

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.005

## 矩形柱体地震动水压力的附加质量简化模型\*

赵密<sup>1</sup>, 王丽晓<sup>1</sup>, 黄义铭<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:** 针对矩形柱体在水中的振动问题, 提出一种代替水-结构动力相互作用的附加质量模型。基于矩形柱体动水压力的计算公式、自由振动方程、自振频率和振型的计算公式, 建立了水中矩形柱体地震动力反应的计算公式; 基于柔性结构的一阶频率降低率, 建立了矩形柱体柔性运动引起动水压力的附加质量简化公式, 并给出了水中矩形柱体自振频率的简化计算公式; 基于刚性运动引起的动水力, 建立了矩形柱体刚性运动引起动水压力的附加质量简化公式; 建立了地震作用下水中柱体结构的简化分析模型, 即分别采用柔性和刚性运动附加质量的简化公式代替相应的水-结构相互作用。

**关键词:** 地震; 矩形柱体; 动水压力; 附加质量

**中图分类号:** TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0174-07

## A Simplified Added Mass Model for Dynamic Water Pressure Calculation of Rectangle Cylinder under Earthquake

ZHAO Mi<sup>1</sup>, WANG Lixiao<sup>1</sup>, HUANG Yiming<sup>1</sup>, WANG Piguang<sup>1,2</sup>, DU Xiuli<sup>1</sup>, LIU Jingbo<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:** Aiming at the vibration problem of rectangle cylinder in water, an added mass model for fluid-structure dynamic interaction calculation is presented. On the basis of the formula for hydrodynamic pressure calculation, the free vibration equation, and the formula for natural frequencies and mode shape, the response equations of rectangular cylinders in water subjected to earthquake are derived. A simplified added mass formula for hydrodynamic pressure calculation of rectangular cylinders caused by flexible motion is established based on the first-order frequency reduction rate of flexible structures. A simplified formula for natural frequencies estimation of rectangular cylinders in water is also given. Considering the hydrodynamic pressure caused by rigid motion, a simplified added mass formula for hydrodynamic pressure on rectangular cylinders caused by rigid motion is established. A simplified model for computing the seismic responses of the cylinders surrounded by water is established, in which the hydrodynamic action is replaced by the simplified added mass formulas obtained by flexible and rigid motion.

**Keywords:** earthquake; rectangle cylinder; hydrodynamic pressure; added mass

\* 收稿日期:2018-03-13;修回日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51708010,51421005,51678015)资助

作者简介:赵密(1980-),男,教授,博士。主要从事结构抗震方面的研究。Email:zhaomi@bjut.edu.cn

# 引言

随着经济和技术的快速发展,我国已经建造了越来越多的跨海跨江桥梁,这些桥梁的桥墩多数处于深水中<sup>[1-3]</sup>。我国是地震多发国家,在地震激励下,深水桥梁会引起结构周围水体的辐射波浪运动,由于水与桥墩存在相对运动,桥墩在水下的结构部分将作用有动水压力,该动水压力不仅会改变结构的动力特性,还会增大桥墩的地震响应。因此充分认识和研究地震激励下结构与水体的动力相互作用对桥梁建设和安全评估有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。

H. M. Westergaard<sup>[6]</sup>于1933年最早研究了刚性垂直坝面在水平地震作用下的动水压力问题,把动水压力视为部分水体质量与结构加速度的乘积,并把这部分水体称为“附加质量”。C. Y. Liaw等<sup>[7]</sup>于1974年基于辐射波浪理论推导了圆柱结构的动水压力公式。研究表明,对于细长结构可以忽略水体压缩性的影响;表面波仅在低频时对动水压力的影响比较明显。R. P. S. Han等<sup>[8]</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。A. Goyal等<sup>[9]</sup>提出了取水塔结构动水压力的附加质量简化计算方法。L. N. Williams<sup>[10]</sup>和Y. Tanaka等<sup>[11]</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。赖伟等<sup>[12]</sup>提出了一种圆形桥墩上地震动水压力的半解析半数值方法。黄信等<sup>[13-14]</sup>讨论了自由表面波、水体压缩性和水底吸收边界对圆形桥墩地震动水压力的影响。杜修力等<sup>[15-16]</sup>提出了可压缩水体条件下圆柱结构地震动水压力的时域算法和时域简化公式。Q. Li等<sup>[17]</sup>和H. Jiang等<sup>[18]</sup>提出了圆形桥墩动水压力的简化计算公式。上述分析表明,目前地震作用下圆形桥墩与水体的动力相互作用问题已取得可供实际应用的研究成果,但还鲜见对矩形柱体结构的研究。

