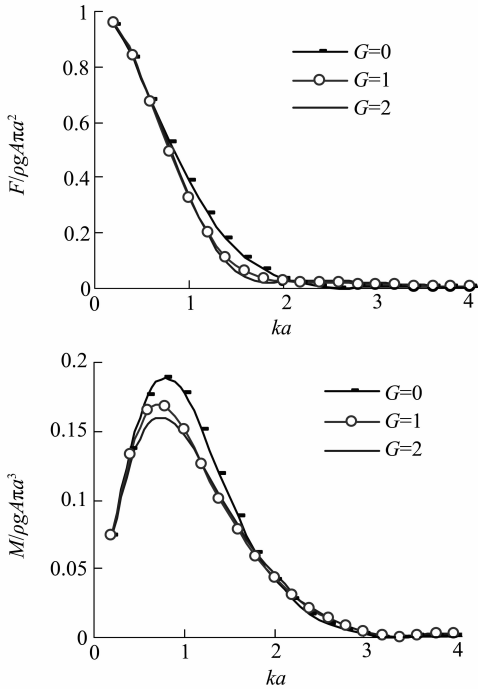


图 5 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($b = 0.5a, h = d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 5 Dimensionless seepage uplift force and moment

图 6 表明随着水深与复合圆底半径比的增大, 圆柱底部的渗流浮托力与倾覆力矩逐渐减小, 其中在 ka 的一定取值范围内时, 倾覆力矩减小幅度更趋明显。

图 7 表明, 海床厚度与复合圆柱底半径比变化对圆柱底部所受渗流浮托力和倾覆力矩影响甚微, 其中当 ka 取值较小时, 随着海床厚度与圆柱底半径的增大, 倾覆力矩出现一定程度的减小。图 8 表明透空复合圆柱底部圆柱高度与水深比的变化对圆柱底部所受浮托力同样影响较小。在 ka 的一定取值范围内, 渗流倾覆力矩随该比值的增大而有所增大。图 9 反映了透空复合圆柱上下柱半径比变化对波浪渗流作用的影响。结果表明半径比变化对复合圆柱底部所受渗流浮托力和倾覆力矩均影响不大。综合各结果可见, 水深与底柱半径比变化对渗流作

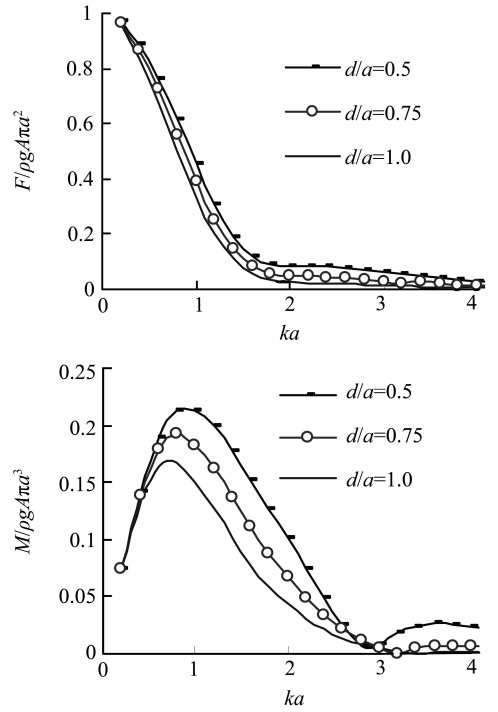


图 6 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($G = 1, b = 0.5a, h = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 6 Dimensionless seepage uplift force and moment

