

波浪对圆柱外接圆弧型防波堤绕射的解析计算

叶伟峰, 黄 华, 詹杰民, 张 敖

(中山大学 应用力学与工程系, 广州 510006)

摘 要:在微幅波绕射理论的基础上,使用特征函数展开法,推导了圆柱外接圆弧型防波堤复合结构的水波绕射的解析解,并据此计算了该结构所受到的波浪载荷以及绕射波面分布。计算结果表明:与单一圆柱相比,外接圆弧型防波堤的存在可明显降低作用于圆柱的波浪载荷和圆柱表面的波浪爬高;采用外接堤表面密实或透空而内圆柱表面透空的结构形式可以取得圆柱防浪的较佳效果;结构透空系数、波浪入射角度、外接堤张角、外堤半径与水深比、水深与波长比等因素的变化对绕射波浪作用均存在一定影响。

关键词:水波绕射;特征函数展开法;圆柱外接圆弧型防波堤复合结构;波浪力;绕射波面;波浪爬高

中图分类号: O352 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-5485(2020)03-0070-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analytical Calculation of Wave Diffraction by a Circular Cylinder Circumscribed Arc-shaped Breakwater

YE Wei-feng, HUANG Hua, ZHAN Jie-min, ZHANG Ao

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The analytical solution to the wave diffraction of compound structure of a circular cylinder circumscribed arc-shaped breakwater is derived using the eigenfunction expansion approach based on the theory of small-amplitude wave diffraction. Accordingly, the wave loads on the structure and the diffracted wave free surfaces are calculated. The calculation evaluating results show that the circumscribed arc-shaped breakwater, compared with single cylinder, could obviously reduce the direct wave loads on cylinder and the wave runup around the surface of cylinder. The structure with solid or porous outer breakwater and porous inner cylinder could get good wave prevention effect. The variations of porous coefficient of structure, incident wave angle, outer breakwater central angle, outer breakwater radius and water depth ratio, water depth and wave length ratio have influence on diffracted wave effects.

Key words: wave diffraction; eigenfunction expansion approach; compound porous structure of a circular cylinder circumscribed arc-shaped breakwater; wave force; diffracted wave free surface; wave runup

1 研究背景

水工建筑物的波浪要素研究与计算十分重要^[1]。大尺度直立圆柱结构广泛应用于近海工程的各种水工建筑中,因而有必要对其与波浪的相互作用问题展开深入研究。MacCamy 和 Fuchs^[2]最早

给出了单一直立圆柱波浪绕射问题的解析解。Garrett^[3]进而解析研究了圆形浮筒的波浪绕射和辐射问题。针对结构物表面布孔能有效降低波浪作用的特性,Chwang 等^[4]论述了对应透空结构的波浪作用机制问题。Williams 等^[5-6]分别解析研究了透空浮筒和透空直柱群的波浪绕射效应。

防波堤是用于阻断波浪直接作用以保护海工设

施的重要水工结构,它具有广泛多样的结构形式,包括直墙式防波堤、斜坡式防波堤、T形或V形防波堤以及潜堤与气幕防波堤^[7-8]等,其中圆弧形防波堤为常见的形式之一。工程上可以外置圆弧形防波堤以有效减弱波浪对内部圆柱的直接作用。Darwiche等^[9]与Williams等^[10]分别解析研究了2种透空圆筒型防波堤的波浪绕射问题。Wang等^[11]对外筒开孔的双筒柱的波浪绕射问题进行了理论分析。李玉成等^[12]解析计算了波浪与外壁开孔双筒柱群的相互作用。楚玉川等^[13]对单一圆弧形贯底式薄壁防波堤的绕射波浪力进行了理论计算。Duan等^[14]解析研究了波浪对圆弧形浮式多孔介质防波堤的作用。

本文选取圆柱外接圆弧形防波堤这一复合透空结构为解析研究对象,通过对特征函数展开法的推广应用,对该结构的Airy微幅波浪绕射问题进行解析求解与计算。本文相关工作是对原有的单一圆弧形堤问题和仅有的双圆筒结构问题的解析方法的重要拓展,同时也对双圆筒结构问题的已有结果进行了较好的验证。

2 波浪对透空型圆柱外接圆弧防波堤结构绕射问题的解析解

如图1所示,在均匀水深为 d 的海域中,设置有半径为 b 的圆柱结构,其外侧接有一半径为 a 的圆弧形防波堤结构。外层堤透空系数为 G_1 ,内圆柱透

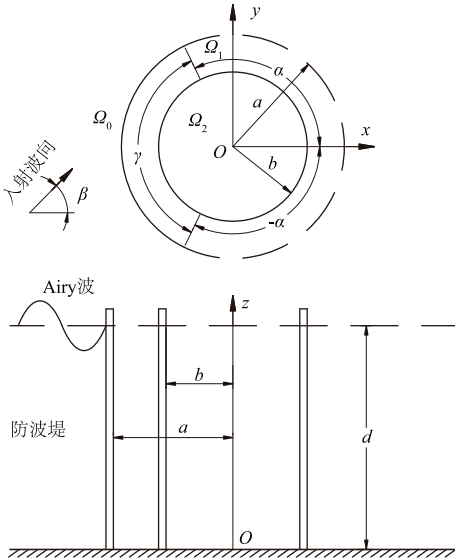


图1 圆柱外接圆弧形防波堤的复合透空结构

Fig.1 Compound porous structure composed of a circular cylinder and its circumscribed arc-shaped breakwater

