

文章编号: 1000-4750(2018)07-0055-07

考虑水体压缩性的椭圆柱体地震动水压力分析

王丕光, 赵 密, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 地震作用下水与柱体结构的相互作用会对结构产生动水压力, 该文研究椭圆柱体的地震动水压力。首先, 基于椭圆坐标系推导了椭圆柱体地震动水压力的解析解; 其次, 通过 ABAQUS 声固耦合方法验证了提出的椭圆柱体地震动水压力的解析解, 算例表明两者误差在 1% 左右; 最后, 引入无量纲参数数频率、宽深比和长短轴比, 定量分析了水体压缩性对地震动水压力的影响。

关键词: 地震; 动水压力; 椭圆柱体; 水体压缩性; 辐射波浪理论

中图分类号: U441.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0235

EARTHQUAKE INDUCED HYDRODYNAMIC PRESSURE ON ELLIPTICAL CYLINDER SURROUNDED BY COMPRESSIBLE WATER

WANG Pi-guang, ZHAO Mi, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Hydrodynamic pressure on cylinders would occur during water-cylinder interaction when the cylinders are subjected to earthquake actions. The hydrodynamic pressure on elliptical cylinders was investigated in this study. Firstly, the analytical solution for earthquake induced hydrodynamic pressure on the elliptical cylinder was derived in elliptical coordinate system. Secondly, the proposed analytical solution was verified by the acoustic-structure coupling method in commercial finite element software ABAQUS. The numerical examples indicated that the proposed analytical solutions were in good agreement with the numerical solutions. Thirdly, the influence of water compressibility on hydrodynamic pressure is analyzed quantitatively by introducing dimensionless parameters including the frequency ratio, width-depth ratio and ratio of long to short axis of the ellipse.

Key words: earthquake; hydrodynamic pressure; elliptical cylinder; water compressibility; radiation wave theory

近海结构物的地震响应分析需要考虑水体和结构的动力相互作用, 该动力相互作用不仅会改变结构的动力特性, 还会对结构产生附加动水压力作用。研究表明地震作用下结构与水体的动力相互作用会对水中结构的动力反应产生较大影响^[1-2]。

实际近海工程中, 存在各种截面形式的墩柱结构, 如圆形、矩形和椭圆形等。国外学者对近海结

构物的地震动水压力的研究较早。Liaw 和 Chopra^[3]基于辐射波浪理论推导了圆柱结构的动水压力公式, 研究结果表明, 对于细长结构可以忽略水体压缩性的影响。Williams^[4]采用边界积分方法研究了水平地震作用下水中圆柱结构的动力反应。Tanaka 等^[5]利用解析法分析了水平地震作用下齐水面弹性圆柱体单位长度上动水压力的附加质量系数和阻

收稿日期: 2017-03-22; 修改日期: 2017-12-11

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

通讯作者: 赵 密(1980—), 男, 吉林人, 教授, 博士, 博导, 主要从事重大工程抗震领域研究(Email: zhaomi@bjut.edu.cn)。

作者简介: 王丕光(1985—), 男, 山东人, 助理研究员, 博士, 主要从事桥梁结构抗震领域的研究(E-mail: wangpiguang1985@126.com);

杜修力(1963—), 男, 四川人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事地震工程领域的研究(Email: duxiuli@bjut.edu.cn)。

尼系数。Goyal 和 Chopra^[6]提出了取水塔结构动水压力的附加质量简化计算方法。Han 和 Xu^[7]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, Sun 和 Nogami^[8]研究了轴对称结构的地震动水压力; Avilés 和 Li^[9]讨论了海底吸收条件对轴对称结构地震动水压力的影响; Liao^[10]研究了水中多个圆柱结构的动力相互作用; Wei 等^[11]提出了水中轴对称结构地震设计和分析的简化方法。

近年来,我国学者也对深水桥墩的地震动水压力进行了研究。赖伟等^[12]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;黄信和李忠献^[13]讨论了水底吸收边界对圆形桥墩地震动水压力的影响;杜修力等^[14-15]提出了可压缩水体条件下圆结构地震动水压力的时域算法和时域简化公式;李乔等^[16-17]提出了矩形空心桥墩地震动水压力的计算公式和圆形空心桥墩上地震动水压力的简化计算公式;Jiang 等^[18]提出了圆形桥墩动水压力的简化计算公式。另外,秦念等^[19]研究了水平激励下储液罐内液体的晃动响应;张文学等^[20]研究了渡槽结构考虑流固耦合的横向地震响应简化计算公式。

