

深水高桩基础桥梁地震水动力效应分析

王君杰, 赖伟, 胡世德

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对我国深水桥梁建设中广泛采用大型群桩基础的现实情况, 为满足深水桥梁抗震分析和抗震设计的需求, 进行了深水高桩基础桥梁地震水动力效应的研究. 将深水高桩基础的承台理想化为一个浸入水中的截断圆柱体, 建立了截断圆柱体的地震水动力等效附加质量与等效附加阻尼矩阵的计算方法, 提出了非圆柱体等效为圆柱体的近似处理方法. 在频域建立了深水高桩基础桥梁考虑水动力效应的地震振动方程. 运用所提出的方法完成了有限元程序编制, 并对一座跨海峡大桥进行了地震反应计算. 结果表明, 地震水动力效应对深水高桩基础桥梁的地震反应有重要影响, 因计算的反应量不同, 可能使地震反应增大, 也可能使地震反应减小, 影响幅度可达20%以上.

关键词: 桥梁; 深水高桩基础; 地震反应; 水动力效应

中图分类号: TU 311.3

文献标识码: A

Seismic Hydrodynamic Effects on Group-pile Foundations with Caps Merged in Water

WANG Junjie, LAI Wei, HU Shide

(State Key Laboratory for Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To meet the seismic design demands of bridges in deep water in China, an investigation was made into the hydrodynamic effects on seismic response of bridges. The cap of group-pile foundation was idealized as a truncated cylinder at first, and theoretical solutions of the added mass matrix and the added damping matrix for the truncated cylinder were developed. Approximate methods were proposed to obtain the added mass matrix and the added damping matrix for the truncated prism with arbitrary section by modifying the ones for truncated cylinder. The seismic motion equation was developed for bridges with group-pile foundation in deep water in frequency domain, and a software was coded for the computation of seismic response of bridges in deep water. The

seismic responses of a bridge were obtained by the proposed methods and the software. The results show that the hydrodynamic effects may increase or decrease the seismic response by a percentage of $\pm 20\%$.

Key words: bridge; group-pile foundation; seismic response; seismic hydrodynamic effect

随着世界经济的不断发展, 世界各国都在致力于建立更加快速、便捷的陆路交通网络. 为了跨越宽阔的水面, 桥梁在朝着更大跨度发展的同时, 也出现了越来越多的深水桥梁, 即部分桥墩和基础位于深水中的桥梁.

深水桥梁主要包括3类. 第1类是修建在较大水深河流上的桥梁, 如长江上的南京三桥、苏通公路大桥等; 第2类是跨海湾(峡)桥梁, 如东海大桥、杭州湾大桥等. 第3类是位于水库内的桥梁. 受水库蓄水的影响, 这类桥梁的桥墩往往淹没在很深的水中, 如奉节长江公路大桥、庙子坪山岷江大桥; 深水桥梁的设计、施工和运营中都面临很多不同于陆地桥梁的特殊问题, 其中之一是水的存在对桥梁地震安全的影响.

对于深水桥梁, 其地震反应的预测应当考虑水的影响. 国际上, 上世纪70年代对结构的地震动水动力效应进行了一系列研究工作^[1-3]. 在我国, 较早的桥梁水动力研究始于1998年^[4], 之后陆续开展了一系列的研究^[5-11]. 本文在文献[5-8]的研究工作基础上, 建立了深水高桩基础承台的地震动水附加质量和附加阻尼矩阵的表达方式, 然后将其用于跨海峡桥梁地震水动力效应对深水桥梁结构地震反应的影响的研究.

收稿日期: 2010-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(50478112, 90715022); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA11Z120)

第一作者: 王君杰(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震及桥梁船撞. E-mail: jjqxu@tongji.edu.cn

1 承台地震动水力效应的附加质量和附加阻尼矩阵

1.1 截断圆柱体的地震附加质量及附加阻尼矩阵的解析表达形式

深水高桩桥梁基础承台的平面形式多种多样,如矩形、八角形和圆形等.桥梁正常运营期间,其承台全部或部分处于水中.承台一般的厚度在几米至十几米之间,可以看成是一个具有不同断面几何形状的截断柱体.需要解决的问题是浸入水中的截断柱体的地震动水力效应的计算方法问题.

