

# 考虑水-结构-土相互作用下深水圆柱的地震响应分析

黄义铭<sup>1</sup>, 赵 密<sup>1</sup>, 王丕光<sup>1,2</sup>, 杜修力<sup>1</sup>, 刘晶波<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 清华大学土木系, 北京 100084)

**摘要:**以水中圆柱体为模型,考虑水-结构-土的相互作用,研究柱体结构在地震和波浪共同作用下的动力响应。采用有限元法将柔性柱体结构离散为欧拉-伯努利梁单元,水-结构相互作用通过附加质量代替,土-结构相互作用通过线性弹簧代替。基于结构自振频率分析,讨论土-结构和水-结构相互作用对结构自振频率的影响。研究土-结构相互作用、地震动水力和波浪力对柱体结构动力响应的影响。

**关键词:**地震响应;水-结构-土相互作用;圆形柱体;附加质量;波浪力

**中图分类号:** TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0730-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.009

## 引 言

随着中国经济与技术的飞速发展,建造了越来越多的海上结构物,如跨海桥梁、海上风机、人工岛等,这些结构物大多数处于深水中<sup>[1-3]</sup>。其中,海洋波浪荷载是近海结构设计中需要考虑的重要环境荷载。然而,地处地震带的国家,地震荷载对海上结构物的危害占其主导地位,因此,为了保证海上结构物的安全,有必要对海洋结构物在地震和波浪联合作用下的动力响应进行研究。

实际工程中,由于水-结构的相互作用,分析近海结构的地震响应时往往需要特殊的考量。当结构在水体中振动时,会产生附加的动水压力,研究表明该动水压力不仅会改变结构的动力特性,对结构的地震响应也有一定的影响。国内外学者针对地震引起的水-结构动力相互作用问题已经进行了一系列的研究。Liaw 和 Chopra<sup>[4]</sup>基于解析方法研究了可压缩水体中弹性圆柱体受到的地震动水压力;Han 和 Xu<sup>[5]</sup>基于梁单元理论,提出了计算水中圆柱结构自振频率的简化公式;另外,Williams<sup>[6]</sup>和 Tanaka 等<sup>[7]</sup>分别采用边界积分方法和解析法研究了水平地震作用下水中圆柱结构的动力反应;黄信和李忠献<sup>[8-9]</sup>讨论了水体压缩性、自由表面波和水底吸收边界对圆柱结构所受地震动水压力的影响;杜修力等<sup>[10-11]</sup>提出了可压缩水体条件下圆柱结构所受地震动水压力的时域算法和时域简化公式;Wang 等<sup>[12]</sup>提出了一种精确的时域化模型来代替三维无限水域

中水-结构相互作用问题,结果表明,当忽略水体可压缩性时,周围水体对结构的影响可用附加质量代替。

近些年来,针对波浪力对垂直柱体结构的研究越来越多。Morison 等<sup>[13]</sup>提出了一种计算柔性柱体结构上波浪力的半理论半经验公式;缪国平和刘应中<sup>[14]</sup>研究了大尺度垂直柱体的波浪力问题;MacCamy 和 Fuchs<sup>[15]</sup>针对水中大直径结构的波浪力计算问题提出了一种绕射波理论;Chen 和 Mei<sup>[16]</sup>提出了一种计算椭圆柱面和任意光滑截面上波浪力的解析解;Li 等<sup>[17]</sup>提出了一种计算任意光滑截面柱体上波浪力的半解析解。

然而,针对地震和波浪联合作用下近海结构动力响应的研究很少。假定地基为刚性,Penzien 等<sup>[18]</sup>研究了随机波和地震联合作用下海上塔式结构的动力反应;Liu 等<sup>[19]</sup>试验研究了地震、波浪和水流联合作用下对斜拉桥群桩基础的影响;Wang 等<sup>[20]</sup>分析了地震和波浪联合作用下圆形桥墩的动力响应。考虑土-结构相互作用,Yamada 等<sup>[21]</sup>研究了随机波浪和随机地震动作用下海上桁架式结构体系的动力响应;Goyal 等<sup>[22-23]</sup>和 Xu 等<sup>[24]</sup>讨论了地震作用下水-结构和土-结构相互作用对储水塔结构动力响应的研究。

上述情况表明,针对水-结构-土相互作用体系的动力特性和地震和波浪联合作用下该体系动力响应的研究还不够深入。本文提出了一种地震和波浪共同作用下水-圆柱-土相互作用体系动力响应的分析模型,系统讨论了土-结构和水-结构相互作用对

结构动力特性和动力响应的影响。

## 1 动力响应方程

### 1.1 地震动水压力计算公式

水-圆柱-土相互作用模型如图1所示。 $a$ 表示圆柱结构的半径, $h$ 为水深, $h_f$ 为结构埋深, $H$ 为结构高度, $M_s$ 为上部结构质量, $\rho_c$ 为结构密度, $A_c$ 为圆柱截面面积, $E$ 为弹性模量, $I$ 为截面惯性矩, $k_s$ 为线性弹簧刚度。直角坐标系下, $z$ 轴沿柱体轴线向上,坐标原点位于柱体底部;假定地基为刚性,地面加速度为 $\ddot{u}_g = U_g e^{-i\omega t}$ , $\omega$ 为荷载频率,水体假定为不可压缩的小扰动流体,并忽略表面重力波的影响。袁迎春等<sup>[25]</sup>研究表明,水的非线性阻力项对地震响应的影响很小,可以忽略。因此,本文忽略了水体的阻尼作用。