矩形柱体结构是桥梁工程中一种常用的截面形式,但长期以来地震作用下矩形柱体与水的相互作用问题一直未得到较好的解决,困难之处在于矩形柱体动水压力难以得到解析表达式。刘振宇等<sup>[19]</sup>对深水矩形空心柱体在地震作用下外域和内域水体动水压力进行了分析,但在矩形柱体外域动水压力求解时,直接将其视为运动方向和竖向的二维平面问题。江辉等<sup>[20]</sup>基于流固耦合理论的势流

体计算方法分析了地震作用下矩形柱体的动力响应,该方法需要求解复杂的流体动力问题,难以用于桥梁的抗震设计。

本文将利用分布参数体系,研究齐水面矩形柱体结构体系的自由振动和强迫振动,并分别给出了自由振动和地震作用下水—结构相互作用的简化分析模型。

## 1 矩形柱体的动水压力计算公式

矩形柱体结构与水体相互作用的模型如图1所示。直角坐标系下, $z$ 轴沿矩形柱体轴线向上,坐标原点位于矩形柱体底部;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。

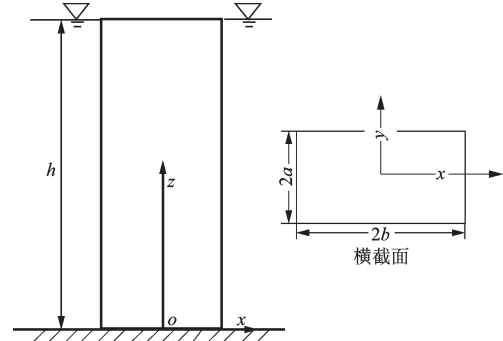


图1 水中矩形柱体分析模型

Fig.1 Definition of the problem

注:  $2a$  和  $2b$  分别为矩形宽度和长度,  $h$  为水深

王丕光<sup>[21]</sup>提出了矩形等复杂截面柱体地震动水压力的数值计算方法,该方法实质上是用垂向特征函数展开,将三维辐射问题简化为二维问题;然后用外域特征函数展开解与结构截面附近内域有限元联合求解。矩形柱体沿单位高度上的动水力可以表示<sup>[21]</sup>:

$$F_g = 2m_0 \ddot{u}_g \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j+1} S_j}{\lambda h} \cos \lambda z \quad (1)$$

$$F_s = 2m_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{S_j}{h} \int_0^h \cos \lambda z \ddot{u}_s dz \cos \lambda z \quad (2)$$

$$S_j = \frac{-\beta K_1(\alpha \lambda a)}{\alpha \lambda a K_1'(\alpha \lambda a)} \quad (3)$$

式中, $\ddot{u}_s$ 为结构弹性反应引起的加速时程; $\rho$ 为水体密度; $2a$ 和 $2b$ 分别为矩形宽度和长度; $h$ 为水深; $\lambda = (2j - 1)\pi/2h$ ,是分离变量常数; $m_0 = 4\rho a^2$ ,为单位高度水体附加质量; $F_g$ 和 $F_s$ 分别为地震作用下

结构刚体运动和弹性运动引起的动水力;  $K_1(\alpha\lambda a)$  为一阶的第二类变形贝塞尔型函数,  $K_1'(\alpha\lambda a)$  为函数  $K_1(\alpha\lambda a)$  的一阶导数;  $\alpha$  和  $\beta$  为随着长宽比变化的修正因子, 见表 1。

表 1 修正因子  $\alpha$  和  $\beta$  随长宽比的变化  
Table 1 Correction factors  $\alpha$  and  $\beta$

$a/b$	$\alpha$	$\beta$	$a/b$	$\alpha$	$\beta$
0.20	1.616	1.456	2.00	1.041	1.082
0.25	1.554	1.423	3.00	0.978	1.027
0.50	1.376	1.309	4.00	0.941	0.994
1.00	1.168	1.188	5.00	0.915	0.970