空系数为 G_2 ,透空系数为0则表示为密实结构。建立坐标系 $Oxyz$ (即坐标系 $Or\theta z$),令 Oxy 平面位于水底,原点位于内圆柱底圆心处,设置 Ox 轴使外层防波堤对称位于 $\theta=\alpha$ 至 $\theta=2\pi-\alpha$ 间,外层防波堤相应的圆心角(防波堤张角)为 $\gamma=2\pi-2\alpha$, Oz 轴竖直向上。设入射波为Airy波,波高为 H ,波数为 k ,圆频率为 ω ,入射角(与 Ox 轴正向夹角)为 β 。分别以 a 和 b 为半径划一同心圆环柱面,流场划分为圆柱外流区 Ω_0 和圆柱内流区 Ω_1 和 Ω_2 。

在重力波的研究当中,海水黏性可以忽略,通常视为无黏不可压流体且运动无旋。设对应流域 Ω_j 的水波总波势为 $\Phi^{(j)} = \Phi_i + \Phi_s^{(j)} = \text{Re}(\varphi^{(j)})$ ($j=0,1,2$),其中 Φ_i 、 Φ_s 分别为入射势和散射势,则对应水波绕射问题的边值问题提法为:

$$\nabla^2 \varphi^{(j)} = \nabla^2 \varphi_s^{(j)} = 0, j=0,1,2 \quad ; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(j)}}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_s^{(j)}}{\partial z} = 0, z=0 \quad ; \quad (2)$$

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

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left(\frac{\partial \varphi_s^{(0)}}{\partial r} - ik \varphi_s^{(0)} \right) = 0 \quad . \quad (4)$$

式中 i 为虚数单位。式(4)为无穷远处的Sommerfeld条件。另 $\varphi^{(j)}$ 须满足外层防波堤与内柱透空或密实表面条件。线性平面入射波势可表示为:

$$\Phi_i = \text{Re}(\varphi_i) \quad ,$$

$$\varphi_i = -\frac{igH}{2\omega} e^{-i\omega t} \frac{\cosh kz}{\cosh kd} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \beta_n J_n(kr) \cos n\theta \cos n\beta + \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n J_n(kr) \sin n\theta \sin n\beta \right] \quad . \quad (5)$$

式中 $J_n(x)$ 为 n 阶第一类Bessel函数。根据微幅波浪绕射理论,由特征函数展开法,可取:

$$\varphi^{(0)} = \varphi_i + \varphi_s^{(0)} = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh kz}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad .$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{ [\beta_n \cos n\beta J_n(kr) + A_n^{(0)} H_n^{(1)}(kr)] \cos n\theta + [\beta_n \sin n\beta J_n(kr) + B_n^{(0)} H_n^{(1)}(kr)] \sin n\theta \} \quad ; \quad (6)$$

$$\varphi^{(1)} = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh kz}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad .$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{ [A_n^{(1)} \cos n\theta + B_n^{(1)} \sin n\theta] J_n(kr) + [C_n^{(1)} \cos n\theta + D_n^{(1)} \sin n\theta] H_n^{(1)}(kr) \} \quad ; \quad (7)$$

$$\varphi^{(2)} = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh kz}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad .$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} [A_n^{(2)} \cos n\theta + B_n^{(2)} \sin n\theta] J_n(kr) \quad . \quad (8)$$

式中: $H_n^{(1)}$ 为第一类 n 阶 Hankle 函数; $A_n^{(0)}$ 、 $B_n^{(0)}$ 、 $A_n^{(1)}$ 、 $B_n^{(1)}$ 、 $A_n^{(2)}$ 、 $B_n^{(2)}$ 、 $C_n^{(1)}$ 和 $D_n^{(1)}$ 均为待求系数, 且取定 $B_0^{(0)} = B_0^{(1)} = D_0^{(1)} = B_0^{(2)} = 0$ 。

将外层堤前后侧两流域径向分界面的非物面上压力和速度连续条件以及透空堤面条件联立写为:

$$\varphi^{(0)} = \varphi^{(1)}, r = a, 0 \leq \theta \leq \alpha, 2\pi - \alpha \leq \theta \leq 2\pi; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial r}, r = a, 0 \leq \theta \leq 2\pi; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial r} = \frac{\gamma_1 \rho}{\mu} \left(\frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial t} - \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial t} \right),$$

$$r = a, \alpha \leq \theta \leq 2\pi - \alpha. \quad (11)$$

式中 ρ 、 γ_1 及 μ 分别为海水密度、具有长度量纲的外层防波堤材料系数及流体黏性系数。将式(6)和式(7)代入式(10), 分别可得:

$$\beta_n \cos n \beta J'_n(ka) + A_n^{(0)} H_n^{(1)'}(ka) =$$

$$A_n^{(1)} J'_n(ka) + C_n^{(1)} H_n^{(1)'}(ka), n = 0, 1, \dots; \quad (12)$$

$$\beta_n \sin n \beta J'_n(ka) + B_n^{(0)} H_n^{(1)'}(ka) =$$

$$B_n^{(1)} J'_n(ka) + D_n^{(1)} H_n^{(1)'}(ka), n = 1, 2, \dots. \quad (13)$$

再将速度势式(6)和式(7)分别代入内外流域圆柱分界面条件式(9)和式(11), 并定义函数

$$f(\theta) = \begin{cases} f_1(\theta), 0 \leq \theta < \alpha, 2\pi - \alpha < \theta \leq 2\pi; \\ f_2(\theta), \alpha \leq \theta \leq 2\pi - \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