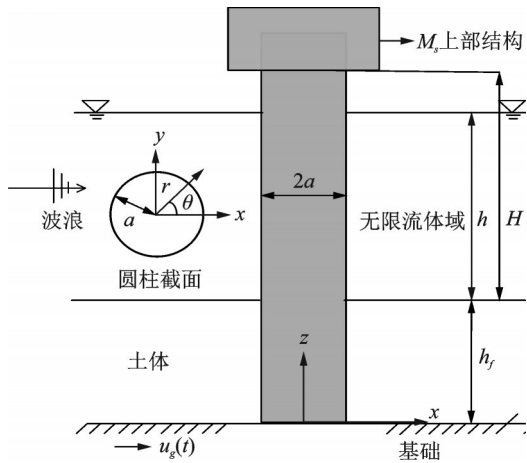


图1 水-结构-土相互作用模型

Fig. 1 Water-structure-soil interaction model

引用赵密等<sup>[26]</sup>提出的矩形柱体地震动水压力的附加质量简化模型方法,即刚体运动和柔性运动引起的动水压力分别采用刚体运动和柔性运动对应的附加质量简化公式代替,简化公式分别为:

$$m_0 = \rho_w \pi r^2 (0.6e^{-0.93 \frac{2r}{h}} + 0.403e^{-0.156 \frac{2r}{h}}) \quad (1)$$

$$m_1 = m_0 (0.4327e^{-5.844 \frac{r}{h}} + 0.5369e^{-0.0781 \frac{r}{h}}) \quad (2)$$

式中  $m_0$  为结构刚性运动引起的附加质量, $m_1$  为结构柔性运动引起的附加质量, $r$  为圆柱结构的半径。

### 1.2 波浪力计算公式

引用王丕光<sup>[27]</sup>提出的地震和波浪联合作用下的桥墩动力响应分析方法,波浪力表达式为

$$f_w = -\frac{2\rho_w g H_w \cosh(kz)}{k \cosh(kh)} A(ka) \sin \omega_s t \quad (3)$$

式中  $\rho_w$  为水体密度, $g$  为重力加速度, $k = 2\pi/L$

为波数, $L$  为波长, $H_w$  为波高, $\omega_s = 2\pi/T$  为波浪的圆频率, $T$  为波浪周期, $A(ka) = 1/\sqrt{[J_1'(ka)]^2 + [Y_1'(ka)]^2}$ , $J_n(\cdot)$  表示第一类  $n$  阶贝塞尔函数, $Y_n(\cdot)$  表示第二类  $n$  阶贝塞尔函数。

### 1.3 水-结构-土体系的动力方程

采用有限元方法将柔性柱体结构离散为欧拉-伯努利梁单元<sup>[28]</sup>,简化模型如图2所示。则地震和波浪联合作用下水-结构-土体系的动力方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_2 + \mathbf{m}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & 0 \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} \\ 0 & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} + \mathbf{k}_s & \mathbf{K}_{12} & 0 \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} \\ 0 & \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{f}_w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $\mathbf{M}_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为结构埋深、水中结构和上部结构质量矩阵; $\mathbf{m}_1$  为附加质量  $m_1$  组成的质量矩阵; $\mathbf{m}_0$  为附加质量  $m_0$  组成的质量矩阵; $\mathbf{C}_{ij}$  和  $\mathbf{K}_{ij}$  ( $i=1,2,3;j=1,2,3$ ) 分别为结构的阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{k}_s$  为线性弹簧刚度  $k_s$  组成的刚度矩阵, $u_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为圆柱结构在土体中、水中及空气中的位移。式(4)通过 Newmark- $\beta$  方法<sup>[29]</sup>求解。

本文通过引入4个无量纲参数定量研究土-结构和水-结构相互作用对圆柱结构动力特性和动力响应的影响。4个无量纲参数为宽深比( $l_0$ )、质量比( $\delta_0$ )、结构高度与埋深比( $\gamma_0$ )和刚度比( $\sigma_0$ ),定义分别为:

$$l_0 = \frac{2a}{h} \quad (5)$$

$$\delta_0 = \frac{M_s}{\rho_c A_c h} \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \frac{h}{h_f} \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \frac{k_s h^4}{EI} \quad (8)$$

## 2 自振频率分析

圆柱结构高度  $H=40$  m,本文水深  $h$  与结构高度  $H$  一致,密度  $\rho_c$  和弹性模量  $E$  分别取为  $2500 \text{ kg/m}^3$  和  $30000 \text{ MPa}$ 。水-结构-土、土-结构和圆柱结构体系的基频分别用  $\omega_{ws}$ ,  $\omega_s$  和  $\omega_{os}$  表示。

图3表示  $\sigma_0=2$  和  $\delta_0=0$  时,圆柱结构在不同  $l_0$  和  $h$  情况下  $\omega_s/\omega_{os}$  随着  $\gamma_0$  的变化。由图中可以看

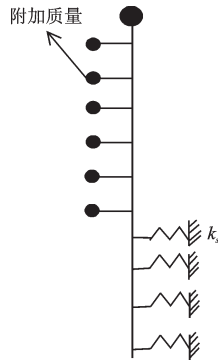


图2 水-结构-土相互作用简化模型

Fig. 2 Water-structure-soil interaction simplified model

出,  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的增大而增大, 说明  $h_f$  越小, 土体对结构基频的影响越小, 还可以看到  $l_0$  和  $h$  的变化对  $\omega_s/\omega_{0s}$  几乎没有影响。

图4表示  $l_0=0.2, \delta_0=0$  和  $h=40$  m 时, 圆柱结构在不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的变化。由图中可以看出随着埋深  $h_f$  的增大, 土-圆柱体系的频率逐渐趋于稳定; 本文定义体系频率达到稳定值时的埋深称为临界深度  $R_{cr}$ 。另外还可以看出, 随着土体刚度  $\sigma_0$  的增大, 土-结构相互作用对圆柱频率的影响逐渐减小。

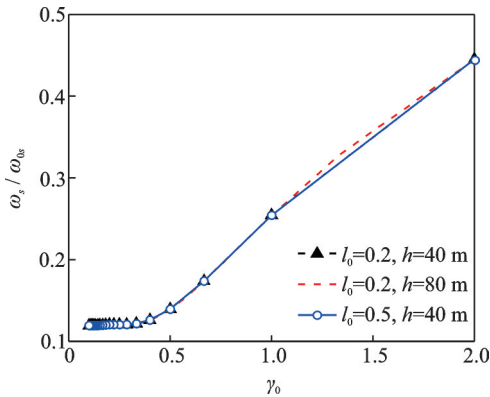


图3 不同  $l_0$  和  $h$  情况下  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的变化 ( $\sigma_0=2, \delta_0=0$ )  
Fig. 3 The variation of ratio  $\omega_s/\omega_{0s}$  with respect to  $\gamma_0$  for different values of  $l_0$  and  $h$  with  $\sigma_0=2$  and  $\delta_0=0$