建立具有任意断面形式的浸入水中的截断柱体地震动水力效应的解析计算方法难以实现,因此,为抓住关键因素,建立承台地震动水力效应附件质量和附加阻尼矩阵的简单的解析计算方法,需要对各种复杂的承台几何形状进行理想化,以降低问题研究的难度.本文建议将浸入水中的截断圆柱体作为研究出发点,首先得到其附加质量矩阵和附加阻尼矩阵的解析表达形式.复杂断面截断柱体的地震动水力效应附加质量和附加阻尼矩阵,则可以在截断圆柱体的解析解答的基础上,引入修正系数来得到.根据上述思路,本文首先研究解决图1所示的浸入水中的截断圆柱体的地震动水力效应的附加质量和附加阻尼矩阵的解析计算方法.

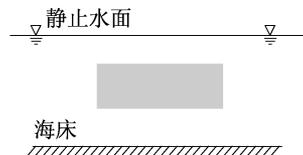


图1 圆形截面截断柱体

Fig.1 Truncated cylinder in water

记地震引起水运动的速度势函数为 $\Phi(i\omega)$ (ω 为水波运动的频率),则根据线性 Bernolli 方程,作用在截断圆柱体上的动水压力分布函数 $p(x, y, z, t)$ 可以表示为 $p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$, 其中 ρ 为水的质量密度.地震动水压力可以通过 $p(x, y, z, t)$ 沿截断圆柱体表面积分得到.沿着水平坐标 x 或 y 方向的地震动水力 F_x 或 F_y 可以按下式计算:

$$F_x \text{ 或 } F_y = - \int_0^{2\pi} \int_{h_1}^{h_1+C} p(a, \theta, z, t) a \cos \theta dz d\theta \quad (1)$$

沿 z 方向的动水力 F_z 是截断圆柱体上表面和下表面的动水力 F_{z_t} 和 F_{z_b} 之和,即

$$\left. \begin{aligned} F_z &= F_{z_t} + F_{z_b} \\ F_{z_t} &= - \int_0^{2\pi} \int_0^a p(r, \theta, h_1 + C, t) r dr d\theta \\ F_{z_b} &= \int_0^{2\pi} \int_0^a p(r, \theta, h_1, t) r dr d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在截断圆柱体上表面、下表面和侧面的动水压力将产生力矩作用(以下表面中心点为参考点)

$$M = M_s + M_t + M_b \quad (3)$$

式中: M 为总力矩; M_s , M_t 和 M_b 分别为柱体侧面动水压力、柱体上表面动水压力和柱体下表面动水压力产生的力矩.在式(3)中

$$\begin{aligned} M_s &= - \int_0^{2\pi} \int_{h_1}^{h_1+C} p(a, \theta, z, t) (z - h_1) a \cos \theta dz d\theta \\ M_t &= \int_0^{2\pi} \int_0^a p(r, \theta, h_1 + C, t) r^2 \cos \theta dr d\theta \\ M_b &= - \int_0^{2\pi} \int_0^a p(r, \theta, h_1, t) r^2 \cos \theta dr d\theta \end{aligned}$$

记截断圆柱体水平、竖向和摇摆运动向量为 $\mathbf{u}_c = \mathbf{u}_{c0} e^{i\omega t}$, $\mathbf{u}_{c0} = \{u_{H0} \quad u_{V0} \quad u_{\theta 0}\}^T$, 则可以得到

$$\left. \begin{aligned} F_H &= \sum_{j=H,V,R} F_{Hj} \\ F_V &= \sum_{j=H,V,R} F_{Vj}, \quad F_{Vj} = F_{tVj} + F_{bVj} \\ M_R &= \sum_{j=H,V,R} M_{Rj}, \quad M_{Rj} = M_{sRj} + M_{tRj} + M_{bRj} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: F_H , F_V 和 M_R 分别为截断圆柱体受到的水平、竖向动水力和摇摆力矩; $j = H, V, R$ 分别表示截断圆柱体的水平、竖向和摇摆运动. F_{Hj} , F_{Vj} 和 M_{Rj} 可以分别表示为

