

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220425001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0127-15

引用格式: 屈科, 徐瑶瑶, 黄竞萱, 等. 聚焦波作用下悬浮隧道水动力特性数值模拟研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 127-141.

Citation: QU Ke, XU Yaoyao, HUANG Jingxuan, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of submerged floating tunnels under the action of focused waves [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 127-141.

# 聚焦波作用下悬浮隧道水动力特性数值模拟研究

屈科<sup>1,2,3</sup>, 徐瑶瑶<sup>1</sup>, 黄竞萱<sup>1</sup>, 温博浩<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】研究聚焦波作用下悬浮隧道水动力及结构动态响应特性。【方法】采用高精度有限体积方法数值求解不可压缩两相流动控制方程, 建立高精度数值波浪水槽模型。应用嵌套网格技术, 采用四阶 Runge-Kutta 方法, 数值计算了波浪荷载作用下悬浮隧道动态响应的弹簧-质量-阻尼系统。通过设计合理的计算工况, 系统分析不同波浪要素及结构动力参数对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响。【结果】聚焦波作用下悬浮隧道所受最大水平荷载稍大于竖向荷载, 最大水平位移远大于最大竖向位移, 约为最大竖向位移的 5 倍。【结论】随着有效波高的增加, 悬浮隧道所受水动力荷载逐渐增大, 结构动态响应逐渐增强; 水深和谐峰周期对悬浮隧道水动力及结构动态响应的影响有限; 随着淹没深度的增加, 悬浮隧道所受波浪荷载逐渐减小, 结构动态响应逐渐减弱; 在相同入射波条件下, 悬浮隧道直径越小, 动态响应越小。上述研究结果可为悬浮隧道的参数设计提供一定参考。

**关键词:** 聚焦波; 悬浮隧道; 水动力特性; 动态响应; 有效波高; 谱峰周期; 淹没深度

**中图分类号:** TV139.2<sup>6</sup>

**文献标志码:** A

## 0 引言

为了缓解海岸区域的交通压力, 适应复杂的深水水域, 学者们提出了悬浮隧道(submerged floating tunnel, SFT)的设计方案<sup>[1]</sup>。相比传统的桥梁和海底隧道, 悬浮隧道作为一种环境友好型的设计方案, 具有显著的造价优势<sup>[2]</sup>。在真实复杂的海洋环境中, 悬浮隧道极易受到海洋强非线性波浪的作用。非线性波浪荷载容易引起悬浮隧道系统的结构动态响应, 对隧道的安全构成潜在威胁。畸形波作为一种强非线性波浪, 具有波高大、发生突然、能量集中和破坏力极强等特点, 对海洋结构物具有极大的破坏作用<sup>[3-4]</sup>。因此, 研究畸形

波与悬浮隧道的相互作用具有重要的意义。

不同于传统的海洋工程结构, 悬浮隧道对结构水动力及动态响应的要求更为严格。基于此, 国内外学者从理论分析、物理模型试验和数值模拟 3 个方面对悬浮隧道开展了大量的研究工作。以项贻强等<sup>[5]</sup>为代表的学者基于 Morison 方程, 采用分层积分的方法计算了悬浮隧道的波浪力, 通过建立悬浮隧道管段的运动控制方程研究了流场<sup>[6-9]</sup>、波浪场<sup>[10-11]</sup>以及内波和海流共同作用<sup>[12]</sup>下悬浮隧道管段的运动响应特性, 并且针对海况条件、结构断面形式、放置深度和支撑形式及间距等因素对悬浮隧道动静态响应的影响进行了计算分析<sup>[13]</sup>, 结果表明 Morison 方程基本能预测隧道的水动力特性。但对于强非线性波浪荷载, Morison 方

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-19; 接受日期: 2022-05-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5582); 湖南省教育厅科学研究重点项目(2019A024); 国家自然科学基金资助项目(51839002)

通信作者: 屈科(1985—)(ORCID: 0000-0003-0054-4617), 男, 副教授, 主要从事波浪水动力数值模拟研究。

E-mail: qukeforjc@126.com

程的误差显著增大。悬浮隧道的物理模型试验主要通过水槽试验开展,研究静水压强<sup>[14]</sup>、水流<sup>[15-16]</sup>、地震荷载<sup>[17]</sup>、波浪(规则波<sup>[18-20]</sup>、随机波<sup>[21-22]</sup>)等的作用。除了物理模型试验,许多学者还开展了大量数值模拟研究。REMSETH等<sup>[23]</sup>用Navier-Stokes方程研究了规则波和定常流共同作用下悬浮隧道的流固耦合问题。罗刚等<sup>[24]</sup>采用大涡模拟法分析了5种不同截面悬浮隧道的受力特性和流场分布,发现耳形截面形式的悬浮隧道结构稳定,升力和阻力系数最小。葛斐等<sup>[25]</sup>利用柔性系数法推导出悬浮隧道的等效刚度,研究了波浪作用下悬浮隧道的运动响应特性,结果表明忽略不同自由度之间的耦合作用得到的垂向位移偏小;刘宇等<sup>[26]</sup>基于势流理论,将锚索简化为水平方向和垂直方向的弹簧系统,并采用Newmark- $\beta$ 方法求解悬浮隧道运动方程,考虑了不同截面和锚索倾角对悬浮隧道动态响应的影响。

虽然前人针对悬浮隧道的水动力特性开展了一定的理论、试验和数值模拟研究,但关于畸形波作用下悬浮隧道水动力及动态响应的研究成果较少。海洋中随机波浪群在特定位置和时间聚焦形成的聚焦波是畸形波产生的重要机理之一<sup>[27]</sup>,本文采用高精度有限体积方法数值求解不可压缩两相流动控制方程,建立高精度数值波浪水槽模型;应用嵌套网格技术,采用四阶Runge-Kutta方法,开展聚焦波作用下悬浮隧道水动力及结构动态响应特性的研究工作;系统分析不同波浪要素及结构动力参数对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响。本文的研究成果对悬浮隧道的优化设

计和工程建设具有一定的借鉴意义。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

本模型基于有限体积法数值求解了两相不可压缩流体的控制方程,包括连续性方程和动量方程,表达式如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m u_i}{\partial t} + \rho_m u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + (\rho_m - \rho_r) g_i \quad (2)$$

式中: $u_i$ 、 $u_j$ 为来流速度; $\rho_m$ 为气-液两相的混合密度; $\rho_r$ 为参考密度; $t$ 为时间; $P$ 为压力; $\mu_e$ 为有效黏度; $g_i$ 为重力加速度。

对于Navier-Stokes方程,即式(2),左侧为由速度随时间变化的瞬态项和对流项组成的惯性力;右侧第一项为压力,第二项为液体黏性力,最后一项为体积力。为了求解控制方程,需在嵌套网格上实现有限体积法。其中,压力-速度耦合方法采用的是Coupled耦合算法,与基于压力分离的算法相比,该算法具有一定的优越性。此外,本文采用高分辨率流体体积(volume of fluid, VOF)分数方法来分辨水气界面,具体可参考文献[28]。

### 1.2 湍流模型

本文采用剪应力输运(shear stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型<sup>[29]</sup>来计算湍流黏性系数,控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_\tau) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_i} = \frac{\gamma}{\nu_\tau} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_\tau) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为水流密度; $k$ 为湍流动能; $\omega$ 为比耗散率; $\tau_{ij}$ 为黏性切应力; $\mu$ 为层流表观动力黏性系数; $\mu_\tau$ 为湍流动力黏性系数; $\nu_\tau$ 为湍流运动黏性系数; $\beta^*$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\omega$ 、 $\sigma_\omega$ 为封闭常数。为了实现SST  $k-\omega$ 湍流模型,引入混合常数 $F_1$ ,对任意常数 $\phi$ ,有:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (5)$$

式中: $\phi_1$ 表示 $k-\omega$ 模型的参数组; $\phi_2$ 表示 $k-\varepsilon$ 模型

的参数组; $\phi$ 表示SST  $k-\omega$ 模型的参数组。

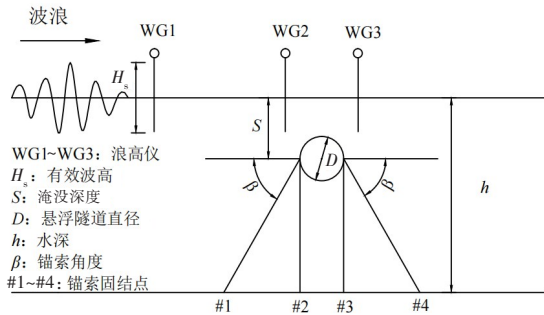
### 1.3 悬浮隧道运动控制方程

悬浮隧道计算区域的布置如图1所示。悬浮隧道结构的运动可以简化为二维平面弹性支撑的弹簧-质量-阻尼系统,如图1(b)所示。本文考虑悬浮隧道水平和竖直方向的振动,则悬浮隧道的运动控制方程如下<sup>[30]</sup>:

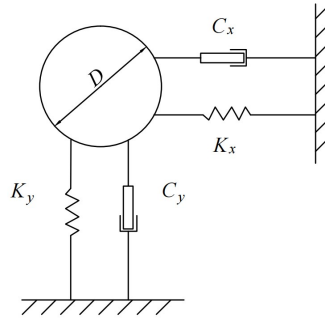
$$M\ddot{x} + C_x\dot{x} + K_x x = F(x, \dot{x}, t) \quad (6)$$

$$M\ddot{y} + C_y\dot{y} + K_y y = F(y, \dot{y}, t) \quad (7)$$

式中:  $M$  为管道结构的总质量  $M = m + m_a$ , 包括管道质量  $m = m^* \frac{\pi}{4} \rho D^2 L$  和附加质量  $m_a = C_A \frac{\pi}{4} \rho D^2 L$ ;  $m^*$  为质量比;  $C = 2\sqrt{KM}\xi$  为悬浮隧道的系统阻尼, 其中,  $C_x = 2\sqrt{K_x M}\xi_x$ ,  $C_y = 2\sqrt{K_y M}\xi_y$ ; 隧道刚度用弹簧  $K$  表示, 分别等效为横向和垂向刚度系数  $K_x, K_y$ ;  $F(x, \dot{x}, t), F(y, \dot{y}, t)$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的外力;  $\ddot{x}, \dot{x}, x$  和  $\ddot{y}, \dot{y}, y$  分别为管道  $x$  和  $y$  方向运动的加速度、速度和位移;  $D$  为管道直径;  $\rho$  为水的密度;  $L$  为管道长度,  $L=1$  m;  $C_A$  为附加质量系数, 圆形断面一般取  $C_A=1$ <sup>[30]</sup>;  $\xi$  为系统阻尼比。



(a) 聚焦波与悬浮隧道作用的计算区域布置图



(b) 悬浮隧道动态响应的弹簧-质量-阻尼系统细节图

图1 悬浮隧道计算区域布置图

Fig. 1 Computational layout for the submerged floating tunnel

本文采用四阶 Runge-Kutta 方法, 利用用户自定义函数来求解悬浮隧道运动方程。采用四阶 Runge-Kutta 方法求解悬浮隧道结构运动方程的过程如下:

对于振动的悬浮隧道, 定义速度为:

$$v_x(t) = \dot{x}(t) \quad (8)$$

$$v_y(t) = \dot{y}(t) \quad (9)$$

悬浮隧道初始条件为:

$$v_x(0) = v_y(0) = 0 \quad (10)$$

$$x(0) = y(0) = 0 \quad (11)$$

根据四阶 Runge-Kutta 方法, 可求解  $x$  和  $y$  方向的运动方程。在  $x$  方向, 式(6)可表示为:

$$\dot{x}(t_{n+1}) = \dot{x}(t_n) + \frac{\Delta t}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (12)$$

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + v_x(t_n)\Delta t + \frac{\Delta t^2}{6} (k_1 + k_2 + k_3) \quad (13)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3, k_4$  均为四阶 Runge-Kutta 方法的系数;  $\Delta t$  为时间步长, 为保证数值模拟计算的准确性, 本文设置  $\Delta t$  为 0.005 s。

#### 1.4 造波方法

本文通过在计算区域的入口边界施加速度和波面高程的方法生成聚焦波, 对于入射波高较大的聚焦波, 不同波组分之间的波-波相互作用不可忽略。因此, 本文采用二阶聚焦波理论, 其表达式为:

$$V = V^{(1)} + V^{(2)} \quad (14)$$

$$\eta = \eta^{(1)} + \eta^{(2)} \quad (15)$$

式中:  $V^{(1)}, \eta^{(1)}$  分别为一阶波浪速度和波面高程;  $V^{(2)}, \eta^{(2)}$  分别为二阶波浪速度和波面高程<sup>[31]</sup>。所生成的聚焦波的速度和波面控制方程由  $N$  个不同频率的波浪组分组成。基于线性叠加理论, 每个波分量的波幅都可以用波谱  $S_i(\omega)$  和聚焦位置处的波幅  $A_F$  表示, 其中波谱为 JONSWAP 谱, JONSWAP 谱的具体表达式为:

$$S_i(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega_i^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_i}{\omega_p}\right)^{-4}\right) r^{\exp\left(\frac{-(\omega_i - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right)} A_r \quad (16)$$

式中:  $H_s$  为有效波高;  $\omega_i$  为角频率;  $\omega_p$  为峰值角频率;  $r$  为无量纲峰形参数,  $r=3.3$ ;  $A_r$  为修正因子,  $A_r = 1 - 0.287 \ln r$ ;  $\sigma$  为峰形参数, 当  $\omega_i < \omega_p$  时,  $\sigma=0.07$ , 当  $\omega_i > \omega_p$  时,  $\sigma=0.09$ 。详见参考文献[32]。

## 2 模型验证

### 2.1 聚焦波水面和速度验证

本节计算了聚焦波在平直水槽的生成及传播过程, 并将计算结果同 NING 等<sup>[32]</sup>的试验结果进行对比, 以验证本文数值模型的计算能力。NING



等<sup>[32]</sup>的物理模型试验是在大连理工大学长 69 m、宽 3 m 的水槽内进行的,聚焦波的聚焦位置设置在距离造波板 11.4 m 处。为了减少计算量,提高计算效率,本文参考 BIHS 等<sup>[33]</sup>的设置,将数值计算区域设置为长 15.0 m、高 0.8 m 的矩形区域,聚焦位置  $x_0=7.2$  m。验证 NING 等<sup>[32]</sup>的试验工况三:水深  $h=0.5$  m,谱峰周期  $T_p=1.25$  s,有效波幅  $A_s=0.0875$  m,聚焦时间  $t_f=10$  s。为了确保计算的精度,在波高范围内采用 25 层网格。当有效波高较大时,由于波-波之间的强非线性作用,实际聚焦位置一般会略微向下游区域移动,聚焦时间也与输入的聚焦时间略有不同。本文数值模型计算得到的聚焦波的实际聚焦位置为距计算区域入口 8.7 m 处,实际聚焦时间为 8 s。

图 2 所示为实际聚焦位置处计算水位与试验测量水位的对比(图中  $\zeta$  为自由水面)。从图 2 可以看出,无论是波峰聚焦还是波谷聚焦,计算得到的聚焦波波面与试验结果具有较高的吻合度。图 3 所示为静水面以下 0.15 m 处聚焦位置的水平波速时程曲线。

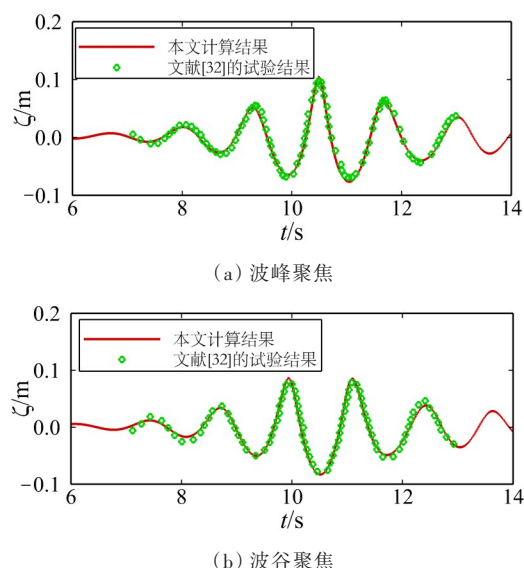
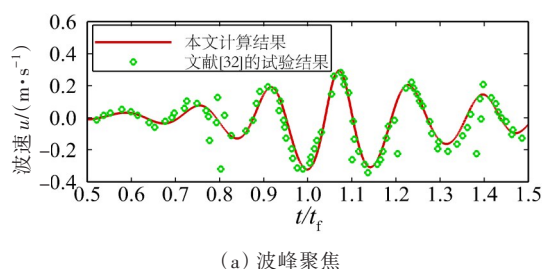
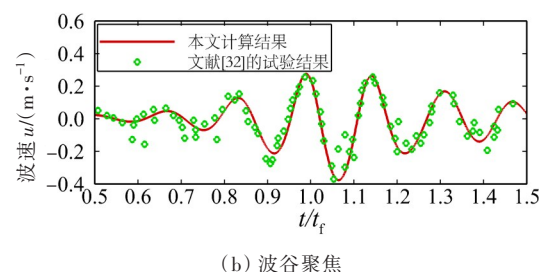