且 $f(\theta) = 0$ 。其中, 将式(6)和式(7)代入式(9)可得

$$f_1(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ [\beta_n \cos n \beta J_n(ka) + A_n^{(0)} H_n^{(1)}(ka)] \cos n \theta +$$

$$[\beta_n \sin n \beta J_n(ka) + B_n^{(0)} H_n^{(1)}(ka)] \sin n \theta \} -$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{ [A_n^{(1)} \cos n \theta + B_n^{(1)} \sin n \theta] J_n(ka) +$$

$$[C_n^{(1)} \cos n \theta + D_n^{(1)} \sin n \theta] H_n^{(1)}(ka) \} = 0, \quad (15)$$

$$0 \leq \theta \leq \alpha, 2\pi - \alpha \leq \theta \leq 2\pi.$$

将式(6)和式(7)代入式(11)可得

$$f_2(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ [A_n^{(1)} \cos n \theta + B_n^{(1)} \sin n \theta] k J'_n(ka) +$$

$$[C_n^{(1)} \cos n \theta + D_n^{(1)} \sin n \theta] k H_n^{(1)'}(ka) \} -$$

$$i G_1 \sum_{n=0}^{\infty} \{ [A_n^{(1)} \cos n \theta + B_n^{(1)} \sin n \theta] k J_n(ka) +$$

$$[C_n^{(1)} \cos n \theta + D_n^{(1)} \sin n \theta] k H_n^{(1)}(ka) \} +$$

$$i G_1 \sum_{n=0}^{\infty} \{ [\beta_n \cos n \beta k J_n(ka) + A_n^{(0)} k H_n^{(1)}(ka)] \cos n \theta +$$

$$[\beta_n \sin n \beta k J_n(ka) + B_n^{(0)} k H_n^{(1)}(ka)] \sin n \theta \} = 0,$$

$$\alpha \leq \theta \leq 2\pi - \alpha. \quad (16)$$

式中 G_1 为外层防波堤径向表面的透空系数, $G_1 = \frac{\gamma_1 \rho \omega}{\mu k}$ 。

将 $f(\theta)$ 在 $0 \sim 2\pi$ 上展开为傅氏级数, 即有

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos m \theta + b_m \sin m \theta) = 0. \quad (17)$$

由 $a_m = b_m = 0$ 可得:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \beta_n \cos n \beta J_n(ka) [I_{nm}^{(1)} + i G_1 k I_{nm}^{(2)}] +$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(0)} H_n^{(1)}(ka) [I_{nm}^{(1)} + i G_1 k I_{nm}^{(2)}] +$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} [k J'_n(ka) I_{nm}^{(2)} - J_n(ka) (I_{nm}^{(1)} + i G_1 k I_{nm}^{(2)})] +$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} C_n^{(1)} [k H_n^{(1)'}(ka) I_{nm}^{(2)} -$$

$$H_n^{(1)}(ka) (I_{nm}^{(1)} + i G_1 k I_{nm}^{(2)})] = 0, m = 0, 1, \dots; \quad (18)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sin n \beta J_n(ka) [I_{nm}^{(3)} + i G_1 k I_{nm}^{(4)}] +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} B_n^{(0)} H_n^{(1)}(ka) [I_{nm}^{(3)} + i G_1 k I_{nm}^{(4)}] +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} B_n^{(1)} [k J'_n(ka) I_{nm}^{(4)} - J_n(ka) (I_{nm}^{(3)} + i G_1 k I_{nm}^{(4)})] +$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} D_n^{(1)} [k H_n^{(1)'}(ka) I_{nm}^{(4)} -$$

$$H_n^{(1)}(ka) (I_{nm}^{(3)} + i G_1 k I_{nm}^{(4)})] = 0, m = 1, 2, \dots. \quad (19)$$

其中:

$$\begin{cases} I_{nm}^{(1)} = \int_{-\alpha}^{\alpha} \cos m \theta \cos n \theta d\theta, \\ I_{nm}^{(2)} = \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha_1} \cos m \theta \cos n \theta d\theta, \\ I_{nm}^{(3)} = \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin m \theta \sin n \theta d\theta, \\ I_{nm}^{(4)} = \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha_1} \sin m \theta \sin n \theta d\theta. \end{cases} \quad (20)$$

进一步利用内圆柱透空物面条件, 即

$$\frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial r} = \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial r} = \frac{\gamma_2 \rho}{\mu} \left(\frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial t} - \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial t} \right), r = b. \quad (21)$$

式中 γ_2 为具有长度量纲的内圆柱材料系数。将式(7)和式(8)代入式(21)的第一等式, 可得:

$$A_n^{(1)} J'_n(kb) + C_n^{(1)} H_n^{(1)'}(kb) = A_n^{(2)} J'_n(kb),$$

$$n = 0, 1, \dots; \quad (22)$$

$$B_n^{(1)} J'_n(kb) + D_n^{(1)} H_n^{(1)'}(kb) = B_n^{(2)} J'_n(kb),$$

$$n = 1, 2, \dots. \quad (23)$$

再将速度势式(7)和式(8)代入式(21)的第二等式,并据此定义函数 $g(\theta)$,可得

$$g(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^{(2)} \cos n\theta + B_n^{(2)} \sin n\theta] k J'_n(kb) - iG_2 \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^{(2)} \cos n\theta + B_n^{(2)} \sin n\theta] k J_n(kb) + iG_2 \sum_{n=0}^{\infty} \{ [A_n^{(1)} \cos n\theta + B_n^{(1)} \sin n\theta] k J_n(kb) + [C_n^{(1)} \cos n\theta + D_n^{(1)} \sin n\theta] k H_n^{(1)}(kb) \} = 0, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (24)$$

式中 G_2 为内圆柱径向表面的透空系数, $G_2 = \frac{\gamma_2 \rho \omega}{\mu k}$ 。

将 $g(\theta)$ 在 $0 \sim 2\pi$ 上展开为傅氏级数,即有

$$g(\theta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \cos m\theta + B_m \sin m\theta) = 0. \quad (25)$$