图5表示  $l_0=0.2$  和  $h=40$  m 时, 圆柱结构在不同  $\delta_0$  情况下  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的变化。由图中可以看出,  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  和  $\delta_0$  的增大而增大, 说明随着  $\delta_0$  的增大, 土体对结构基频的影响越小。

通过对不同工况下的临界深度  $R_{cr}$  进行拟合, 进一步给出了不同  $\delta_0$  情况下  $R_{cr}$  随着  $\sigma_0$  变化的计算公式, 该公式为

$$R_{cr} = a_1 e^{b_1 \sigma_0} + a_2 e^{b_2 \sigma_0} \quad (9)$$

式中 未知系数  $a_1, a_2, b_1$  和  $b_2$  通过曲线拟合得到, 如表1所示。图6为通过拟合公式得到的圆柱结构在不同  $\delta_0$  情况下临界深度  $R_{cr}$  随着  $\sigma_0$  的变化。由图中

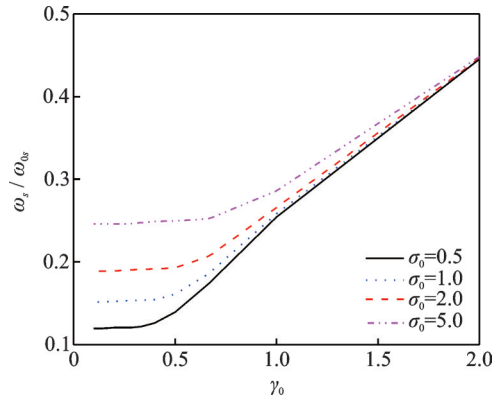


图4 不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的变化 ( $l_0=0.2, \delta_0=0, h=40$  m)

Fig. 4 The variation of ratio  $\omega_s/\omega_{0s}$  with respect to  $\gamma_0$  for different values of  $\sigma_0$  with  $l_0=0.2, \delta_0=0$  and  $h=40$  m

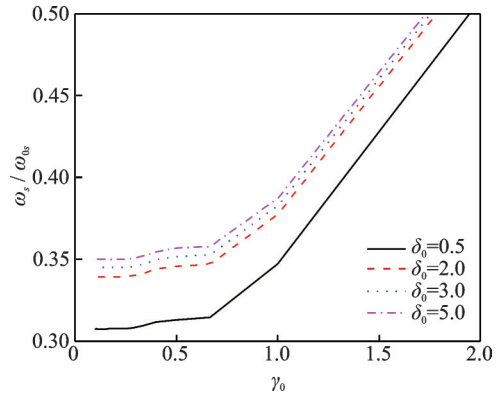


图5 不同  $\delta_0$  情况下  $\omega_s/\omega_{0s}$  随着  $\gamma_0$  的变化 ( $l_0=0.2, h=40$  m)

Fig. 5 The variation of ratio  $\omega_s/\omega_{0s}$  with respect to  $\gamma_0$  for different values of  $\delta_0$  with  $l_0=0.2$  and  $h=40$  m

表1 不同  $\delta_0$  情况下临界深度  $R_{cr}$  随着  $\sigma_0$  的变化

Tab. 1 The variation of critical depth  $R_{cr}$  with respect to  $\sigma_0$  for different values of  $\delta_0$

$\delta_0$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$
0	0.210	-4.033	0.468	-0.287
1/2	0.294	-3.175	0.548	-0.225
2	0.222	-4.149	0.640	-0.295
5	0.236	-5.988	0.693	-0.327

可以看出  $R_{cr}$  随着  $\sigma_0$  的增大而减小。

图7表示  $l_0=0.2, \delta_0=0, h=40$  m 时, 圆柱结构分别在不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $\gamma_0$  的变化。由图中可以看出  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $\gamma_0$  和  $\sigma_0$  的增大几乎没有变化, 说明随着  $\gamma_0$  和  $\sigma_0$  的增大, 水体对结构基频影响很小, 几乎可以忽略。

图8表示  $\delta_0=0, h=40$  m 时, 圆柱结构分别在不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $l_0$  的变化。由图中可以看出  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $l_0$  的增大而增大, 但随着  $\sigma_0$  的增大几乎没有变化, 说明随着  $l_0$  的增大, 水体对结构基频的影

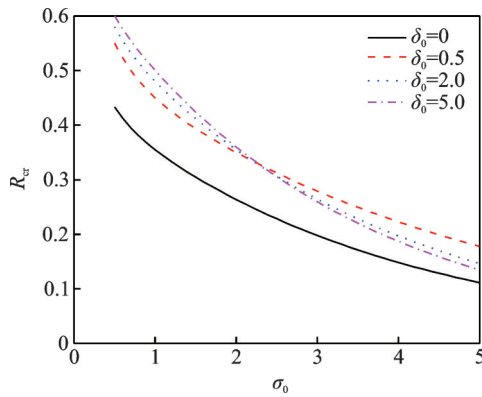


图 6 不同  $\delta_0$  情况下临界深度  $R_{cr}$  随着  $\sigma_0$  的变化

Fig. 6 The variation of critical depth  $R_{cr}$  with respect to  $\sigma_0$  for different values of  $\delta_0$

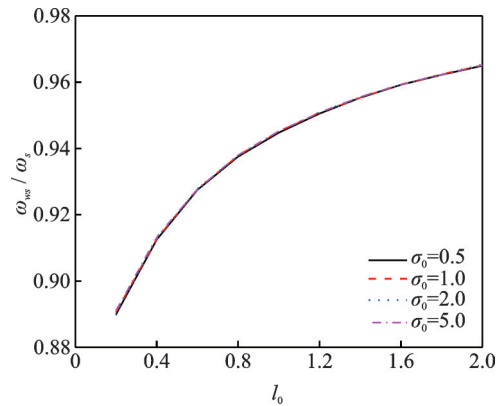


图 8 不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $l_0$  的变化 ( $\delta_0=0, h=40\text{ m}$ )