图 2 聚焦位置处波面时程曲线

Fig. 2 Temporal profiles of wave elevations at focal point



(a) 波峰聚焦



(b) 波谷聚焦

图 3 静水面以下 0.15 m 处水平波速时程曲线

Fig. 3 Temporal profiles of horizontal velocity below still water surface 0.15 m

从图 3 可以看出,数值计算结果与试验测量结果吻合较好。通过上述对比可知,本文数值模型可以准确地计算聚焦波的生成和传播过程。

## 2.2 规则波与圆柱相互作用

为了验证本文数值模型在计算悬浮隧道水动力荷载方面的能力,本节数值计算了规则波与水平圆柱复杂的相互作用,并且将计算得到的水位、水平及竖向荷载与柏君励等<sup>[34]</sup>的试验结果进行了对比。柏君励等<sup>[34]</sup>的物理模型试验是在上海交通大学的风浪循环水槽内进行的。该水槽的工作段长 8.00 m,宽 3.00 m,验证工况的静水深  $h=1.63$  m,圆柱直径  $D=0.06$  m,淹没深度  $S=0.00$  m,入射波高  $H=0.03$  m,周期  $T=0.7$  s。数值计算区域长 8 m,高 3 m,圆柱放置在距计算区域入口 2 m 的位置,计算区域布置如图 4 所示。在距圆柱左侧 0.3 m 的位置设置水位测点 WG1。在波高方向共划分 25 层网格,在圆柱表面附近采用高分辨率计算网格。图 5~6 所示为自由水面、水动力荷载的数值计算结果和试验结果的对比。

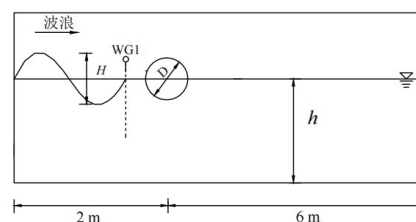


图 4 规则波与水平圆柱作用计算区域布置图

Fig. 4 Computational layout for regular wave impacting horizontal circular cylinder

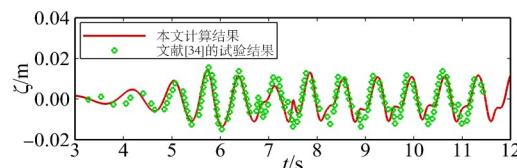


图 5 WG1 处自由水面的对比

Fig. 5 Comparison of water surface elevations at WG1

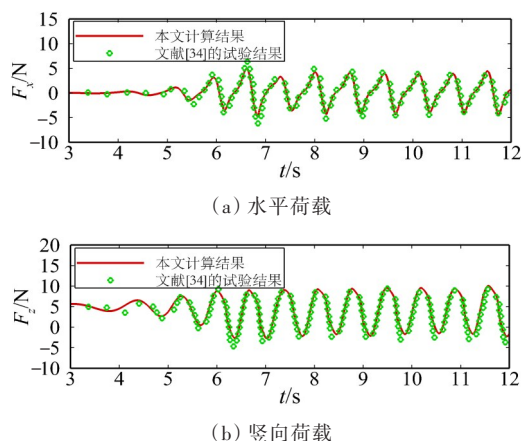


图6 圆柱水动力荷载的对比

Fig. 6 Comparisons of hydrodynamic forces exerted on the cylinder

从图5~6可以看出,数值计算结果同试验结果吻合较好,说明本文数值模型具有计算水动力荷载的能力。

### 2.3 圆柱两自由度涡激振动验证

为了验证本文数值模型在模拟悬浮隧道结构动态响应方面的能力,本节通过数值波浪水槽模型模拟了水流作用下圆柱两自由度的涡激振动,并将计算结果与JAUVTIS等<sup>[35]</sup>的试验结果进行了对比。在JAUVTIS等<sup>[35]</sup>的试验中,圆柱直径 $D=0.0381\text{ m}$ ,系统阻尼比 $\xi=0.0036$ ,质量比 $m^*=2.6$ ,圆柱在水中振动的固有频率 $f_n=0.4\text{ Hz}$ 。该试验以约化速度 $U_r=U/(f_n D)$ 为变化参数,研究了不同约化速度( $U_r=2\sim 16$ )下圆柱的振动特性。其中,圆柱的水平振幅用 $A_x$ 表示,竖向振幅用 $A_y$ 表示。本文的数值计算采用了与JAUVTIS等<sup>[35]</sup>的试验相同的工况,计算区域的大小为 $60D\times 40D$ ,圆柱的圆心位置到计算区域入口和底边界的距离均为 $20D$ ,计算区域布置如图7所示。

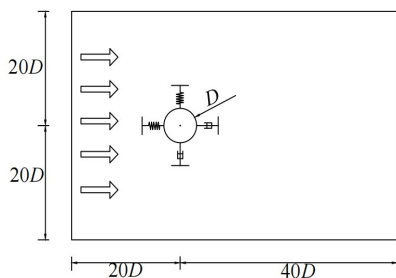


图7 水流作用下圆柱二自由度涡激振动计算区域布置图

Fig. 7 Computational layout for the two-degree-of-freedom vortex induced vibration of a circular cylinder under the action of water flow

圆柱的最内层网格的分辨率依据 $y^+$ 值( $y^+$ 为无量纲壁面距离)确定,在保证 $y^+\approx 1$ 的前提下将数值模型计算得到的结果和试验结果对比。除此之外,本文还对比了GSELL等<sup>[36]</sup>和ZHAO<sup>[37]</sup>的数值计算结果,如图8所示。从图8可以看出,本文的数值计算结果整体上同JAUVTIS等<sup>[35]</sup>的试验结果较为吻合,与ZHAO<sup>[37]</sup>的数值计算结果的吻合度较高,并且整体上优于GSELL等<sup>[36]</sup>的数值计算结果,说明本文数值模型具有模拟结构动态响应的能力。

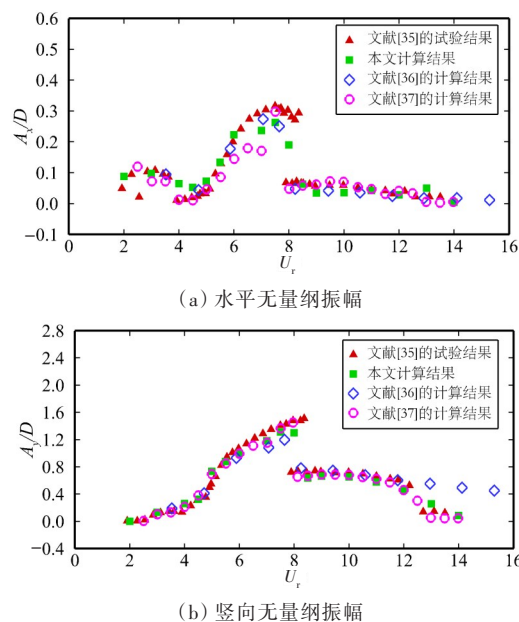


图8 不同约化速度下圆柱的无量纲振幅

Fig. 8 Non-dimensional amplitude as a function of the different approximate velocity

## 3 结果讨论

本文参考国内外拟建悬浮隧道的参数,以圆形管道断面为研究主体,对聚焦波作用下悬浮隧道的水动力特性和结构动态响应进行了高精度数值模拟研究。依据日本北海道的隧道原型和环境条件<sup>[19]</sup>,将基础算例的参数设置为:有效入射波高 $H_s=9.3\text{ m}$ ,谱峰周期 $T_p=13\text{ s}$ ,静水深 $h=100\text{ m}$ ,隧道直径 $D=23\text{ m}$ ,淹没深度 $S=30\text{ m}$ ,浮重比 $R_{BW}=1.4$ 。悬浮隧道约束采用混合布索方式,由两条竖直布置和两条倾斜布置( $\beta=60^\circ$ )的锚索组成。根据文献<sup>[19]</sup>的试验结果,该锚索系统可以简化为水平和竖向的线性弹簧系统,其中水平和竖向的等效

刚度分别为  $K_x=5 \times 10^6$  N/m,  $K_z=2 \times 10^7$  N/m, 数值计算区域的大小为 800 m×140 m。隧道中心设置在距离计算区域入口 280~310 m 的位置。依据不同聚焦波工况下实际聚焦位置的差异适当调整隧道中心位置, 以保证圆柱迎风面始终位于实际聚焦位置。在  $x=100$  m 和悬浮隧道前后 0.5 m 处分别设置 WG1、WG2、WG3 水位测点。

为了研究不同波浪和结构参数对聚焦波与悬浮隧道相互作用的影响, 除设置基础算例的参数外, 本文共设置了 21 个数值模拟工况, 见表 1。

表 1 数值模拟工况的参数设置

Table 1 Parameter setup for numerical cases

工况	有效波高 $H_s/m$	水深 $h/m$	谱峰周期 $T_p/s$	淹没深度 $S/m$	直径 $D/m$
1	5.3	100	13	30	23
2	7.3	100	13	30	23
3	9.3	100	13	30	23
4	11.3	100	13	30	23
5	13.3	100	13	30	23
6	9.3	80	13	30	23
7	9.3	90	13	30	23
8	9.3	110	13	30	23
9	9.3	120	13	30	23
10	9.3	100	10	30	23
11	9.3	100	11	30	23
12	9.3	100	12	30	23
13	9.3	100	14	30	23
14	9.3	100	13	25	23
15	9.3	100	13	35	23
16	9.3	100	13	40	23
17	9.3	100	13	45	23
18	9.3	100	13	30	17
19	9.3	100	13	30	19
20	9.3	100	13	30	21
21	9.3	100	13	30	25