由 $A_m = B_m = 0$ 可得:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} iG_2 k J_n(kb) \hat{I}_{nm}^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(2)} [k J'_n(kb) - iG_2 k J_n(kb)] \hat{I}_{nm}^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n^{(1)} iG_2 k H_n^{(1)}(kb) \hat{I}_{nm}^{(2)} = 0, \quad m = 0, 1, \dots; \quad (26)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} B_n^{(1)} iG_2 k J_n(kb) \hat{I}_{nm}^{(4)} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n^{(2)} [k J'_n(kb) - iG_2 k J_n(kb)] \hat{I}_{nm}^{(4)} + \sum_{n=0}^{\infty} D_n^{(1)} iG_2 k H_n^{(1)}(kb) \hat{I}_{nm}^{(4)} = 0, \quad m = 1, 2, \dots. \quad (27)$$

其中

$$\hat{I}_{nm}^{(2)} = \int_0^{2\pi} \cos m\theta \cos n\theta d\theta, \quad \hat{I}_{nm}^{(4)} = \int_0^{2\pi} \sin m\theta \sin n\theta d\theta. \quad (28)$$

至此,式(12)、式(13)、式(18)、式(19)、式(22)、式(23)、式(26)和式(27)构成了待定系数 $A_n^{(0)}$ 、 $B_n^{(0)}$ 、 $A_n^{(1)}$ 、 $B_n^{(1)}$ 、 $A_n^{(2)}$ 、 $B_n^{(2)}$ 、 $C_n^{(1)}$ 和 $D_n^{(1)}$ 的完备联立待数方程组,其中已设定 $B_0^{(0)} = B_0^{(1)} = D_0^{(1)} = B_0^{(2)} = 0$ 。实算中进行适度有限维运算即可满足计算精度要求。

对应区域 Ω_j 的绕射波面 $\eta^{(j)}$ 为

$$\eta^{(j)} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^{(j)}}{\partial t} \Big|_{z=d}, \quad j = 0, 1, 2. \quad (29)$$

对应区域 Ω_j 的压力分布 $P^{(j)}$ 为

$$P^{(j)} = -\rho \frac{\partial \Phi^{(j)}}{\partial t} = \text{Re}(p^{(j)}), \quad j = 0, 1, 2. \quad (30)$$

据此可得作用于外层防波堤的水平波浪力和力矩分别为:

$$F_{x1} = -\int_0^d dz \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [P^{(0)} - P^{(1)}] \Big|_{r=a} a \cos \theta d\theta; \quad (31)$$

$$F_{y1} = -\int_0^d dz \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [P^{(0)} - P^{(1)}] \Big|_{r=a} a \sin \theta d\theta; \quad (32)$$

$$M_{x1} = -\int_0^d z dz \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [P^{(0)} - P^{(1)}] \Big|_{r=a} a \cos \theta d\theta; \quad (33)$$

$$M_{y1} = -\int_0^d z dz \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [P^{(0)} - P^{(1)}] \Big|_{r=a} a \sin \theta d\theta. \quad (34)$$

式中: F_{x1} 和 F_{y1} 分别为沿 Ox 轴和 Oy 轴的水平波浪力; M_{x1} 和 M_{y1} 分别为绕 Oy 轴和 Ox 轴的水平波浪力矩。相应的外层防波堤所受到的总波浪力 F_1 和力矩 M_1 分别为

$$F_1 = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2}, \quad M_1 = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2}. \quad (35)$$

作用于内圆柱上的水平波浪力和力矩分别为:

$$F_{x2} = -\int_0^d dz \int_0^{2\pi} [P^{(1)} - P^{(2)}] \Big|_{r=b} b \cos \theta d\theta; \quad (36)$$

$$F_{y2} = -\int_0^d dz \int_0^{2\pi} [P^{(1)} - P^{(2)}] \Big|_{r=b} b \sin \theta d\theta; \quad (37)$$

$$M_{x2} = -\int_0^d z dz \int_0^{2\pi} [P^{(1)} - P^{(2)}] \Big|_{r=b} b \cos \theta d\theta; \quad (38)$$

$$M_{y2} = -\int_0^d z dz \int_0^{2\pi} [P^{(1)} - P^{(2)}] \Big|_{r=b} b \sin \theta d\theta. \quad (39)$$

式中: F_{x2} 和 F_{y2} 分别为沿 Ox 轴和 Oy 轴的水平波浪力; M_{x2} 和 M_{y2} 分别为绕 Oy 轴和 Ox 轴的水平波浪力矩。相应的内圆柱所受到的总波浪力 F_2 和力矩 M_2 分别为

$$F_2 = \sqrt{F_{x2}^2 + F_{y2}^2}, \quad M_2 = \sqrt{M_{x2}^2 + M_{y2}^2}. \quad (40)$$

3 算例与分析

3.1 波浪力的计算

在以下各波浪载荷的计算结果图中,符号 $F_1/[\rho g(H/2)ad]$ 和 $F_2/[\rho g(H/2)bd]$ 分别表示外层防波堤与内圆柱所受的无量纲波浪力幅值, $M_1/[\rho g(H/2)ad^2]$ 和 $M_2/[\rho g(H/2)bd^2]$ 分别表示外层防波堤与内圆柱所受的无量纲波浪力矩幅值。

图2给出了本文与文献[6]关于透空圆环柱结构(即圆柱外接 360° 圆弧防波堤结构)的水波绕射理论解的对比结果,两者完全吻合,从而验证了本文关于圆柱外接任意张角圆弧防波堤水波绕射解析解的正确性。

