

一种适用于淤泥质底质的新型人工鱼礁的设计与研究

周秋萍, 盛国强

(广州中国科学院工业技术研究院, 广东 广州 511458)

摘要:为使人工鱼礁在淤泥质底质上保持稳定不发生淤埋,提出了一种新型人工鱼礁,主要包含鱼礁本体、浮力基础、筒形桩。基于调研及测量的地质、水文、极限风浪流等信息,通过 Stokes 波理论和 Fluent 软件模拟鱼礁周围的流场效应,采用理论分析和数值仿真方法分别计算得到人工鱼礁上的环境载荷,并通过理论分析得到淤泥地基下的负压筒形桩的抗拔力及水平抗力。结果显示,新型人工鱼礁在给定的投放环境下能保持稳定,不发生淤埋,其在波流作用下抗滑移和抗倾覆安全系数均满足规范要求。本研究可为淤泥质底质上人工鱼礁提供设计方法,具有一定的指导意义。

关键词:人工鱼礁;淤泥质底质;环境载荷;流场效应;稳定性

中图分类号:S953

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2020)03-045-07

人工鱼礁的建设对于保证海洋渔业增长,保护和改善海洋生态环境都有十分重要的作用^[1-4]。传统的人工鱼礁主体均坐落在浅层有细砂覆盖的坚硬岩石质海床上^[5-7]。在黏土、淤泥质和散沙上建造人工鱼礁还存在很大的困难,礁体投放后会整体沉降,最终导致礁体被淤埋^[8-10]。但是在河流三角洲地区淤泥质软基分布较为广泛,且河口地区渔业资源丰富,珠江入海口目前投放的人工鱼礁容易被淤埋。本研究探讨了一种了能在淤泥质底质上保持稳定,不发生淤埋的人工鱼礁设计方法。

1 新型人工鱼礁及投放区域概况

1.1 新型人工鱼礁

新型人工鱼礁主要包含 3 部分结构:鱼礁本体、浮力基础和筒形桩(图 1)。通过在传统人工鱼礁下方安装带筒形桩的浮力基础,可确保礁体投放后在淤泥基础上不发生埋淤,也不会因风暴潮作用而滑移、拔起。

浮力基础为中空密封结构,可以提供主动上浮力,当基础在泥面上时提供向下净重,当基础沉到泥面以下一定程度时,提供向上浮力,而且其浮力可以调整,基础越往下,其浮力越大,这样可以

防止鱼礁持续下沉,具有一定的恢复能力。筒形桩安装完成后,对人工鱼礁坐底稳定有重要作用。首先,对于地基的竖向承载力而言,除了提供抗拔力外,桩身顶板还提供了稳定的淤泥承载力,桩径越大,所承受的竖向荷载力越大;其次,可承受较大的水平推力,提供较大的抗倾覆力矩。

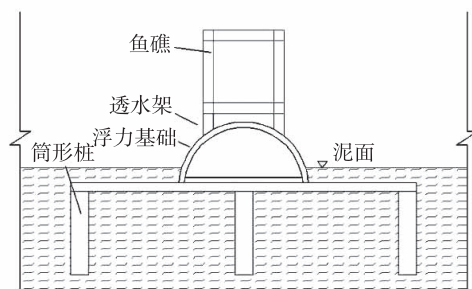


图 1 新型人工鱼礁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the new artificial reefs

用于后续分析的新型人工鱼礁的情况如下:筒形桩为钢质材料,直径 0.159 m,壁厚 4.5 mm,中心距 2.0 m;鱼礁本体为混凝土材料,框型结构,规格为 1m×1m×1m,棱柱宽 0.13 m;浮力基础为混凝土材料,球冠状,球冠半径 0.8 m,球冠高 0.73 m,球冠壁厚 65 mm。浮力基础内有间距为 0.35 m 的立柱十字布置。

收稿日期:2019-08-09

基金项目:中国科学院 STS 计划区域重点项目“浅水域生态型开发技术(KFJ-ST-S-QYZD-007)”

