

# 大尺度柱状结构物波流荷载研究

聂锋<sup>1,2</sup>, 潘军宁<sup>1</sup>, 王晓敏<sup>1</sup>, 王兴刚<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 大型深水工程往往面临水深、浪大以及流急等复杂自然条件, 将受到巨大的水平波流力, 在工程设计中需准确考虑波流力的大小. 通过在波流水槽进行圆柱、方柱和矩形柱波流系列试验, 进行大尺度柱状结构物波流荷载研究, 同时建立数学模型, 应用边界元法求解大尺度柱体上的波浪荷载, 编写了 Fortran 程序计算波浪力, 运用柱体绕流理论计算水动力. 对比分析试验结果和数值计算结果提出了波流力工程计算方法; 对于深水大尺度柱状结构物波流力可由波浪力线性迭加水动力再乘以 1.04 得到, 计算中波浪要素采用水流影响下的要素, 水动力采用柱体绕流求得. 按此方法计算波流力, 并与物理模型试验结果进行对比, 两者误差较小, 满足工程设计的精度要求.

**关键词:** 大尺度; 柱状结构物; 波流力; 势流理论

**中图分类号:** TV139.2+6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2013)03-0065-06

随着我国经济的快速增长, 海洋工程建设及海洋资源开发利用随之不断发展, 需要建设越来越多的大尺度深水结构物. 所谓大尺度结构物是指其直径或特征尺度  $D$  与波长  $L$  的比值  $D/L > 0.2$  的结构物, 大型深水工程往往同时面临水深、浪大、流急等复杂自然条件, 且结构物自身相当庞大和复杂, 具有三维特性. 如置于海洋环境中的较大桥梁基础, 在波浪和海流共同作用下, 将受到强大的水平波流力, 波流荷载成为桥梁基础设计的控制荷载, 在设计中需准确考虑波流力的大小.

在计算波浪对结构物作用时, 不能忽略因结构物产生的波浪绕射作用. 波浪与弱流对结构物的作用<sup>[1-3]</sup>, 可运用弱流假定, 采用势流理论求解波浪力, 摄动理论被广泛地应用于积分方程求解, 波流作用问题可分解为两个相对简单的问题: 一是纯波浪对结构物的作用, 二是水流对波浪问题的修正. 对于发生紊乱的强波强流对结构物的作用问题<sup>[4]</sup>, 势流理论不再成立, 目前只能通过物理模型试验测量波流. 当前工程设计中, 如我国已建和在建的东海大桥、杭州湾跨海大桥及港珠澳大桥等大型桥梁工程<sup>[5-6]</sup>, 主要通过物理模型试验来确定桥梁基础波流力.

本文采用数值计算与物理模型相结合的方法对作用在大尺度柱状结构物上波流荷载进行研究. 数值方法中, 采用边界元方法计算作用在结构物上波浪力, 采用水流绕流理论方法计算结构物上水动力. 在物理模型试验中, 对圆柱、方柱和矩形柱的波浪力、水动力和波流力分别进行了测量. 最后, 分析试验数据, 提出建立可供工程使用的强波、强流海区大尺度深水结构物波流力的数值计算方法.

## 1 数学模型建立

### 1.1 波浪力

选定静水面为  $x-y$  平面,  $z$  轴垂直  $x-y$  平面且向上为正的笛卡尔坐标系(见图1). 假定流体理想、无旋不可压缩, 运动是有势的, 基于线性绕射理论<sup>[7]</sup>, 波动场里任一点的总速度势  $\Phi$  可表示为:

收稿日期: 2012-12-25

作者简介: 聂锋(1987-), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程研究.

E-mail: biggentle@163.com

$$\Phi(x, y, z, t) = [\varphi_1(x, y, z) + \varphi_s(x, y, z)] \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

$$\text{入射势 } \varphi_1(x, y, z) \text{ 为 } \varphi_1 = \frac{Hg \operatorname{ch}k(d+z)}{2\omega \operatorname{ch}kd} \exp(ikr \cos\theta) \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为入射波与  $x$  轴线的夹角.

