

作用于二层海洋中大直径透空圆环墩柱上的波浪渗流力*

黄 华, 许潇楠, 詹杰民, 曾昭奎, 郭 霖
(中山大学工学院应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 基于 Biot 渗流固结理论与层化海绕射波理论, 应用特征函数展开法, 研究了二层海洋中立于可渗弹性海床上透空圆环墩柱的波浪渗流力问题, 给出了表面波和内波所致波浪渗流压力场的解析解式, 由此计算了作用于固立透空圆环墩柱底部上由波浪渗流压力所导致的浮托力和倾覆力矩。计算结果表明圆环柱外表面的透空性对表面波和内波的波浪直接作用具有明显的减弱效应, 而对波浪渗流倾覆力矩也具有一定的减弱效应。内波所致波浪渗流倾覆力矩可能超过表面波对应的作用。圆环墩柱内外柱半径比减小对波浪力矩的减弱效应较渗流倾覆力矩更为明显。

关键词: 透空圆环墩柱; 二层海; 波浪绕射; 海床; 波浪渗流力及倾覆力矩

中图分类号: O353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)05-0006-09

Wave-induced Seepage Forces on the Large Diameter Porous Vertical Circular Annular Cylinder in Two Layer Ocean

HUANG Hua, XU Xiaonan, ZHAN Jiemin, ZENG Zhaoluan, GUO Lin

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

Abstract: Based on the Biot consolidation theory and the two layer ocean diffracted wave theory, the wave seepage forces on vertical porous circular annular cylinder resting on porous elastic seabed in two layer ocean has been investigated by applying the eigenfunction expansion approach. The analytical solutions to seepage pressure fields caused by surface wave and inner wave are given respectively and then the wave-induced lift force and overturn moment caused by the seepage pressure on the bottom of vertical porous circular annular cylinder are evaluated. The results demonstrate that the porosity of the external surface of the cylinder will lead an obvious reduction in direct wave loads on cylinder and certain reduction in seepage overturn moment on the bottom of cylinder. Inner wave-induced seepage overturn moment may be greater than that induced by surface wave. Decreasing the ratio of the cylinder's inside diameter to outside diameter will lead more obvious diminishing effect of direct wave moment than that of wave-induced overturn moment.

Key words: porous circular annular cylinder; two layer ocean; wave diffraction; sea bed; wave-Induced seepage force and overturn moment

在实际海洋中, 除表面波对大尺度结构的绕射作用外, 可能还存在因海洋层化引起的内波对结构物的绕射作用。内波在传播中可以携带巨大的能

量, 从而对结构的安全性会造成一定隐患。当海洋表面受阳光照射而使表层升温, 在一定深度水层以下水温不再升高, 形成温度突变的跃变层, 该层面

* 收稿日期: 2013-01-09

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: 黄华(1961年生), 男; 研究方向: 水波动力学; E-mail: tsyh1982@163.com

在上下方向小扰动作用下，微小密度差可使水体浮力变化而诱发或加剧该层面波动，形成二层海内波。吴建华等^[1]对二层海中浮筒的水波绕射和辐射问题进行了计算。尤云祥等^[2-3]对两层海中固定于海底的大直径圆柱的波浪力进行了计算，并对圆柱沿径向方向振荡而产生的辐射问题进行了分析。付静和黄华等^[4-5]对两层海中透空单圆柱和双圆柱的水动力学特性问题展开了研究。其中，对透空结构的波浪作用分析是基于相关研究成果，即通过对结构表面布孔改变绕射波浪的作用机制，从而降低波浪对结构的总体载荷。Williams 等^[6-7]利用线性波势理论，研究了均匀海中透空浮筒和柱群的波浪绕射问题。此外，当结构固立于可渗透海底上时，绕射波浪将在海底的海床表面上产生往复的波浪水压力，从而促使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，进而引起渗流浮托力和渗流倾覆力矩，对结构实际承受的波浪载荷产生明显影响。因此，对固立于二层海中可渗透海床上的透空墩柱，即要考虑表面波和内波绕射波浪的直接作用，还需考虑海底下孔隙海床中由表面波和内波分别引起的对结构底部的渗流作用力^[8]。Durand 和 Monkmeier^[9]给出了无限厚度海床条件下渗流压力分布的解析解。孙昭晨和邱大洪^[10]给出了圆墩柱固立于有限厚度海床上的波浪渗流压力解析解。邹志利和邱大洪等^[11-14]分别针对墩柱直接放置于海床上和放置在埋入海床中抛石基床上的不同情形，计算了大尺度墩柱底面波浪渗流作用，并对双墩柱情形的波浪渗流压力问题进行了讨论。曾昭鑫和黄华等^[15]对均匀海中透空固立单圆柱的波浪渗流问题进行了研究，探讨了结构表面透空对波浪渗流力的可能影响。

本文考虑将波浪渗流的固结理论、层化海绕射波理论以及透空结构与波浪的相互作用理论相结合，研究结构表面透空分别对表面波和内波所引起渗流作用的可能影响。针对透空结构必须兼顾减载性和稳定性两方面要求，本文选取了内柱密实而外柱表面透空的圆环墩柱作为研究对象。通过对二层海中固立透空圆环墩柱的绕射波浪场和波浪渗流场分别进行分区求特征函数级数解，从而给出了表面波和内波的渗流压力解析解，并据此推导了墩柱底部所受波浪渗流力各算式。实算结果反映了结构透空系数、圆环柱内外半径比以及海水上下层密度比等几种重要参数的变化分别对表面波和内波的波浪渗流作用，特别是对渗流倾覆力矩的可能影响。