作者简介:周秋萍(1984—),女,助理研究员,硕士,研究方向:海洋工程、固体力学。E-mail:zhouqp@gziit.ac.cn

通信作者:盛国强(1987—),男,工程师,硕士,研究方向:船舶与海洋工程。E-mail:shengguoqiang@gziit.ac.cn

1.2 投放区域

广州市南沙区地处珠江口与伶仃洋的交汇处,属于冲积平原,地表主要为第四纪沉积物,地层中存在深厚海陆交互相淤泥。根据综合调研结果及原位测试试验数据,投放区域的设计不排水抗剪强度值取 7.0 kPa。人工鱼礁投放海域水深 $h=5$ m。鱼礁坐底处潮流^[11]:涨潮流向北北西约 340°,落潮流向南南东约 165°,主流与伶仃巷道走向一致,平时涨潮平均流速为 0.2~0.4 m/s,落潮平均流速为 0.3~0.5 m/s。风暴潮期间的最大流速为 1.44 m/s。该海域以风浪为主,常浪向为东南偏南(SSE),频率 15.3%,年平均波高 0.2 m,最大波高 1.92 m,最大平均波高 0.68 m,平均周期 3.5 s^[12]。由于波周期的平方遵循瑞利分布,推算设计最大波周期 4.55 s。

2 环境载荷评估

2.1 极限波浪载荷计算

人工鱼礁礁体设计,水深取 5 m。根据文献^[13]进行极限波浪荷载计算:

(1)确定波长 L 。根据波浪的弥散关系计算波长 L 。

$$\sigma^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h) \quad \text{其中, } k = \frac{2\pi}{L} \quad (1)$$

式中: σ —圆频率, $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ (rad/s); T —波周期(s); k —波数 (rad/m), L —波长 (m); h —水深 (m); g —重力加速度 (m/s^2)。

计算得到波长 $L=26.68$ m。

(2)确定波浪理论。不同的波浪理论使用范围受相对水深 h/L 、厄塞尔数 U 等的控制。相对水深为 $h/L=0.18$;厄塞尔数为 $U=\frac{HL^2}{h^3}=10.94$, H 为波高 (m)。厄塞尔数 U 表征了非线性波理论中 2 阶项和 1 阶项的比值。

综上,波浪理论采用 Stokes 波理论。

(3)求解一定水深下的波速。水体任意一点 (x, z) 水质点在任意时刻 t (s) 的水平流速 u (m/s) 和垂向流速 w (m/s)。 x, z 的单位为 m。

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{ch[k(z+h)]}{sh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H}{T} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{ch[2k(z+h)]}{sh^4(kh)} \cos[2(kx - \sigma t)] \quad (2)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{sh[k(z+h)]}{sh(kh)} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H}{T} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{sh[2k(z+h)]}{sh^4(kh)} \sin[2(kx - \sigma t)] \quad (3)$$

式中: ch, sh 为双曲余弦和双曲正弦函数。

由式(2)、(3)计算得到不同水深下的最大水平和垂向流速(图 2)。

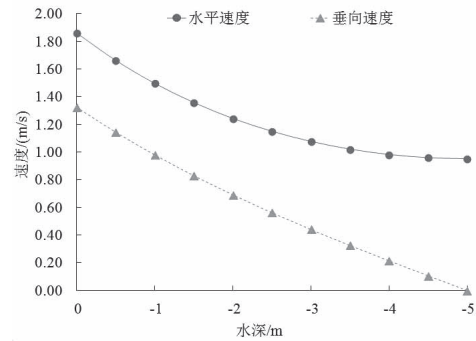


图 2 不同水深处最大流速分布

Fig. 2 Distribution of maximum velocity at different water depth

(4)求解人工鱼礁礁体在波浪和潮流的共同作用下的流速及作用力^[14]。流速 u 是潮流速度 u_0 (m/s) 和波浪速度 u_1 (m/s) 合成的,即:

$$u = u_0 + u_1 \quad (4)$$

u_1 根据式(2)改写为:

$$u_1 = u_{m1} \cos \theta + u_{m2} \cos 2\theta \quad (5)$$

式中: $u_{m1} = \frac{\pi H}{T} \frac{ch[k(z+h)]}{sh(kh)}$, $u_{m2} = \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H}{T} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{ch[2k(z+h)]}{sh^4(kh)}$, $\theta = kx - \sigma t$; u_{m1} 为波速一阶值, m/s; u_{m2} 为波速二阶值, m/s。