根据边界元法的基本思想<sup>[8]</sup>, 波动场中某一点  $q(x, y, z)$  所受到的扰动势  $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$  是由结构物湿表面  $S(x, y, z) = 0$  上布置的各点源  $M(\xi, \eta, \zeta)$  引起的. 若  $M(\xi, \eta, \zeta)$  点的源强度为  $f(\xi, \eta, \zeta)$  且在结构物表面上的分布是连续的, 故在波动场中某一点  $q(x, y, z)$  的绕射势  $\varphi_s(x, y, z)$  可认为是由结构物表面上所有点波源对  $q$  点所引起的源势之和, 可表示为

$$\varphi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_S f(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) dS \quad (3)$$

式中:  $(x, y, z)$  和  $(\xi, \eta, \zeta)$  分别为计算点和变化点坐标,  $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$  为格林函数;  $f(\xi, \eta, \zeta)$  为结构物表面上的源强度分布函数.

J. V. Wehausen 等<sup>[9]</sup> 给出了满足上述条件的格林函数的积分形式和级数形式. 其中级数形式为:

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{2\pi(v^2 - k^2)}{(k^2 - v^2)d + v} \cosh[k(\xi + d)] \cosh[k(z + d)] [Y_0(kr) - iJ_0(kr)] + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + v^2}{(\mu_n^2 + v^2)d - v} \cos[\mu_n(\xi + d)] \cos[\mu_n(z + d)] K_0(\mu_n r) \quad (4)$$

式中:  $v = \omega^2/g = k \tan kd$ ;  $r = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}$  为计算点  $q(x, y, z)$  至布源点  $M(\xi, \eta, \zeta)$  的距离;  $Y_0(kr)$  和  $J_0(kr)$  分别为零阶第二类和第一类贝塞尔函数;  $K_0(\mu_n r)$  为零阶第二类修正 Bessel 函数;  $\mu_n$  为方程  $\mu_n \tan(\mu_n d) + v = 0$  的正实数根.

源强  $f(\xi, \eta, \zeta)$  可用以下公式表示:

$$-f_D(x, y, z) + \frac{1}{2\pi} \iint_S f_D(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G}{\partial n}(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) dS = 2U(x, y, z) = -2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} \Big|_{S_0} \quad (5)$$

式中:  $\frac{\partial G}{\partial n} = \frac{\partial G}{\partial x} \cdot n_x + \frac{\partial G}{\partial y} \cdot n_y + \frac{\partial G}{\partial z} \cdot n_z$ ,  $n_x, n_y, n_z$  为分块的单位法线分量.

采用数值方法求解上述积分方程, 将物体表面分成  $N$  个单元面积为  $\Delta S_j (j=1, 2, \dots, N)$  的单元, 并以每块面积单元的形心作为节点, 假设其坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 且每个单元面积上源强度  $f_i$  为常数. 则离散后的式(5)可写为:

$$\varphi_D = \beta_{ij} f_j \quad (6)$$

$$-f_i + \alpha_{ij} f_j = -2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} \quad (7)$$

式中:  $\beta_{ij} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Delta S_j} G(x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta) dS$ ;  $\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Delta S_j} \frac{\partial G}{\partial n}(x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta) dS$ .

得出  $\varphi_1(x, y, z)$  和  $\varphi_s(x, y, z)$  后, 再求解线性波浪场中任一点的波浪压力  $p$ .

$$p(x_j, y_j, z_j) = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\rho\omega(\varphi_1 + \varphi_s) \exp(-i\omega t) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (8)$$

于是, 沿着淹湿物面上压力积分得到作用于结构物上的水平波浪力为:

$$F_w = \int_S p(x, y, z) n_x dS \quad (9)$$

式中:  $n_x$  为物面外法线的  $x$  方向分量.