本文对隧道断面的周向压力、水平和竖向水动力荷载、水平和竖向位移分别采用如下方法进行无量纲处理:

$$C_p = \frac{P}{\rho g D} \quad (17)$$

$$F_x^* = \frac{F_x}{\rho g D^2} \quad (18)$$

$$F_z^* = \frac{F_z}{\rho g D^2} \quad (19)$$

$$x^* = \frac{x}{D} \quad (20)$$

$$z^* = \frac{z}{D} \quad (21)$$

式中:  $P$  为悬浮隧道四周承受的压力;  $F_x$ 、 $F_z$  分别为隧道承受的水平 and 竖向荷载;  $h$  为静水水深;  $\rho$  为海水密度, 为 1 028 kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度在竖直方向的分量, 为 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $x$ 、 $z$  分别为悬浮隧道水平和竖向的结构位移。

此外, 本文在对悬浮隧道水动力及结构动态响应特性的分析过程中, 引入了最大荷载和最大位移的概念, 其表达式如下:

$$F_{x\_max}^* = |F_x^*|_{\max} \quad (22)$$

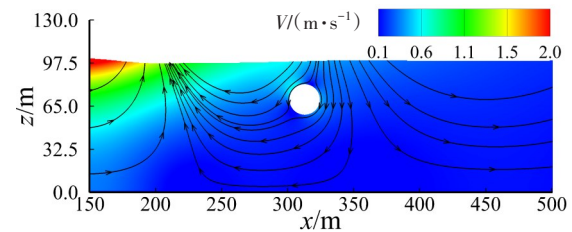
$$F_{z\_max}^* = |F_z^*|_{\max} \quad (23)$$

$$x_{\max}^* = |x^*|_{\max} \quad (24)$$

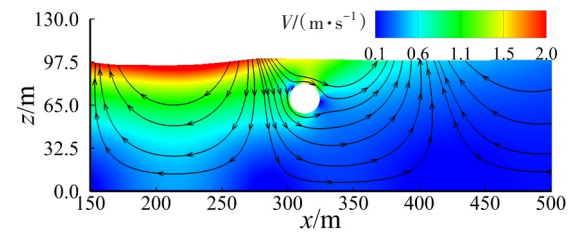
$$z_{\max}^* = |z^*|_{\max} \quad (25)$$

### 3.1 水动力现象

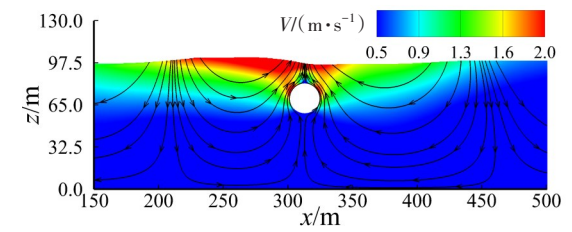
本节基于基础算例分析聚焦波作用下悬浮隧道的水动力特性及结构响应。图 9 为不同时刻聚焦波与悬浮隧道相互作用的水流速度云图。从图 9 可以看出, 随着聚焦波的推进, 水流速度逐渐增大, 但最大速度集中在波面位置。当聚焦波与悬浮隧道相互作用时, 悬浮隧道周围水流的高速区域有所扩大, 隧道周围的流场呈竖直轴对称, 如图 9(c) 所示。



(a)  $t=30.2$  s



(b)  $t=40.2$  s



(c)  $t=49.2$  s



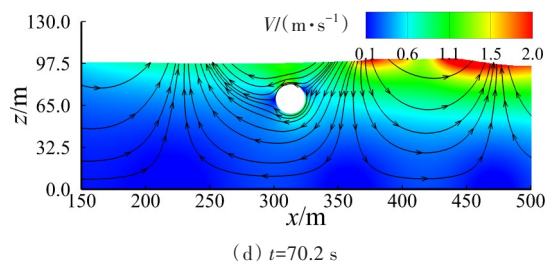


图9 不同时刻聚焦波与悬浮隧道相互作用时水流速度云图

Fig. 9 Snapshots of velocity distribution at different time instances during focused wave impinging the submerged floating tunnel

图10为悬浮隧道前后3个水位测点处的水位时程曲线。从图10可以看出,当波浪在WG2的位置发生波峰聚焦时,聚焦波最大波峰两侧的波谷值相等。此时,聚焦波在悬浮隧道附近的水位达到最大值,但由于受到了隧道的阻碍作用,隧道后的水位最大值有所增加。

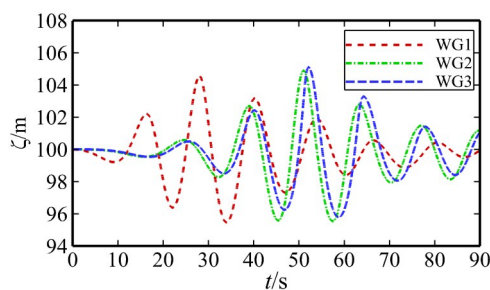
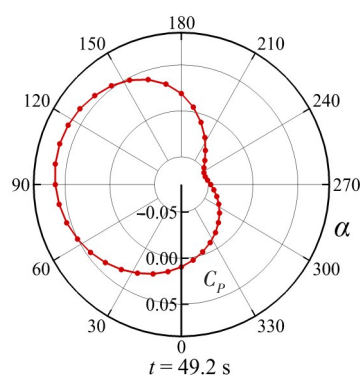


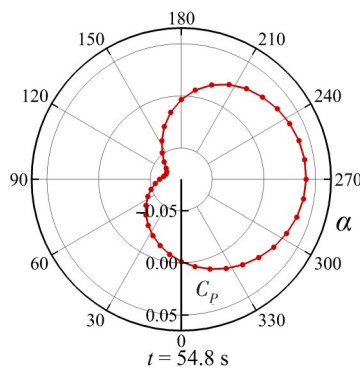
图10 悬浮隧道前后的水位时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of water elevation before and after the submerged floating tunnel

图11所示为聚焦波作用下悬浮隧道在承受最大水平荷载时,其断面周向压力的分布情况,图中, $\alpha$ 为相对隧道最低点沿顺时针方向的转动角度, $C_p$ 为隧道周向压力的无量纲值。当悬浮隧道承受正向最大水平荷载时,隧道的迎浪面和背浪面形成了最大的压力差,即压差阻力,其为结构阻力的主要来源<sup>[38]</sup>。因此,当 $t=40.2$  s时,悬浮隧道承受的水平荷载主要来源于悬浮隧道迎浪面和背浪面的压差阻力,如图11(a)所示。图11(b)给出了悬浮隧道在承受负向最大水平荷载时,其断面周向压力的分布情况。与隧道承受正向最大水平荷载不同的是,此时悬浮隧道断面的迎浪面承受负压作用,而隧道的背浪面承受正压作用,但正、负压力的变化趋势类似。总体而言,当悬浮隧道承受最大水平荷载时,隧道断面迎浪面和背浪面



(a) 承受正向最大水平荷载



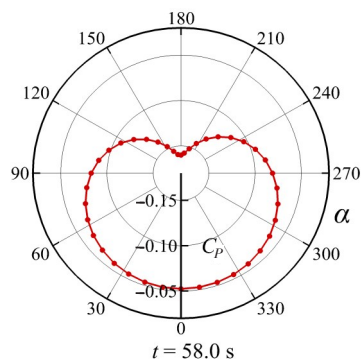
(b) 承受负向最大水平荷载

图11 悬浮隧道在承受最大水平荷载时隧道周向压力分布图

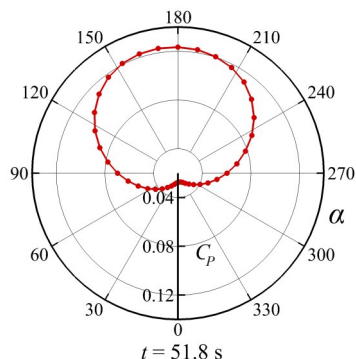
Fig. 11 Pressure distribution around the pipe body when the submerged floating tunnel is subjected to the maximum horizontal load