人工鱼礁礁体在流速 u 下的流体作用力可分成拖曳力和附加质量力,在数学形式上表示成流速与流速导数的函数,具体计算公式为:

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho A u^2 + C_M \rho V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6)$$

式中: C_d 为拖曳力系数; C_M 为附加质量系数; ρ 为海水密度 (1025 kg/m^3); A 为迎流面积, m^2 ; V 为实体体积, m^3 。 C_d, C_M 的值根据波浪 KC 数确定, KC 数 (Keulegan-Carpenter number) 是一个无量纲数,用来描述一个在振荡流场中的物体,所受到的黏性力相对惯性力之间的关系。

将公式(5)代入公式(6),整理得到下式:

$$F = F_d (1 + \alpha \cos \theta + \beta \cos 2\theta)^2 + F_M (\sin \theta + 2\gamma \sin 2\theta) \quad (7)$$

式中: $F_d = C_d \frac{1}{2} \rho A u_0^2$ 为拖曳力, N; $F_M = \frac{2\pi C_M \rho V u_{m1}}{T}$

为附加质量力, N; $\alpha = \frac{u_{m1}}{u_0}$; $\beta = \frac{u_{m2}}{u_0}$; $\gamma = \frac{u_{m2}}{u_{m1}}$

若要使得 F 取得最大值, 需满足:

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = 2F_d (1 + \alpha \cos \theta + \beta \cos 2\theta) (-\alpha \sin \theta - 2\beta \sin 2\theta) + F_M (\cos \theta + 4\gamma \cos 2\theta) = 0 \quad (8)$$

公式(7)、(8)中的各参数的实际取值以及最终求得作用在鱼礁及浮力基础水平波流计算见表1。

表1 鱼礁及浮力基础水平波流计算

Tab. 1 Calculation of horizontal wave currents in artificial reefs and buoyancy foundation

构件	C_d	C_M	F_d/N	F_M/N	α	β	γ	A/m^2	V/m^3	F/N
鱼礁礁体	3.4	1.8	600	234	0.685	0.047	0.068	0.45	0.17	2 500
浮力基础	0.95	1.0	1 009	425	0.630	0.035	0.056	1.0	0.33	1 600
总计	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4 100

注: C_d 为拖曳力系数; C_M 为附加质量系数; F_d 为拖曳力, N; F_M 为附加质量力, N; $\alpha = \frac{u_{m1}}{u_0}$, $\beta = \frac{u_{m2}}{u_0}$, $\gamma = \frac{u_{m2}}{u_{m1}}$ 为无量的系数; A 为迎流面积, m^2 ; V 为实体体积, m^3 ; F 为人工鱼礁在流速 u 下的流体作用力, N

2.2 Fluent 仿真模拟

图3为数值模型计算区域,以鱼礁底面中心为坐标原点建立三维水槽,水槽长度足够可以保证水流达到鱼礁附近时趋于稳定,并满足尾流区的范围是10倍模型边长以上的要求^[15]。

计算采用 Fluent 中的 VOF 物理模型,进口边界采用速度及二阶 stock 波的进口边界条件设置,其中,造波边界设置可参考文献[16]。流场中鱼礁附近的流速分布如图4所示、动水压分布如图5所示。