### 1.2 水 流 力

当流体绕过墩柱时, 在边界层内对柱体作用表面力. 流体力学中, 将表面力合力在流动方向的分量定义

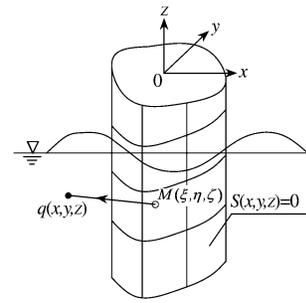


图 1 波浪与结构物作用示意图  
Fig. 1 Wave acting on structures

为绕流阻力  $F_D$ , 用以下公式<sup>[10]</sup>表示:

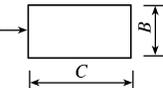
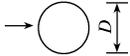
$$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A \quad (10)$$

式中:  $C_D$  为绕流阻力系数, 集中反映流体的黏滞性引起的黏滞效应, 与雷诺数  $Re$  和柱面粗糙程度有关;  $A$  为绕流物体垂直于流动方向的投影面积;  $U$  为水流未受绕流物体影响时的流速;  $\rho$  为水的密度.

《港口荷载规范》中对某些截面形式墩柱绕流阻力系数  $C_D$  取值如表 1.

表 1 绕流阻力取值

Tab. 1 The values of circfluence resistance

| 形 状 | 示 意 图   | $C_D$ 取值  |           |           |                |
|-----|---|-----------|-----------|-----------|----------------|
|     |   | $C/B=1.0$ | $C/B=1.5$ | $C/B=2.0$ | $C/B \leq 3.0$ |
| 矩形  |  | 1.50      | 1.45      | 1.30      | 1.10           |
| 圆形  |  | 0.73      |           |           |                |

## 2 物理模型

试验在南京水利科学研究院波浪水槽中进行, 该水槽可同时产生波浪、水流和风. 水槽长 64 m, 宽和深均为 1.8 m. 试验所用 3 种柱体, 其中圆柱体直径 25 cm, 方柱边长 25 cm (一边与波峰线平行), 矩形柱尺寸 25 cm×50 cm (短边与波峰线平行). 3 种柱体均高 85 cm, 试验中水深为 50 cm, 水流流速为 10 和 15 cm/s, 波高为  $H=2, 3$  和 4 cm, 波流共同作用下的波浪周期为 0.6, 0.7 和 0.8 s.

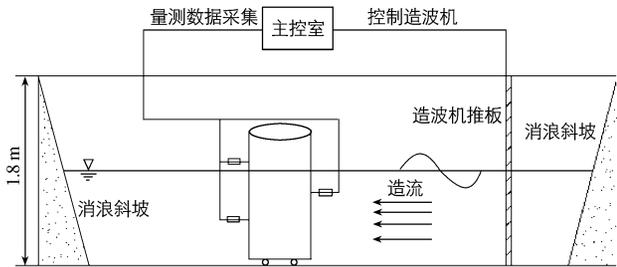


图 2 水槽布置

Fig. 2 Layout of the flume

试验前将柱体放置在水槽试验段, 置于两壁中间 (水槽布置见图 2), 柱体迎浪面安装 1 根总力仪, 背浪面安装 2 根, 柱体底部安装滑轮后安放于平整光滑的水槽底部.

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验结果

测量水流力  $F_D$  时, 无波浪伴随, 测量结果为: 水流流速为 10 cm/s 时, 圆柱、方柱和矩形柱的水流力  $F_D$  分别为 0.48, 0.93 和 0.84 N; 水流流速为 15 cm/s 时, 圆柱、方柱和矩形柱的水流力  $F_D$  分别为 1.07, 2.15 和 1.78 N.

试验工况为波流共存时, 试验结果见表 2. 测量波浪力  $F_w$  时, 无水流伴随, 相应波浪要素采用水流影响下的波浪要素, 保持波长与波流共存时波长一致. 波浪力与水流力线性迭加值为波流共同作用下波流力值的 0.90 ~ 1.06 倍, 此值中小于 1.0 的平均值约为 0.96. 实际工程中, 为安全起见可选用 0.96, 即波流力可用波浪力与水流力之和再乘以 1.04 得到.