上述情况表明,目前对于地震作用下圆形和矩形墩柱结构与周围水体的动力相互作用问题已经取得了可供实际应用的研究成果,但还鲜见对椭圆柱体结构地震动水压力的研究。需要指出的是,水体压缩性是影响墩柱结构地震动水压力的一个重要因素,而目前有关水体压缩性对墩柱结构地震动水压力的影响还缺乏定量的分析和系统性的研究。

本文将基于辐射波浪理论,并根据水体控制方程和边界条件,在椭圆坐标系下通过分离变量推导椭圆截面墩柱结构地震动水压力的解析公式,并通过引入无量纲参数定量分析水体压缩性对墩柱结构地震动水压力的影响。

1 控制方程及边界条件

地震作用下刚性椭圆截面柱体与水体动力相互作用的分析模型如图 1 所示, a 和 b 分别表示椭圆的半长轴和半短轴。假定水体为无旋、无粘、可压缩的小扰动流体,忽略表面重力波的影响;地基为刚性,地面运动位移为 u 。坐标原点设于柱底,水深为 h 。直角坐标系下,以动水压力 p 作为未知量的水体控制方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: c 为声波在水中的传播速度,水体不可压缩时 $1/c=0$ 。

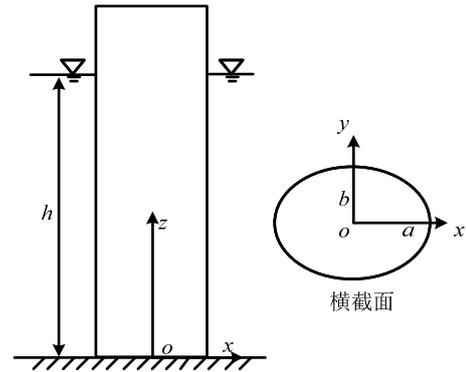


图 1 分析模型

Fig.1 Analysis model

由于柱体截面呈椭圆形,故首先将式(1)变换到椭圆坐标系上去。椭圆坐标系如图 2 所示。直角坐标系与椭圆坐标系直接的变化关系为:

$$x = \mu \cosh \xi \cos \eta \quad (2)$$

$$y = \mu \sinh \xi \sin \eta \quad (3)$$

式中: $\mu = \sqrt{a^2 - b^2}$; ξ 和 η 分别为椭圆坐标系的径向和环向坐标,取值范围分别为 $0 \leq \xi < \infty$ 和 $0 \leq \eta < 2\pi$ 。椭圆截面的环向坐标为:

$$\xi = \xi_0 = \arctan(b/a) \quad (4)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)得到椭圆坐标系下水体控制方程为:

$$\frac{2}{\mu^2 (\cosh 2\xi - \cos 2\eta)} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

水体底部、静水表面和无穷远边界条件为:

$$\frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (6)$$

$$p \Big|_{z=h} = 0 \quad (7)$$

$$p \Big|_{\xi \rightarrow \infty} = 0 \quad (8)$$

地震动沿长轴方向作用时的水体与结构界面边界条件为:

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = 0 \quad (9)$$

$$p \Big|_{\eta=0.5\pi} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} b \cos \eta \quad (11)$$

地震动沿短轴方向作用时的水体与结构界面边界条件为:

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0.5\pi} = 0 \quad (12)$$

$$p \Big|_{\eta=0} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} a \sin \eta \quad (14)$$

式中, ρ 为水体密度。

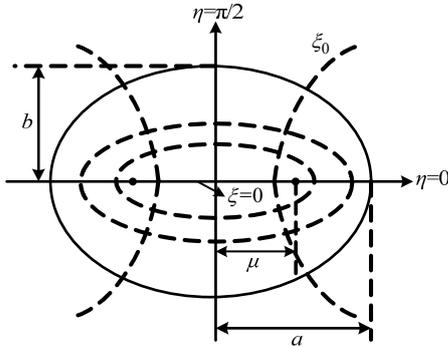


图2 椭圆坐标系

Fig.2 Elliptical cylindrical coordinate

2 动水压力的频域解析解

地面简谐运动时水体的动水压力和结构刚体位移可以表示为:

$$p(\xi, \eta, z, t) = P(\xi, \eta, z) e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$u(t) = U e^{i\omega t} \quad (16)$$