1 二层海中透空圆环柱的绕射波浪场求解

如图 1 所示，设二层海上、下层流体的密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$)，厚度分别为 h_1 和 h_2 ，水深为 d ，海底下海床厚度为 h 。依据 Biot 固结理论的相关假设，可设定立于海床上的圆环柱结构与海床间无相对滑动，海床内土体各向同性、可渗且具有线弹性性质，而海床底部不可渗透。考虑一般情况下波浪在海床处的水质点速度远大于海床内的渗流速度，故在波浪场的分析中可设海底不可渗透，从而海域波浪场的求解不受海床渗流的影响，只需考虑海中绕射波浪对海床内渗流场的影响即可。对于二层海，对应的 Stokes 一阶绕射波势的边值问题可表达为：

$$\Phi = \text{Re}(\varphi^\pm e^{-i\omega t}), \varphi^\pm = \varphi_i^\pm + \varphi_s^\pm, \quad \nabla^2 \varphi^\pm = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} - \omega_\pm^2 \varphi^\pm = 0 \quad (z = h_1 + h_2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} = 0 \quad (z = 0),$$

$$\frac{\partial \varphi^{\pm(3)}}{\partial r} = 0 \quad (r = b, 0 \leq z \leq d) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi^{\pm(2)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{\pm(3)}}{\partial r} =$$

$$i \frac{\gamma}{\mu} \rho \omega_\pm (\varphi^{\pm(3)} - \varphi^{\pm(2)}) \quad (r = a, 0 \leq z \leq d) \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left[\frac{\partial \varphi_s^\pm}{\partial r} - ik \varphi_s^\pm \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} \Big|_{z=h_2+0} = \frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} \Big|_{z=h_2-0},$$

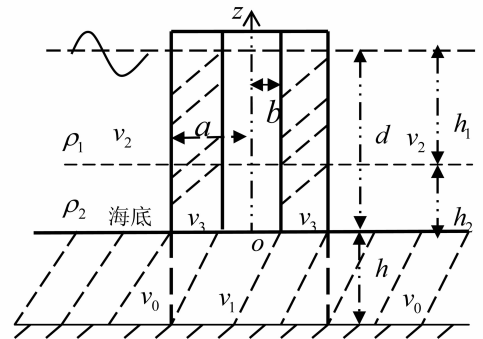


图 1 二层海中可渗透海底上的透空圆环柱

Fig. 1 A large diameter vertical porous circular annular cylinder resting on seabed in two layer ocean

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(g \frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} - \omega_\pm^2 \varphi^\pm \right) \Big|_{z=h_2+0} = \\ \rho_2 \left(g \frac{\partial \varphi^\pm}{\partial z} - \omega_\pm^2 \varphi^\pm \right) \Big|_{z=h_2-0} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, φ^\pm 、 φ_i^\pm 、 φ_s^\pm 分别为总波势、入射和绕射波势分量, 其中 φ^+ 、 φ^- 分别对应表面波及内波; k 为入射波波数, 在此波数下存在表面波和内波两种不同频率的波系, 其各自波频分别为 ω_+ 和 ω_- , 且满足色散关系:

$$\omega_\pm^2 = gk \frac{(T_1 + T_2) \pm \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4(1 - \lambda)T_1T_2(1 + \lambda T_1T_2)}}{2(1 + \lambda T_1T_2)} \quad (7)$$

式中, $T_1 = \tanh kh_1$, $T_2 = \tanh kh_2$, $\lambda = \rho_1/\rho_2$ 。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粘性系数。由线性绕射波的相关理论, 利用透空圆环柱径向表面条件可得:

$$\begin{cases} \varphi^{\pm(2)} = -\frac{igA_\pm}{\omega_\pm} Z_\pm(z) \sum_{n=0}^{\infty} [\beta_n J_n(kr) + A_n^{\pm(2)} H_n^{(1)}(kr)] \cos n\theta \\ \varphi^{\pm(3)} = -\frac{igA_\pm}{\omega_\pm} Z_\pm(z) \sum_{n=0}^{\infty} B_n^{\pm(3)} [J_n(kr) - \frac{J'_n(kb)}{H_n^{(1)'}(kb)} H_n^{(1)}(kr)] \cos n\theta \\ \beta_n = (2 - \delta_n) i^n \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$Z_\pm(z) = \begin{cases} \cosh k(z-h) + T_\pm(k) \sinh k(z-h), & h_2 \leq z \leq h \\ E_\pm(k) \cosh kz, & 0 \leq z < h_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_n^{\pm(2)} = \\ \frac{iG(\omega_\pm/\omega) \beta_n \left[\frac{D_n J'_n(ka)}{C_n} - J_n(ka) \right] - \beta_n J'_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka) + iG(\omega_\pm/\omega) \left[H_n^{(1)}(ka) - \frac{D_n H_n^{(1)'}(ka)}{C_n} \right]} \end{aligned} \quad (10)$$

$$B_n^{\pm(3)} = \frac{\beta_n J'_n(ka) + A_n^{\pm(2)} H_n^{(1)'}(ka)}{J'_n(ka) - \frac{J'_n(kb)}{H_n^{(1)'}(kb)} H_n^{(1)'}(ka)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_n &= J'_n(ka) - \frac{J'_n(kb)}{H_n^{(1)'}(kb)} H_n^{(1)'}(ka) \\ D_n &= J_n(ka) - \frac{J'_n(kb)}{H_n^{(1)'}(kb)} H_n^{(1)}(ka) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $E_\pm(k) = \frac{T_\pm(k) \cosh kh_1 - \sinh kh_1}{\sinh kh_2}$, $G =$

$\frac{\gamma \rho \omega}{\mu k}$ 为透空系数 (通过对 γ 值的调整, 可使上下层

流对应的透空系数相同), 而 $\frac{\omega_\pm}{\omega} = \sqrt{\frac{T_\pm(k)}{\tanh kd}}$ 。另 A_+ 和 A_- 分别为表面波和内波波幅; $J_n(x)$ 为 n 阶第一类 Bessel 函数, $H_n^{(1)}(x)$ 为 n 阶第一类 Hankel 函数, $I_n(x)$ 、 $K_n(x)$ 为第一类和第二类修正 Bessel 函数。

由压强积分方程可得圆环柱外侧面上动压强为:

$$\begin{aligned} P_a^\pm &= -\rho \frac{\partial (\Phi^{\pm(2)} - \Phi^{\pm(3)})}{\partial t} \Big|_{r=a} = \\ &\text{Re} [e^{-i\omega_\pm t} i\omega_\pm \rho (\varphi^{\pm(2)} - \varphi^{\pm(3)}) \Big|_{r=a}] \end{aligned} \quad (13)$$