表2 试验结果

Tab.2 Results of experiment

| 试验工况                        |           |          | 波流力 $F/N$ |       |       | 波浪力 $F_w/N$ |       |       | $(F_w+F_D)/F$ |      |      |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------------|------|------|
| 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 波高/<br>cm | 周期/<br>s | 圆柱        | 方柱    | 矩形柱   | 圆柱          | 方柱    | 矩形柱   | 圆柱            | 方柱   | 矩形柱  |
| 10                          | 2         | 0.6      | 6.22      | 7.61  | 4.29  | 5.86        | 6.58  | 3.32  | 1.02          | 0.99 | 0.97 |
|                             | 3         | 0.6      | 9.35      | 11.25 | 6.17  | 8.91        | 9.71  | 5.04  | 1.00          | 0.95 | 0.95 |
|                             | 4         | 0.6      | 12.39     | 14.42 | 8.05  | 11.71       | 12.82 | 6.68  | 0.98          | 0.95 | 0.93 |
|                             | 2         | 0.7      | 8.05      | 9.22  | 7.69  | 7.71        | 8.88  | 6.36  | 1.02          | 1.06 | 0.94 |
|                             | 3         | 0.7      | 12.23     | 14.77 | 10.64 | 11.15       | 13.16 | 9.55  | 0.95          | 0.95 | 0.98 |
|                             | 4         | 0.7      | 16.28     | 19.18 | 13.06 | 15.08       | 17.57 | 12.48 | 0.96          | 0.96 | 1.02 |
|                             | 2         | 0.8      | 9.75      | 11.87 | 11.40 | 9.14        | 9.97  | 10.12 | 0.99          | 0.92 | 0.96 |
|                             | 3         | 0.8      | 14.33     | 17.14 | 16.93 | 13.31       | 15.55 | 15.26 | 0.96          | 0.96 | 0.95 |
| 15                          | 4         | 0.8      | 18.09     | 22.41 | 21.02 | 18.16       | 20.75 | 20.07 | 1.03          | 0.97 | 0.99 |
|                             | 2         | 0.6      | 7.07      | 9.80  | 6.13  | 6.33        | 6.95  | 3.88  | 1.05          | 0.93 | 0.92 |
|                             | 3         | 0.6      | 10.32     | 12.75 | 7.97  | 9.30        | 10.46 | 5.71  | 1.00          | 0.99 | 0.94 |
|                             | 4         | 0.6      | 13.70     | 15.57 | 9.89  | 12.62       | 14.01 | 7.54  | 1.00          | 1.04 | 0.94 |
|                             | 2         | 0.7      | 8.74      | 11.68 | 9.47  | 8.11        | 9.35  | 7.41  | 1.05          | 0.98 | 0.97 |
|                             | 3         | 0.7      | 12.99     | 16.34 | 12.9  | 12.09       | 14.37 | 11.1  | 1.01          | 1.01 | 1.00 |
|                             | 4         | 0.7      | 17.08     | 21.77 | 15.9  | 16.19       | 18.65 | 14.82 | 1.01          | 0.96 | 1.04 |
|                             | 2         | 0.8      | 10.70     | 13.20 | 12.93 | 9.14        | 10.93 | 10.93 | 0.95          | 0.99 | 0.98 |
| 3                           | 0.8       | 16.16    | 19.16     | 18.37 | 13.64 | 16.64       | 16.35 | 0.91  | 0.98          | 0.99 |      |
| 4                           | 0.8       | 21.38    | 24.84     | 24.10 | 18.23 | 21.82       | 21.84 | 0.90  | 0.96          | 0.98 |      |

3.2 模型验证

3.2.1 数模计算结果与物模试验结果对比 为验证本程序的准确性,将本文计算结果与试验所得波浪力结果进行对比(如图3).可见:大尺度柱体波浪力数学模型计算所得结果与物模试验结果吻合良好,两列数据相关系数达0.99.