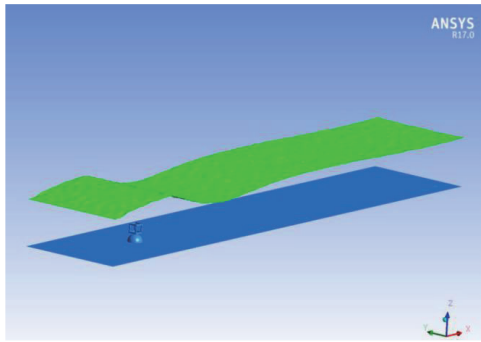


图3 鱼礁及浮力基础模型

Fig. 3 Model of artificial reefs and buoyancy foundation

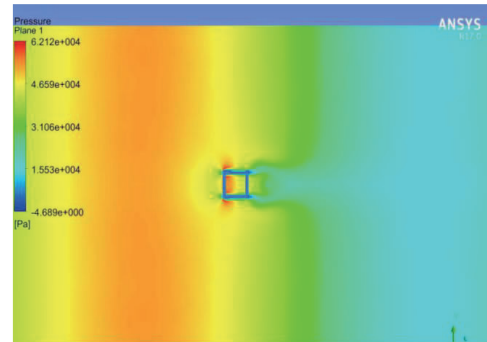


图4 流速分布

Fig. 4 Velocity distribution

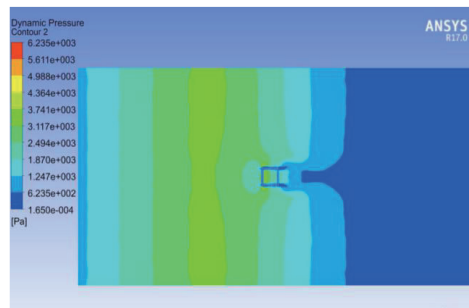


图5 动水压分布

Fig. 5 Dynamic water pressure distribution

2.3 仿真和理论计算值对比

通过仿真分析和理论计算得到人工鱼礁上的水阻力和升力,人工鱼礁设计选用的环境载荷取两者较大者,仿真和理论计算结果对比见表 2。

表 2 仿真和理论结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation and theoretical results

项目	阻力/N	升力/N
仿真结果	4 900	2 220
理论结果	4 100	—
设计取值	4 900	2 220

对于本研究中的鱼礁升力计算暂无理论计算的公式,故只进行了仿真分析。表 2 可以看出,鱼礁阻力计算仿真和理论计算结果较为接近,但偏大于理论值,这是符合实际的。理论计算基于势流理论,而仿真考虑了水体绕流产生的漩涡对结构的作用,之所以仿真值大是因为增加了部分的压差阻。

故阻力值选取了更偏于实际的仿真计算的结果值,即阻力 4 900 N,升力 2 220 N。

3 鱼礁强度分析

浮力基础及人工鱼礁所用材料为混凝土 C40,其设计抗压强度为 19.1 MPa;设计抗拉强度为 1.71 MPa^[17];矩形截面结构抗剪强度与抗压强度比值为 0.065~0.089,取 0.065,则矩形截面 C40 的设计抗剪强度为 1.24 MPa。

浮力基础底板上受到的载荷:5 m 水深的水压 50 kPa,鱼礁坐底后连接钢架给底板的载荷(结构浮重)。边界条件如图 6 所示,浮力基础底板第一主应力云图如图 7 所示。从结果可看出,浮力基础底板第一主应力最大值为 1.435 MPa,小于设计值,满足强度要求。

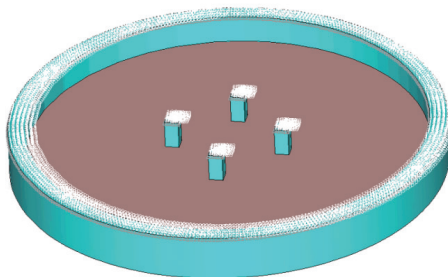


图 6 浮力基础底板边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of buoyancy foundation floor

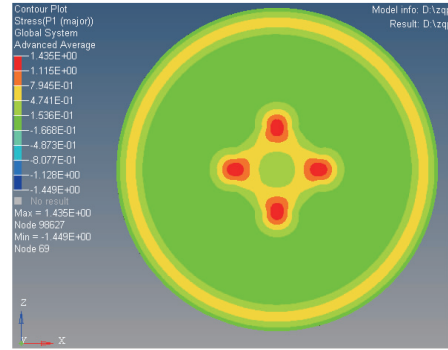


图 7 浮力基础底板第一主应力云图

Fig. 7 First principal stress cloud diagram of buoyancy foundation floor

浮力基础球壳及人工鱼礁上所受的载荷:人工鱼礁上所受极限海况的水动力,浮力基础受到极限海况的水动力,浮力基础受到的静水压力,自重载荷。边界条件如图 8 所示,浮力基础球壳及鱼礁第一主应力云图如图 9 所示。