## 2 自由振动

根据欧拉梁的自由振动方程<sup>[22]</sup>和矩形柱体结构的动水压力计算公式, 柔性矩形柱体在水中的自由振动方程可表示为:

$$EI \frac{d^4 \phi}{dz^4} - m\omega^2 \phi = m_0 \omega^2 \sum_{j=1}^{\infty} S_j \cos \lambda z B_j \quad (4)$$

$$B_j = \frac{2}{h} \int_0^h \phi \cos \lambda z dz \quad (5)$$

式中,  $E$  为结构的杨氏弹性模量;  $I$  为截面惯性矩;  $\omega$  为矩形柱体的自振频率;  $m = 4\rho_s ab$ , 为矩形柱体单位长度质量,  $\rho_s$  为矩形柱体密度;  $\phi$  为矩形柱体在水中的振型。

矩形柱体在水中的振型可以用在无水情况下的振型来展开, 其表达式:

$$\phi = \sum_i^{\infty} A_i \bar{\phi}_i \quad (6)$$

式中,  $\bar{\phi}_i$  为矩形柱体无水情况下的振型;  $A_i$  为展开系数。

对于悬臂梁, 无水情况下标准化的振型函数和频率方程<sup>[22]</sup>:

$$\bar{\phi}_i = \sin \beta z - \sinh \beta z + \frac{\sin \beta h + \sinh \beta h}{\cos \beta h + \cosh \beta h} (\cosh \beta z - \cos \beta z) \quad (7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta^4 EI}{m}} \quad (8)$$

式中,  $\omega_0$  为无水情况下的自振频率;  $\beta$  通过以下频率方程求得:

$$1 + \cosh \beta h \cos \beta h = 0 \quad (9)$$

将式(6)、(7)代入式(4)并进一步整理得:

$$\sum_i^{\infty} (\omega_{0i}^2 - \omega^2) m \bar{\phi}_i A_i = \rho \omega^2 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_i S_j \cos \lambda z B_j \quad (10)$$

式中,  $B_j$  通过无水情况下求得。

利用无水情况下的模态正交性, 式(10)进一步整理:

$$\omega_{0n}^2 M_n A_n = \omega^2 M_n A_n + \omega^2 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_i H_i M_{jn} M_{ji} \quad (11)$$

$$M_n = \int_0^h m \bar{\phi}_n^2 dz \quad (12)$$

$$M_{ji} = \int_0^h \bar{\phi}_i \bar{\phi}_j \cos \lambda z dz \quad (13)$$

$$H_j = \frac{2}{h} m_0 S_j \quad (14)$$

式(11)进一步用矩阵表示:

$$\{[\bar{K}] - \omega^2 [\bar{M}]\} \{A\} = 0 \quad (15)$$

$$[\bar{K}] = \begin{vmatrix} K_{11} & & & \\ & K_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_{nn} \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$[\bar{M}] = \begin{vmatrix} \frac{K_{11}}{\omega_{01}^2} + \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \frac{K_{22}}{\omega_{02}^2} + \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \frac{K_{nn}}{\omega_{0n}^2} + \delta_{nn} \end{vmatrix} \quad (17)$$

式中,  $\delta_{ni} = \sum_{j=1}^{\infty} H_j M_{jn} M_{ji}$ ,  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}^T$ ,

$K_{mm} = M_n \omega_{0n}^2$ 。

由式(15)可以计算得到有水时的自振频率  $\omega$  表达式:

$$|[\bar{K}] - \omega^2 [\bar{M}]| = 0 \quad (18)$$

式(6)也可进一步用矩阵形式表示:

$$\begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \bar{\phi}_2 \\ \vdots \\ \bar{\phi}_n \end{Bmatrix} \quad (19)$$

## 3 强迫振动

假设矩形柱体为弯曲悬臂梁, 地震作用下结构的弹性位移  $u$  按无水振型展开:

$$u = \sum_{i=1}^N \phi_i(z) q_i(t) \quad (20)$$

式中,  $\phi_i(z)$  为结构的第  $i$  阶振型;  $q_i(t)$  为第  $i$  阶振型的广义坐标。

利用振型叠加法和水中模态正交性并考虑阻尼作用, 则地震作用下水中矩形柱体的动力方程<sup>[22]</sup>:

$$\begin{aligned} M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = -M_{0i} \ddot{u}_g - \\ M_{gi} \ddot{u}_g - M_{si} \ddot{q}_i \end{aligned} \quad (21)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} M_i &= \int_0^h m \phi_i(z)^2 dz \\ M_{0i} &= \int_0^h m \phi_i(z) dz \\ K_i &= \omega_i^2 M_i \\ C_i &= 2\xi_i \omega_i M_i \\ M_{gi} &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2\rho \sin \lambda z}{h\lambda} S_j \int_0^h \phi_i(z) \cos \lambda z dz \\ M_{si} &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2\rho}{h\lambda} S_j \left[ \int_0^h \cos \lambda z \phi_i(z) dz \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中,  $\omega_i$  表示第  $i$  振型对应的自振频率;  $\xi_i$  为相应的阻尼比。