数模波流力值为波浪力与水流力之和再乘以1.04得到.图4为圆柱、方柱和矩形柱在波高  $H=4$  cm 情况下的波流力值随波长的变化关系.图中  $k$  为波数,  $d$  为水深.图4(a)中波流力规范计算值采用《海港水文规范》(JTS 144-1-2010)大直径圆柱波流力公式得出.由图4可见:本文波流力计算结果与物理模型试验结果吻合较好,在实际工程应用中偏安全.

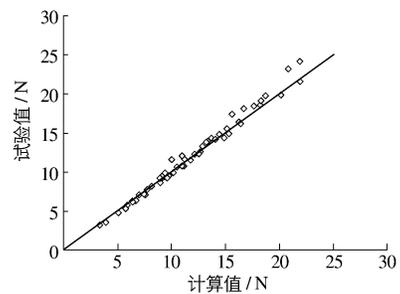


图3 波浪力的试验值与计算值对比

Fig.3 Comparison between the calculated and measured results of wave force

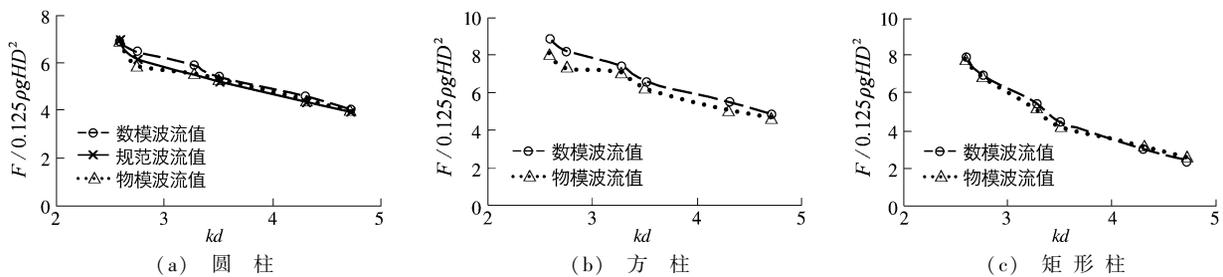


图4 波流力数模结果与试验结果对比

Fig.4 Comparison between the calculated and measured results of wave-current force

**3.2.2 数模计算结果与工程实例对比** 采用上述模型计算某桥梁工程承台波流力,并与物理模型试验结果进行对比分析.承台截面形式如图5.桥梁形式均为承台-桩基结构,承台厚5 m(不包括封底混凝土厚度2 m),承台顶高程+5 m.

本次物理模型试验在南京水利科学研究院河港所波浪港池中进行,可同时模拟波浪、水流对结构物的作用,港池长50 m,宽17.5 m,高1.2 m.试验水位包括极端高水位、设计高水位,采用100年一遇波浪,桥梁基础承台部分最大波流力的试验结果和计算结果比较见表4.可见:计算值与试验值相差在8%以内,计算精度满足工程要求.

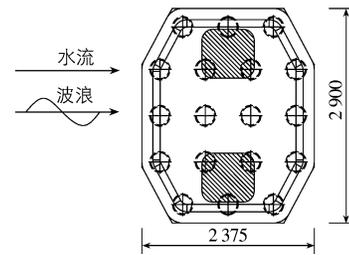


图5 承台截面(单位: mm)

Fig.5 Sectional sketch of caps (unit: mm)

表4 试验要素及结果比较

Tab.4 Comparison of experiment parameters and results

| 水位/<br>m | 波流要素        |       |                        | 最大水平波流力/ kN |         |
|----------|-------------|-------|------------------------|-------------|---------|
|          | $H_{1\%}/m$ | $T/s$ | 流速/ $(m \cdot s^{-1})$ | 试验值         | 计算值     |
| +6.01    | 3.8         | 4.1   | 2.45                   | 3 512.5     | 3 226.3 |
| +3.74    | 3.5         | 3.9   | 2.45                   | 3 705.2     | 3 532.7 |