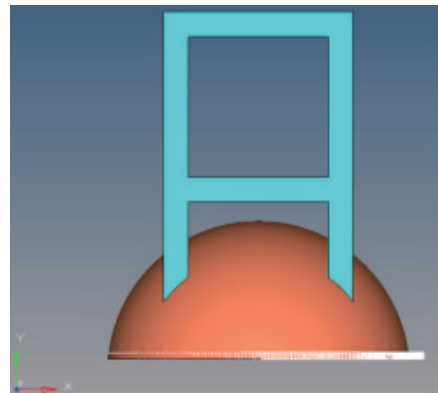


图 8 浮力基础球壳及鱼礁边界条件

Fig. 8 Boundary conditions of buoyancy foundation spherical shells and artificial reefs

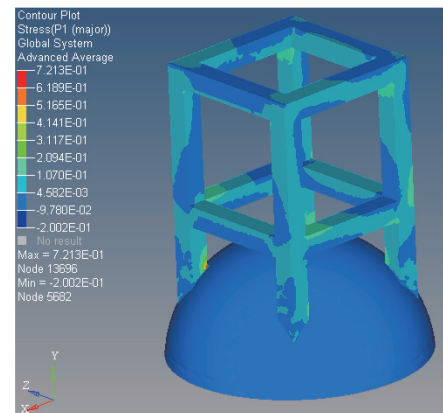


图 9 浮力基础球壳及鱼礁第一主应力云图

Fig. 9 First principal stress cloud diagram of buoyancy foundation spherical shells and artificial reefs

从结果可看出,浮力基础球壳及鱼礁第一主应力最大值为 0.721 MPa,小于设计值,满足强度要求。

4 抗淤埋分析

人工鱼礁安装稳定位置平衡方程为:

$$(\rho_{混} - \rho_{水})gV_{鱼礁} + (\rho_{材} - \rho_{泥})gV_{桩} + \rho_{混}gV_{基础混} - \rho_{水}gV_{基础水} - \rho_{泥}gV_{基础泥} = pA_T \quad (9)$$

式中: A_T 为筒形桩底面积, m^2 ; p 为淤泥承载力, Pa ; $\rho_{混}$ 为混凝土密度, kg/m^3 ; $\rho_{材}$ 为筒形桩密度, kg/m^3 ; $\rho_{水}$ 为水的密度, kg/m^3 ; $\rho_{泥}$ 为淤泥的密度, kg/m^3 ; $V_{鱼礁}$ 为鱼礁体积, m^3 ; $V_{桩}$ 为筒形桩的体积, m^3 ; $V_{基础混}$ 为浮力基础混凝土体积, m^3 ; $V_{基础水}$ 为浮力基础在安装的平衡位置时排开水体积, m^3 ; $V_{基础泥}$ 为浮力基础在安装的平衡位置时排开泥体积, m^3 。

不考虑淤泥的承载力,安装稳定位置为泥面距离浮力基础顶部 0.55 m 处。该浮力基础埋在淤泥里一定深度,其浮力可以调整,基础越往下,其浮力越大,这样可以防止鱼礁持续下沉,具有一定的回复能力,起到抗淤埋的作用。

5 稳定性分析

5.1 分析方法

5.1.1 风暴潮作用下抗滑稳定性分析

根据《港口工程桩基规范》^[18],桩的水平承载力可由下式确定:

$$F_C = 9C_u D(L_{桩} - 1.5D) \quad (10)$$

式中: F_C 为单桩阻滑力, kN ; C_u 为不排水抗剪强度, kPa ; $L_{桩}$ 为桩的入土深度, m ; D 为筒形桩直径, m 。

5.1.2 风暴潮作用下抗拔承载力分析

在黏土中,筒形桩考虑 3 种不排水破坏的模式:(1)桩单独从土中拔出;(2)桩内的土柱因张力失效而与基础分离和桩筒一同被拔出;(3)移动了大量土体,逆荷载失效,外部破坏。吸力桩的极限抗拔能力取 3 种所得的最小值^[19-20]。