而作用于圆柱透空外表面上的水平波浪力及力矩分别为 $F_{ha}^\pm = \text{Re}(F_{1a}^\pm)$ 和 $M_{ha}^\pm = \text{Re}(M_{1a}^\pm)$, 其中

$$\begin{aligned} F_{1a}^\pm &= -\int_0^d dz \int_0^{2\pi} i\rho \omega_\pm e^{-i\omega_\pm t} (\varphi^{\pm(2)} - \varphi^{\pm(3)})_{r=a} \times \\ &a \cos \theta d\theta = \left(\frac{-A_\pm g \pi a e^{-i\omega_\pm t}}{k} \right) \{ \rho_2 E_\pm(k) \sinh kh_2 + \\ &\rho_1 [\sinh kh_1 + T_\pm(k) (1 - \cosh kh_1)] \} \times \\ &\{ [J_1(ka) - \frac{J'_1(kb)}{H_1^{(1)'}(kb)} H_1^{(1)}(ka)] B_1^{\pm(3)} - \\ &2iJ_1(ka) - H_1^{(1)}(ka) A_1^{\pm(2)} \} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} M_{1a}^\pm &= -\int_0^d zdz \int_0^{2\pi} i\rho \omega_\pm e^{-i\omega_\pm t} (\varphi^{\pm(2)} - \varphi^{\pm(3)})_{r=a} \times \\ &a \cos \theta d\theta = \frac{(-A_\pm g \pi a e^{-i\omega_\pm t})}{k^2} \{ \rho_2 E_\pm(k) \times \\ &[kh_2 \sinh kh_2 - \cosh kh_2 + 1] + \\ &\rho_1 [kh_2 \sinh kh_1 - 1 + \cosh kh_1] + \\ &\rho_1 T_\pm(k) [kd - kh_2 \cosh kh_1 - \sinh kh_1] \} \times \\ &\{ [J_1(ka) - \frac{J'_1(kb)}{H_1^{(1)'}(kb)} H_1^{(1)}(ka)] B_1^{\pm(3)} - \\ &2iJ_1(ka) - H_1^{(1)}(ka) A_1^{\pm(2)} \} \end{aligned} \quad (15)$$

此外, 圆环柱密实内侧表面上的动压强为:

$$\begin{aligned} P_b^\pm &= -\rho \frac{\partial \Phi^{\pm(3)}}{\partial t} \Big|_{r=b} = \\ &[e^{-i\omega_\pm t} i\omega_\pm \rho \varphi^{\pm(3)} \Big|_{r=b}] \end{aligned} \quad (16)$$

相应的水平波浪力及力矩分别为 $F_{hb}^\pm = \text{Re}(F_{1b}^\pm)$ 和 $M_{hb}^\pm = \text{Re}(M_{1b}^\pm)$, 其中

$$\begin{aligned} F_{1b}^\pm &= -\int_0^d dz \int_0^{2\pi} i\rho \omega_\pm e^{-i\omega_\pm t} \varphi^{\pm(3)} \Big|_{r=b} b \cos \theta d\theta = \\ &-\left(\frac{A_\pm g \pi b e^{-i\omega_\pm t}}{k} \right) \{ \rho_2 E_\pm(k) \sinh kh_2 + \\ &\rho_1 [\sinh kh_1 + T_\pm(k) (1 - \cosh kh_1)] \} \times \\ &[J_1(kb) - \frac{J'_1(kb)}{H_1^{(1)'}(kb)} H_1^{(1)}(kb)] B_1^{\pm(3)} \end{aligned} \quad (17)$$

$$M_{1b}^\pm = -\int_0^d zdz \int_0^{2\pi} i\rho \omega_\pm e^{-i\omega_\pm t} (\varphi^{\pm(3)})_{r=b} b \cos \theta d\theta =$$

$$-\frac{(A_{\pm} g \pi b e^{-i\omega_{\pm} t})}{k^2} \{ \rho_2 E_{\pm}(k) [kh_2 \sinh kh_2 - \cosh kh_2 + 1] + \rho_1 [kh_2 \sinh kh_1 - 1 + \cosh kh_1] + \rho_1 T_{\pm}(k) [kd - kh_2 \cosh kh_1 - \sinh kh_1] \} [J_1(kb) - \frac{J'_1(kb)}{H_1^{(1)'}(kb)} H_1^{(1)}(kb)] B_1^{\pm(3)} \quad (18)$$

圆环柱所受总水平波浪力和力矩分别为：

$$F_h^{\pm} = F_{ha}^{\pm} + F_{hb}^{\pm} = \text{Re}(F_{1a}^{\pm} + F_{1b}^{\pm}) \quad (19)$$

$$M_h^{\pm} = M_{ha}^{\pm} + M_{hb}^{\pm} = \text{Re}(M_{1a}^{\pm} + M_{1b}^{\pm}) \quad (20)$$

2 波浪渗流压力场的求解及波浪渗流力算式

将海床内的渗流压力场划分为 v_1 和 v_0 内外两个区域（如图 1 所示）。设 P_w^+ 和 P_w^- 分别为由表面波和内波引起的海底处的动水压强，且，则有

$$P_w^{\pm} = -\rho_2 \left(\frac{\partial \varphi^{\pm(2)}}{\partial t} e^{-i\omega_{\pm} t} \right)_{z=0} = A_{\pm} g \rho_2 Z_{\pm}(0) e^{-i\omega_{\pm} t} \sum_{n=0}^{\infty} [\beta_n J_n(kr) + A_n^{\pm(2)} H_n^{(1)}(kr)] \cos n\theta \quad (21)$$