Fig. 8 The variation of ratio  $\omega_{ws}/\omega_s$  with respect to  $l_0$  for different values of  $\sigma_0$  with  $\delta_0=0$  and  $h=40\text{ m}$

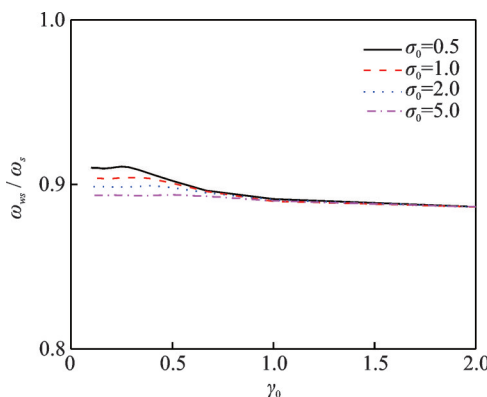


图 7 不同  $\sigma_0$  情况下  $\omega_{ws}/\omega_s$  随着  $\gamma_0$  的变化 ( $l_0=0.2, \delta_0=0, h=40\text{ m}$ )

Fig. 7 The variation of ratio  $\omega_{ws}/\omega_s$  with respect to  $\gamma_0$  for different values of  $\sigma_0$  with  $l_0=0.2, \delta_0=0$  and  $h=40\text{ m}$

著差异,本文考虑了从太平洋地震工程研究中心的 NGA-West2 地震动数据库 FEMA-P695(2009)中选取的 11 条远场记录,具体的地震动信息如表 2 所示。表中 PGA 和 PGV 为峰值加速度和峰值速度,其中 NORTH R 波的地震动加速度时程如图 9 所示,

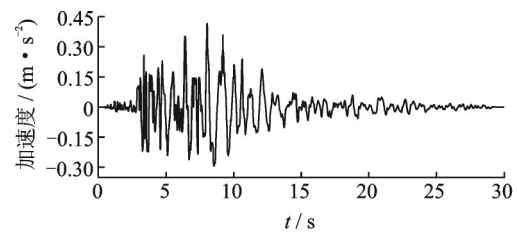


图 9 NORTH R 地震动加速度时程

Fig. 9 Time history of acceleration of NORTH R wave

响逐渐减小。

### 3 地震动力响应分析

由于场地不同造成地震波的主频率之间存在显

#### 3.1 模型验证

水-结构相互作用通过沿高度均匀分布的附加质量代替。如图 10 所示,表示附加质量系数简化公式与解析解之间的比较,从图中可以看出,两者吻合较好。

表 2 地震动信息

Tab. 2 Details of the ground motion

ID No.	Record Seq. No.	Lowest Freq/Hz	PEER NGA Record Information File Names-Horizontal Records	Recorded PGA/g	Motions PGV/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	953	0.25	NORTH R/MUL009	0.52	63
2	960	0.13	NORTH R/LOS000	0.48	45
3	1602	0.06	DUZCE/BOL000	0.82	62
4	1787	0.04	HECTOR/HEC00	0.34	42
5	169	0.06	IMPVALUHDLT262	0.35	33
6	174	0.25	IMPVALHE11140	0.38	42
7	1111	0.13	KOBENIS000	0.51	37
8	1116	0.13	KOBE/SHI000	0.24	38
9	1158	0.24	KOCAELUDZC1B0	0.36	59
10	1148	0.09	KOCAELIARC000	0.22	40
11	900	0.07	LANDERSYER270	0.24	52



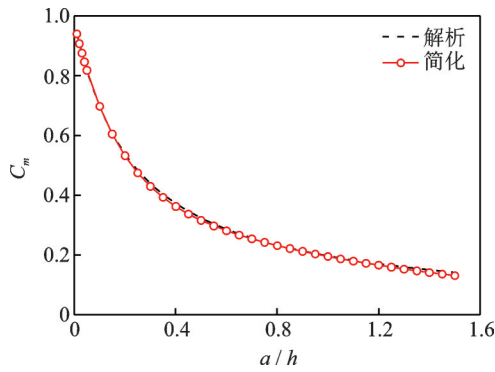


图10 附加质量系数简化公式与精确解的比较

Fig. 10 The simple formula for the added mass coefficient compared with the exact solution

土-结构相互作用通过均匀分布的线性弹簧代替。为了验证文中土-结构相互作用程序的正确性,与有限元软件 Abaqus 进行了动力特性和动力响应的对比分析,结果如表 3 和图 11 所示。从表和图中可以看出,两者吻合较好。

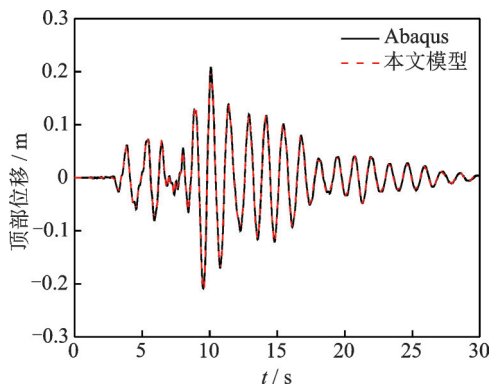


图11 顶部位移时程

Fig. 11 Top displacement time history

### 3.2 土-结构相互作用影响

刚性地基和考虑土-结构相互作用时柱体结构的位移峰值分别用  $u_{0\max}$  和  $u_{1\max}$  表示,相应的加速度峰值分别用  $ba_{0\max}$  和  $ba_{1\max}$  表示。引入两个无量纲参

表3 结构前三阶自振频率比较

Tab. 3 Comparison of the first three order natural vibration frequencies of the structure

	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
Abaqus	4.76	24.62	62.1
本文模型	4.77	25.32	66.5
误差	0.21%	2.76%	6.61%