式中: ω 为结构的振动频率; U 为频域下结构的刚体位移。

2.1 分离变量求解

椭圆柱坐标系下, $P(\xi, \eta, z)$ 可分离变量为:

$$P = R(\xi)G(\eta)Z(z) \quad (17)$$

将式(15)代入控制方程式(5)得:

$$\frac{2}{\mu^2 (\cosh 2\xi - \cos 2\eta)} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + k^2 P = 0 \quad (18)$$

式中, $k = \omega / c$ 。

将式(17)代入式(18), 整理得到三个解耦的方程:

$$Z'' + \lambda^2 Z = 0 \quad (19)$$

$$G'' + (a_0 - 2q \cos 2\eta)G = 0 \quad (20)$$

$$R'' - (a_0 - 2q \cosh 2\xi)R = 0 \quad (21)$$

式中: λ 和 a_0 为分离变量常数; q 为一无量纲参数。如果 $k > \lambda$, $q = \mu^2(k^2 - \lambda^2) / 4$; 如果 $k < \lambda$, $q = -q'$, $q' = \mu^2(\lambda^2 - k^2) / 4$ 。

由式(19)和边界条件式(6)和式(7)可得:

$$Z = d_j \cos \lambda z \quad (22)$$

式中: d_j 为待定系数; $\lambda = (2j - 1)\pi / 2h$, $j = 1, 2, \dots$ 。

式(20)叫做角向马蒂厄方程^[21]。第一类角向马蒂厄函数 $ce_n(\eta, q)$ 和 $se_n(\eta, q)$ 是本文角向马蒂厄方程的解。 $ce_n(\eta, q)$ 和 $se_n(\eta, q)$ 是周期函数, n 是偶数时周期为 π , n 是奇数时周期为 2π 。当 $q > 0$ 时, 整数阶角向马蒂厄函数为:

$$ce_{2n}(\eta, q) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{2k}^{(2n)}(q) \cos(2k)\eta \quad (23)$$

$$ce_{2n+1}(\eta, q) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{2k+1}^{(2n+1)}(q) \cos(2k+1)\eta \quad (24)$$

$$se_{2n+2}(\eta, q) = \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+2}^{(2n+2)}(q) \sin(2k+2)\eta \quad (25)$$

$$se_{2n+1}(\eta, q) = \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1}^{(2n+1)}(q) \sin(2k+1)\eta \quad (26)$$

当 $q < 0$ 时, 整数阶角向马蒂厄函数为:

$$ce_{2n}(\eta, -q') = (-1)^n ce_{2n}(0.5\pi - \eta, q') \quad (27)$$

$$ce_{2n+1}(\eta, -q') = (-1)^n se_{2n+1}(0.5\pi - \eta, q') \quad (28)$$

$$se_{2n+2}(\eta, -q') = (-1)^n se_{2n+2}(0.5\pi - \eta, q') \quad (29)$$

$$se_{2n+1}(\eta, -q') = (-1)^n ce_{2n+1}(0.5\pi - \eta, q') \quad (30)$$

函数 $ce_n(\eta, q)$ 和 $se_n(\eta, q)$ 的归一化正交关系为:

$$\int_0^{2\pi} ce_m(\eta, q) ce_n(\eta, q) d\eta = \begin{cases} \pi, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (31)$$

$$\int_0^{2\pi} se_m(\eta, q) se_n(\eta, q) d\eta = \begin{cases} \pi, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases}$$

$$\int_0^{2\pi} ce_n(\eta, q) \cos k\eta d\eta = \pi A_k^{(n)}$$

$$\int_0^{2\pi} se_n(\eta, q) \sin k\eta d\eta = \pi B_k^{(n)} \quad (32)$$

式(21)叫做径向马蒂厄方程^[22]。当 $q > 0$ 时, 整数阶径向马蒂厄方程的完全解为:

$$R = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} D_n^1 He_n^{(1)}(\xi, q) + D_n^2 He_n^{(2)}(\xi, q) \\ \sum_{n=0}^{\infty} D_{n+1}^3 Ho_{n+1}^{(1)}(\xi, q) + D_{n+1}^4 Ho_{n+1}^{(2)}(\xi, q) \end{cases} \quad (33)$$

式中: D_n^1 、 D_n^2 、 D_n^3 和 D_n^4 是任意常数; $He_n^{(1)}(\xi, q)$ 和 $Ho_n^{(1)}(\xi, q)$ 称为第一类马蒂厄-汉克尔函数, 椭圆坐标系中常用来表示向内传播的波; $He_n^{(2)}(\xi, q)$ 和 $Ho_n^{(2)}(\xi, q)$ 称为第二类马蒂厄-汉克尔函数, 椭圆坐