再设海床内渗流场区域 v_0 和 v_1 中，对应表面波及内波所致波浪渗流总压力分别为 $P^{\pm(0)} = \text{Re}(p^{\pm(0)})$ ，以及 $P^{\pm(1)} = \text{Re}(p^{\pm(1)})$ ，则各区波浪渗流压力场所对应的边值问题可表达为：

$$\nabla^2 p^{\pm(0)} = C_s \frac{\partial p^{\pm(0)}}{\partial t} \quad (22)$$

$$p^{\pm(0)} = p^{\pm} \quad (z = 0, r > a) \quad (23)$$

$$\frac{\partial p^{\pm(0)}}{\partial z} = 0 \quad (z = -h, r > a) \quad (24)$$

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

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

$$\frac{\partial p^{\pm(1)}}{\partial z} = 0 \quad (z = -h, r < a) \quad (26)$$

式 (22)、(25) 为孔隙水压的控制方程； C_s 为影响多孔介质海洋土变形的综合特性系数，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 、 ν 分别为海床土介质的剪切模量和泊松比。

分别求解 $p^{\pm(0)}$ 和 $p^{\pm(1)}$ ，可得：

$$p^{\pm(0)} = \rho_2 g A_{\pm} e^{-i\omega_{\pm} t} E_{\pm}(k) \left\{ \frac{\cosh k_1^{\pm}(z+h)}{\cosh k_1^{\pm} h} \times \sum_{n=0}^{\infty} [\beta_n J_n(kr) + A_n^{\pm(2)} H_n^{(1)}(kr)] \cos n\theta + \right.$$

$$\left. \sum_{n=0m=0}^{\infty} \sum_{n=0m=0}^{\infty} A_{nm}^{\pm} H_n^{(1)}(k_{2m}^{\pm} r) \sin(m + \frac{1}{2}) \frac{\pi z}{h} \cos n\theta \right\} \quad (27)$$

$$p^{\pm(1)} = \rho_2 g A_{\pm} e^{-i\omega_{\pm} t} E_{\pm}(k) \sum_{n=0m=0}^{\infty} \sum_{n=0m=0}^{\infty} B_{nm}^{\pm} J_n(k_{3m}^{\pm} r) \times \cos \frac{m\pi z}{h} \cos n\theta \quad (C_s \neq 0) \quad (28)$$

$$p^{\pm(1)} = \rho_2 g A_{\pm} e^{-i\omega_{\pm} t} E_{\pm}(k) \sum_{n=0}^{\infty} [B_{n0}^{\pm} (\frac{r}{a})^n + \sum_{m=1}^{\infty} 2B_{nm}^{\pm} \frac{I_n(\frac{m\pi r}{h})}{I_n(\frac{m\pi a}{h})} \cos \frac{m\pi z}{h}] \cos n\theta \quad (C_s = 0) \quad (29)$$

式中， A_{nm}^{\pm} 与 B_{nm}^{\pm} 为待定系数； $k_1^{\pm} = \sqrt{k^2 - i\omega_{\pm} C_s}$ ；

$$k_{2m}^{\pm} = \sqrt{i\omega_{\pm} C_s - (m + \frac{1}{2})^2 (\frac{\pi}{h})^2}；k_{3m}^{\pm} = \sqrt{i\omega_{\pm} C_s - (\frac{m\pi}{h})^2}；若 $C_s = 0$ ，则有 $k_1^{\pm} = k$ ， $k_{2m}^{\pm} = i(m + \frac{1}{2}) (\frac{\pi}{h})$ 。利用区域 v_0 与 v_1 在界面处渗流$$

压力及径向压力梯度相等条件，由函数系 $\left\{ \cos \frac{m\pi z}{h}, -h \leq z \leq 0 \right\}$ 和

$\left\{ \sin(\frac{1}{2} + m) \frac{\pi z}{h}, -h \leq z \leq 0 \right\}$ 的正交性，按傅氏级数展开方法，即可得到待定系数 A_{nm}^{\pm} 与 B_{nm}^{\pm} 的完备代数方程组。

设圆柱底面上所受渗流浮托力和倾覆力矩分别为 $F_v^{\pm} = \text{Re}(F_1^{\pm})$ 及 $M_v^{\pm} = \text{Re}(M_1^{\pm})$ ，则有：

$$F_1^{\pm} = \int_0^a \int_0^{2\pi} P^{\pm(1)}|_{z=0} r d\theta dr = (A_{\pm} \rho_2 g a^2 \pi) E_{\pm}(k) e^{-i\omega_{\pm} t} \times [B_{00}^{\pm} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4B_{0m}^{\pm}}{m\pi} \frac{h}{a} \frac{I_1(\frac{m\pi a}{h})}{I_0(\frac{m\pi a}{h})}] \quad (30)$$

$$M_1^{\pm} = \int_0^a \int_0^{2\pi} P^{\pm(1)}|_{z=0} r^2 \cos \theta d\theta dr = (A_{\pm} \rho_2 g a^3 \pi) e^{-i\omega_{\pm} t} E_{\pm}(k) \times [\frac{B_{10}^{\pm}}{4} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2B_{1m}^{\pm}}{m\pi} \frac{h}{a} \frac{I_2(\frac{m\pi a}{h})}{I_1(\frac{m\pi a}{h})}] \quad (31)$$

3 算例与分析

为实算方便计，并结合考虑多数实际海况条件，可设海床不变形及孔隙水不可压缩^[8]，相应

有 $C_s = 0$ 。另设 $A^+ = A^- = A$ 。对水平波浪力与渗流浮托力, 本文采用 $\rho_1 g A \pi a^2$ 进行无量纲化; 对水平波浪力矩和渗流倾覆力矩, 本文用 $\rho_1 g \pi A a^3$ 进行无量纲化; 无量纲数 ka 定义为绕射参数。

图 2-4 表明, 与密实墩柱 (对应 $G = 0$) 相比较, 结构表面的透空性将有效减小波浪直接荷载及波浪渗流载荷。图 3 表明随着透空系数的适度增大, 表面波及内波所致渗流浮托力的变化较小, 其中内波浮托力减弱效应略为明显一些。图 4 则反映出在绕射参数 ka 的一定取值范围内, 相对浮托力,