将广义坐标  $q_i(t)$  进行傅里叶变化:

$$Q_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q_i(t) e^{-i\omega t} dt \quad (23)$$

将式(22)代入式(21)整理得:

$$Q_i(\omega) = - \frac{(M_{0i} + M_{gi}) \omega^2 U_g}{M_i [1 - 2i\xi_i (\omega_i/\omega) - (\omega_i/\omega^2)] + M_{si}} \quad (24)$$

式中,  $U_g$  为  $u_g$  的傅里叶变化形式。通过傅里叶反变换可得到时域下广义坐标  $q_i(t)$ :

$$q_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_i(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (25)$$

## 4 水-结构相互作用的简化模型

水中柔性矩形柱体的自振频率, 可通过式(18)计算得到, 但是式(18)的求解过程复杂, 不便于工程应用。为在工程设计中快速方便的计算水中矩形柱体的自振频率, 本文基于柔性结构的一阶频率降低率, 提出了一个简化但精度较高的计算公式, 即用附加质量模型计算水-结构动力相互作用的自振频率。

### 4.1 自由振动

矩形柱体在无水情况下的基频表达式  $\omega_{01}$ :

$$\omega_{01} = \sqrt{k/m} \quad (26)$$

式中,  $k$  为结构刚度;  $m$  为结构单位高度质量。

根据式(26), 假设水与矩形柱体的相互作用采用附加质量  $V_m$  代替, 则矩形柱体在有水情况下的基频  $\omega_1$  表达式:

$$\omega_1 = \sqrt{k/(m + V_m)} \quad (27)$$

式中,  $V_m = C_m \rho A_0$ ,  $C_m$  为未知的附加质量系数,  $A_0 = 4a^2$ 。

由式(27)可以计算得到  $C_m$  的表达式:

$$C_m = \frac{(1 - \omega_{01}^2/\omega_1^2)m}{\rho A_0} \quad (28)$$

通过式(9)和(18)可以计算得到精确的无水基本频率  $\omega_{01}$  和有水基本频率  $\omega_1$ 。数值算例表明,  $C_m$  仅随宽深比的变化而变化。

当假设矩形柱体结构是刚性时, 也可以得到一个附加质量系数  $C_{m0}$ , 由式(1)可以计算得到附加质量系数  $C_{m0}$  的表达式:

$$C_{m0} = \int_0^h F_g dz / h / \ddot{u}_g = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2S_j}{h^2 \lambda^2} \quad (29)$$

通过对式(29)进行曲线拟合, 可得到附加质量系数  $C_{m0}$  的简化计算公式:

$$C_{m0} \approx p_{31} l^{-p_{32}} + p_{33} \quad (30)$$

其中,

$$p_{31} = \begin{cases} -11.122e^{-9.191\delta_2} - 1.438e^{-0.544\delta_2}, & \delta_2 \leq 1 \\ -0.779e^{-0.743\delta_2} - 0.475e^{-0.0151\delta_2}, & \delta_2 > 1 \end{cases} \quad (31)$$

$$p_{32} = \begin{cases} -0.469\delta_2^2 + 0.888\delta_2 - 0.044, & \delta_2 \leq 1 \\ -0.384e^{-0.4\delta_2} + 0.644e^{-0.017\delta_2}, & \delta_2 > 1 \end{cases} \quad (32)$$

$$p_{33} = \begin{cases} 11.05e^{-9.117\delta_2} + 2.053e^{-0.326\delta_2}, & \delta_2 \leq 1 \\ 1.09e^{-0.0095\delta_2} + 0.826e^{-0.711\delta_2}, & \delta_2 > 1 \end{cases} \quad (33)$$