用影响相对明显一些, 而各几何参数比变化对渗流倾覆力矩影响更为明显一些。

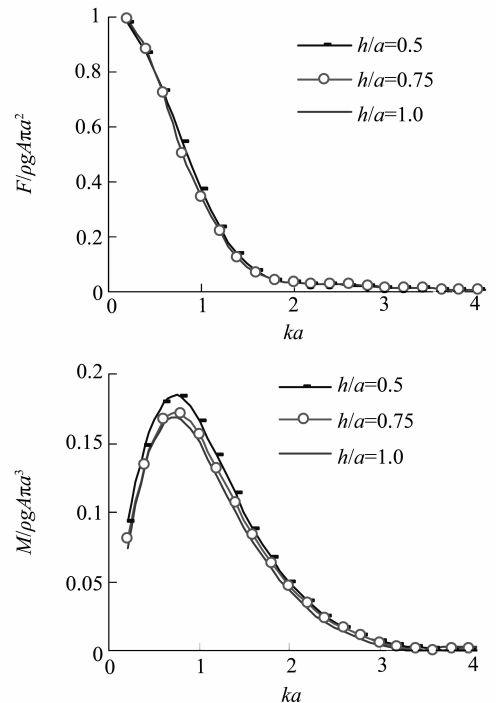


图 7 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($G = 1, b = 0.5a, d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 7 Dimensionless seepage uplift force and moment

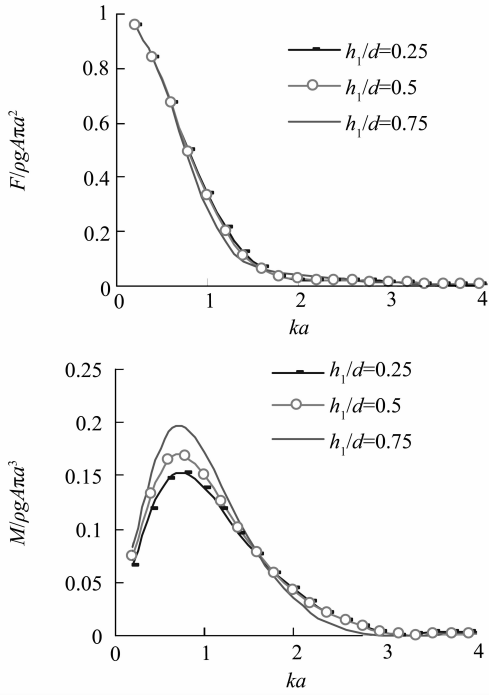


图 8 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($G = 1, b = 0.5a, h = d = a$)

Fig. 8 Dimensionless seepage uplift force and moment

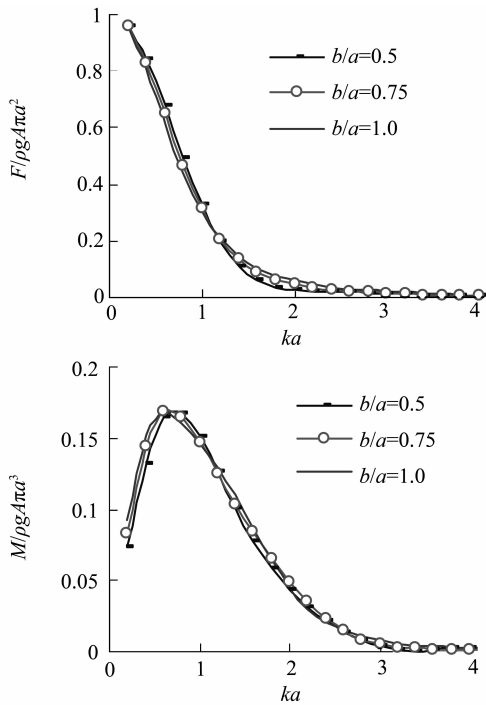


图 9 最大无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩
($G = 1, d = h = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 9 Dimensionless seepage uplift force and moment

及渗流倾覆力矩无量纲幅值的对比结果。结果表明波浪直接引起的总垂直波浪力与力矩幅值相对较大。在一定的海况和结构几何条件下，三种作用力（矩）可以具有相同量级。随着底半径与水深比的增大，渗流倾覆力矩幅值相对水平波浪力矩幅值明显增大，且整体大小超过水平波浪力矩。从中可见，在固立于可渗海床上的海下结构设计中，波浪引起的对结构底部的渗流浮托力和倾覆力矩是波浪载荷的重要组成部分，必须予以足够重视。