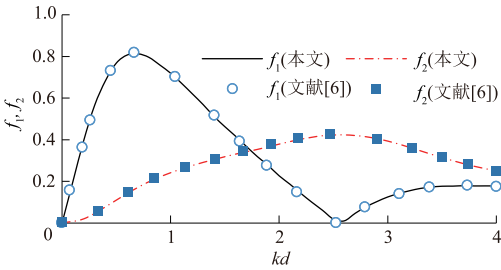


图2 透空圆环柱的最大无量纲波浪力 f_1 和 f_2 随 kd 的变化 ($G_1=1, G_2=0, d/a=3/2, b/a=0.2, \gamma=360^\circ$)

Fig.2 Variation of maximum dimensionless wave force on a vertical concentric porous cylinder versus kd ($G_1=1, G_2=0, d/a=3/2, b/a=0.2, \gamma=360^\circ$)

图3 为外接圆弧防波堤之圆柱与单圆柱所受最大无量纲波浪力和波浪力矩的比较,其中单圆柱与外接圆弧堤之圆柱的圆心和半径均相同。结果表明:外接圆弧堤之圆柱所受的无量纲波浪力和力矩幅值明显低于单圆柱的对应值,说明外置透空圆弧防波堤可以明显减弱被保护墩柱所受到的波浪作用,同时由于防波堤本身透空,波浪对外接防波堤的载荷也可相应减小。考虑无量纲波浪力和力矩幅值随各参数的变化趋势基本一致,以下波浪载荷分析中将主要针对最大无量纲波浪力进行。

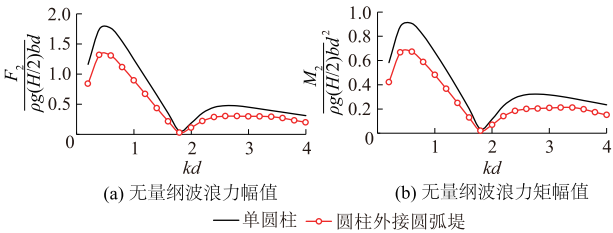


图3 外接圆弧堤之圆柱与单圆柱的波浪载荷比较 ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

Fig.3 Comparison of wave loads between circular cylinder circumscribed arc-shaped breakwater and single circular cylinder breakwater ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

图4 为4种不同透空形式下圆柱外接圆弧堤的最大无量纲波浪力的变化形态。透空形式包括内柱外堤均密实($G_1=G_2=0$)、外堤密实内柱透空($G_1=0, G_2=1$)、外堤透空内柱密实($G_1=1, G_2=0$)以及内柱外堤均透空($G_1=G_2=1$)4种。结果表明:采用外堤与内柱均密实($G_1=G_2=0$)形式将导致在较小的参数 kd 处(浅水区)外堤与内柱均出现陡增的波浪力峰值,显然该情形既不利于对内柱的保护,也不利于外堤的减载;采用外堤透空内柱密实($G_1=1, G_2=0$)形式或内外结构均透空($G_1=G_2=1$)的形式可以有效降低外堤的承载,然而若内柱密实将增大内柱的波浪承载;采用外堤密实内柱透空($G_1=0, G_2=1$)形式或内外结构均透空形式,能有效降低内

柱的波浪承载,但外堤密实将增大外堤的波浪承载。综合而言,当圆柱需保持密实侧面形式时,外堤宜采用适度透空形式,以避免载荷峰值突增现象的出现。当内圆柱侧面可以透空时,则宜采用内外结构均透空形式,其中外堤的透空对透空内柱的波载影响不大,却可明显降低外堤的波载。

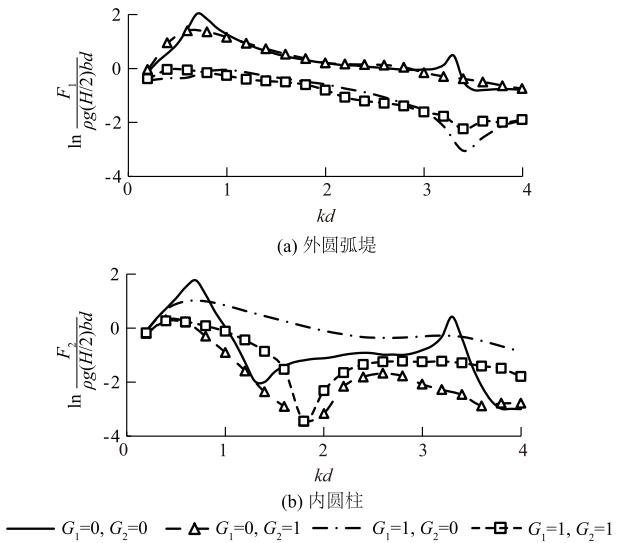


图4 不同透空形式下圆柱与其外接堤的最大无量纲波浪力($\beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

Fig.4 Maximum dimensionless wave force on a circular cylinder and its circumscribed breakwater with different porous structure forms ($\beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

图5 为不同透空系数 G 下圆柱与其外接圆弧堤结构的最大无量纲波浪力随参数 kd 的变化趋势,

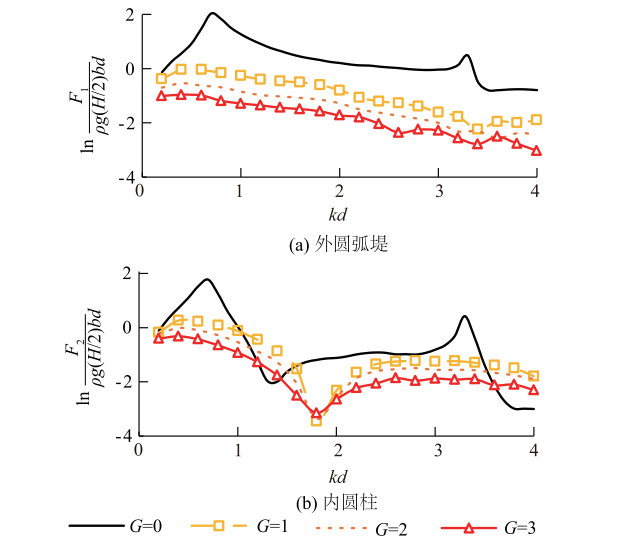


图5 不同透空系数下圆柱与其外接堤的最大无量纲波浪力($\beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