图2为  $C_m$  与  $C_{m0}$  的比值随着宽深比的变化。从图中可以看出: 附加质量系数  $C_m$  小于附加质量系数

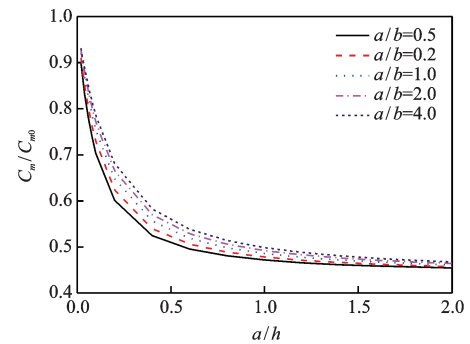


图2  $C_m$  与  $C_{m0}$  的比值随宽深比的变化

Fig.2 The change of the ratio of  $C_m$  to  $C_{m0}$  with the ratio of width to depth

$C_{m0}$ , 宽深比越大两者的相对差值越大。

为方便工程应用,通过对附加质量系数  $C_m$  的曲线拟合,可得到  $C_m$  的简化计算公式:

$$C_m = C_{m0} (p_1 e^{p_2 b/h} + p_3 e^{p_4 b/h}) \quad (34)$$

式中,未知系数  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  和  $p_4$  通过曲线拟合得到,不同  $a/b$  时的拟合系数见表 2。

表 2 附加质量系数  $C_m$  的拟合系数

Table 2 The fitting coefficients for added mass coefficient  $C_m$

$a/b$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
0.20	0.448 8	-8.087	0.510 7	-0.066 07
0.25	0.447 9	-7.849	0.512 6	-0.067 15
0.50	0.444 6	-7.146	0.518 9	-0.070 47
1.00	0.438 8	-6.293	0.528 0	-0.074 58
2.00	0.433 9	-5.756	0.535 0	-0.077 37
3.00	0.430 8	-5.484	0.539 1	-0.078 80
4.00	0.428 8	-5.234	0.541 7	-0.079 65
5.00	0.427 2	-5.211	0.543 7	-0.080 24

图 3 给出了附加质量系数  $C_m$  精确解和简化公式之间的误差,由图中可以看出误差小于 10%,符合工程应用要求。

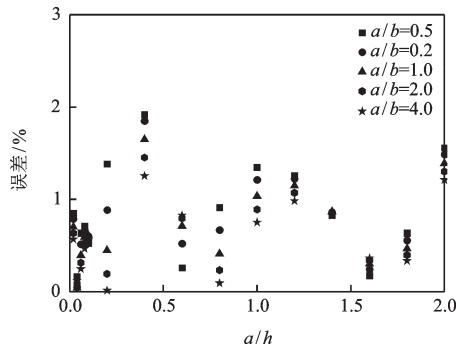


图 3 附加质量系数  $C_m$  简化公式与精确解的误差

Fig.3 The added mass coefficients  $C_m$  obtained by simplified formula compared with exact solution.

进一步可以得到矩形柱体在水中振动的自振频率的简化计算公式:

$$\omega_{1k} = \frac{\eta_k^2 b}{h^2} \sqrt{\frac{Eb}{3[\rho_s b + C_{m0} \rho a (p_1 e^{p_2 a/h} + p_3 e^{p_4 a/h})]}} \quad (35)$$

式中,  $\eta_k = \beta h$ , 通过式 (8) 得到, 如  $\eta_1 = 1.875$ ,  $\eta_2 = 4.694$ ,  $\eta_3 = 7.855$ 。

图 4 给出了自振频率  $\omega_{1k}$  精确解和简化公式之间的误差,可以看出误差小于 10%,尤其是一阶频

率的误差小于 1%,符合工程应用要求。

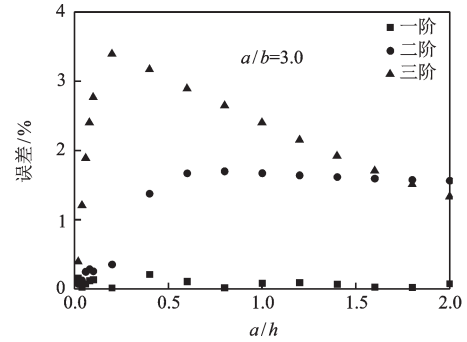


图 4 自振频率  $\omega_{1k}$  简化公式与精确解的误差

Fig.4 The error of natural frequencies between simplified formula and exact solution