(1)桩单独从土中拔出,桩筒的内、外壁的土发生剪切破坏,其受力图如图 10(a)所示,极限抗

拔力为:

$$F_1 = W_p + F_{ext} - F_{int} + T_e + T_i - F_{tip} \quad (11)$$

式中: W_p 为筒桩自身在淤泥中的浮重, kN ,这部分在此由浮力基础抵消为 0; F_{ext} 为桩顶外压力(kN),其中, $F_{ext} = A_e \gamma_w d_1$, A_e 为桩顶外截面积(m^2), γ_w 为水浮容重(kN/m^3), d_1 为桩顶所处的水深(m); F_{int} 为桩顶内压力(kN),其中, $F_{int} = A_i P_{top}$, A_i 为桩顶内截面积(m^2), P_{top} 为桩内水压力(kPa); T_e 为外侧摩阻力(kN),其中, $T_e = P_e C_u A_e L_{桩}$, P_e 为桩截面外周长(m), C_u 为不排水抗剪强度(kPa), $L_{桩}$ 为入土深度(m), T_i 为内侧摩阻力(kN),其中, $T_i = P_i C_u A_i L_1$, L_1 为桩内入土深度(m), P_i 为内测周长(m), A_e 、 A_i 根据 API-RP-2GEO^[21]第 8.1.3 节规定,对于欠固结黏土取 1; F_{tip} 为桩尖压力,其中, $F_{tip} = P_{tip}(A_e - A_i)$, P_{tip} 为基准水平面上桩截面(土塞)中的孔隙压力(kPa),当桩与土的界面完全空化 $P_{tip} = P_{top} = -100$ kPa (一个大气压), $A_e \approx A_i$, F_{tip} 约为 0。

(2)当负压超过一定限制时,筒体及其土塞一块拔出,其受力情况如图 10(b)所示,极限抗拔力为:

$$F_2 = W_p + F_{ext} + T_e + W_s + F_T \quad (12)$$

式中: W_s 为筒内土的浮重(kN),其中, $W_s = A_i \gamma_M L_1$, γ_M 为土的浮容重(kN/m^3); F_T 为桩端断面上的土抗力(kN),其中, $F_T = A_i [\min(\sigma_T - p_{tip})]$, $\sigma_T = 2c_u - \sigma_h$ 为桩端断面上的土塞抗拉强度(kPa), σ_h 为在基准水平面处,即在静止状态下土压力系数为 1.0 时,土塞与桩内壁之间总水平应力,不排水状态下有: $\sigma_h = \max\left(\sigma_{lim}, \frac{W_s - T_i}{A_i}\right)$, kPa 。当埋置不深时, $\sigma_{lim} = \gamma_w d$ (kPa), d 为桩底端面至静水平面的深度(m)。

(3)外部破坏情况,其受力情况如图 10(c)所示,极限抗拔力为:

$$F_3 = W_p + F_{ext} + T_e + W_s + NC_u A_e - q_{tip} A_e \quad (13)$$

其中: $N = \min\left[9, 6.2\left(1 + \frac{0.35L_2}{p_e}\right)\right]$, L_2 为桩底端面至泥面的深度(m); $q_{tip} = d_2 \gamma_w + L_2 \gamma_M$, kPa , d_2 泥面与水面的距离(m)。