透空系数增大对直接影响结构稳定性的波浪 (特别是表面波浪) 渗流倾覆力矩具有更明显的减弱效应, 当然其减弱程度仍低于结构透空对表面波和内波直接波浪力矩的减弱程度 (图 2), 不过这至少说明结构表面透空不会导致负面的表面波及内波诱导的渗流作用影响。进一步由图 2 和图 4 可见, 当透空系数增至一定值时, 透空系数的变化对水平波浪力矩和渗流倾覆力矩的影响明显趋弱, 这说明圆柱外表面应保持适度透空。

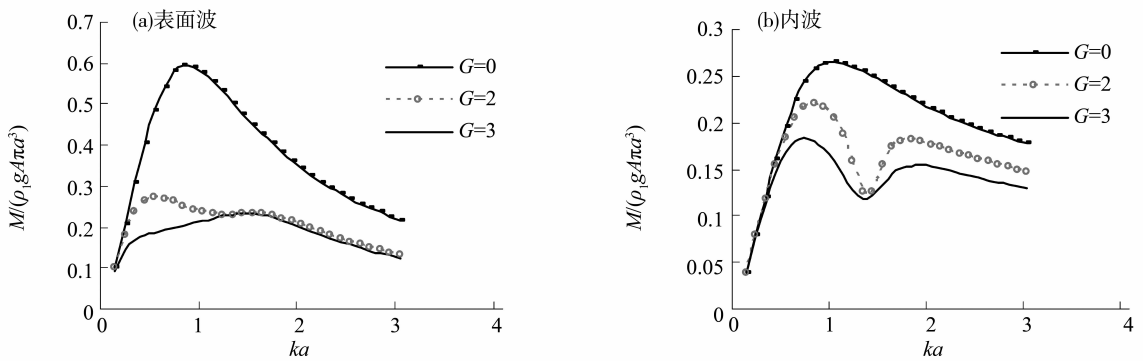


图 2 表面波及内波的最大无量纲水平波浪力矩 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, \lambda = 0.9$)

Fig. 2 Dimensionless surface wave and internal wave moment

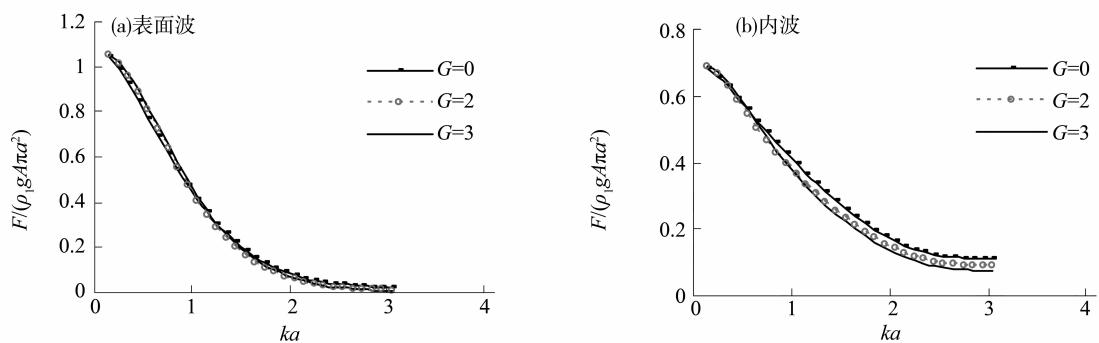


图 3 表面波及内波所致最大无量纲渗流浮托力 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, \lambda = 0.9$)

Fig. 3 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage uplift force

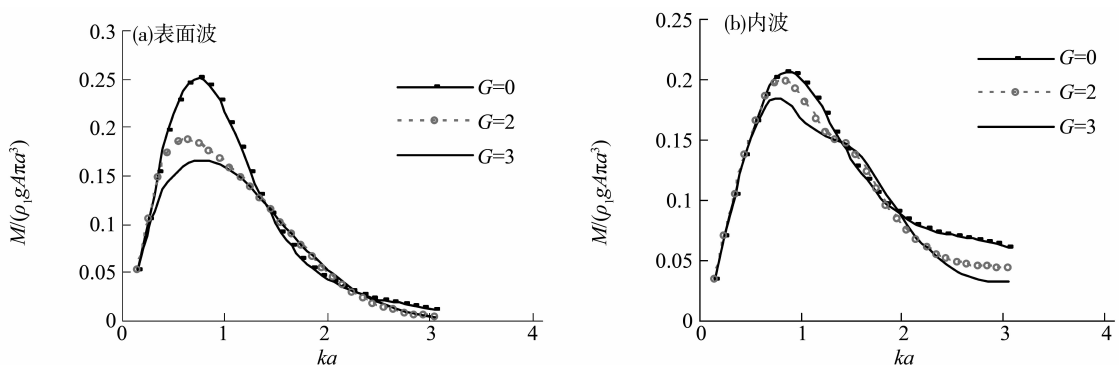


图 4 表面波及内波所致最大无量纲渗流倾覆力矩 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, \lambda = 0.9$)

Fig. 4 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage overturn moment

图 5~7 反映了圆环墩柱内外半径比对波浪载荷及波浪渗流载荷的可能影响。图 5 表明，随着墩柱内外半径比的减小，与密实柱（对应 $b/a = 1$ ）相比，表面波及内波的直接波浪力矩有明显减小。图 6 表明墩柱内外半径比的变化对浮托力影响较弱，相对密实柱而言（ $b/a = 1$ ），圆环柱所受浮托力仍有一定程度减小。图 7 结果说明由表面波及内波所致倾覆力矩随半径比的变化程度明显超过浮

托力变化程度，在 ka 的一定取值范围内，波浪（特别是表面波浪）所致渗流倾覆力矩随半径比减小而减小，但与水平力矩相比，其减弱程度趋弱。此外，随着半径比的减小，波浪力矩及波浪渗流倾覆力矩的减弱效应不再明显（特别是内波，从而说明半径比也可适度取值，以达到结构减载和安全稳定的双重效果。