Fig.5 Maximum dimensionless wave force on a circular cylinder and its circumscribed breakwater at different porous coefficients ($\beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

其中对外堤内柱取相同透空系数,即 $G_1 = G_2 = G$ 。结果表明:外堤与内柱同时透空将明显减小波浪对二种结构的直接作用。随透空系数的不断增大,外堤与内柱的波浪力幅值的下降趋势明显趋缓,说明在实际工程中仅需对复合结构进行适度透空。

图 6 为不同波浪入射角 β 下圆柱与其外接圆弧堤结构的最大无量纲波浪力随参数 kd 的变化趋势。由图 6 可见,外堤的无量纲波浪力幅值整体上随波浪入射角度的增加而减小,水波正入射下($\beta=0$)对应波浪力幅值的最大值。内圆柱的无量纲波浪力幅值随波浪入射角度的增加而略微增加,相对水波正入射($\beta=0$),斜入射下(例如 $\beta=\pi/4$)外圆弧堤对内圆柱的正面掩护范围变小,因而引起圆柱的波浪力幅值小幅增大,其中在 kd 较小处(浅水区)更为明显。

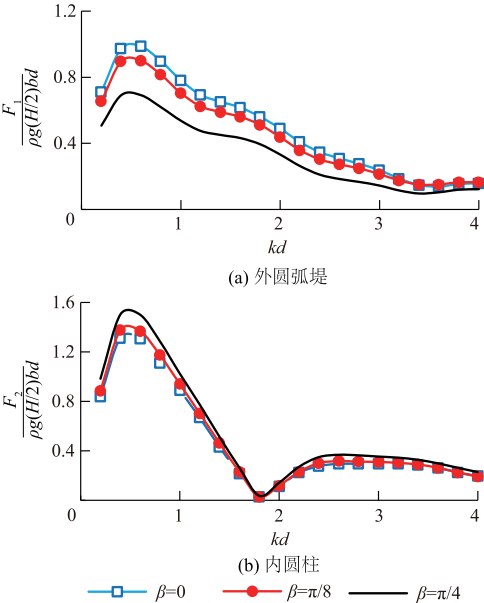


图 6 不同入射角下圆柱与其外接堤的最大无量纲波浪力 ($G_1=1, G_2=1, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

Fig. 6 Maximum dimensionless wave force on a circular cylinder and its circumscribed breakwater at different incident wave angles ($G_1=1, G_2=1, d/a=0.5, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

图 7 为不同水深外径比 d/a 下(由于 b/a 为定值, d/a 与水深内径比 d/b 等价)圆柱与其外接圆弧堤结构的最大无量纲波浪力随参数 kd 的变化趋势。由图 7 可见,当 kd 较小时($kd<0.8$),外圆弧堤和内圆柱的无量纲波浪力幅值均随水深外径比的增加而增加,而在 kd 的其它取值范围变化趋势不一。

图 8 为不同外圆弧堤张角 γ 下圆柱与外堤的最大无量纲波浪力随 kd 的变化趋势。由图 8 可知,当 $kd<2.5$ 时,选取较小的外圆弧堤张角可使外堤的无量纲波浪力幅值有所减小;而当 $kd<1$ 时,选取较小的外圆弧堤张角将导致内圆柱的无量纲波浪力幅值略

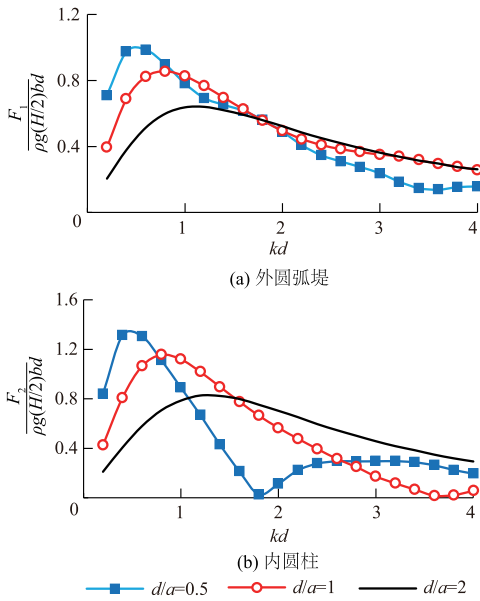


图 7 不同水深外径比下圆柱与其外接堤的最大无量纲波浪力 ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

Fig. 7 Maximum dimensionless wave force on a circular cylinder and its circumscribed breakwater at different ratios of water depth to outer breakwater radius ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, b/a=0.5, \gamma=120^\circ$)