的压力差大于隧道上下表面的压力差。

悬浮隧道在承受最大竖向荷载时,隧道断面迎浪面和背浪面的压力差小于隧道上下表面的压力差。图12(a)所示为聚焦波作用下悬浮隧道在承受正向最大竖向荷载时,其断面周向压力的分布情况。从图12(a)可以看出,当 $t=58.0$  s时,悬浮隧道断面仅承受负压作用,且在管道顶部出现了最大负压,其与隧道底部的最小负压形成了最大压差。图12(b)给出了聚焦波作用下悬浮隧道在承受负向最大竖向荷载时,其断面周向压力的分布情况。从图12(b)可以看出,此时悬浮隧道断面仅承受正压作用,但当 $\alpha$ 为 $155^\circ \sim 195^\circ$ 时,隧道断面的周向压力相对稳定。在罗刚等<sup>[24]</sup>的研究中也出现了这样一段稳定的压力区域,但在水流的作用下,稳定区域出现在 $220^\circ \sim 320^\circ$ 的位置,此处稳定的压力被称为“截面背压”。因此,当 $t=51.8$  s时,隧道上下表面出现了最大压差阻力,这也是隧道断面所受竖向荷载的主要来源。



(a) 承受正向最大竖向荷载



(b) 承受负向最大竖向荷载

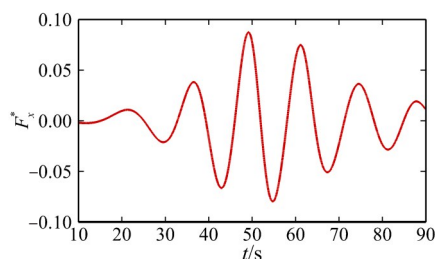
图12 悬浮隧道在承受最大竖向荷载时隧道周向压力分布图

Fig. 12 Pressure distribution around the pipe body when the submerged floating tunnel is subjected to the maximum vertical load

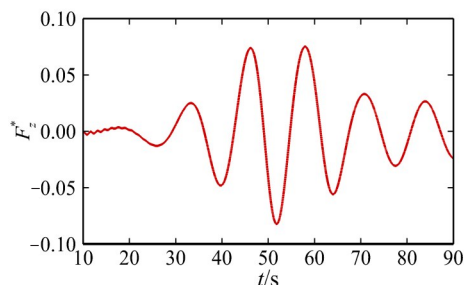
图13所示为悬浮隧道所受水动力荷载的时程曲线。由图13可知,悬浮隧道所受水动力荷载的时程变化趋势与聚焦波波形的变化趋势基本一致。但是,水平荷载要先于竖向荷载达到最大值。

图14所示为聚焦波作用下悬浮隧道两自由度的动态响应。从图14可以看出,悬浮隧道的水平最大位移要远大于竖向最大位移,约为竖向最大位移的5倍。

CHEN等<sup>[39]</sup>也有同样的发现,认为悬浮隧道在波浪传播方向上的位移要比竖直方向的位移对隧道来讲更危险。



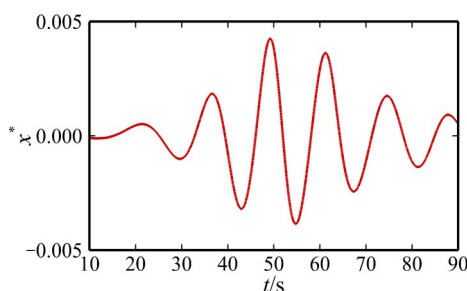
(a) 水平荷载



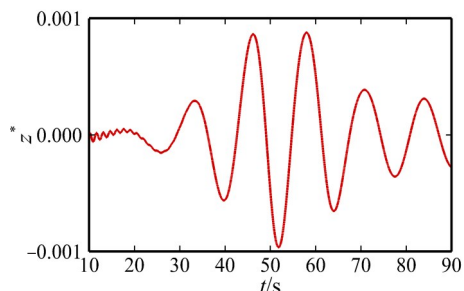
(b) 竖向荷载

图13 悬浮隧道所受水动力荷载的时程曲线

Fig. 13 Temporal evolution of hydrodynamic forces exerted on the submerged floating tunnel



(a) 水平位移



(b) 竖向位移

图14 悬浮隧道的动态响应

Fig. 14 Dynamic responses of submerged floating tunnels

### 3.2 有效波高的影响

本节讨论聚焦波作用下有效波高对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响,共选定了5种有效波高,分别为 $H_s=5.3、7.3、9.3、11.3、13.3$  m。图15所示为悬浮隧道所受最大水动力荷载随有效波高的变化情况。图16所示为悬浮隧道最大位移随有效波高的变化情况。

从图15可以看出,最大水平荷载和最大竖向荷载均随有效波高的增大呈线性增大趋势。当有效波高从5.3 m增大到13.3 m时,最大水平荷载和最大竖向荷载的增长率分别为162.90%和141.36%。由此可知,水平荷载比竖向荷载受有效波高的影响稍大。



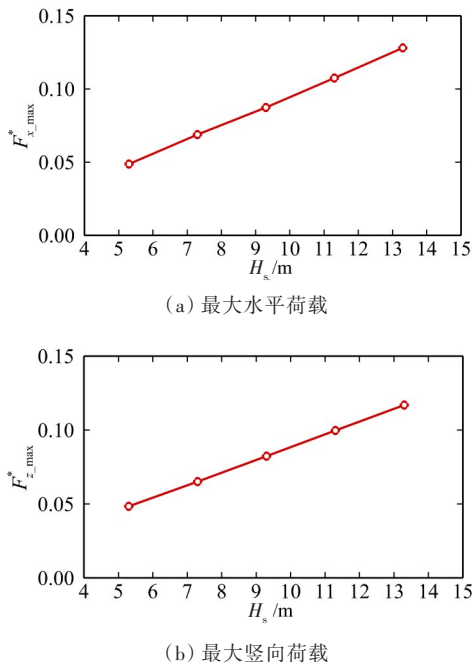


图15 悬浮隧道所受最大水动力荷载随有效波高的变化  
Fig. 15 The variation of maximum hydrodynamic loads on the submerged floating tunnel with effective wave height

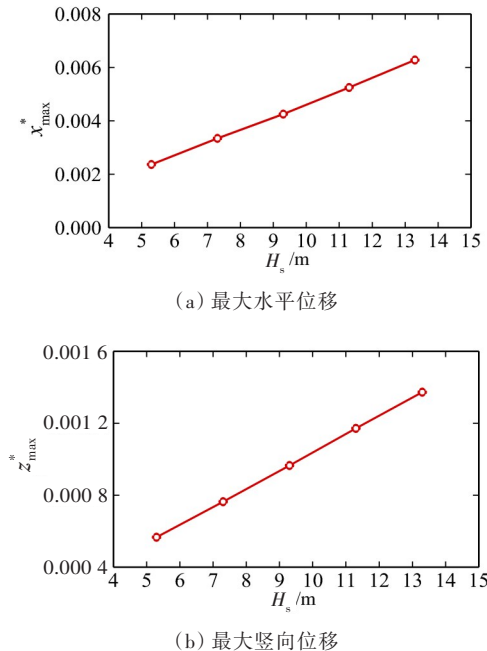


图16 悬浮隧道最大位移随有效波高的变化  
Fig. 16 The variation of maximum displacement of submerged floating tunnels with effective wave height

从图16可以看出,当 $H_s=5.3$  m时,悬浮隧道的最大水平位移为0.002 37;当 $H_s=13.3$  m时,悬浮隧道的最大水平位移为0.006 28,比 $H_s=5.3$  m时增长了164.98%。同样地,当有效波高从5.3 m增大到13.3 m时,悬浮隧道的最大竖向位移由0.000 57增

大到了0.001 37,增长了140.35%。这是因为随着波高的增大,聚焦波的传播速度相应增大,其对悬浮隧道的撞击作用增强,并最终导致悬浮隧道所受水动力荷载和运动位移均有所增大。

### 3.3 谱峰周期和水深的影响

本节讨论聚焦波作用下谱峰周期和水深对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响。选取5个谱峰周期,分别为 $T_p=10、11、12、13、14$  s。图17所示为悬浮隧道所受最大水动力荷载随谱峰周期的变化情况。从图17可以看出,悬浮隧道所受的最大水平荷载随谱峰周期的增大先增大,然后基本保持不变;悬浮隧道所受的最大竖向荷载则随谱峰周期的增大先增大再减小,但最大水平荷载和最大竖向荷载都在 $T_p=12$  s时达到最大值。

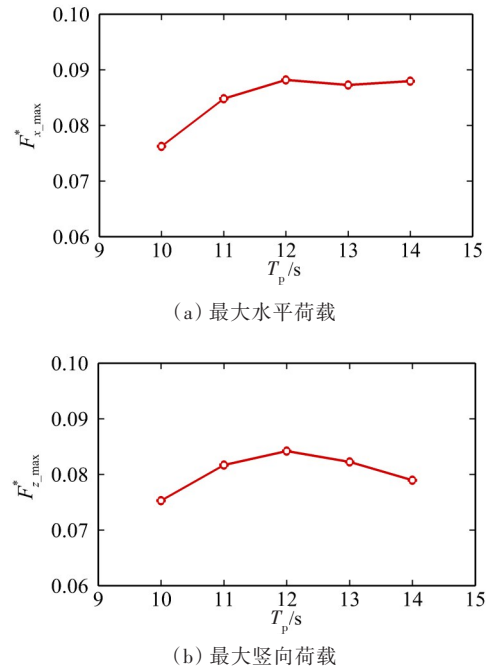


图17 悬浮隧道所受最大水动力荷载随谱峰周期的变化  
Fig. 17 The variation of maximum hydrodynamic loads on the submerged floating tunnel with spectral peak periods