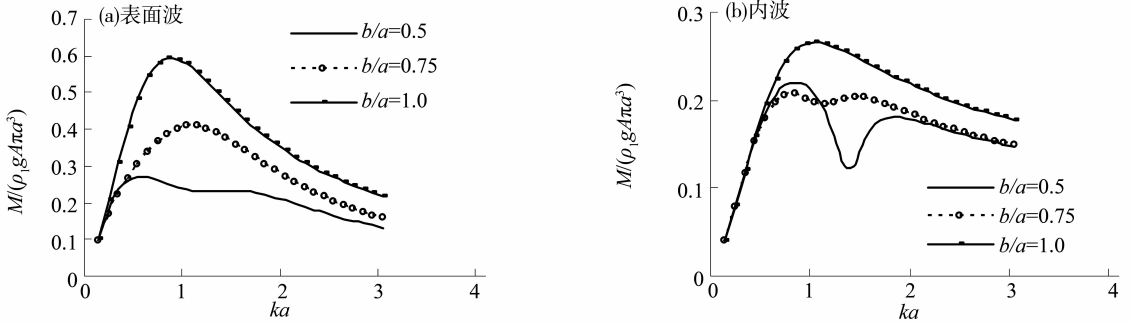


图 5 表面波及内波的最大无量纲水平波浪力矩 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, G = 1, \lambda = 0.9$)

Fig. 5 Dimensionless surface wave and internal wave moment

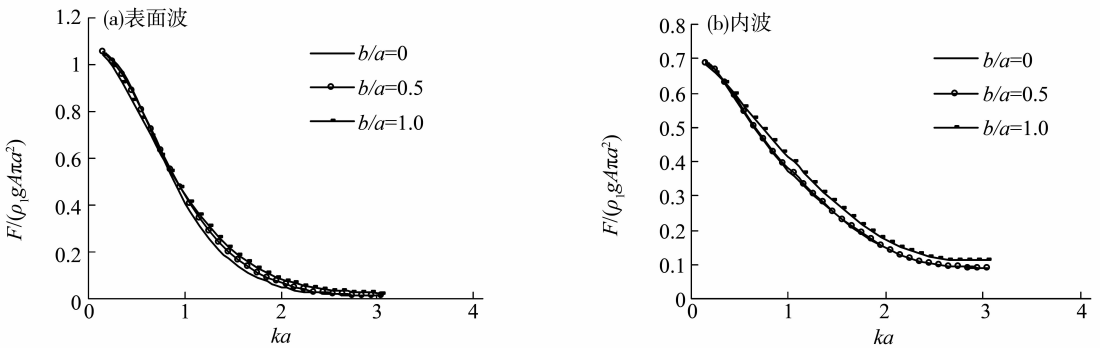


图 6 表面波及内波所致最大无量纲浮托力 ($d = h = 0.75a, h_1/h_2 = 2/3, G = 1, \lambda = 0.9$)

Fig. 6 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage uplift force

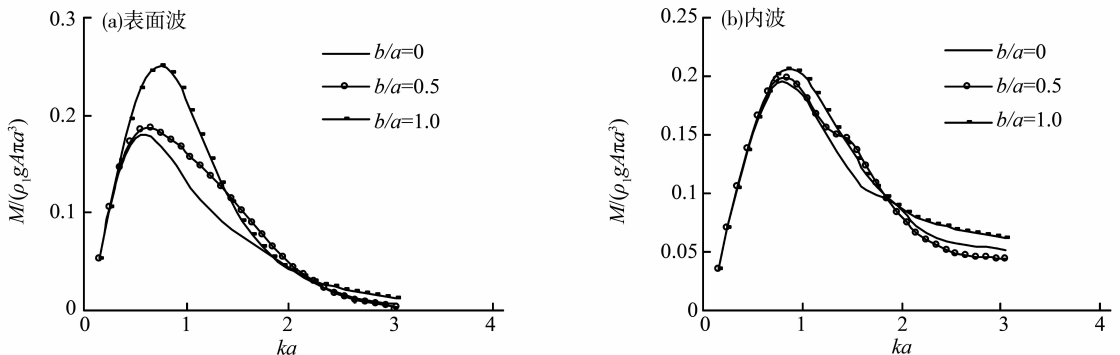


图 7 表面波及内波所致最大无量纲倾覆力矩 ($d = h = 0.75a, h_1/h_2 = 2/3, G = 1, \lambda = 0.9$)

Fig. 7 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage overturn moment

图 8 表明, 透空圆环柱表面波水平波浪力远大于内波波浪力。而对墩柱稳定性影响较大的表面波和内波的水平波浪力矩则较为接近, 说明内波的直接波浪作用不可忽视。图 9 (a) 表明, 表面波及内波所致圆环底部浮托力随绕射参数 ka 的变化形态与水平波浪力的变化形态 (图 8 (a)) 存在较大差别, 即当 $ka < 1$ 时, 表面波浮托力大于内波浮托力, 但当 $ka > 1$ 时, 情况正好相反。而图 9 (b) 的结果则表明表面波及内波所致圆环底部倾覆力矩在变化趋势和幅值大小上都十分接近, 特别当绕射参数 $ka > 0.8$ 时, 内波所致倾覆力矩明显超过表面波对应的作用。从而从渗流作用的角度再次说明内波作用是海工结构设计的一个重要考虑因素。

将图 8 与图 9 进行对比, 还可以看到在相同海

况条件下, 透空圆环墩柱表面波水平波浪力和由表面波所致浮托力可以具有相同量级。而表面波与内波的直接水平力矩与对应的倾覆力矩均具有相同量级。这说明波浪引起的对固立于软基海底结构底部的渗流力可能构成海工固定结构海上作业的一大潜在威胁。在实际工程中, 对海洋内波及波浪渗流作用均需给予足够重视。

图 10 ~ 11 表明二层海中, 上下层流体密度比的变化对透空圆环柱所受表面波及内波所致浮托力和倾覆力矩均有程度相对较小的影响。比较而言, 表面波倾覆力矩随密度比影响最大。整体来说, 随海水密度比的降低, 波浪渗流力趋强。这说明海水层化性变化对波浪渗流作用存在一定影响。当然上、下层流体密度差所导致的最重要的结果是内波的产生。