## 4 结 语

本文对规则波与均匀流同向运动共同作用于大尺度柱状结构物进行了试验研究.同时应用边界元方法对任意形状大尺度柱体上波浪荷载进行了研究,并编写改进了波浪力计算 Fortran 程序,运用柱体绕流理论计算水动力.模型验证中对比数值结果与试验结果,并计算某工程实例承台波流力,得出对于大尺度圆柱的波流力,可直接采用《海港水文规范》(JTS 144-1-2010)波流力进行计算.工程中,对如圆柱、方柱、矩形柱等截面形状大尺度柱状结构物波流力值可由采用水流影响下的波浪要素的波浪力值迭加水动力值再乘以1.04得到.本次试验中,为了保证水流的均匀以及  $D/L > 0.2$ ,未能模拟出更强水流和波浪,建议以后选用更宽水槽进行进一步试验.

## 参 考 文 献:

- [1] TENG B, TAYLOR R E. New higher-order boundary element methods for wave diffraction/radiation [J]. Applied Ocean Research, 1995, 17(2): 71-77.
- [2] 滕斌. 深水中波浪与弱流对结构物的作用[J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 117-126. (TENG Bin. Wave and weak current interaction with structures in deep water[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(5): 117-126. (in Chinese))
- [3] 陶建华, 刘连武. 波浪和水流对大直径圆柱的共同作用力[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(3): 265-272. (TAO Jian-hua, LIU Lian-wu. Wave-current forces on a large vertical cylinder[J]. Journal of Hydrodynamics, 1993, 8(3): 265-272. (in Chinese))
- [4] 胡勇, 雷丽萍, 杨进先. 跨海桥梁基础波浪(流)力计算问题探讨[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 101-105. (HU Yong, LEI Li-ping, YANG Jin-xian. Study of wave force on foundation of sea-crossing bridges[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(2): 101-105. (in Chinese))
- [5] 潘军宁, 王登婷. 杭州湾大桥工程桥梁基础波流力模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003. (PAN Jun-ning, WANG Deng-ting. Wave-current force model test of bridge foundation of Hangzhou bay bridge engineering[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [6] 王登婷, 潘军宁. 港珠澳大桥桥梁基础波流力试验专题研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (WANG Deng-ting, PAN Jun-ning. Wave-current force special research report of bridge foundation of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

- [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [7] GARRET C J R. Wave forces on a circular dock[J]. Fluid Mech, 1971, 46(1): 129-139.
- [8] HOGBEN N, MILLER B L, SEARLE J W, et al. Estimation of fluid loading on offshore structures[J]. Proc Inst Civil Eng, 1977, 63: 515-562.
- [9] WEHAUSEN J V, LAITON E V. Surface Wave[EB/OL]. <http://coe.berkeley.edu/SurfaceWaves/pdf/p446-476.pdf>
- [10] 华绍曾. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 351-489. (HUA Shao-zeng. Applied fluid resistance manual[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 351-489. (in Chinese))

## A study of wave-current force acting on large scale cylinder structures

NIE Feng<sup>1,2</sup>, PAN Jun-ning<sup>1</sup>, WANG Xiao-min<sup>1</sup>, WANG Xing-gang<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of Transportation and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Large scale deepwater structures often face some complex natural conditions such as deepwater, large wave height and strong current, and are subject to considerable horizontal wave-current forces. It is necessary to accurately consider the size of the wave-current forces in the engineering design. A series of wave-current forces experiments for cylindrical, square columns and rectangular columns are carried out in the wave-current flume. At the same time, boundary element method for solving the wave loads on a large scale cylinder is used, and the preparation of Fortran program is made. Comparing the model results with the calculated values, an engineering method for calculation of the wave-current forces is developed: for deepwater large scale cylinder structures, wave-current forces can be obtained by the wave force linear superposition current force multiplied by 1.04, wave element is considered under the influence of current, and current force is calculated by flow around cylinders theory. By using this method to calculate wave-current force, and comparing the physical model results, the error is relatively small, and the model accuracy satisfies the requirement of engineering design.

**Key words:** large scale; cylinder structures; wave-current force; potential theory

### 版 权 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。

该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《水利水运工程学报》编辑部