图18所示为悬浮隧道最大位移随谱峰周期的变化情况。从图18可以看出,悬浮隧道最大位移随谱峰周期的变化趋势与其所受最大水动力荷载随谱峰周期的变化趋势相似。

大跨度悬浮隧道不同管节处实际水深的变化范围较大,本节研究水深对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响。选取5个水深,分别为 $h=80、90、100、110、120$  m。图19所示为悬浮隧道所受最大水动力荷载随水深的变化情况。从图19

可以看出,水深对于悬浮隧道最大水平荷载的影响有限,其变化范围为0.087~0.089。但随着水深的增加,悬浮隧道所受最大竖向荷载稍有增加,增大了约5.00%。

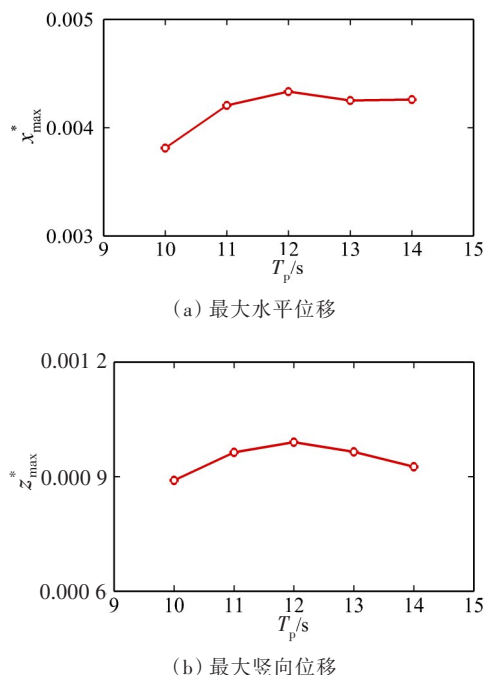


图 18 悬浮隧道最大位移随谱峰周期的变化  
Fig. 18 The variation of maximum displacement of submerged floating tunnels with spectral peak periods

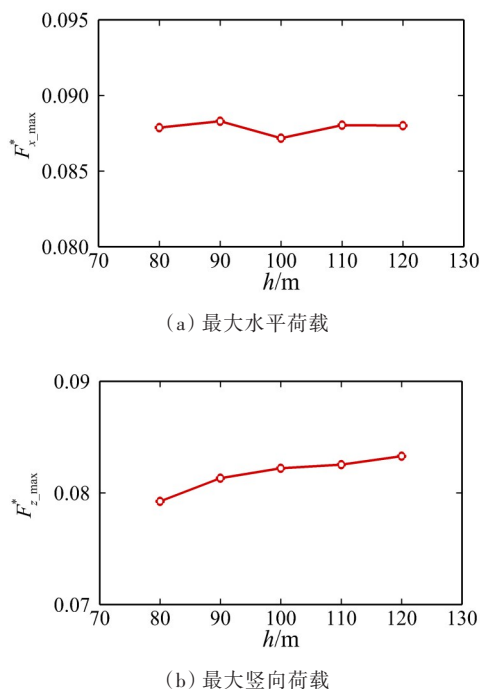


图 19 悬浮隧道所受最大水动力荷载随水深的变化  
Fig. 19 The variation of maximum hydrodynamic loads on the submerged floating tunnel with wave depths

图 20 所示为悬浮隧道最大位移随水深的变化情况。从图 20 可以看出,在水深为 80~120 m 时,悬浮隧道的最大水平位移变化不大,变化范围为 0.004 25~0.004 33;悬浮隧道的最大竖向位移随水深的增加略有增大,增大了约 5.38%。由此可见,水深对悬浮隧道水动力荷载和动态响应的影响有限。

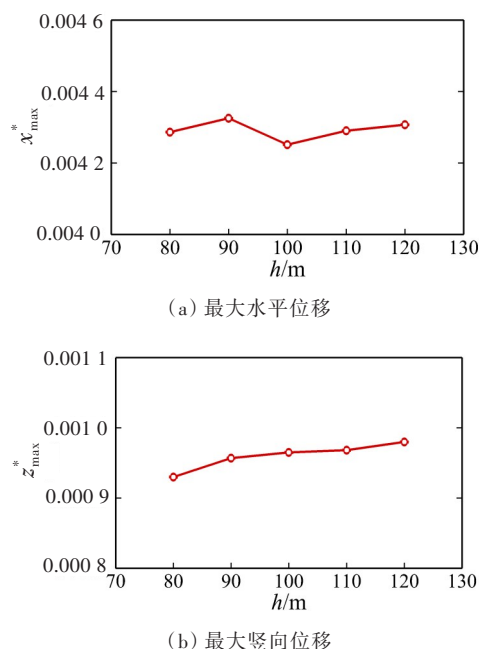


图 20 悬浮隧道最大位移随水深的变化  
Fig. 20 The variation of maximum displacement of submerged floating tunnels with water depths

### 3.4 淹没深度的影响

悬浮隧道一般设置在水下 20~50 m 处,因此本节讨论聚焦波作用下淹没深度对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响。选取 5 个淹没深度,分别为  $S=20, 25, 30, 35, 40$  m。图 21 所示为悬浮隧道所受最大水动力荷载随淹没深度的变化情况。图 22 所示为悬浮隧道最大位移随淹没深度的变化情况。

从图 21 可以看出,悬浮隧道所受的最大水平荷载和最大竖向荷载随淹没深度的增加而减小,并基本呈线性下降趋势。这是因为聚焦波的波能主要集中在波面,且随着水深的增加而迅速减小<sup>[40]</sup>。所以当淹没深度较小时,悬浮隧道到水面的距离较小,而水面附近流速大、能量集中,因此悬浮隧道所受的水动力荷载较大。但随着淹没深度的增加,悬浮隧道离水面的距离有所增大,波浪使得流体速度逐渐减小,并最终导致悬浮隧道所

受水动力荷载逐渐减小。当淹没深度的范围为20~40 m时,随着淹没深度的增加,悬浮隧道的最大水平荷载降低了52.38%,最大竖向荷载降低了47.99%。由此可见,与竖向荷载相比,悬浮隧道所受水平荷载对淹没深度更敏感。

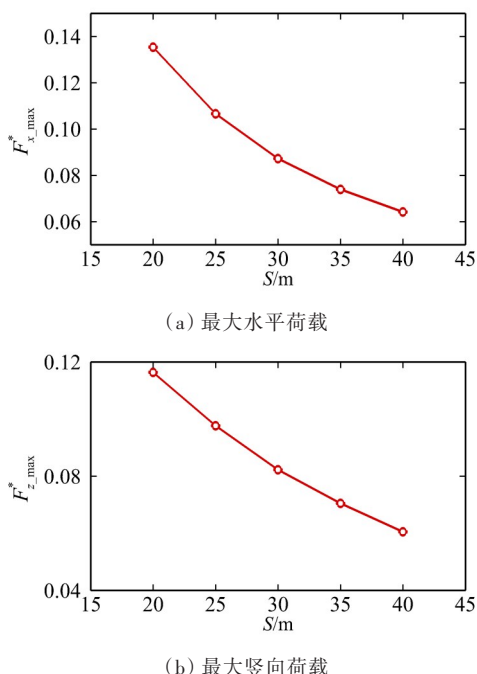


图21 悬浮隧道所受最大水动力荷载随淹没深度的变化  
Fig. 21 The variation of maximum hydrodynamic loads on the submerged floating tunnel with submersion depths

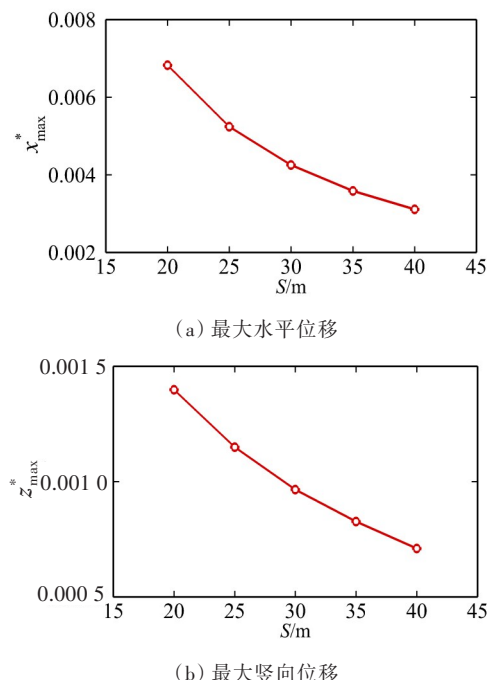


图22 悬浮隧道最大位移随淹没深度的变化  
Fig. 22 The variation of maximum displacement of submerged floating tunnels with submersion depths

