

# 地震作用下海底悬跨管道水动力计算模型

董汝博\*, 李 昕, 金 娇, 周 晶

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在不同方向的地震动输入下海底悬跨管道的动力响应存在差别. 基于 Wake 模型, 提出了三维地震输入下的海底悬跨管道的水动力模型, 并推导了有限元控制方程. 建立有限元离散模型模拟模型试验工况, 进行了正弦波和 El Centro 模拟地震波输入下海底悬跨管道的动力分析. 通过数值计算和模型试验的结果比较可以看出, 考虑地震动输入方向影响的 Wake 模型能够应用于海底悬跨管道的地震响应分析, 其计算结果与试验结果符合得较好.

**关键词:** 海底悬跨管道; Wake 模型; 地震反应; 数值分析

**中图分类号:** TU311.3 **文献标志码:** A

## 0 引言

海床崎岖不平及波浪和海流的冲刷和淘蚀, 均会使海底管道出现悬空. 海底管道的悬空段与海水直接接触, 其所受的水动力一直是各国学者研究的热点问题. 目前开展的研究大多针对海底管道在波浪和海流作用下的受力问题, 相继提出了 Morison 模型、Wake 模型和 Wake II 模型等水动力模型. 而针对地震作用下海底管道所受水动力的研究开展得相对较少. 渤海地区地面水平地震加速度在  $0.20g \sim 0.25g$ , 地震与工作荷载组合成为该海域海底管道强度设计控制条件<sup>[1]</sup>. 研究海底悬跨管道在地震作用下的动力特性时, 通常采用 Morison 方程<sup>[2]</sup>或者仅考虑流体引起的附加质量模拟管道和周围流体的相互作用<sup>[3~7]</sup>. 地震荷载相对波浪和海流荷载具有强度大、持时短、频率高的特点, 同时地面运动也将影响到流体的运动特性, 而基于 Morison 方程分析海底管道的水动力与实测情况存在较大差别. 因此, 研究地震作用下海底管道的水动力模型具有重要的理论和应用意义.

本文在 Wake 模型的基础上, 引入不同地震动输入方向的影响, 建立地震作用下海底悬跨管道的水动力模型, 并将数值计算结果与模型试验结果进行对比研究.

## 1 地震作用下的水动力模型

### 1.1 Wake 模型

Wake 模型是 Lambrakos 等在分析 Exxon 公司的 Pipeline Field Measurement Program (PFMP) 的测试数据的基础上, 在 Morison 方程中引入了尾流影响后提出的<sup>[8]</sup>. Wake 模型的基本方程采用与 Morison 方程类似的形式. 但在 Wake 模型中, 拖曳力系数是与时间有关的(受启动效应的影响), 且原 Morison 方程中的水质点速度也以有效速度代替, 此处的有效速度为水质点相对管道的速度与尾流流速之和. 在 Wake 模型中, 不考虑柱体的弹性, 则惯性力的表达式为

$$f_i = C_m \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w \quad (1)$$

式中:  $C_m$  为惯性力系数;  $\rho$  为海水密度;  $D$  为管道外径;  $U$  为水体速度;  $C_{aw}$  为尾流引起的附加质量系数;  $U_w$  为尾流速度. 拖曳力的表达式为

$$f_d = C_d(t) \frac{1}{2} \rho D U_e |U_e| \quad (2)$$

式中:  $C_d(t)$  为与时间有关的拖曳力系数;  $U_e$  为有效水质点速度.

管道在水体中运动产生的尾流及其速度分布如图 1 所示.

收稿日期: 2007-12-10; 修回日期: 2010-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重点项目 50439010); 教育部科学技术研究资助项目(重大项目 305003).

作者简介: 董汝博\*(1982-), 男, 博士生, E-mail: dongrubo\_df@sohu.com; 周 晶(1949-), 男, 教授, 博士生导师.