标系中常用来表示向外传播的波。当 $q < 0$ 时, 整数阶径向马蒂厄方程的完全解为:

$$R = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} C_n^1 Ie_n(\xi, -q) + C_n^2 Ke_n(\xi, -q) \\ \sum_{n=0}^{\infty} C_{n+1}^3 Io_{n+1}(\xi, -q) + C_{n+1}^4 Ko_{n+1}(\xi, -q) \end{cases} \quad (34)$$

式中: C_n^1 、 C_n^2 、 C_n^3 和 C_n^4 为任意常数; 函数 $Ie_n(\xi, -q)$ 和 $Io_n(\xi, -q)$ 为第一类变形贝塞尔型径向马蒂厄函数, 是单调递增函数; 函数 $Ke_n(\xi, -q)$ 和 $Ko_n(\xi, -q)$ 为第二类变形贝塞尔型径向马蒂厄函数, 是单调递减函数。

1) 地震动沿长轴方向作用。

当地震动沿长轴方向时, 根据边界条件式(8)~式(10), 式(18)的解为:

$$P = \sum_{j=1}^{s-1} d_j ce_1(\eta, q) He_1^{(2)}(\xi, q) \cos \lambda z + \sum_{j=s}^{\infty} d_j ce_1(\eta, -q') Ke_1(\xi, -q') \cos \lambda z \quad (35)$$

将式(33)代入边界条件式(11), 并在区间 $z=[0, h]$ 和 $\eta=[0, 2\pi]$ 积分可得到如下式:

$$\int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\partial P}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} ce_1(\eta, q) \cos \lambda z d\theta dz = \rho \omega^2 b \int_0^h U \cos \lambda z dz \int_0^{2\pi} \cos \eta ce_1(\eta, q) d\theta \quad (36)$$

由角向马蒂厄函数的正交性式(31)和式(32)以及竖向土层振型函数 $\cos \lambda z$ 的正交性, 可得:

$$d_j = \begin{cases} \frac{2\rho\omega^2 b A_1^{(1)} \int_0^h U \cos \lambda z dz}{h He_1^{(2)'}(\xi_0, q)} & , k \geq \lambda \\ \frac{2\rho\omega^2 b B_1^{(1)} \int_0^h U \cos \lambda z dz}{h Ke_1'(\xi_0, -q')} & , k < \lambda \end{cases} \quad (37)$$

式中: $He_1^{(2)'}(\xi, q)$ 和 $Ke_1'(\xi, -q')$ 为函数 $He_1^{(2)}(\xi, q)$ 和 $Ke_1(\xi, -q')$ 的一阶导数。

2) 地震动沿短轴方向作用。

当地震动沿短轴方向时, 根据边界条件式(8)、式(12)~式(14), 可求得椭圆截面柱体表面动水压力为:

$$P = \sum_{j=1}^{s-1} d_j se_1(\eta, q) Ho_1^{(2)}(\xi, q) \cos \lambda z + \sum_{j=s}^{\infty} d_j se_1(\eta, -q') Ko_1(\xi, -q') \cos \lambda z \quad (38)$$

$$d_j = \begin{cases} \frac{2\rho\omega^2 a B_1^{(1)} \int_0^h U \cos \lambda z dz}{h Ho_1^{(2)'}(\xi_0, q)} & , k \geq \lambda \\ \frac{2\rho\omega^2 a A_1^{(1)} \int_0^h U \cos \lambda z dz}{h Ko_1'(\xi_0, -q')} & , k < \lambda \end{cases} \quad (39)$$

式中: $Ho_1^{(2)'}(\xi, q)$ 和 $Ko_1'(\xi, -q')$ 为函数 $Ho_1^{(2)}(\xi, q)$ 和 $Ko_1(\xi, -q')$ 的一阶导数。

2.2 椭圆柱体的动水力

地震作用沿长轴方向时椭圆截面柱体表面沿单位高度上的动水力为:

$$F_x(z) = -\int_0^{2\pi} P(\xi_0, \eta, z) b \cos \eta d\eta \quad (40)$$

将式(35)代入式(40)整理得:

$$F_x(z) = -\rho \pi b^2 \omega^2 U \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{j+1} S_{xj}}{\lambda h} \cos \lambda z \quad (41)$$

$$S_{xj} = \begin{cases} \frac{[A_1^{(1)}]^2 He_1^{(2)}(\xi_0, q)}{He_1^{(2)'}(\xi_0, q)} & , k \geq \lambda \\ \frac{[B_1^{(1)}]^2 Ke_1(\xi_0, -q')}{Ke_1'(\xi_0, -q')} & , k < \lambda \end{cases} \quad (42)$$