从图22可以看出,当淹没深度从20 m增加到40 m时,悬浮隧道的最大水平位移和最大竖向位移随淹没深度的增加而减小,并分别减少了54.47%和49.29%。

### 3.5 管道直径的影响

本节分析管道直径对聚焦波作用下悬浮隧道水动力特性和结构动态响应的影响。选取5种管道直径,分别为 $D=17$ 、19、21、23、25 m。图23所示为悬浮隧道所受最大水动力荷载随管道直径的变化情况。从图23可以看出,当管道直径从17 m增加到25 m时,悬浮隧道所受的最大水平荷载和最大竖向荷载均随管道直径的增加而增大,并分别增大了3.64%和3.05%。这是因为随着管道直径的增加,悬浮隧道迎水面的宽度增大,悬浮隧道顶端距离波面的距离减小,而聚焦波在波面附近具有更大的速度,因此,随着管道直径的增大,悬浮隧道所受的水动力荷载会略有增加。

相比之下,悬浮隧道位移受管道直径的影响更为显著。图24所示为悬浮隧道最大位移随管道直径的变化情况。从图24可以看出,随着管道直径的增大,悬浮隧道的最大位移逐渐增大,其中,最大水平位移增大了57.53%,最大竖向位移增大了52.52%。

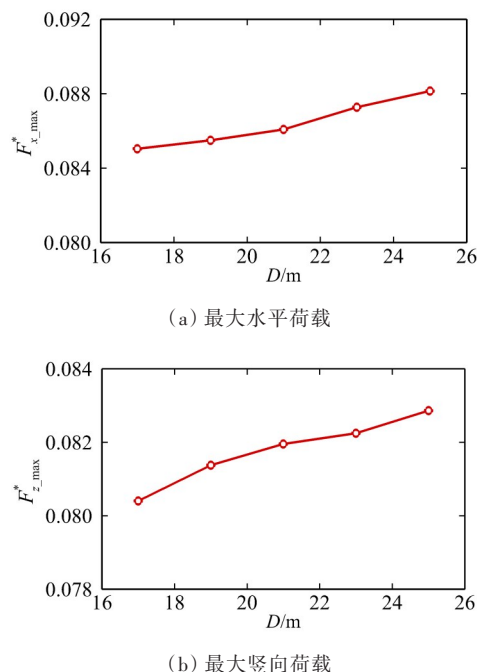
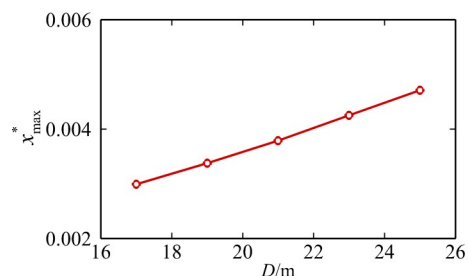
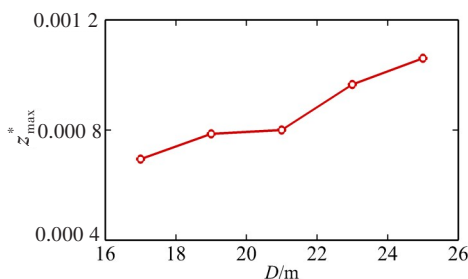


图23 悬浮隧道所受最大水动力荷载随管道直径的变化  
Fig. 23 The variation of maximum hydrodynamic loads on the submerged floating tunnel with tunnel diameters





(a) 最大水平位移



(b) 最大竖向位移

图24 悬浮隧道最大位移随管道直径的变化  
Fig. 24 The variation of maximum displacement of submerged floating tunnels with tunnel diameters

## 4 结论

本文采用高精度有限体积方法数值求解不可压缩两相流动控制方程,建立了高精度数值波浪水槽模型。通过设计合理的计算工况,系统分析了不同波浪要素及结构动力参数对悬浮隧道水动力特性及结构动态响应的影响,主要结论如下:

1) 聚焦波传播方向的位移比竖直方向的位移更危险,水平最大位移约为竖向最大位移的5倍。

2) 当悬浮隧道承受最大水动力荷载时,其局部最大压力分别出现在悬浮隧道断面的左上侧、右上侧及上下端。因此,在实际工程实践中,需重点关注悬浮隧道断面上这4个位置的稳定性。

3) 随着有效波高的增加,悬浮隧道所受最大水动力荷载及最大位移均呈线性增长趋势。与此同时,悬浮隧道所受水平方向的水动力荷载易受有效波高的影响,并且悬浮隧道水平方向的位移远大于竖直方向的位移。

4) 在本文考虑的谱峰周期范围内,淹没深度  $S=30$  m、隧道直径  $D=23$  m 的悬浮隧道所受的最大水动力荷载和运动位移均在  $T_p=12$  s 时达到最大值。但总体而言,谱峰周期和水深对悬浮隧道水

动力荷载和动态响应的影响有限。

5) 淹没深度对悬浮隧道水动力荷载和动态响应有显著影响。随着淹没深度的增加,悬浮隧道所受最大水动力荷载和结构动态响应均有所减小。

6) 随着管道直径的增加,悬浮隧道所受最大水动力荷载和最大位移均呈单调增加趋势。

## [参考文献]

- [1] 项贻强. 一种未来跨越长大深水海域交通的新型解决方案: 悬浮隧道及其开发研究[C]//第六届中国公路科技创新高层论坛论文集(下册). 北京: 人民交通出版社, 2013: 572-575.  
XIANG Yiqiang. A new solution for future transportation across long and deep water seas: research on submerged floating tunnels and their development [C]//the Proceedings of the 6th China Highway Science and Technology Innovation High-level Forum (Volume 2). Beijing: China Communications Press, 2013: 572-575.
- [2] 叶腾超. 悬浮隧道的研究价值及应用前景[J]. 四川建材, 2018, 44(1): 171, 173. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2018.01.089.  
YE Tengchao. Research value and application prospect of suspended tunnel [J]. Sichuan Building Materials, 2018, 44(1): 171, 173. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2018.01.089.
- [3] 李润锋, 赵刘群, 朱良生. 畸形波的非线性生成及特性初步分析[J]. 中国造船, 2020, 61(增刊2): 27-36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.004.  
LI Runfeng, ZHAO Liuqun, ZHU Liangsheng. Analysis of formation and characteristics of abnormal wave [J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(sup 2): 27-36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.004.
- [4] KHARIF C, PELINOVSKY E, SLUNYAEV A. Rogue waves in the ocean[M]. Berlin: Springer, 2009: 11-31.
- [5] 项贻强, 张科乾. 基于 Morison 方程分层积分计算悬浮隧道的波浪力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(8): 1399-1404. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2011.08.012.  
XIANG Yiqiang, ZHANG Kegan. The layered integrating method for calculating wave force of submerged floating tunnel based on Morison equation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1399-1404. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2011.08.012.
- [6] KANG L, GE F, HONG Y S. A numerical study on responses of submerged floating structures undergoing vortex-induced vibration and seismic excitation [J].