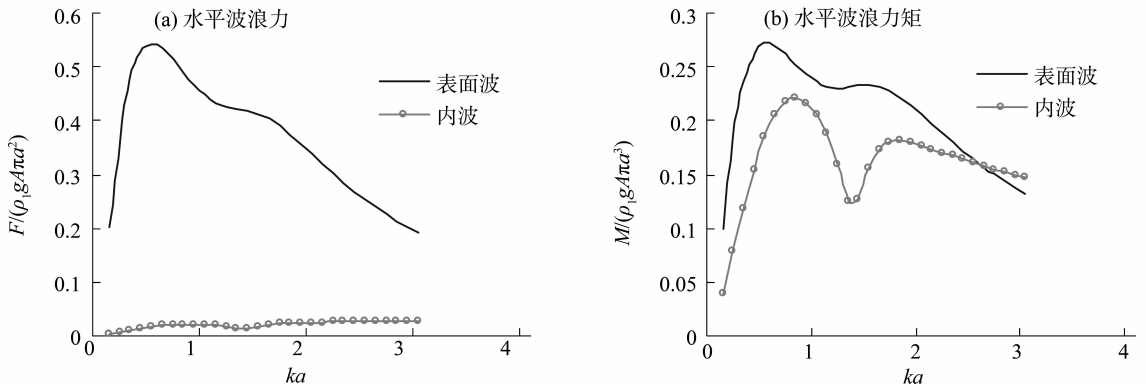


图 8 表面波与内波的最大无量纲水平波浪力 (矩) ($h/a = 1, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, G = 1, \lambda = 0.9$)

Fig. 8 Dimensionless surface wave and internal wave force and moment

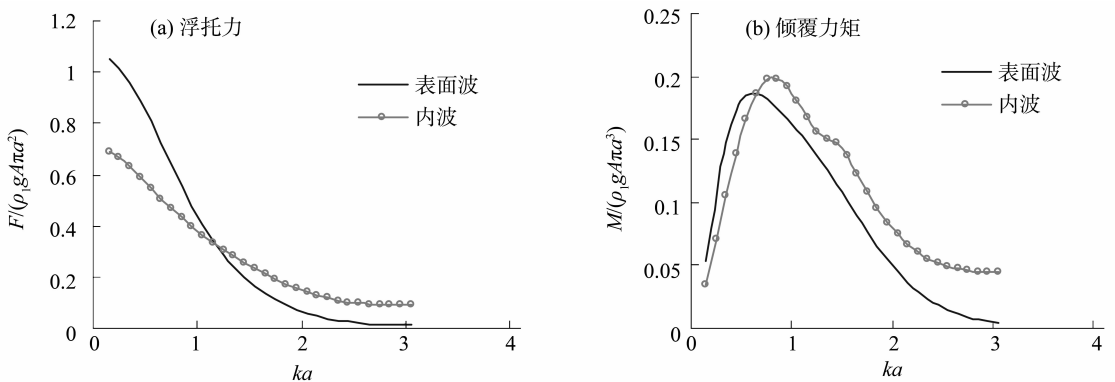


图 9 表面波与内波所致最大无量纲浮托力及倾覆力矩的比较 ($h/a = 1, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, G = 1, \lambda = 0.9$)

Fig. 9 Comparison of surface wave and internal wave-induced seepage uplift force and overturning moment

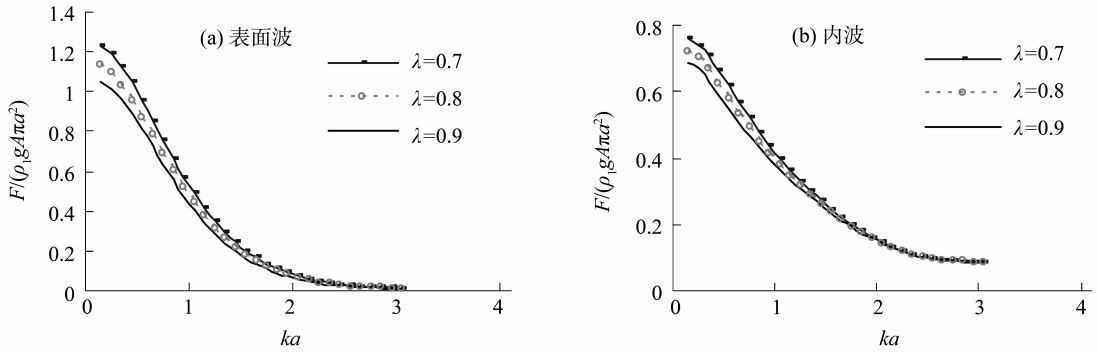


图 10 表面波及内波所致最大无量纲浮托力 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, G = 1$)

Fig. 10 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage uplift force

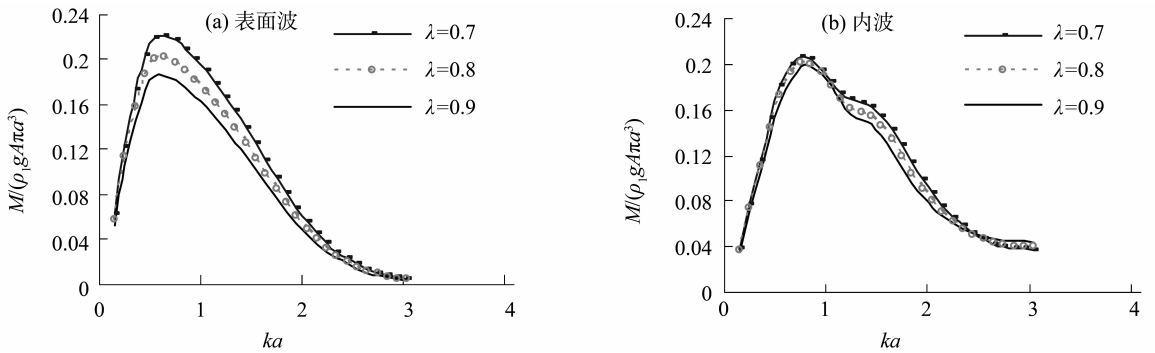


图 11 表面波及内波所致最大无量纲倾覆力矩 ($d = h = a, h_1/h_2 = 2/3, b/a = 0.5, G = 1$)