地震作用沿短轴方向时椭圆截面柱体表面沿单位高度上的动水力为:

$$F_y(z) = -\int_0^{2\pi} P(\xi_0, \eta, z) a \sin \eta d\eta \quad (43)$$

将式(38)代入式(43)整理得:

$$F_y(z) = -\rho \pi a^2 \omega^2 U \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{j+1} S_{yj}}{\lambda h} \cos \lambda z \quad (44)$$

$$S_{yj} = \begin{cases} \frac{[B_1^{(1)}]^2 Ho_1^{(2)}(\xi_0, q)}{Ho_1^{(2)'}(\xi_0, q)} & , k \geq \lambda \\ \frac{[A_1^{(1)}]^2 Ko_1(\xi_0, -q')}{Ko_1'(\xi_0, -q')} & , k < \lambda \end{cases} \quad (45)$$

将式(41)和式(43)沿高度积分可得到沿长轴方向和沿短轴方向的总动水力 \bar{F}_x 和 \bar{F}_y , 动水力的时域解可通过傅里叶反变换得到。

2.3 算例验证

目前还缺乏对椭圆形柱体结构动水压力的物理试验研究, 因此, 本节将采用数值方法验证本文提出的解析公式。商业有限元软件 ABAQUS^[23]中的声-固耦合方法可模拟可压缩水体与结构的动力相互作用。假定椭圆柱体结构为刚性, 通过声-固耦合方法计算得到单位脉冲运动作用下刚性椭圆柱

体上的总动水压力。图 3 是地面运动位移，脉冲持时 0.2 s，频谱覆盖了地震作用频段。

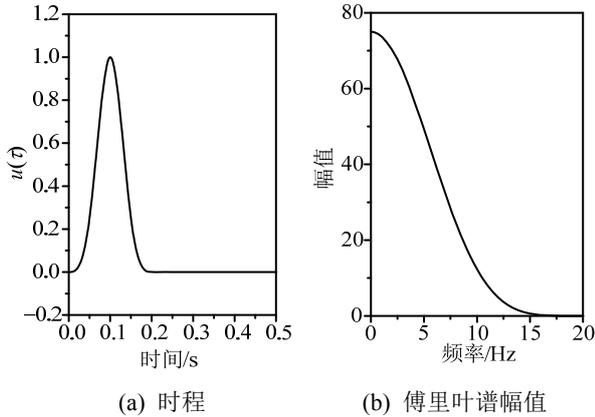


图 3 刚性桥墩位移时程和傅氏谱
Fig.3 Time history of displacement of rigid pier and its Fourier spectrum

水深取为 80 m，可压缩水体声速和密度分别为 1400 m/s^2 和 1000 kg/m^3 ；水体的区域为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ ，截断边界处采用吸收边界模拟无限域水体，水面处声压为 0，水体的整体有限元尺寸为 10 m；椭圆柱体短轴尺寸 b 取为 20 m，长轴尺寸 a 取为 30 m 和 60 m；水体与椭圆柱体交界面的相互作用通过绑定约束实现。图 4 和图 5 分别为地震作用沿 x 轴方向和 y 轴方向时椭圆柱体的总动水力。图 4 和图 5 中刚性椭圆柱体在峰值点时的通过本文解析公式和 ABAQUS 声固耦合方法计算得到的总动水压力如表 1 所示。由表 1 可以看出，两者的误差在 1% 左右。可见，本文解析解与 ABAQUS 声固耦合方法计算得到的结果吻合很好。

3 水体压缩性对动水压力的影响

引入无量纲参数频率比 $\bar{\omega}$ 、宽深比 l 和长短轴比 δ ：

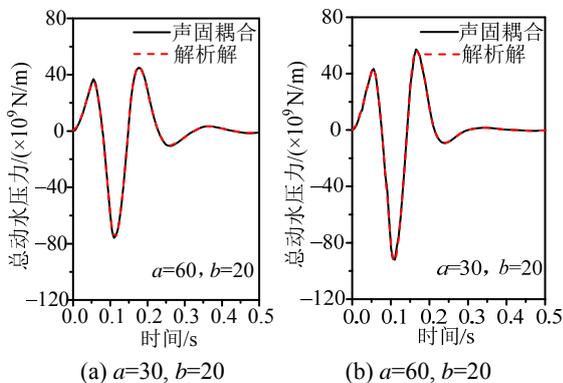


图 4 地震沿 x 轴方向时柱体的总动水力
Fig.4 Total hydrodynamic force on cylinders subjected to earthquake along x -axis