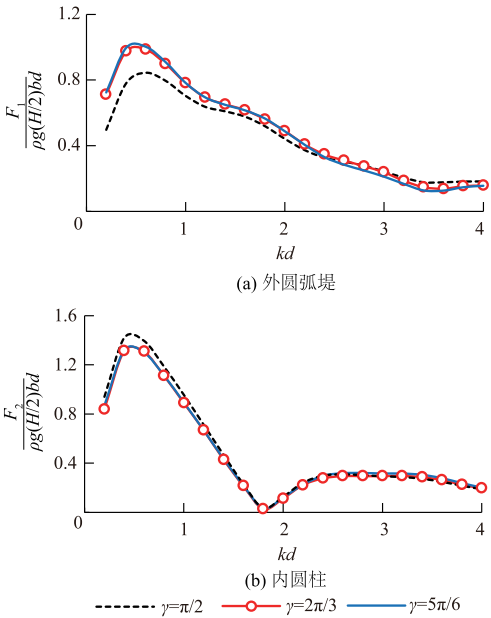


图 8 不同外堤张角下圆柱与其外接堤的最大无量纲波浪力 ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5$)

Fig. 8 Maximum dimensionless wave force on a circular cylinder and its circumscribed breakwater at different central angles of outer breakwater ($G_1=1, G_2=1, \beta=0, d/a=0.5, b/a=0.5$)

有增加。综合来看,在对应结构的设计中可适当选择相对较小的外圆弧堤张角以缩短外圆弧防波堤长度,从而节省外堤的建造成本且对结构承载影响较小。

3.2 最大绕射波面分布

在以下对最大绕射波面的计算中,均以符号

η/H 统一表示各区最大无量纲波面。图 9 为相同条件下单一透空圆柱和圆柱外接圆弧结构绕射最大波面分布的剖面比较。结果表明:在外圆弧堤的掩护下,圆柱表面的波浪爬高以及圆柱前后 ($x/d=-2\sim 2$) 的最大波幅均有明显降低,体现了圆柱外接圆弧防波堤对中心区圆柱的防浪保护作用。

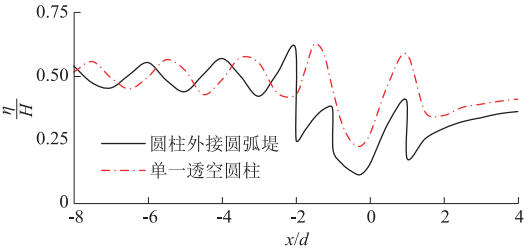


图 9 单柱和圆柱外接圆弧堤的最大绕射波面分布剖面比较 ($G_1=1, G_2=1, kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ, y=0$)

Fig. 9 Comparison of the profiles of maximum diffracted wave surface distribution between single cylinder breakwater and cylinder circumscribed arc-shaped breakwater ($G_1=1, G_2=1, kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ, y=0$)

图 10 为 4 种不同透空形式下正入射波对圆柱外接圆弧堤绕射的最大波面分布剖面 ($y=0$) 比较。结果表明:对应内柱外堤均密实或外堤密实内柱透空的结构 ($G_1=G_2=0$ 或 $G_1=0, G_2=1$),外堤前最大波面分布基本一致,此时外堤堤前壁面处波幅明显大于外堤透空情形,而内柱的透空将降低内柱前后壁的波浪爬高;对应外堤透空内柱密实或外堤内柱均透空结构 ($G_1=1, G_2=0$ 或 $G_1=G_2=1$),外堤前最大波面分布也基本一致,且外堤堤前壁面波幅明显小于外堤密实情形,此时内柱透空将降低柱外区内柱前后壁的波浪爬高。对于透空柱内区,外堤密实将明显降低柱内区的最大波面。综合来看,考虑内外结构均密实情形对应外堤内柱陡增的波载,故不

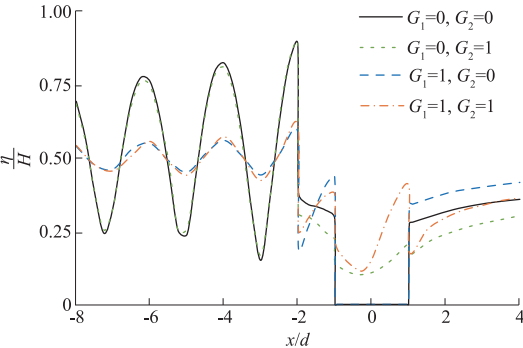


图 10 不同透空形式下圆柱外接圆弧堤的最大波面分布剖面 ($kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ, y=0$)

Fig. 10 Profiles of maximum wave surface distribution of the cylinder circumscribed arc-shaped breakwater with different porous structure forms ($kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ, y=0$)

宜采用。外堤透空内柱密实对应内柱前后壁较大的爬高,且内柱表面波载较大故也不宜采用。可选方案将包括另外 2 种情形,其中外堤内柱均透空的优点在于外堤内柱承受的波载均较小,且外堤堤前壁面处最大波面较小,缺点在于内柱壁前波浪爬高较大且柱内区波浪爬高也相对较大。而外堤密实内柱透空的优点在于柱壁前波浪爬高与柱内区波浪爬高均较小且圆柱所受波载相对其它情形最小,这是一个重要的优点。此外,图 11 的圆柱波浪爬高表明:相对无外圆弧堤保护的单一圆柱情形,具有外圆弧防波堤保护的防波堤除其所受波载明显减小外,圆柱表面的波浪爬高也明显降低,反映了外接防波堤有效增强圆柱防浪抗载能力的重要功效。

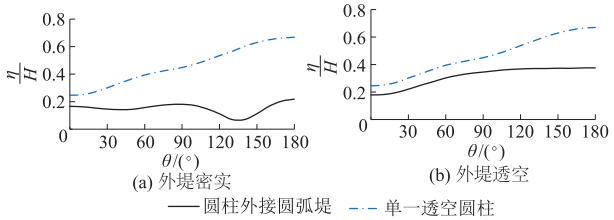


图 11 外堤密实、外堤透空下透空内圆柱的最大波浪爬高 ($G_1=0, G_2=1, kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ$)