数  $Ru_1 = u_{1\max}/u_{0\max}$  和  $Ra_1 = ba_{1\max}/ba_{0\max}$ 。

图 12-18 中 Trend line 表示对图中 11 条地震动的数据进行线性回归分析,用来分析线性走势,可以通过线性拟合得到。阻尼比和加速度峰值分别取为 0.05 和 0.2g,在  $\delta_0=0$ ,  $H_w=3$  m 和  $T=8$  s 的情况下研究土-结构相互作用、地震动水力和波浪力对柱体结构动力响应的影响。图 12 和 13 分别表示  $l_0=0.2$  时不同  $H$  情况下  $Ru_1$  和  $Ra_1$  随着  $\sigma_0$  的变化。由图 12 中可以看出,土-结构相互作用明显增大了圆柱结构的位移响应,并随着刚度比和结构高度的增大响应逐渐减弱。由图 13 可以看出,在宽深比  $l_0=0.2$ 、结构高度  $H=40$  和 60 m 时,土-结构相互作用明显减弱了圆柱结构的加速度响应。

图 14 表示  $\sigma_0=2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下  $Ra_1$  随着  $l_0$  的变化。由图中可以看出,土-结构相互作用对结构地震响应的影响随着  $l_0$  的增大影响逐渐增强。结合图 13 和 14 可以看出,当  $l_0$  比较小时土-结构相互作用会降低结构的加速度反应,但随着  $l_0$  的增大土-结构相互作用则会增大结构的加速度反应。

### 3.3 地震动水力的影响

考虑水-结构-土相互作用时柱体结构的位移和加速度峰值分别用  $u_{2\max}$  和  $ba_{2\max}$  表示,引入两个无量纲参数  $Ru_2 = u_{2\max}/u_{1\max}$  和  $Ra_2 = ba_{2\max}/ba_{1\max}$ 。图 15

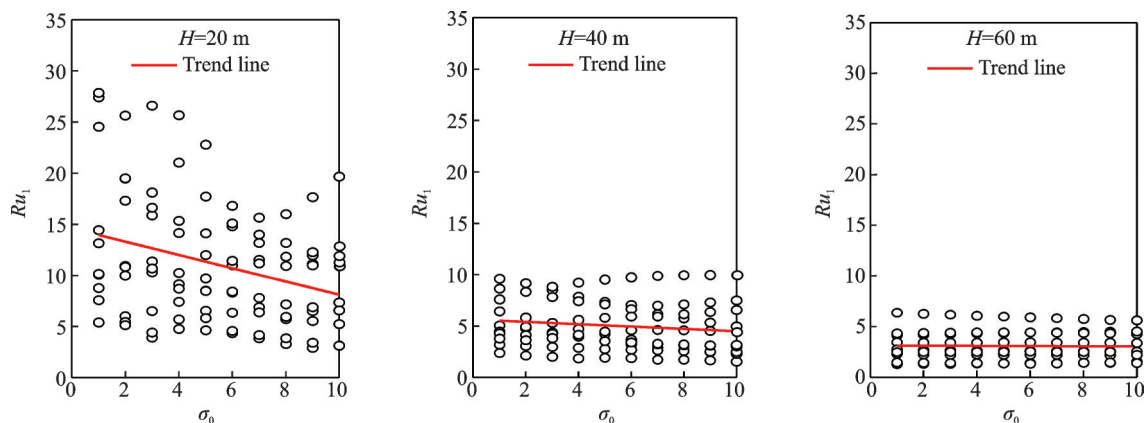
图12  $l_0=0.2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下参数  $Ru_1$  随着  $\sigma_0$  的变化

Fig. 12 The parameters  $Ru_1$  versus  $\sigma_0$  for different values of  $H$  with  $l_0=0.2$  and  $\delta_0=0$

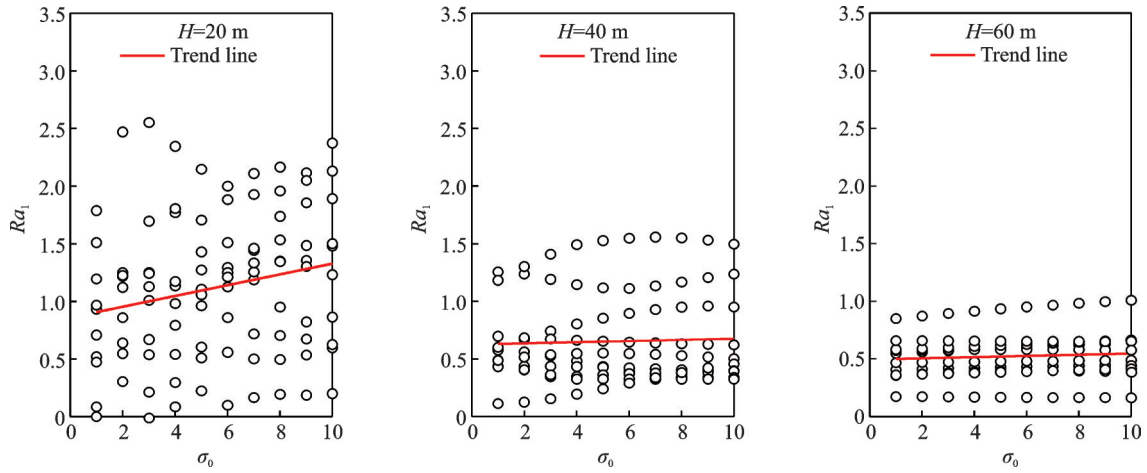


图 13  $l_0=0.2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下参数  $Ra_1$  随着  $\sigma_0$  的变化  
 Fig. 13 The parameters  $Ra_1$  versus  $\sigma_0$  for different values of  $H$  with  $l_0=0.2$  and  $\delta_0=0$