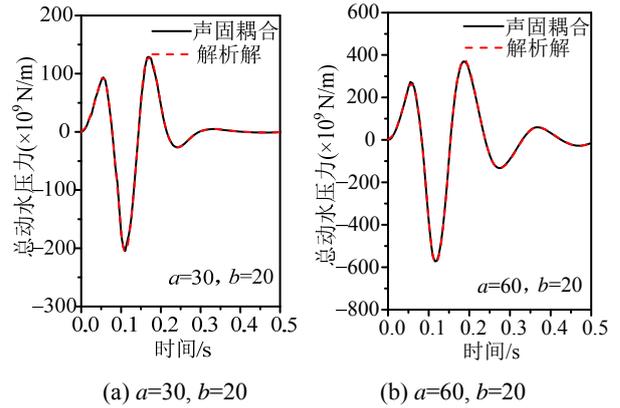


图 5 地震沿 y 轴方向时柱体的总动水力
Fig.5 Total hydrodynamic force on cylinders subjected to earthquake along y -axis

表 1 总动水压力峰值

	ABAQUS/N	解析解/N	误差/(%)
图 4(a)	92.05×10^9	93.29×10^9	1.35
图 4(b)	75.89×10^9	75.585×10^9	0.4
图 5(a)	204.71×10^9	205.32×10^9	0.3
图 5(b)	572.35×10^9	578.44×10^9	1.06

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_1} = \frac{\omega}{\pi c / 2h} \quad (46)$$

$$l = \frac{D}{h} \quad (47)$$

$$\delta = \frac{a}{b} \quad (48)$$

式中， $\omega_1 = \pi c / 2h$ 为水层的基频；地震方向沿 x 轴时 $D=2b$ ，地震方向沿 y 轴时 $D=2a$ 。

为定量分析水体压缩性对动水力的影响，定义无量纲动力刚度系数：

$$\beta = \frac{\bar{F}}{\omega^2 U h \rho \pi D^2 / 4} \quad (49)$$

其中，地震方向沿 x 轴时 $\bar{F} = \bar{F}_x$ ，地震方向沿 y 轴时 $\bar{F} = \bar{F}_y$ 。频率比为零时，式(49)的值为不可压缩水体的动力刚度系数。

图 6 和图 7 分别为地震作用沿 x 轴和 y 轴时动力刚度系数幅值和辐角随频率比的变化，图中 $a/b=2$ 。由图 6(a)和图 7(a)可以看出，对于可压缩水体，动力刚度系数幅值先随着频率比的增加而增大，达到峰值后随着频率比的增加而减小，定义峰值时的频率值为峰值频率；柱体宽深比越大，水体可压缩时动力刚度系数幅值的峰值与水体不可压缩时动力刚度系数幅值的比值越大。由图 6(b)和图 7(b)可以看出，频率小于水层基频(频率比小于 1)时，

动力刚度系数辐角为零，即不存在水体的辐射阻尼；频率大于水层基频时，动力刚度系数辐角随频率比和宽深比的增加而增大。可见，频率比越大、宽深比越大，水体的辐射阻尼的影响就越大，而水体的辐射阻尼是由于水体压缩性引起的。图 6 和图 7 的结果表明，动力刚度系数峰值频率与水体基频越接近，水体压缩性对动水力的影响就越大；水体的基频主要取决于水深，水深越大，水体的基频越小。

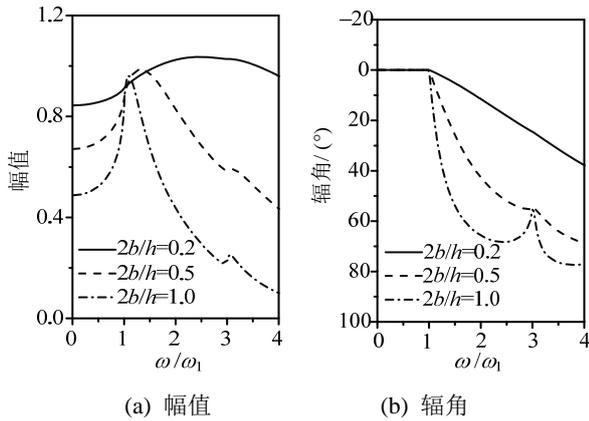


图 6 地震沿 x 轴方向时的动力刚度系数(a/b=2)