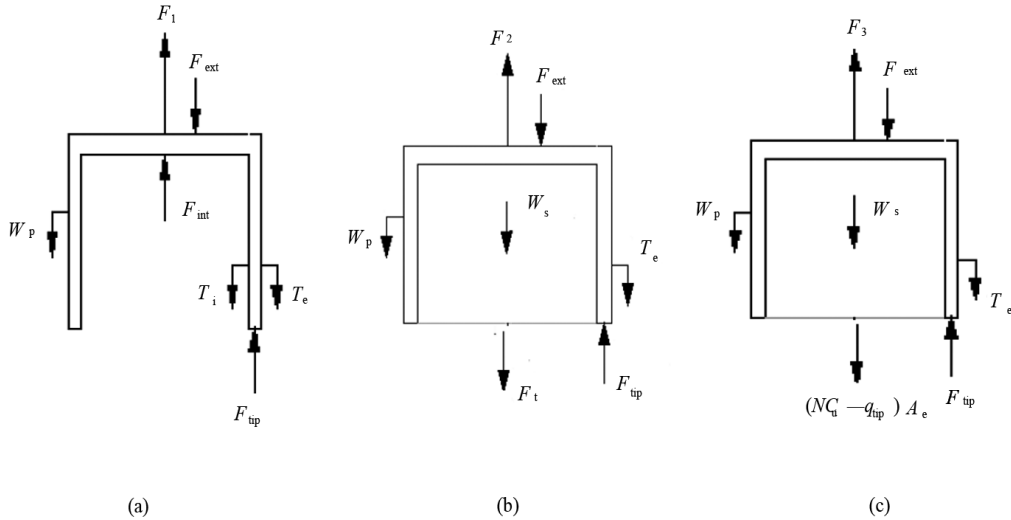


图 10 筒形桩 3 种破坏模式受力图

Fig. 10 Force diagram of the three failure modes of cylindrical piles

5.1.3 风暴潮作用下抗倾覆稳定性分析

人工鱼礁礁体在水流和波浪的冲击作用下不发生翻滚倾倒,就需要满足筒形桩在埋置土中时其侧摩阻力和抗拔力共同作用下的力矩 M_1 大于流体最大作用力产生的倾覆力矩 M_2 。为了简化计算,将筒形桩的桩底作为旋转中心,且不考虑土体对筒形桩的土压力,抗倾覆的计算简图如图 11 所示^[22]。

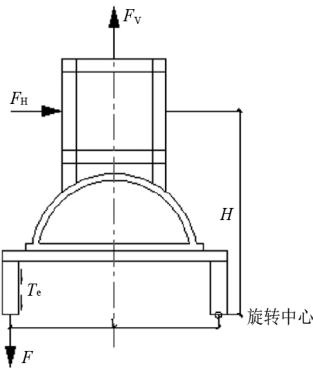


图 11 人工鱼礁抗倾覆计算简图

Fig. 11 Schematic diagram of anti-overturning calculation of artificial reefs

$$\begin{aligned} M_1 &= (F + T_e) \times L \\ M_2 &= F_H \times H + F_V \times L/2 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: M_1 为抗倾覆力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_2 为倾覆力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; T_e 为筒形桩周围土侧摩阻, kN ; F 为筒形桩抗拔力, kN ; F_H 为波流水平力, kN ; F_V 为波流

垂直作用力, kN ; H 为水平力到旋转中心的距离, m ; $L_{\text{距}}$ 为筒形桩的中心距, m 。自重未考虑的原因是自重与浮力基础产生的浮力相互抵消,垂向合力为 0。

5.2 稳定性校核

水平抗力 $F_C = 14.5 \text{ kN}$ 。波流联合作用的水平冲击力 $F_H = 4.9 \text{ kN}$ 。计算得到抗滑系数为 $14.5/4.9 = 3.0$, 满足规范要求^[23]。

根据破坏模式不同分 3 种情况进行计算,失效模式 1、2、3 算得的竖向抗拔力分别为 17.3 kN 、 16.3 kN 、 13.5 kN , 抗拔承载力取最小者。波浪产生的上托力 $F_V = 2.22 \text{ kN}$, 故设计的筒形桩的抗拔系数为 $13.5/2.22 = 6$, 满足规范要求。

计算得到 $M_1 = 62.4 \text{ kNm}$, $M_2 = 12.0 \text{ kNm}$, 抗倾覆系数为 $62.4/12 = 5.2$, 满足规范要求。

6 结论

针对淤泥地质条件,设计了新型的人工鱼礁,以确保鱼礁不淤埋,并根据波流动力学理论及 Fluent 数值模拟对此礁体进行稳定性计算,结果表明,在波流作用下,礁体最大作用力为 4900 N , 最大作用力矩 12000 Nm , 抗滑系数 3, 抗拔系数 6, 抗倾覆系数 5.2, 满足礁体稳定性要求。 □