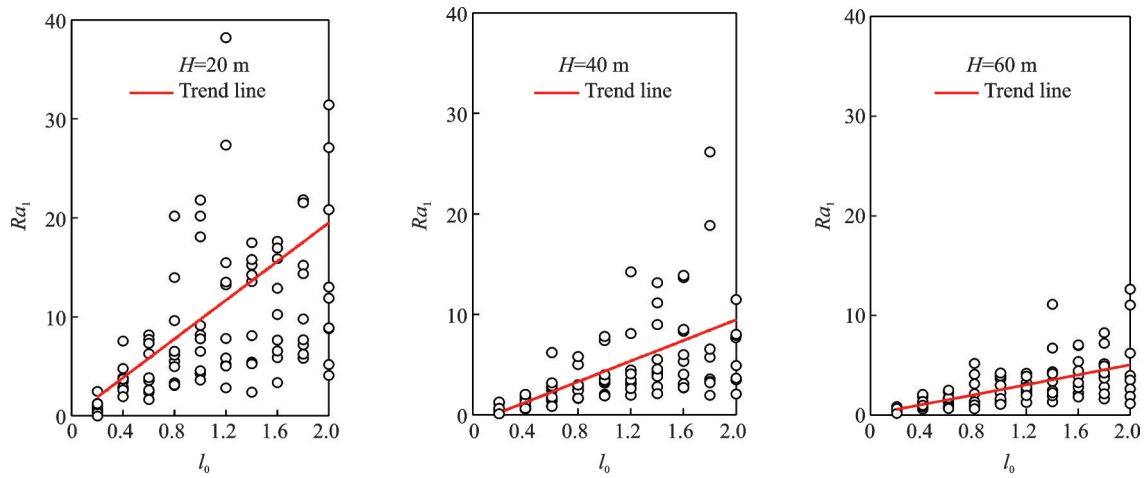


图 14  $\sigma_0=2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下参数  $Ra_1$  随着  $l_0$  的变化  
 Fig. 14 The parameters  $Ra_1$  versus  $l_0$  for different values of  $H$  with  $\sigma_0=2$  and  $\delta_0=0$

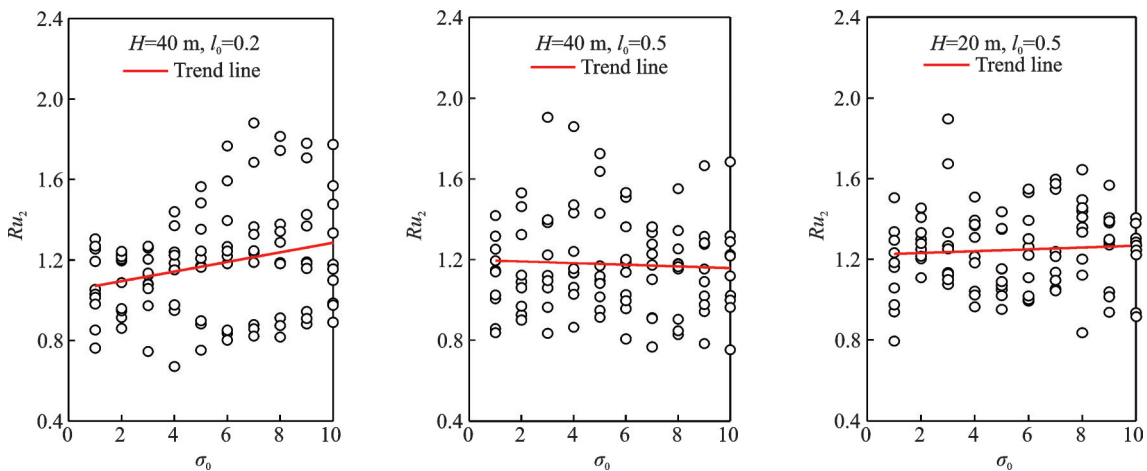


图 15  $\delta_0=0$  时不同  $H$  和  $l_0$  情况下参数  $Ru_2$  随着  $\sigma_0$  的变化  
 Fig. 15 The parameters  $Ru_2$  versus  $\sigma_0$  for different values of  $H$  and  $l_0$  with  $\delta_0=0$

和 16 分别表示  $\delta_0=0$  时不同  $H$  和  $l_0$  情况下  $Ru_2$  和  $Ra_2$  随着  $\sigma_0$  的变化。由图中可以看出,水-结构相互作用增大了圆柱结构的动力响应,但是随着  $\sigma_0$  的增大没有明显的变化趋势。

### 3.4 波浪力对地震响应的影响

考虑地震和波浪联合作用下柱体结构的位移峰值用  $u_{3max}$  表示,引入无量纲参数  $Ru_3=u_{3max}/u_{2max}$ 。图 17 表示  $l_0=0.2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下  $Ru_3$  随着

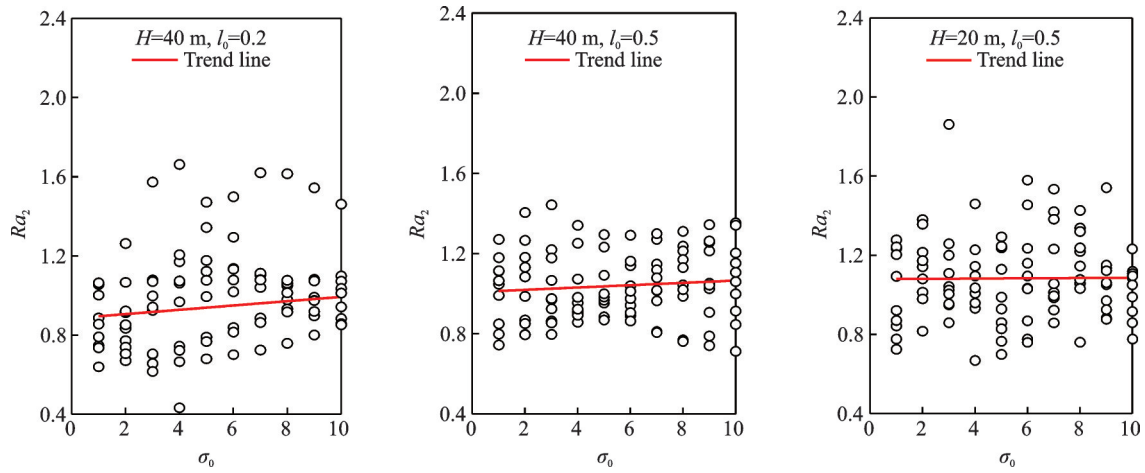


图 16  $\delta_0=0$ 时不同 $H$ 和 $l_0$ 情况下参数 $Ra_2$ 随着 $\sigma_0$ 的变化

Fig. 16 The parameters  $Ra_2$  versus with  $\sigma_0$  for different values of  $H$  and  $l_0$  with  $\delta_0=0$