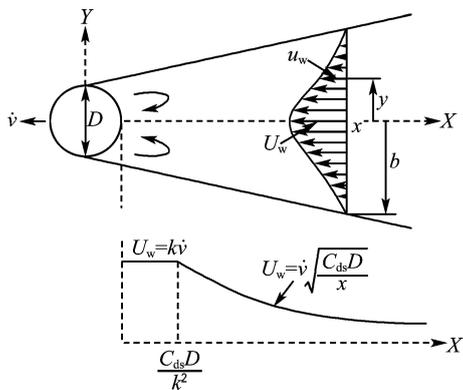


图1 管道在静水中匀速运动时产生的尾流  
Fig.1 Wake flow for the pipe moving at constant speed in still water

图1中, $D$ 为管道外径; $v$ 为管道运动位移; $x$ 为沿管道运动方向上距管道轴线的距离; $y$ 为在垂直管道运动方向上距管道轴线运动轨迹的距离; $b$ 为尾流流速等于0处距管道轴线的距离; $u_w$ 为在 $y$ 处的尾流速度; $U_w$ 为在管道轴线运动轨迹处尾流速度; $C_{ds}$ 为定常流下管道的拖曳力系数; $k$ 为小于等于1.0的常数,通常根据试验获得。

管道匀速运动时,任一点的尾流速度可通过下式计算:

$$u_w = \dot{v} \sqrt{\frac{C_{ds} D}{x}} \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^{1.5} \right]^2 \quad (3)$$

在实际应用中,为简化计算,通常取在管道轴线运动轨迹处尾流速度 $U_w$ 作为最终结果,同时假定在管道附近时,尾流速度为定值,则尾流速度 $U_w$ 的表达式为

$$U_w = k \dot{v}; x \leq C_{ds} D / k^2 \quad (4)$$

$$U_w = \dot{v} \sqrt{C_{ds} D / x}; x > C_{ds} D / k^2 \quad (5)$$

对于管道运动速度随时间变化的情况,当尾流邻近管道时,其速度按式(4)计算;当尾流与管道分离时,尾流的速度按式(5)计算。

### 1.2 三维地震动输入下水动力模型

本文在Wake模型的基础上考虑地震时管道和水体的运动特点,引入地震动输入方向的影响,并考虑管道的弹性,从而得到了适用于三维地震动输入情况下的水动力模型。

利用Wake模型计算海底管道在地震作用下所受的水动力时,引入如下基本假设:(1)地震过程中管道附近海流流速为0,且管道足够深而不受波浪影响;(2)地面水平运动时,水体速度为0,地面竖向运动时,水体速度等于地面运动速度;

(3)不考虑管道在不同方向上运动之间的相互影响;(4)不考虑启动效应的影响;(5)管道运动振幅较小,尾流始终发生在管道附近;(6)管道为弹性体。假设(2)是根据文献[9]中的模型试验和数值计算结果得到。

1.2.1 地震动沿管轴线水平方向输入情况 管道悬空段在沿管轴线方向水平运动时所受的水动力为

$$f_i = 0 \quad (6)$$

1.2.2 地震动沿垂直管轴线水平方向输入情况 管道为弹性体,则海底管道悬空段所受的惯性力为

$$f_i = C_m \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U} - C_a \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w \quad (7)$$

式中: $C_a = C_m - 1$ ,为附加水质量系数。根据假设,水体速度 $U = 0$ ,则上式变为

$$f_i = -C_a \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w \quad (8)$$

管道为弹性体,则海底管道悬空段所受的拖曳力为

$$f_d = C_d \frac{1}{2} \rho D (U - \dot{v} + U_w) |U - \dot{v} + U_w| \quad (9)$$

类似地,由于 $U = 0$ ,上式变为

$$f_d = C_d \frac{1}{2} \rho D (-\dot{v} + U_w) |-\dot{v} + U_w| \quad (10)$$

则管道悬空段在运动方向所受的水动力为

$$f_i = f_i + f_d = -C_a \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w + C_d \frac{1}{2} \rho D (-\dot{v} + U_w) |-\dot{v} + U_w| \quad (11)$$