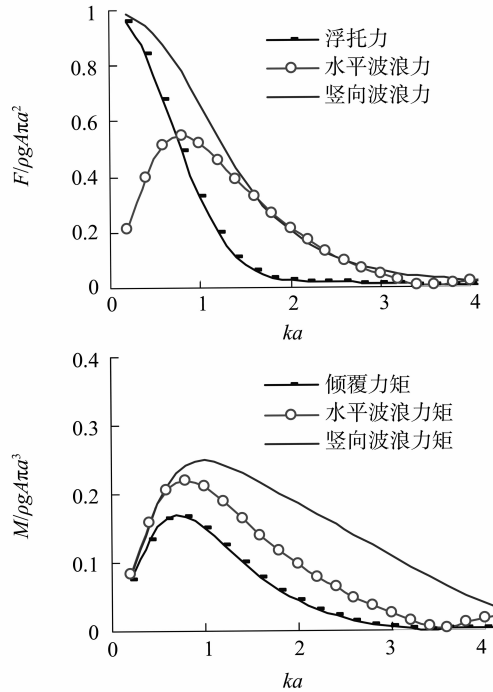


图 10 无量纲水平波浪力、垂直波浪力及浮托力和相应力矩幅值的对比 ($G = 1, b = 0.5a, h = d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 10 Comparison of dimensionless horizontal wave loads, vertical wave loads and wave-induced seepage loads

3.2 部分透空直柱

针对图 2 所示的一般透空复合圆柱特殊情形下的部分透空直立直柱结构，本文对波浪场进行了独立解析求解，并对波浪直接作用和波浪渗流作用进行了独立计算。

图 11 表明随透空系数从零值增大，部分透空圆柱所受水平波浪力及力矩明显减小，与一般复合圆柱相比，波载减弱效应更趋明显。图中 $G = 0$ 为密实直立圆柱结果。随着透空系数的进一步增大，波载减弱效应趋弱。

图 12 表明，对比水平波浪力和力矩变化情形，部分透空圆柱底部的渗流浮托力和倾覆力矩受透空系数的影响明显较小一些，随透空系数增大，在

图 10 给出了透空复合圆柱所受绕射水平、垂直波浪力及渗流浮托力和绕射水平、垂直波浪力矩

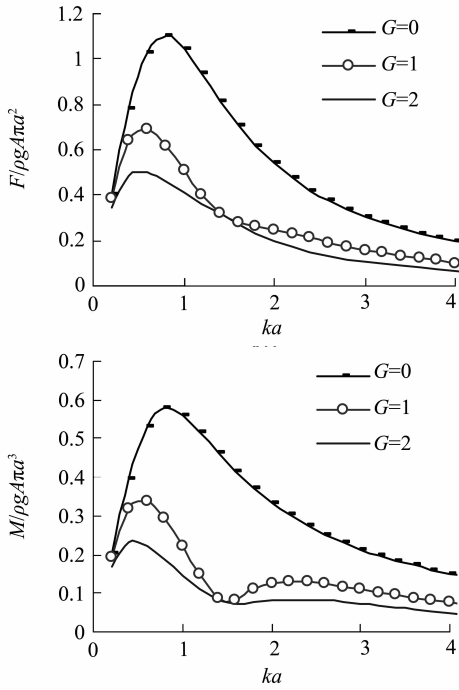


图 11 无量纲水平波浪力和力矩幅值
($h = d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 11 Dimensionless horizontal force and moment