Fig. 11 Dimensionless surface wave and internal wave - induced seepage overturn moment

4 结 论

本文在波浪引起的渗流作用理论上，引入两层海绕射波浪模式以及透空结构的研究对象，探讨了在复杂海况条件下透空结构波浪渗流力的变化特性和规律。通过给出绕射表面波与内波所致可渗透海床内渗流压力场的解析算式，进而对透空圆环墩柱底部由渗流压力产生的浮托力和倾覆力矩予以了实算。结果表明，在一定条件下，内波波浪渗流倾覆力矩可以超过表面波渗流倾覆力矩，而波浪引起的直接的水平力矩和渗流倾覆力矩量级也可以较为接近，从而说明在软基海底孤立墩柱结构的设计中对内波的渗流作用应尤加关注。值得指出的是，对墩柱外表面布孔实施透空可以较大程度的减弱水平力矩，同时一定程度减弱波浪倾覆力矩，这说明无论对于表面波还是内波，结构表面透空对渗流作用均保持正面影响。进一步随着圆环墩柱内外半径比减小，水平力矩和渗流倾覆力矩均出现程度不一的减小。通过对半径比的适当取值，可以达到墩柱减载和安全稳定的双重效果。最后要指出一点的是墩柱表面透空度及墩柱半径比变化对波浪渗流浮托力的影响是相对轻微的。

参考文献：

- [1] 吴建华, 吴秀恒, 李世漠. 大尺度物体在层化海洋中的波浪绕射和散射理论(IV)本征函数展开法[J]. 水动力学研究与进展, 1991, 6(3): 46 - 53.
- [2] 尤云祥, 朱伟, 缪国平. 分层海洋中大直径桩柱的波浪力[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1181 - 1185
- [3] YOU Yunxiang, SHI Qiang, MIAO Guoping. The radiation and diffraction of water waves by a bottom-mounted circular cylinder in a two-layer fluid [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(1): 1 - 8.
- [4] 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.
- [5] 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(2): 76 - 80.
- [6] WILLIAMS A N, LI W, WANG K H. Water wave interaction with a floating porous cylinder [J]. Ocean Engineering, 2000, 27(1): 1 - 28.
- [7] 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.

- synthetic mullite[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 171: 414 - 416.
- [3] 唐强, 张纯祥. 热释光和光释光发光谱的测量[J]. 核技术, 2009, 27(3): 308 - 312.
- [4] KUHN R, TRAUTMANN T, SINGHVI A K, et al. A study of thermoluminescence emission spectra and optical stimulation spectra of quartz from different provenances[J]. Radiation Measurements, 2000, 32: 653 - 657.
- [5] 刘泽华, 谭凯旋, 周泉宇. 芙蓉石的三维热释光谱[J]. 核技术, 2009, 32: 82 - 86.
- [6] ITOH C, TANIMURA K, ITOH N. Optical studies of self-trapped excitons in SiO₂ [J]. Journal of Physics C, 1988, 21: 4693 - 4702.
- [7] STEVENS KALCEFF M A, PHILLIPS M R. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz[J]. Physics Review B, 1995, 52: 3122 - 3132.
- [8] RINK W J, RENDELL H, MARSLIA E A, et al. Thermoluminescence spectra of igneous quartz and hydrothermal vein quartz [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1993, 20: 353 - 361.
- [9] FUCHS H, GOËTZE J. Origin of volcanic agate-evidence from cathode luminescence, EPR and geo-chemical studies[C] // International Conference on Cathodo luminescence and Related Techniques in Geosciences and Geomaterials, Nancy, France, Abstracts, 1996: 49 - 50.
- [10] SIEGEL G H, MARRONE M J. Photoluminescence in as-drawn and irradiated silica optical fibers: An assessment of the role of non bridging oxygen defect centres [J]. Non-Cryst. Solids, 1981, 45: 235 - 247.
- [11] ZHANG Q, YANG B, WOOD R A, et al. Thermoluminescence spectra of amethyst [J]. Radiation Measurements, 1994, 23: 423 - 431.
- [12] LUFF B J, TOWNSEND P D. A novel high sensitivity TL spectrometer[J]. Measurement Science Technology, 1992, 3: 65 - 71.
- [13] LUFF B J, TOWNSEND P D. High sensitivity thermoluminescence spectrometer[J]. Measurements in Science Technology, 1993, 4: 65 - 71.
- [14] PRESCOTT J R, FOX P J, ROBERTSON G B, et al. Three-dimensional spectral studies of the bleaching of the thermoluminescence of feldspars [J]. Radiation Measurements, 1994, 23: 367 - 375.
- [15] PRESCOTT J R, SCHOLEFIELD R B, FRANKLIN A D. Three-dimensional thermoluminescence spectra and their application in the study of some sedimentary quartz[J]. Scanning Microscopy, 1995(Sup): 9.
- [16] KIRSH Y, SHOVAL S, TOWNSEND P D. Kinetics and emission spectra of TL in the feldspars albite and microcline[J]. Physica Status Solidi (a), 1987(a), 101: 253 - 262.
- [17] KIRSH Y, TOWNSEND P D, SHOVAL S. Local transitions and charge transport in thermoluminescence of calcite[J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1987(b), 13: 115 - 119.

(上接第 13 页)

- [8] 邱大洪. 波浪渗流力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 193 - 203.
- [9] DURAND T J P, MONKMEYER P L. Wave-induced seepage effects on a vertical cylinder [C]. Proceeding of 17th Coastal Engineering, 1980: 1781 - 1798.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 邱大洪, 邹志利. 双墩柱波浪渗流[J]. 大连理工大学学报, 1993, 33(2): 232 - 237.
- [13] 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.
- [14] 邱大洪, 臧军. 群墩上的波浪浮托力[J]. 中国港湾建设, 1995(5): 8 - 12.
- [15] 曾昭鑫, 黄华, 詹杰民, 等. 固立于可渗透弹性海床上透空型圆柱的波浪渗流[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 327 - 330.