Fig. 11 Profiles of maximum wave run-up of the porous inner cylinder ($G_1=0, G_2=1, kd=1.5, d/a=0.5, b/a=0.5, \beta=0, \gamma=120^\circ$)

4 结 论

本文基于微幅波绕射理论,给出了波浪对圆柱外接圆弧防波堤绕射的解析解,将仅有的单一圆弧堤绕射解和双圆筒绕射解进行了较大拓展。主要结论包括:

- (1) 根据本文所给的圆柱外接圆弧防波堤水波绕射解,与已有的透空圆环柱波浪绕射的解析算法进行了波浪力的比较计算,结果吻合,从而验证了本文方法的合理与正确性。
- (2) 通过与单一圆柱的计算结果对比可知,外层堤的设立可以有效减小内圆柱所受的水平波浪载荷,同时可以明显降低圆柱表面的波浪爬高以及圆柱前后的最大波幅。
- (3) 在实际复合结构的设计中适度选择较小的外圆弧堤张角,既可缩短外堤弧长而节省成本,又可减小外堤所受波载且不会导致内柱所受波载的明显增大。
- (4) 采用外堤和内柱均透空形式可同时降低内外结构所受波浪载荷,相比该形式,采用外堤密实内柱透空结构虽明显增大了外堤表面的波浪载荷与外

堤前堤壁处波浪爬高,但该形式结构能最有效地降低柱壁内外的波浪爬高以及内柱的波浪力,从而达到保护内柱的最佳效果。

(5)波浪的入射角度、外层堤张角、外堤半径与水深比以及波浪特征参数等因素的相对变化对复合结构的波浪绕射均存在一定影响。

参考文献:

[1] 程兴奇,刘福臣,李凌霄. 水工建筑物波浪要素计算探讨[J]. 长江科学院院报,2009,26(7):21-24.

[2] MACCAMY R C, FUCHS R A. Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory [R]. USA: US Army Coastal Engineering Research Center, 1954.

[3] GARRETT C J R. Wave Forces on a Circular Dock[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(1): 129-139.

[4] CHWANG A T, CHAN A. Interaction Between Porous Media and Wave Motion [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30(1): 53-84.

[5] WILLIAMS A N, LI W, WANG K H. Water Wave Interaction with a Floating Porous Cylinder[J]. Ocean Engineering, 2000, 27(1): 1-28.

[6] 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.

[7] 廖 斌,陈善群,任超洋. 潜堤上波浪传播过程数值研

究[J]. 长江科学院院报,2017,34(8):52-58.

[8] 张成兴,李丽慧,马 加. 气幕防波堤消波性能影响因素数值模拟研究[J]. 长江科学院院报,2012,29(6): 31-35.

[9] DARWICHE M K M, WILLIAMS A N, WANG K H. Wave Interaction with Semi-porous Cylindrical Breakwater [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 1994, 120(4): 382-403.

[10] WILLIAMS A N, LI W. Wave Interaction with a semi-porous Cylindrical Breakwater Mounted on a Storage Tank [J]. Ocean Engineering, 1998, 25(2/3):195-219.

[11] WANG K H, REN X. Wave Interaction with a Concentric Porous Cylinder System [J]. Ocean Engineering, 1994, 21(4): 343-360.

[12] 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.

[13] 楚玉川,程建生,赵 鑫,等. 圆弧型贯底式防波堤上波浪作用力的解析研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2014,29(2):212-217.

[14] DUAN J H, CHENG J S, WANG J P, et al. Wave Diffraction on Arc-shaped Floating Perforated Breakwaters [J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(2): 305-316.

(编辑:罗 娟)

长江科学院“长江经济带协调协同发展战略问题研究”
报告成果首获商务部商务发展研究成果奖二等奖

2020 年 4 月,经商务部商务发展研究成果奖评审委员会评选,长江科学院水资源综合利用研究所“长江经济带协调协同发展战略问题研究”报告成果获得 2018/2019 年度商务发展研究成果奖二等奖。

在长江科学院院长卢金友和院党委书记吴志广的关心和指导下,水资源综合利用研究所于 2017 年 6 月通过公开招投标竞争方式,申请获得了国家发展和改革委员会基础产业司战略研究课题“长江经济带协调协同发展战略问题研究”。由于该课题涉及长江经济带国家发展战略,课题组高度重视,经过 1 年的不懈努力和不断创新研究,于 2018 年 10 月向国家发展和改革委员会基础产业司长江办提交了最终研究报告。报告成果中:①提出通过建立完善长江经济带区域资源优势互补、生态环境联防联控、区域交通互联互通、沿江产业分工协作和城市群互动合作,探索实现长江经济带的协调协同发展;②根据长江经济带上中下游功能定位、区域发展差异性和互补性,重点在资源优化配置方面侧重基于空间结构下的自然资源和社会资源的优化配置,提出了长江经济带资源要素的市场化配置模式,构建政府引导、市场决定双重作用下的合理配置;③在生态环境联防联控治方面提出了长江流域跨省河湖长制协调监督机制、长江经济带横向生态补偿机制和长江经济带生态脱贫长效机制。

商务发展研究成果奖(2005 年以前为全国外经贸研究成果奖)的设立旨在加强商务战略和政策研究,繁荣商务理论,鼓励全国从事商务理论、政策研究和实际工作的单位及个人提高研究质量与水平,加快培养商务研究人才,建立健全商务领域科研工作的激励机制。商务发展研究成果奖是面向全国的社会科学类奖项,用于奖励商务领域具有前瞻性、创见性、有较高理论和学术价值的著作、论文和研究报告,以及对政府决策和实际工作产生重要影响的研究成果。

(摘自:长江水利科技网)