由于假设尾流始终发生在管道附近,根据Wake理论有

$$U_w = k(\dot{v} - U) = k \dot{v} \quad (12)$$

其中 $k$ 为试验参数。将式(12)代入式(11)有

$$f_i = -(C_a + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_d \frac{1}{2} \rho D (1 - k)^2 \dot{v} |\dot{v}| \quad (13)$$

1.2.3 地震动沿竖直方向输入情况 管道为弹性体,则海底管道悬空段所受的惯性力如式(7)所示。根据假设,水体速度 $U = \dot{u}_g$ ( $u_g$ 为地面运动位移),则式(7)变为

$$f_i = C_m \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{u}_g - C_a \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w \quad (14)$$

管道为弹性体,海底管道悬空段所受的拖曳力如式(9)所示.类似地,由于 $U = \dot{u}_g$ ,式(9)变为

$$f_d = C_d \frac{1}{2} \rho D (\dot{u}_g - \dot{v} + U_w) | \dot{u}_g - \dot{v} + U_w | \quad (15)$$

则管道悬空段在运动方向所受的水动力为

$$f_v = f_i + f_d = C_m \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{u}_g - C_a \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_{aw} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{U}_w + C_d \frac{1}{2} \rho D (\dot{u}_g - \dot{v} + U_w) | \dot{u}_g - \dot{v} + U_w | \quad (16)$$

由于假设尾流始终发生在管道附近,根据Wake理论有

$$U_w = k(\dot{v} - U) = k(\dot{v} - \dot{u}_g) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)有

$$f_v = (C_m + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{u}_g - (C_a + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2 \ddot{v} - C_d \frac{1}{2} \rho D (1 - k)^2 (\dot{v} - \dot{u}_g) | \dot{v} - \dot{u}_g | \quad (18)$$

### 1.3 运动方程推导

由式(6)、(13)和(18)可知,在忽略波浪和海流的情况下,单位长度海底管道悬空段在地震动作用下所受的水动力为

$$f_{sw} = -m_{aw} \ddot{v} - d_{aw} (\dot{v} - \dot{w}) | \dot{v} - \dot{w} | + f_{aw} \ddot{u}_g \quad (19)$$

式中: $m_{aw}$ 为单位长度管道上的附加水质量; $d_{aw}$ 为单位长度管道上的附加水阻尼; $w$ 为水体运动位移; $f_{aw}$ 为由地面运动引起的单位长度管道上的惯性力系数.分别表述如下:

$$m_{aw} = \begin{cases} 0; & \text{沿管轴线方向} \\ (C_a + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2; & \text{垂直管轴线水平向} \\ (C_a + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2; & \text{垂直管轴线竖向} \end{cases} \quad (20)$$

$$d_{aw} = \begin{cases} 0; & \text{沿管轴线方向} \\ C_d \frac{1}{2} \rho D (1 - k)^2; & \text{垂直管轴线水平向} \\ C_d \frac{1}{2} \rho D (1 - k)^2; & \text{垂直管轴线竖向} \end{cases} \quad (21)$$

$$w = \begin{cases} 0; & \text{沿管轴线方向} \\ 0; & \text{垂直管轴线水平向} \\ u_g; & \text{垂直管轴线竖向} \end{cases} \quad (22)$$

$$f_{aw} = \begin{cases} 0; & \text{沿管轴线方向} \\ 0; & \text{垂直管轴线水平向} \\ (C_m + kC_{aw}) \frac{\pi}{4} \rho D^2; & \text{垂直管轴线竖向} \end{cases} \quad (23)$$