- Procedia Engineering, 2016, 166: 91–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.569.
- [7] YAN H S, LUO Y Q, YU J X. Dynamic response of submerged floating tunnel in the flow field[J]. Procedia Engineering, 2016, 166: 107–117. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.573.
- [8] LIN H, XIANG Y Q, YANG Y, et al. Dynamic response analysis for submerged floating tunnel due to fluid-vehicle-tunnel interaction [J]. Ocean Engineering, 2018, 166: 290–301. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.023.
- [9] 易壮鹏, 李小超, 曾有艺. 张力腿悬浮隧道的动力学模型和自振特性[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 180–184. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.037.
- YI Zhuangpeng, LI Xiaochao, ZENG Youyi. Dynamic model and natural vibration characteristics of tension leg submerged floating tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 180–184. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.037.
- [10] JIN C, KIM M H. Tunnel-mooring-train coupled dynamic analysis for submerged floating tunnel under wave excitations [J]. Applied Ocean Research, 2020, 94: 102008. DOI: 10.1016/j.apor.2019.102008.
- [11] SHARMA M, KALIGATLA R B, SAHOO T. Wave interaction with a submerged floating tunnel in the presence of a bottom mounted submerged porous breakwater [J]. Applied Ocean Research, 2020, 96: 102069. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102069.
- [12] 田雪飞, 董满生, 逢焕平, 等. 海洋内波和洋流联合作用下水中悬浮隧道的动力响应[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(1): 71–80. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.01.008.
- TIAN Xuefei, DONG Mansheng, PANG Huanping, et al. Dynamic responses of the submerged floating tunnel under combined internal wave and sea current effect [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(1): 71–80. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.01.008.
- [13] 秦银刚, 周生国, 周晓军. 多跨悬浮隧道合理支撑间距分析[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(3): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2008.03.016.
- QIN Yingang, ZHOU Shengguo, ZHOU Xiaojun. Analysis of the reasonable support length for multi-spans submerged floating tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(3): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2008.03.016.
- [14] 干湧. 水下悬浮隧道的空间分析与节段模型试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- GAN Yong. Three-dimensional analysis and segmental model experimental investigation of submerged floating tunnel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [15] DENG S, REN H J, XU Y W, et al. Experimental study of vortex-induced vibration of a twin-tube submerged floating tunnel segment model [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94: 102908. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102908.
- [16] 王广地. 波流作用下悬浮隧道结构响应的数值分析及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- WANG Guangdi. Numerical analysis and experiment research of submerged floating tunnel subjected to wave and current effects [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [17] 孙胜男, 陈健云. 地震下悬浮隧道所受动水压力研究: SV波[J]. 防灾减灾工程学报, 2006(4): 425–430. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2006.04.011.
- SUN Shengnan, CHEN Jianyun. Hydrodynamic on submerged floating tunnels under the earthquakes: SV Wave [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006(4): 425–430. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2006.04.011.
- [18] FUJITA R, MIKAMI T, YAMASHITA T, et al. Development of submerged floating tunnels in shallow water [J]. Proceedings of Civil Engineering in the Ocean, 2000, 16: 263–268. DOI: 10.2208/prooe.16.263.
- [19] KUNISU H, FUJII T, MIZUNO Y, et al. The study of submerged floating tunnel characteristic under the wave conditions [J]. Proceedings of Civil Engineering in the Ocean, 1992, 8: 487–492. DOI: 10.2208/prooe.8.487.
- [20] YANG Z W, LI J Z, ZHANG H Q, et al. Experimental study on 2D motion characteristics of submerged floating tunnel in waves [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(2): 123. DOI: 10.3390/jmse8020123.
- [21] 蒋树屏, 李勤熙. 不同断面型式悬浮隧道管段波动特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 416–422. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2009.01.017.
- JIANG Shuping, LI Qinxin. Wave characteristics of submerged floating tunnels under random irregular waves [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 416–422. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2009.01.017.
- [22] JIANG B L, LIANG B, SHAKEL S. Experimental study of environment-friendly underwater structure-submerged floating tunnel [J]. Materials Science Forum, 2020, 980: 346–355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.980.346.
- [23] REMSETH S, LEIRA B J, OKSTAD K M, et al. Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels [J]. Computers & Structures, 1999, 72(4–5): 659–685. DOI: 10.1016/S0045-7949(98)00329-0.
- [24] 罗刚, 周晓军, 张川, 等. 水中悬浮隧道合理截面数

- 值模拟分析[J]. 铁道建筑, 2012, 52(12): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2012.12.10.
- LUO Gang, ZHOU Xiaojun, ZHANG Chuan, et al. Numerical simulation analysis on rational cross-section of submerged floating tunnel[J]. Railway Engineering, 2012, 52(12): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2012.12.10.
- [25] 葛斐, 惠磊, 洪友士. 水中悬浮隧道在波浪场中非线性动力响应的研究[J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 207-211.
- GE Fei, HUI Lei, HONG Youshi. Nonlinear response of submerged floating tunnel to wave forces [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(2): 207-211.
- [26] 刘宇, 金瑞佳, 耿宝磊, 等. 锚索倾角对不同截面悬浮隧道运动响应影响研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(2): 237-247. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.02.012.
- LIU Yu, JIN Ruijia, GENG Baolei, et al. Influence of anchor cable inclination angle on the motion response of submerged floating tunnel with different sections[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Series A), 2020, 35(2): 237-247. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.02.012.
- [27] KHARIF C, PELINOVSKY E, TALIPOVA T. Freak wave generation in shallow water[J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Series IIB), 2000, 328(11): 801-807. DOI: 10.1016/S1620-7742(00)01262-9.
- [28] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [29] MENTER F. Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows [C]// the Proceedings of 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. Orlando: AIAA, 1993. DOI: 10.2514/6.1993-2906.
- [30] ZHU H J, LIAO Z H, GAO Y, et al. Numerical evaluation of the suppression effect of a free-to-rotate triangular fairing on the vortex-induced vibration of a circular cylinder[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 52: 709-730. DOI: 10.1016/j.apm.2017.07.045.
- [31] SCHÄFFER H A. Second-order wavemaker theory for irregular waves[J]. Ocean Engineering, 1996, 23(1): 47-88. DOI: 10.1016/0029-8018(95)00013-B.
- [32] NING D Z, ZANG J, LIU S X, et al. Free-surface evolution and wave kinematics for nonlinear uni-directional focused wave groups [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(15-16): 1226-1243. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.07.011.
- [33] BIHS H, CHELLA M A, KAMATH A, et al. Numerical investigation of focused waves and their interaction with a vertical cylinder using REEF3D[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017, 139(4): 041101. DOI: 10.1115/1.4036206.
- [34] 柏君励, 马宁, 顾解仲. 波流对不同淹没深度水平圆柱的荷载分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(8): 938-945. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.08.009.
- BAI Junli, MA Ning, GU Jiechong. Wave-current loads on the horizontal cylinder with varying submergence depths [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(8): 938-945. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.08.009.
- [35] JAUVTIS N, WILLIAMSON C H K. The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 509: 23-62. DOI: 10.1017/s0022112004008778.
- [36] GSELL S, BOURGUET R, BRAZA M. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a circular cylinder at  $Re=3\ 900$ [J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 67: 156-172. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.09.004.
- [37] ZHAO M. Numerical investigation of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of a circular cylinder in oscillatory flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 39: 41-59. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.003.
- [38] 罗刚, 周晓军, 李登峰, 等. 不同断面悬浮隧道绕流特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 115-120. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.01.018.
- LUO Gang, ZHOU Xiaojun, LI Dengfeng, et al. Analysis on characteristics of flow passing submerged floating tunnels of different sections [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 115-120. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.01.018.
- [39] CHEN X B, CHEN Q, CHEN Z W, et al. Numerical modeling of the interaction between submerged floating tunnel and surface waves[J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108494. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108494.
- [40] 常留红, 汤薇, 肖政, 等. 波浪作用下空心块体堤身结构稳定性和消浪特性试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 24-31. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbk.2021.03.003.
- CHANG Lihong, TANG Wei, XIAO Zheng, et al. Experimental study on structural stability and wave suppression characteristics of hollow block dike under wave action[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 24-31. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbk.2021.03.003.



## Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of submerged floating tunnels under the action of focused waves

QU Ke<sup>1,2,3</sup>, XU Yaoyao<sup>1</sup>, HUANG Jingxuan<sup>1</sup>, WEN Bohao<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] This work contributes to the existing body of research by systematically carrying out numerical investigations on the hydrodynamic characteristics of submerged floating tunnels under the impact of freak waves generated by wave focusing. [Methods] The high-precision finite volume method is used to simulate the governing equations of incompressible two-phase flow. Additionally, a high-resolution numerical wave tank was established. The spring-mass-damping system, which represents the dynamic response of a submerged floating tunnel under wave loads is numerically calculated using the overset mesh technique and the fourth-order Runge-Kutta method. The hydrodynamic characteristics of submerged floating tunnels are systematically investigated by considering the effects of five prominent factors, i.e. wave height, submersion depth, water depth, wave period, and tunnel diameter. [Findings] When subjected to the impact of focused wave, the maximum horizontal load on the submerged floating tunnel is slightly larger than the vertical load. Furthermore, the maximum horizontal displacement is approximately 5 times that of the vertical displacement. [Conclusions] With the increase of the effective wave height, both the hydrodynamic load on the submerged floating tunnel and the structural dynamic response rises gradually. Results show that the influence of the water depth and wave period on the hydrodynamic and structural dynamic response of submerged floating tunnel is very limited. With the increase of the submersion depth, both the wave load on the submerged floating tunnel and the dynamic response of the structure decrease conversely. Another finding is that under the same incident wave conditions, the smaller the diameter of the submerged floating tunnel is, the less the dynamic responses. Therefore, it is believed that the findings drawn from this paper can further enhance our understanding on the damage mechanism of submerged floating tunnel under freak waves.

**Key words:** focused wave; submerged floating tunnel; hydrodynamic characteristic; dynamic response; effective wave height; spectral peak period; submersion depth

**Manuscript received:** 2022-04-25; **revised:** 2022-05-19; **accepted:** 2022-05-20

**Foundation item:** Project (2020JJ5582) supported by Hunan Natural Science Outstanding Youth Foundation; Project (2019A024) supported by Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province; Project (51839002) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Corresponding author:** QU Ke (1985—) (ORCID: 0000-0003-0054-4617), male, associate professor, research interest: numerical simulation of wave hydrodynamics. E-mail: qukeforjc@126.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:汪进婷)