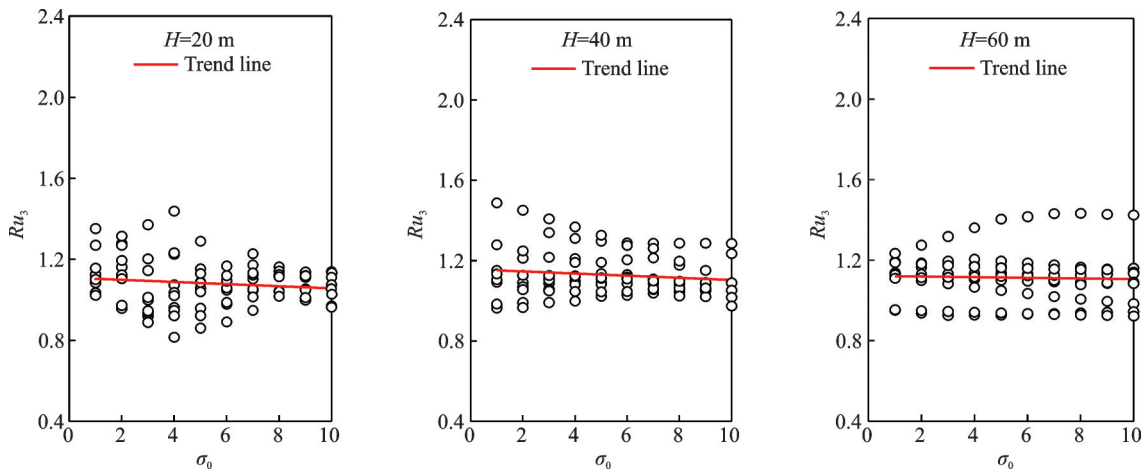


图 17  $l_0=0.2$ 和 $\delta_0=0$ 时不同 $H$ 情况下参数 $Ru_3$ 随着 $\sigma_0$ 的变化

Fig. 17 The parameters  $Ru_3$  versus  $\sigma_0$  for different values of  $H$  with  $l_0=0.2$  and  $\delta_0=0$

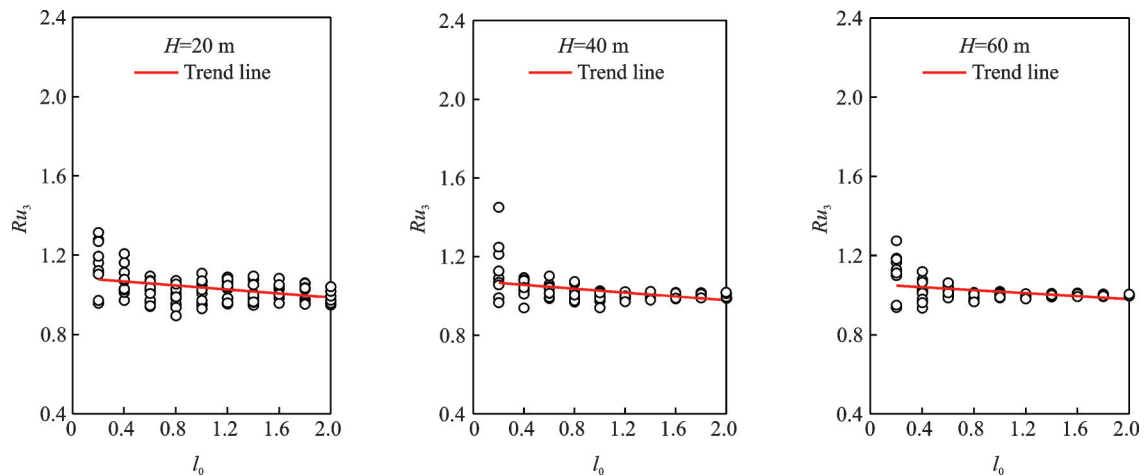


图 18  $\sigma_0=2$ 和 $\delta_0=0$ 时不同 $H$ 情况下参数 $Ru_3$ 随着 $l_0$ 的变化

Fig. 18 The parameters  $Ru_3$  versus  $l_0$  for different values of  $H$  with  $\sigma_0=2$  and  $\delta_0=0$

$\sigma_0$ 的变化。图 18 表示  $\sigma_0=2$  和  $\delta_0=0$  时不同  $H$  情况下  $Ru_3$  随着  $l_0$  的变化。由图中可以看出,波浪力显著增加了圆柱结构的位移,并随着  $\sigma_0$  和  $l_0$  的增大影响逐渐减小,但是随着  $H$  的增大没有明显的变化趋势。

### 4 结论

本文采用有限元法研究了在地震和波浪联合作用下水-结构-土相互作用对圆柱结构动力特性和动

力响应的影响。研究结果表明:

1) 土-结构相互作用降低了结构自振频率,并随着结构高度与埋深比值、土体刚度和上部结构质量的增大影响逐渐减小;并且圆柱自振频率的临界深度随着土体刚度比值的增大而减小;

2) 水-结构相互作用会降低结构自振频率,并随着宽深比的增大影响逐渐减小;随着结构高度与埋深比值和土体刚度的变化,水-结构相互作用对结构自振频率的影响很小

3) 土-结构相互作用明显增大了圆柱结构的位移响应,并且随着刚度比和结构高度的增大影响逐渐减弱、随着宽深比的增大影响逐渐增大;宽深比较小时土-结构相互作用会降低结构的加速度反应;

4) 水-结构相互作用增大了圆柱结构的动力响应;随着土体刚度的变化,水-结构相互作用对结构地震响应的影响无明显的变化趋势;

5) 宽深比较小时,波浪力的作用会明显增大圆柱结构的地震响应,并随着土体刚度比的增大影响逐渐减小,但随着结构高度的增大没有明显的变化趋势。

需要注意的是,文中均布弹簧的刚度系数是通过无量纲刚度值确定的,没有考虑到场地土等指标对弹簧刚度的影响,具体到工程实例时弹簧刚度的取值应根据桩的尺寸、土体材料参数和场地土类型等确定;另外,施加的地震动也应与场地土类型相匹配。