## 2 有限元数值模型

### 2.1 考虑水动力的海底管道多点输入运动方程

离散后 $n$ 个自由度的管道模型在 $m$ 个地面支点运动作用下,考虑水动力的运动方程以矩阵形式表示为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\mathbf{U}}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{C}_c^T & \mathbf{C}_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\mathbf{U}}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{U}_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F} \end{pmatrix} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{v}$ 、 $\dot{\mathbf{v}}$ 和 $\ddot{\mathbf{v}}$ 分别是非约束自由度的 $n$ 维位移、速度和加速度列向量; $\mathbf{U}_g$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_g$ 和 $\ddot{\mathbf{U}}_g$ 分别是约束自由度的 $m$ 维位移、速度和加速度列向量; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别是 $n \times n$ 的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{M}_g$ 、 $\mathbf{C}_g$ 和 $\mathbf{K}_g$ 分别是 $m \times m$ 的支座自由度的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{M}_c$ 、 $\mathbf{C}_c$ 和 $\mathbf{K}_c$ 分别是 $n \times m$ 的两种自由度之间的质量、阻尼和刚度耦合矩阵; $\mathbf{F}_s$ 是 $n$ 维水动力列向量; $\mathbf{F}$ 是 $m$ 维支座反力列向量.

由式(24)的第一式可得

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = \mathbf{F}_s - \mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{U}}_g - \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{U}}_g - \mathbf{K}_c \mathbf{U}_g \quad (25)$$

采用集中质量模型,则有 $\mathbf{M}_c = \mathbf{0}$ .同时在一一般情况下阻尼矩阵 $\mathbf{C}_c$ 很难确定,因此上式右侧的阻尼力常常被忽略<sup>[10]</sup>.则可以得到

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = \mathbf{F}_s - \mathbf{K}_c \mathbf{U}_g \quad (26)$$

### 2.2 基于Wake模型的海底管道运动方程

基于式(19),水动力向量 $\mathbf{F}_s$ 的表达式如下:

$$\mathbf{F}_s = -\mathbf{M}_{aw} \ddot{\mathbf{v}} - \mathbf{D}_{aw} (\dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{W}}) | \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{W}} | + \mathbf{F}_{aw} \ddot{\mathbf{U}}_g \quad (27)$$

式中: $\mathbf{M}_{aw}$ 是附加水质量矩阵; $\mathbf{D}_{aw}$ 是附加水阻尼矩阵; $\mathbf{W}$ 是水体位移列向量; $\mathbf{F}_{aw}$ 是地面运动产生的惯性力系数矩阵.针对管单元,各矩阵的单元矩阵表达式为

$$\mathbf{M}_{aw}^e = \begin{cases} \int m_{aw} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dl; & \text{悬空段} \\ 0; & \text{埋设段} \end{cases} \quad (28)$$

$$\mathbf{D}_{aw}^e = \begin{cases} \int d_{aw} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dl; & \text{悬空段} \\ 0; & \text{埋设段} \end{cases} \quad (29)$$

$$\mathbf{F}_{aw}^e = \begin{cases} \int f_{aw} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dl; & \text{悬空段} \\ 0; & \text{埋设段} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\mathbf{N}$  为插值函数矩阵;  $l$  为单元长度. 将式(27)代入式(26), 得到采用改进 Wake 模型计算水动力的海底管道多点输入运动方程

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_{aw}) \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}_{aw} (\dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{W}}) + \mathbf{K} \mathbf{v} = -\mathbf{K}_c \mathbf{U}_g + \mathbf{F}_{aw} \dot{\mathbf{U}}_g \quad (31)$$

由式(24)可知,  $\mathbf{C}$  为管道结构阻尼矩阵, 计算中引入 Rayleigh 阻尼, 近似表达阻尼矩阵  $\mathbf{C}$ ,

$$\mathbf{C} = \alpha_d (\mathbf{M} + \mathbf{M}_{aw}) + \beta_d \mathbf{K} \quad (32)$$