Fig.6 Dynamic stiffness coefficient when earthquake is along x-axis (a/b=2)

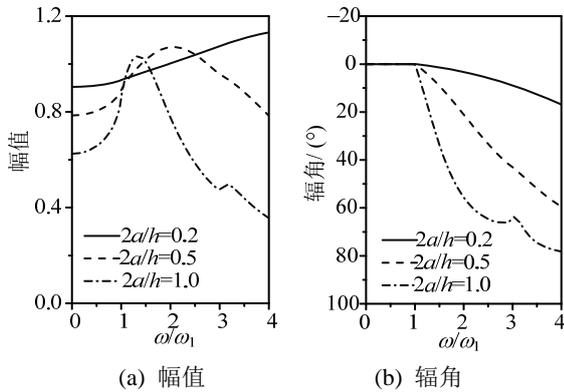


图 7 地震沿 y 轴方向时的动力刚度系数(a/b=2)

Fig.7 Dynamic stiffness coefficient when earthquake is along y-axis (a/b=2)

图 8 为动力刚度系数峰值频率随宽深比的变化。由图可以看出，动力刚度系数的峰值频率随着宽深比的增加而减小，并逐渐趋近于水体的基频；同一宽深比下，椭圆长短轴比越大，峰值频率越小。可见，椭圆的宽深比和长短轴比越大，水体压缩性的影响越显著。地震作用的频率范围主要在 1 Hz~10 Hz，水深较浅时(h=20 m)，水体的基频(18 Hz)远大于地震作用的主要频率；水深较深时(h=80 m)，水体的基频(4.5 Hz)在地震作用的主要频率范围内。

选取 El-Centro 波进一步研究水体压缩性对椭

圆柱体地震动水压力的影响，El-Centro 波的时程和频谱如图 9 所示。图 10 为考虑和忽略水体压缩性时动水力峰值的比值(R_f)随宽深比的变化。由图可以看出，水深较浅($h < 40$ m)时，水体压缩性对动水压力的影响小，可忽略；水深较深($h > 40$ m)、宽深比较小($l < 1$)时，同样可以忽略水体压缩性对动水压力的影响；水深较深($h > 40$ m)、宽深比较大($l > 1$)时，水体压缩性对对动水压力的影响显著。可见，对于深水大尺寸柱体($h > 40$ m、 $l > 1$)，需要考虑水体压缩性对其地震动水压力的影响。