#### 参考文献:

- [1] 项海帆. 21世纪世界桥梁工程的展望[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 1-6.  
Xiang Hai-fan. Prospect of world's bridge projects in 21st Century [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 1-6.
- [2] Zhang D, Zhang X, He J, et al. Offshore wind energy development in China: Current status and future perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4673-4684.
- [3] 闫静茹, 路德春, 杜修力, 等. 港珠澳大桥工程人工岛三维非线性地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 161-168.  
Yan Jing-ru, Lu De-chun, Du Xiu-li, et al. Three-dimensional nonlinear seismic response analysis of artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32 (1) : 161-168.
- [4] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.
- [5] Han R P S, Xu H. A simple and accurate added mass model for hydrodynamic fluid-structure interaction analysis[J]. Journal of the Franklin Institute, 1996, 333(6): 929-945.
- [6] Williams L N. Earthquake response of submerged circular cylinder [J]. Ocean Engineering, 1986, 13 (6) : 569-585.
- [7] Tanaka Y, Hudspeth R T. Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 16: 99-119.
- [8] 黄信, 李忠献. 自由表面波和水体压缩性对深水桥墩地震动水压力的影响[J]. 天津大学学报, 2011, 44(4): 319-323.  
HUANG Xin, LI Zhong-xian. Influence of free surface wave and water compressibility on earthquake induced hydrodynamic pressure[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4): 319-323.
- [9] 黄信, 李忠献. 考虑水底柔性反射边界的深水桥墩地震动水压力分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 102-116.  
HUANG Xin, LI Zhong-xian. Earthquake induced hydrodynamic pressure of bridge pier in deep water with flexible reflecting boundary [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7), 102-116.
- [10] 杜修力, 赵娟, 赵密. 大直径深水圆柱结构动水压力的时域算法[J]. 土木工程学报, 2012, 45: 316-320.  
DU Xiu-li, ZHAO Juan, ZHAO Mi. A time-domain method for the hydrodynamic pressure on deep-water cylindrical structure with large diameter [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45: 316-320.
- [11] Du X L, Wang P G, Zhao M. Simplified formula of hydrodynamic pressure on circular bridge piers in the time domain[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 44-53.
- [12] Wang P G, Zhao M, Li H, et al. An accurate and efficient time-domain model for simulating water-cylinder dynamic interaction during earthquakes[J]. Engineering Structures, 2018, 166: 263-273.
- [13] Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, et al. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5):149-154.
- [14] 缪国平, 刘应中. 任意截面大尺度垂直柱体的波浪力和水作用力[J]. 海洋学报, 1991, 13(5): 728-735.
- [15] MacCamy R C, Fuchs R A. Wave forces on piles: A diffraction theory [R]. Beach Erosion Board Technical Memorandum U.S. Army Corps of Engineers, Report 69, 1954.
- [16] Chen H S, Mei C C. Wave forces on a stationary platform of elliptical shape [J]. Journal of Ship Research,



- 1973, 17(2): 61-71.
- [17] Li B, Cheng L, Deeks A J, et al. A semianalytical solution method for two-dimensional Helmholtz equation [J]. *Applied Ocean Research*, 2006, 28(3): 193-207.
- [18] Penzien J, Kaul M K, Berge B. Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquakes [J]. *Computers and Structures*, 1972, 2: 733-756.
- [19] Liu C, Zhang S, Hao E. Joint earthquake, wave and current action on the pile group cablestayed bridge tower foundation: An experimental study [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 63: 157-169.
- [20] Wang P G, Zhao M, Du X L, et al. Dynamic response of bridge pier under combined earthquake and wave-current action [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(10): 04019095.
- [21] Yamada Y, Iemura H, Kawano K, et al. Seismic response of offshore structures in random seas [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1989, 18: 965-981.
- [22] Goyal A, Chopra A K. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1989, 18(3): 325-344.
- [23] Goyal A, Chopra A K. Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamic of intake towers: Earthquake responses [J]. *Journal of Structure Engineering*, 1989, 115(6): 1386-1395.
- [24] Xu C J, Spyrakos C C. Seismic analysis of towers including foundation uplift [J]. *Engineering Structures*, 1996, 18(4): 271-278.
- [25] 袁迎春, 赖伟, 王君杰, 等. Morison方程中动水阻力项对桥梁桩柱地震反应的影响 [J]. *世界地震工程*, 2005, 21(4): 88-94.
- YUAN Ying-chun, LAI Wei, WANG Jun-jie, et al. The effect of hydrodynamic draging on seismic response of bridge plies [J]. *World Earthquake Engineering*, 2005, 21(4): 88-94.
- [26] 赵密, 王丽晓, 黄义铭, 等. 矩形柱体地震动水压力的附加质量模型 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, (2): 174-180.
- Zhao M, Wang X L, Huang Y M, et al. A simplified added mass model for dynamic water pressure calculation of rectangle cylinder under earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, (2): 174-180.
- [27] 王丕光. 地震和波浪作用下水-桥梁下部结构相互作用研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- WANG P G. Study on water-substructure of bridge interaction under earthquake action and wave action [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [28] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- WANG Xu-cheng. *Finite Element Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [29] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- LIU Jing-bo, DU Xiu-li. *Dynamics of Structures* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

## Earthquake and wave analysis of the circular cylinder considering water-structure-soil interaction

HUANG Yi-ming<sup>1</sup>, ZHAO Mi<sup>1</sup>, WANG Pi-guang<sup>1,2</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>, LIU Jing-bo<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The potential threat to offshore structures in zones of active seismicity is caused by combined earthquake and wave action. In this paper, the dynamic response of a cylinder structure under the combined action of earthquake and wave is studied by taking the water-structure-soil interaction into account. The flexible column structure is discretized as the Euler beam unit by the finite element method, water-cylinder interaction is replaced by the added mass, and soil-cylinder interaction is replaced by the linear spring. Based on the analysis of natural vibration frequency, the influence of soil-structure and water-structure interactions on the natural vibration frequency of the structure is analyzed. The effects of soil-structure interaction, seismic hydrodynamic force and wave force on the dynamic response of the submerged cylinder are investigated.

**Key words:** earthquake response; water-structure-soil interaction; cylinder structure; added mass; wave force

作者简介: 黄义铭(1991-), 男, 博士研究生。电话: 18810680832; E-mail: 632815832@qq.com

通讯作者: 王丕光(1985-), 男, 教授。E-mail: wangpiguang1985@126.com