参考文献

[1] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016,

- 40(7):1133-1140.
- [2] 阙华勇,陈勇,张秀梅,等.现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J].中国工程科学,2016,18(3):79-84.
- [3] 章守宇,许敏,汪振华.我国人工鱼礁建设与资源增殖[J].渔业现代化,2010,37(3):55-58.
- [4] 陈坤,张秀梅,刘锡胤,等.中国海洋牧场发展史概述及发展方向初探[J].渔业信息与战略,2020,35(1):12-21.
- [5] 许强,刘舜斌,许敏,等.海洋牧场建设选址初步研究—以舟山为例[J].渔业现代化,2011,38(2):27-31.
- [6] 许妍,鲍晨光,梁斌,等.天津市近海海域人工鱼礁选址适宜性评价[J].海洋环境科学,2016,35(6):846-867.
- [7] 夏章英.人工鱼礁工程学[M].北京:海洋出版社,2011:98-105.
- [8] KIM D K, KIM W K, SON Y S, et al. Settlement characteristics of three type of artificial reefs on sandy bottom in the eastern coast of Korea[J]. The Korean of Marine Engineering, 2008, 32(2): 359-364.
- [9] KIM D K, SUH S H, CHO J K. Settlement characteristics of square reefs installed on soft seafloor ground[J]. The Korean of Marine Engineering, 2010, 34(1): 163 - 167.
- [10] 吴星辰.人工鱼礁区泥沙输送的数值模拟研究[D].上海:上海海洋大学,2019.
- [11] 肖玉芳,卢永昌,麦宇雄.广州港南沙港区集装箱码头工程设计技术[C].广州:中国交通建设集团有限公司第一届科技大会,2009:17-25.
- [12] 徐润刚,黎维祥,王科华.广州港南沙港区水文泥沙条件及回淤分析[J].水运工程,2009(7):29-35.
- [13] 邹志利.海岸动力学[M].北京:人民交通出版社,2009:28-105.
- [14] 吴子岳,孙满昌,汤威.十字型人工鱼礁礁体的水动力计算[J].海洋水产研究,2003,24(4):32-35.
- [15] 刘彦.人工鱼礁水动力特性数值与实验研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [16] 刘霞,谭国焕,王大国.基于边界造波法的二阶 Stokes 波的数值生成[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(1):107-111.
- [17] 宋玉普.水工钢筋混凝土结构学[M].北京:中国电力出版社,2012:407.
- [18] JTJ254—98.港口工程桩基规范[S].
- [19] CHRI,朱儒弟.大型负压桩的上拔阻力[J].海岸工程,1999(1):90-94.
- [20] 徐继祖,李维扬,汪克让,等.海洋工程结构动力分析[M].天津:天津大学出版社,1992:232-258.
- [21] API RP GEO, Geotechnical and foundation design considerations [Z]. American Petroleum Institute, 2014.
- [22] 朱焰.吸力式筒型基础承载力研究[D].天津:天津大学,2002.
- [23] JTJ267—98.港口工程混凝土结构设计规范[S].

Design and research of new artificial reefs suitable for silty texture foundation

ZHOU Qiuping, SHENG Guoqiang

(Institute of Industry Technology, Guangzhou Academy of Sciences, Guangzhou 511458, Guang dong, China)

Abstract: In order to keep the artificial reefs stable on the silty substrate without sedimentation, a new type of artificial reefs is proposed in this paper, mainly including the reef body, buoyancy foundation, and cylindrical piles. Based on the surveyed and measured geological, hydrological, extreme wind and wave flow, Stockes wave theory and Fluent software were used to simulate the flow field effects around the reefs, and the environmental loads on the artificial reefs were calculated through theoretical analysis and numerical simulation. Through theoretical analysis, the pull-out resistance and horizontal resistance of the negative-pressure cylindrical pile under the silt foundation were obtained. Finally, it was obtained that the new artificial reefs can be kept stable without sedimentation under a given release environment, and its anti-slip and anti-overturning safety factors under the action of wave current can meet the specifications. This study provides a method for the design of artificial reefs on silty substrates, and has certain guiding significance.

Key words: artificial reefs; silty substrate; environmental load; flow field effect; stability