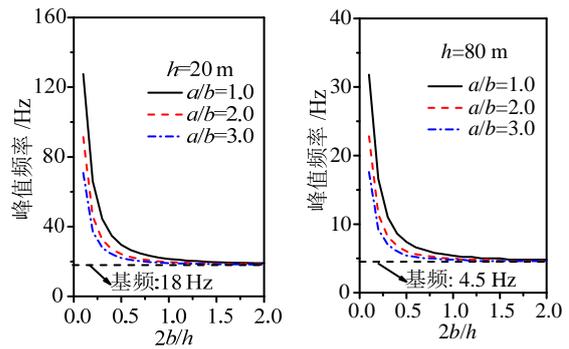


图 8 动力刚度系数峰值频率

Fig.8 Peak frequency of dynamic stiffness coefficient

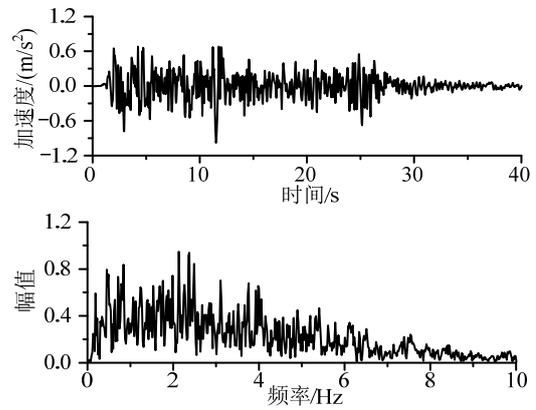


图 9 El-Centro 地震波加速度时程和傅氏谱

Fig.9 Time history of acceleration of El-Centro wave and its Fourier spectrum

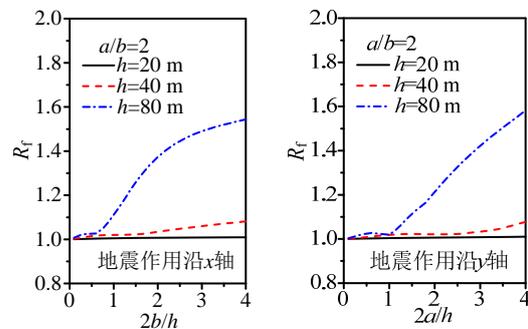


图 10 考虑和忽略水体压缩性时动水力峰值的比值(a/b=2)

Fig.10 Ratio of peak hydrodynamic force when considering and ignoring water compressibility (a/b=2)

4 结论

本文基于辐射波浪理论,在椭圆柱坐标系下采用分离变量法推导了椭圆柱体地震动水压力的解析公式,算例的结果表明本文提出的解析公式与ABAQUS声固耦合方法吻合较好;基于提出的解析公式,定量分析了水体压缩性对墩柱结构地震动水压力的影响。结果表明:地震作用下,深水大尺寸柱体($h > 40$ m、 $l > 1$)的动水压力分析中需要考虑水体压缩性的影响;水深较浅($h < 40$ m)或宽深比较小($l < 1$)时,可忽略水体压缩性的影响,此时可以利用附加质量概念对近海结构进行地震响应分析。

参考文献:

- [1] 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 Yue, Song Bo. 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)
- [2] 黄信,李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 65—73.
Huang Xin, Li Zhongxian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic responses of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65—73. (in Chinese)
- [3] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33—49.
- [4] Williams A N. Earthquake response of submerged circular cylinder [J]. Ocean Engineering, 1986, 13(6): 569—585.
- [5] Tanaka Y, Hudspeth R T. Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 16: 99—119.
- [6] Goyal A, Chopra A. Simplified evaluation of added hydrodynamic mass for intake towers [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1989, 115(7): 1393—1412.
- [7] Han R P S, Xu H. A simple and accurate added mass model for hydrodynamic fluid-structure interaction analysis. Journal of the Franklin Institute, 1996, 333(6): 929—945.
- [8] Sun K, Nogami T. Earthquake induced hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20(5): 429—440.
- [9] Avilés J, Li X. Hydrodynamic pressures on axisymmetric offshore structures considering seabed flexibility [J]. Computer and Structures, 2001, 79(29/30): 2595—2606.
- [10] Liao W G. Hydrodynamic interaction of flexible structures [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-ASCE, 1985, 111(4): 719—731.
- [11] Wei K, Bouaanani N, Yuan WC. Simplified methods for efficient seismic design and analysis of water-surrounded composite axisymmetric structures. Ocean Engineering, 2015, 104: 617—638.
- [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 Wei, Wang Junjie, Hu Shide. 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. 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 Zhongxian. Earthquake induced hydrodynamic pressure of bridge pier in deep water with flexible reflecting boundary [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7), 102—116. (in Chinese)
- [14] 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 Xiuli, 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. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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 Zhengyu, Li Qiao, Zhao Canhui, 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)
- [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, Zeng C, Zhang H. Simplified expression of hydrodynamic pressure on deep water cylindrical bridge piers during earthquakes [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017014.
- [19] 秦念,周叮,刘伟庆,等. 水平激励下任意截面柱形储液罐内液体的晃动响应[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 178—182.
Qin Nian, Zhou Ding, Liu Weiqing, et al. Sloshing response of liquid in cylindrical tank with arbitrary cross-section under lateral excitations [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 178—182. (in Chinese)
- [20] 张文学,黄荐,陈盈,等. 渡槽结构考虑流固耦合的横向地震响应简化计算公式[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 69—75.
Zhang Wenxue, Huang Jian, Chen Ying, et al. A simplified formula for the calculation of the transverse seismic response of aqueducts considering fluid-structure interaction [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 69—75. (in Chinese)
- [21] Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of Mathematical Functions [M]. New York: Dover Publications, 1965: 721—750.
- [22] 熊天信. 马蒂厄函数理论基础及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 139—155.
Xiong Tianxin. Theory and application of Mathieu functions [M]. Beijing: China Science Press, 2014: 139—155. (in Chinese)
- [23] ABAQUS. Abaqus User Manual, version 6.10 [M]. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.