式中:  $\alpha_d$  和  $\beta_d$  由结构的 1 阶固有频率  $\omega_1$  和 3 阶固有频率  $\omega_3$  及阻尼比  $\xi$  求得.

$$\alpha_d = \frac{2\xi\omega_1\omega_3}{\omega_1 + \omega_3}, \beta_d = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_3} \quad (33)$$

### 3 结果分析

建立文献[9]中模型试验管道的有限元模型, 其中, 模型管道材料为有机玻璃, 管道外半径  $D_0 = 150$  mm; 壁厚  $t_p = 5$  mm; 模型材料动弹性模量  $E_m = 3\,450$  MPa; 质量密度  $\rho = 1.2 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>; 管道长度  $l = 2.7$  m. 并与试验工况对应, 采用基于 Wake 模型推导得到的三维地震动输入的控制方程计算了海底悬跨管道在不同激励方向

(水平激励和竖直激励)、不同激励波形(5 Hz 正弦波和 El Centro 模拟地震波)情况下的动力反应. 并将管道跨中与试验测点相同部位的加速度和应变反应结果与试验结果进行了比较. 计算中, 惯性力系数  $C_m$  按我国海底管道系统规范(SY/T 4804—92)的建议, 取  $2.0^{[11]}$ ; 拖曳力系数  $C_d$  和尾流引起的附加质量系数  $C_{aw}$  及试验参数  $k$  按 PFMP 测试数据的结果, 分别取 1.10、0.25 和 0.50<sup>[8]</sup>; 同时为了简化问题, 假设管道在不同方向上振动时,  $C_m$ 、 $C_d$ 、 $C_{aw}$ 、 $k$  等参数的取值不变. 在模型试验中, 水下振动台作用在管道模型两个支座上的地震动激励是相同的, 因此利用式(31)分析时, 地面位移  $\mathbf{U}_g$  和加速度  $\dot{\mathbf{U}}_g$  采用一致地震动.

考虑地震动输入方向的 Wake 模型对海底悬跨管道进行的数值计算结果和试验结果<sup>[9]</sup>的峰值比较如表 1 所示. 从表中可以看出, 基于 Wake 模型的计算结果与模型试验结果的最大相对误差为 10.00%, 表明考虑地震动输入方向的 Wake 模型能够用于分析海底悬跨管道的动力响应.

水平地震激励下, 模型试验和基于 Wake 模型计算的管道加速度和应变反应时程分别如图 2、3 所示. 可以看出, 基于 Wake 模型的计算结果与模型试验结果无论在幅值上, 还是在相位上均符合较好. 竖直地震激励下, 模型试验和基于考虑地震动输入方向的 Wake 模型计算的管道加速度和应变反应时程分别如图 4、5 所示. 可以看出, 基于考虑地震动输入方向的 Wake 模型的计算结果与模型试验结果无论在幅值上, 还是在相位上均吻合较好.

表 1 计算结果与试验结果峰值比较

Tab. 1 Comparison of peak values of numerical and experimental results

结果类别	激励波形	激励方向	试验值	地震下 Wake 模型	
				计算值	相对误差/%
加速度/ (m · s <sup>-2</sup> )	正弦波	水平	9.58	8.92	6.89
		竖直	2.87	2.64	8.01
	El Centro 模拟波	水平	1.09	1.04	4.59
		竖直	0.73	0.69	5.48
应变/10 <sup>-6</sup>	正弦波	水平	969	1 032	6.50
		竖直	271	290	7.01
	El Centro 模拟波	水平	120	108	10.00
		竖直	41	38	7.32