## 4.2 强迫振动

基于上面的讨论,在计算水中矩形柱体的地震反应时,可由式 (35) 计算得到水中的自振频率,相应的式 (22) 进一步整理得:

$$M_{gi} = 4\rho a^2 C_{mg} \int_0^h \bar{\phi}_i(z) dz \quad (36)$$

$$M_{si} = 4\rho a^2 C_{ms} \int_0^h \bar{\phi}_i(z) dz \quad (37)$$

式中,  $C_{mg}$ ,  $C_{ms}$  分别为刚性运动和柔性运动的附加质量系数。本文讨论了三种附加质量表示方案,即  $C_{mg} = C_{ms} = C_{m0}$ ,  $C_{mg} = C_{ms} = C_m$ ,  $C_{mg} = C_{m0}$ 、 $C_{ms} = C_{m0}$ 。

通过数值算例验证不同的附加质量代替方案的精度。算例中矩形柱体高度为  $h=40$  m, 密度和弹性模量分别为  $2\ 500$  kg/m<sup>3</sup> 和  $30$  GPa, 阻尼比为  $0.05$ 。图 5 是地面运动位移时程,脉冲持时  $0.2$  s, 频谱覆盖了地震作用频段。

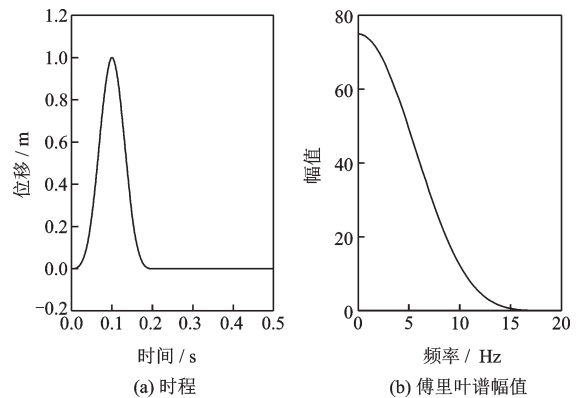


图 5 地面位移时程和傅氏谱

Fig.5 The time history of displacement of the ground motion and its Fourier spectrum

图6给出了不同长宽比、不同宽深比时水中矩形柱体顶部的位移反应。由图可以看出,第一种方案与精确解之间误差较大,第二、第三种方案与精确解吻合较好。图7给出了不同方案下矩形柱体沿高度相对位移的峰值。可以看出,第二种方案下的相对位移峰值要比精确解小,而第三种方案下的相对位移峰值要比精确解大。因此为了工程结构的安全,在计算水中矩形柱体地震反应时,建议采用

第三种方案。

## 5 结论

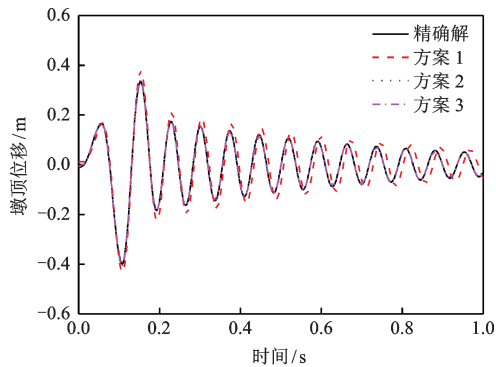
(1)建立了矩形柱体在水中自由振动的精确分析模型和水中矩形柱体结构地震响应的计算公式,模型中矩形柱体结构的有水振型用无水振型来展开。

(2)建立了刚体运动引起矩形柱体动水压力的附加质量简化公式和柔性运动引起矩形柱体动水压力的附加质量精确计算方法及其简化计算公式。数值分析结果表明,本文提出的简化公式数学表达简单、精度较高,适用于工程应用。

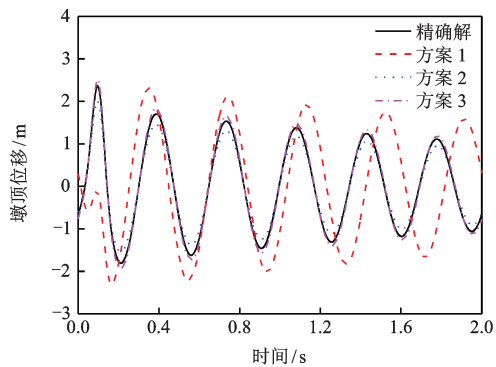
(3)提出了地震作用下矩形柱体动力反应的简化分析模型,即刚体运动和柔性运动引起的动水压力分别采用刚体运动和柔性运动对应的附加质量简化公式代替。