ka 的一定取值范围内, 相对浮托力, 倾覆力矩减弱效应略为明显一些, 这与一般复合圆柱对应的变化状况基本一致。

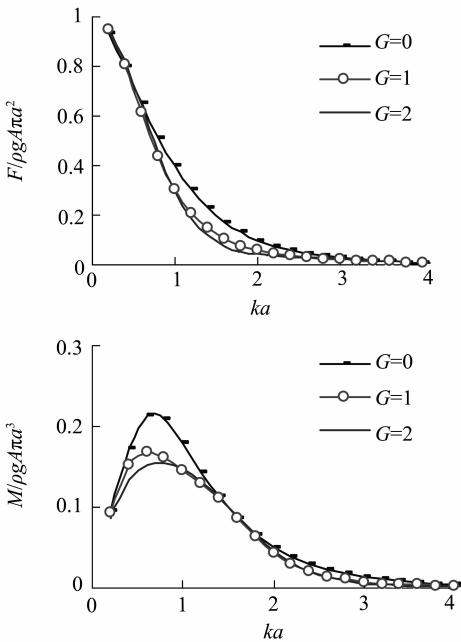


图 12 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($h = d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 12 Dimensionless seepage force and moment

图 13 反映了部分透空圆柱密实部分高度与水深比的变化对圆柱所受水平波浪力和力矩的影响。其中比值为 0 对应全透空圆柱。结果表明随着圆柱密实部分高度与水深比值的减小, 圆柱受到的水平波浪力和力矩作用随之减小, 这说明除透空面结构透空系数增大具有适度减弱波浪直接作用的效应外, 圆柱透空内区域范围的增大也具有适度降低波浪直接作用的效应。由图可减, 高度比为 0.25 与高度比为 0 两种情形下的结果十分近, 说明对圆柱采用适当的部分透空形式同样可取得全透空圆柱形式的减载效果, 而采用部分透空形式更有利于增加直立圆柱的稳定性。

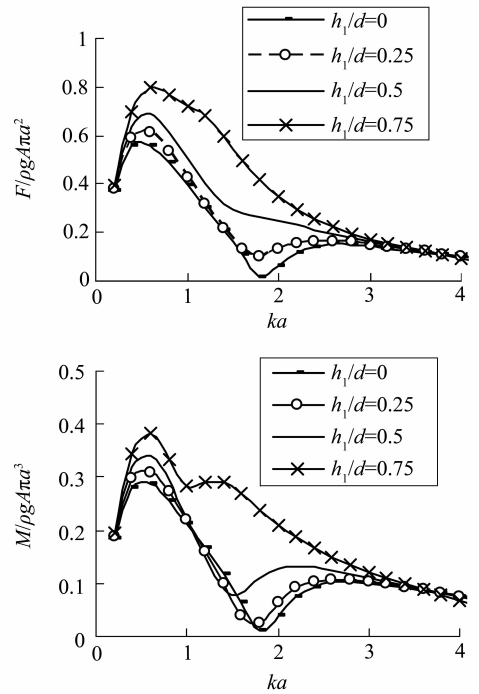


图 13 无量纲波浪渗流浮托力和倾覆力矩幅值
($G = 1, h = d = a$)

Fig. 13 Dimensionless seepage force and moment

图 14 反映了部分透空圆柱所受水平波浪力及力矩与波浪引起的渗流浮托力及倾覆力矩的对比结果。由图可见, 圆柱所受水平波浪力与渗流浮托力, 以及水平波浪力矩与渗流倾覆力矩幅值均保持相当的数量级, 表明波浪引起的渗流作用不容忽视。

4 结论

本文以线性绕射波浪理论和 Biot 波浪渗流固结理论为基础, 推广特征函数展开法, 给出了海工经典结构之一的复合圆柱在表面透空条件下的绕射波势和波浪渗流压力解析解。