注: 相对误差 = |计算值 - 试验值| / 试验值

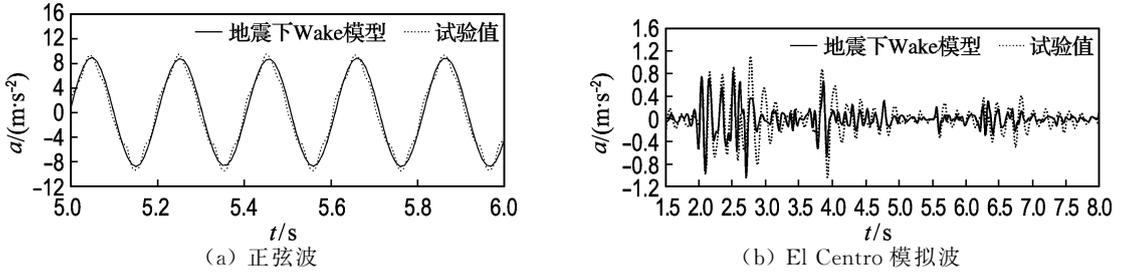


图2 水平激励时管道跨中加速度反应时程

Fig. 2 Acceleration time histories at the center of pipe span under horizontal excitations

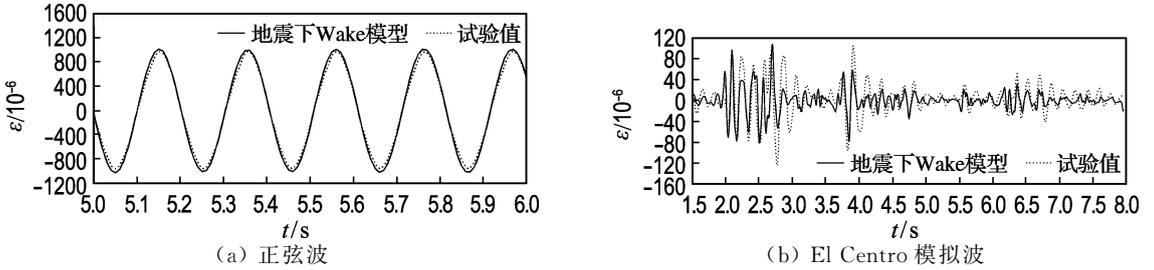


图3 水平激励时管道跨中应变反应时程

Fig. 3 Strain time histories at the center of pipe span under horizontal excitations

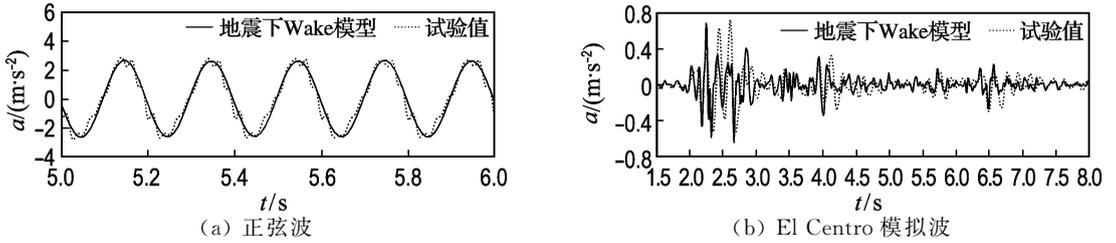


图4 竖直激励时管道跨中加速度反应时程

Fig. 4 Acceleration time histories at the center of pipe span under vertical excitations

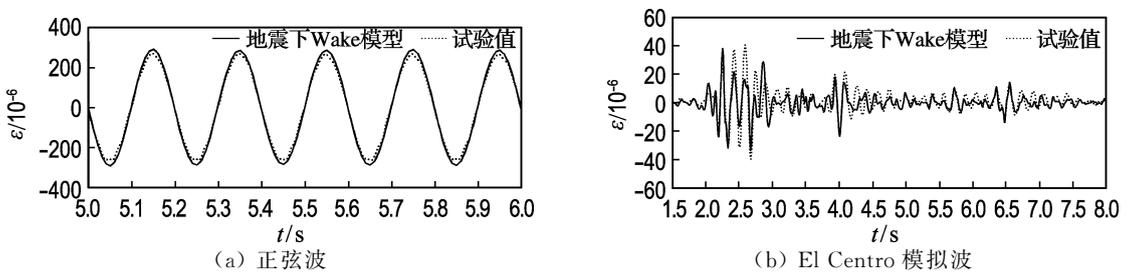


图5 竖直激励时管道跨中应变反应时程

Fig. 5 Strain time histories at the center of pipe span under vertical excitations