## 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 H F. Prospect of world's bridge projects in 21st century [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (3): 1-6. (in Chinese)
- [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: 4 673-4 684.
- [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 J R, Lu D Ch, Du X L, 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. (in Chinese)
- [4] 李悦, 宋波. 动水对斜拉桥结构动力响应影响研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 94-99.  
Li Y, Song B. Study of the effect of hydrodynamic force on cable-stayed bridges under earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 94-99. (in Chinese)
- [5] 黄信, 李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影晌[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 65-73.  
Huang X, Li Zh X. Influence of hydrodynamic pressure



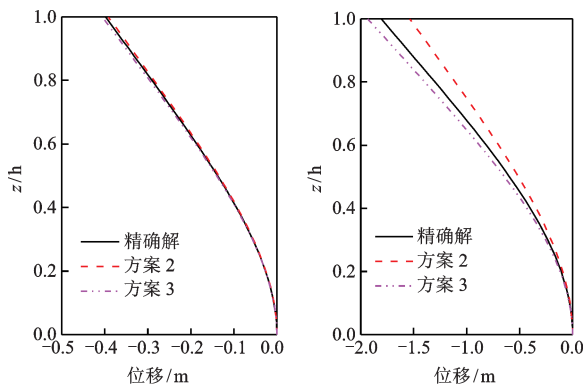
(a)  $a/b=3.0, b/h=0.2$



(b)  $a/b=3.0, a/h=0.5$

图6 不同方案下水中矩形柱体顶部位移反应

Fig.6 Relative displacement response at the top of the cylinder in water in different cases



(a)  $a/b=3.0, b/h=0.2$

(b)  $a/b=3.0, a/h=0.5$

图7 不同方案下矩形柱体沿高度相对位移的峰值

Fig.7 Relative displacement response at the top of the cylinder in water in different cases

- on seismic responses of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65-73. (in Chinese)
- [6] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98:418-433.
- [7] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.
- [8] 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.
- [9] Goyal A, Chopra A. Simplified evaluation of added hydrodynamic mass for intake towers [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1989, 115(7): 1 393-1 412.
- [10] Williams L N. Earthquake response of submerged circular cylinder [J]. Ocean Engineering, 1986, 13(6): 569-585.
- [11] Tanaka Y, Hudspeth R T. Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 16: 99-119.
- [12] 赖伟, 王君杰, 胡世德. 地震下桥墩动水压力分析 [J]. 同济大学学报, 2004, 32(1): 1-5.  
Lai W, Wang J J, Hu Sh D. Earthquake induced hydrodynamic pressure on bridge pier [J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] 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 X, Li Zh X. Influence of free surface wave and water compressibility on earthquake induced hydrodynamic pressure [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4): 319-323. (in Chinese)
- [14] 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 X, Li Zh X. Earthquake induced hydrodynamic pressure of bridge pier in deep water with flexible reflecting boundary [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 102-116. (in Chinese)
- [15] 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(增1): 316-320.
- Du X L, Zhao J, Zhao M. A time-domain method for the hydrodynamic pressure on deep-water cylindrical structure with large diameter [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup 1): 316-320. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] Li Q, Yang W L. An improved method of hydrodynamic pressure calculation for circular hollow piers in deep water under earthquake [J]. Ocean Engineering, 2013, 72: 241-256.
- [18] Jiang H, Wang B, Bai X, et al. Simplified expression of hydrodynamic pressure on deep water cylindrical bridge piers during earthquakes [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017014.
- [19] 刘振宇, 李乔, 赵灿晖, 等. 深水矩形空心桥墩在地震作用下附加动水压力分析 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 53-56.  
Liu Zh Y, Li Q, Zhao C H, et al. Additional hydrodynamic pressure on rectangular hollow piers in deep water due to earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 27(2): 53-56. (in Chinese)
- [20] 江辉, 楚芹, 王宝喜. 近、远场地震下深水桥墩动力响应特性对比研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 58-66.  
Jiang H, Chu Q, Wang B X. Comparative study on the dynamic response feature of bridge pier in deep-water excited by near-fault and far-field earthquake ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 33(22): 58-66. (in Chinese)
- [21] 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. (in Chinese)
- [22] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
Liu J B, Du X L. Dynamics of structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)