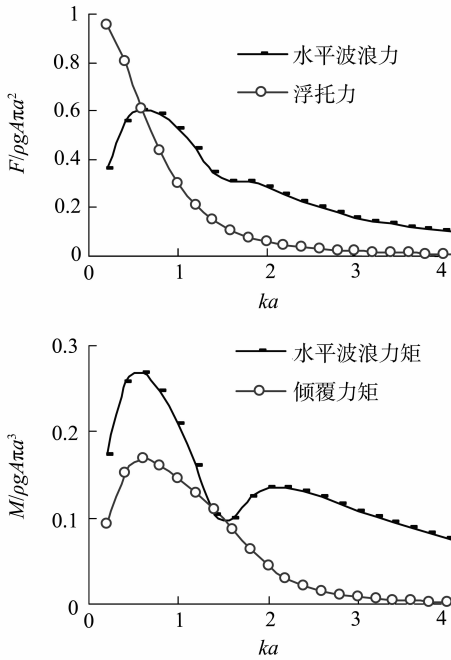


图14 无量纲水平波浪力(矩)与浮托力及倾覆力矩幅值的对比 ($G = 1, h = d = a, h_1 = 0.5d$)

Fig. 14 Comparison of Dimensionless horizontal wave and seepage force and moment

对绕射波浪的直接作用和渗流作用进行实算。结果表明,对复合圆柱或直柱与自由面相连的上部侧面透空即可较大幅度的降低表面波的水平直接作用,而透空系数的增大对垂直波浪力矩的影响平均而言具有小幅降低效应,同时对波浪渗流倾覆力矩平均而言也具有小幅降低作用。这表明复合圆柱无论是作为单一的自升式石油平台还是作为水下支撑结构来使用,利用上柱侧面透空方法来减弱波浪载荷是值得推广应用的重要方式之一。此外,结构透空内域范围的增大也将增大对直接波浪力和力矩以及渗流倾覆力矩的减弱作用。相比之下,各参数比变化对渗流浮托力影响较小,而对渗流倾覆力矩的影响相对明显一些。在一定取值条件下,渗流倾覆力矩幅值可能超过水平波浪力矩幅值的大小,由此说明波浪载荷计算中对渗流作用应给予足够的重视。部分透空圆柱的计算结果表明,对直柱接近自由面的上部进行部分透空即具有全透空直柱的相同量级的波浪减载效应,又可利用下部表面的密实增加墩柱的稳定性。值得指出的是,当圆柱透空系数或者是圆柱透空内域范围增大到一定程度时,

对波浪的减弱作用不再随之增大,说明结构的透空度需要适度控制来达到降低波浪作用和保证结构安全稳定的双重效应。

参考文献:

- [1] MACCAMY R C, FUCHS R A. Wave forces on piles: a diffraction theory [R]. USA: US Army Coastal Engineering Research Center, Tech Memo, No 69, 1954.
- [2] GARRETT C J R. Wave forces on a circular dock [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(1): 129 - 139.
- [3] ISAACSON M, de St Q. Wave forces on compound cylinders [J]. Civil Engineering in the Oceans, 1979, 1: 518 - 530.
- [4] WILLIAMS N. Water wave interaction with a floating porous cylinder [J]. Ocean Engineering, 2000, 27(1): 1 - 28.
- [5] WILLIAMS Liw. Water wave interaction with an array of bottom-mounted surface-piercing porous cylinders [J]. Ocean Engineering, 2000, 27(8): 841 - 866.
- [6] 李玉成, 孙路, 滕斌. 波浪与外壁开孔双筒柱群的相互作用[J]. 力学学报, 2005, 37(2): 141 - 147.
- [7] 付静, 黄华. 二层海洋中波浪对透空双圆柱的绕射作用分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(2): 76 - 80.
- [8] 付静, 黄华. 二层海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.
- [9] 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.
- [10] 邱大洪, 邹志利. 双墩柱波浪渗流力 [J]. 大连理工大学学报, 1993, 33(2): 232 - 237.
- [11] 曾昭奎, 黄华, 詹杰民. 固立于可渗透弹性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, 31(4): 327 - 330.
- [12] 黄华, 曾昭奎. 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.
- [13] 黄华, 许潇楠. 二层海中大直径透空圆环墩柱的波浪渗流力 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(5): 6 - 18.
- [14] 李奇, 黄华. 作用于透空圆环墩柱的浅水波绕射波浪力与波浪渗流力 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(3): 23 - 29.
- [15] 邱大洪. 波浪渗流力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 193 - 203.