在地震波作用下,基于 Wake 模型的计算结果与实验结果存在一定差异,主要原因为采用 Wake 模型模拟管道受到水动力就存在误差,经文献[8]中实验值与基于 Wake 模型的水动力的计算值的比较发现,水平力峰值的最大误差为 17%,升力峰值的最大误差为 10%。其次,本文假设不考虑管道和流体在不同方向上运动之间的耦合作用,这与实际不符,在计算中也会引入误差。

## 4 结论

(1)在海底管道承受地震作用时,地震动的输入方向及管道运动产生的尾流对海底管道所受的水动力有一定影响,从而进一步影响管道的动力反应。

(2)基于地面水平运动时,水体速度为 0,地面竖向运动时,水体速度等于地面运动速度这两个假设建立的海底悬跨管道水动力模型,能够较

好地与试验结果吻合。

(3)虽然在海底悬跨管道水动力模型的推导中假设不考虑管道和水体在不同方向上运动之间的耦合作用,与实际不符,但数值计算结果与模型试验结果的误差在可接受的范围内。

### 参考文献:

- [1] 王金英,赵冬岩. 渤海海底管道工程的现状、特点和问题[J]. 石油学报, 1993, **14**(4):1-6
- [2] DATTA T K, MASHALY E A. Transverse response of offshore pipelines to random ground motion [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1990, **19**(2):217-228
- [3] KALLIONTZIS C. Numerical simulation of submarine pipelines in dynamic contact with a moving seabed [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1998, **27**(5):465-486
- [4] 李 昕,刘亚坤,周 晶,等. 海底悬跨管道动力反应的试验研究和数值模拟[J]. 工程力学, 2003, **20**(2):21-25
- [5] 高学奎,朱 晔. 地震动水压力对深水桥墩的影响[J]. 北京交通大学学报, 2006, **30**(1):54-58
- [6] 冯玉涛,戎进章,曹 芳,等. 动水及桩-土-结构相互作用对跨江大桥稳定性的地震影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(s1):3713-3718
- [7] 朱诗颂. 丹江口水库二桥考虑水作用时的地震反应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(10):86-88
- [8] LAMBRAKOS K F, CHAO J C, BECKMANN H, *et al.* Wake model of hydrodynamic forces on pipelines [J]. **Ocean Engineering**, 1987, **14**(2):117-136
- [9] 董汝博. 多点地震动作用下海底悬跨管道非线性分析[D]. 大连:大连理工大学, 2007
- [10] WILSON E L. **Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering** [M]. California: Computers and Structures Inc., 2002
- [11] 中国石油社. SY/T 4804—92 海底管道系统规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1992

## Hydrodynamic force model for free spanning submarine pipelines under earthquake

DONG Ru-bo\*, LI Xin, JIN Qiao, ZHOU Jing

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The earthquake input directions affect seismic response of free spanning submarine pipeline. A hydrodynamic force model improved from Wake model considering three dimensional excitation inputs is presented. Equations of motion are derived from the improved Wake model on the basis of finite element method. Finite element model is established to simulate the experimental conditions. The numerical results subjected to sine wave input and simulated El Centro earthquake input are obtained. The comparison of numerical and experimental results shows that the Wake model considering excitation directions could satisfactorily predict dynamic response of free spanning submarine pipelines under earthquake, and the numerical results are in agreement with the experimental ones.

**Key words:** free spanning submarine pipelines; Wake model; seismic response; numerical analysis