$$\left. \begin{aligned} F_{Hj} &= \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \bar{F}_{Hj} = \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \left(m_{Hj} - \frac{i}{\omega} c_{Hj} \right) \\ F_{Vj} &= \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \bar{F}_{Vj} = \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \left(m_{Vj} - \frac{i}{\omega} c_{Vj} \right) \\ M_{Rj} &= \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \bar{M}_{Rj} = \omega^2 u_{j0} e^{i\omega t} \left(m_{Rj} - \frac{i}{\omega} c_{Rj} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $m_{Hj} = \text{Re } \bar{F}_{Hj}$, $c_{Hj} = -\omega \text{Im } \bar{F}_{Hj}$; $m_{Vj} = \text{Re } \bar{F}_{Vj}$, $c_{Vj} = -\omega \text{Im } \bar{F}_{Vj}$; $m_{Rj} = \text{Re } \bar{M}_{Rj}$, $c_{Rj} = -\omega \text{Im } \bar{M}_{Rj}$, 各符号分别为水平、竖向和摇摆运动的等效质量和等效阻尼.

对于一个在3维空间中运动的截断圆柱体,记其底面的运动为 $\mathbf{u}_c = \mathbf{u}_{c0} e^{i\omega t}$, $\mathbf{u}_{c0} = \{u_{x0} \quad u_{y0} \quad u_{z0} \quad \theta_{x0} \quad \theta_{y0} \quad \theta_{z0}\}^T$, 则动水力向量, $\mathbf{f}_{Rc} = \{F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z\}^T$, 可以表示为

$$f_{Rc} = \omega^2 e^{i\omega t} \left(\mathbf{M}_{ac} - \frac{i}{\omega} \mathbf{C}_{ac} \right) \mathbf{u}_{c0} \quad (6)$$

式中： \mathbf{M}_{ac} 和 \mathbf{C}_{ac} 分别是动水压力的等效质量和等效阻尼矩阵。

由于论文篇幅所限，速度势函数 Φ 的解析计算方法参见文献[5-7]。

1.2 截断矩形柱体的地震附加质量及附加阻尼矩阵

实际工程中普遍采用矩形截面桥墩和承台。从工程设计的需求出发，可以考虑通过修正截断圆柱体的解析解答近似估算矩形断面柱体的地震动水力效应。

对于水平运动情况，文献[12]通过试验研究，得到了几种比值情况下矩形断面柱体附加动水质量与圆形断面柱体动水压力附加质量之间的比值，见图2。利用文献[12]给出的数据，采用最小二乘法进行拟合，得到以矩形截面长宽比系数 D/B 为参数的修正系数的近似计算公式

$$K_c = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516} \right)^{0.54638}}, \quad 0.1 \leq D/B \leq 10 \quad (7)$$

拟合结果也示于图2。式(7)的适用范围为 $0.1 \leq D/B \leq 10$ ，矩形截面桥墩和桩基础承台一般满足此条件。

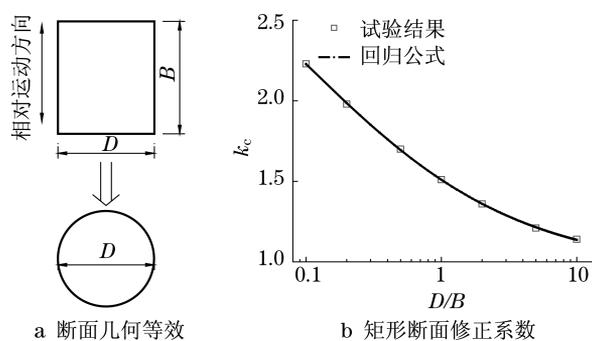


图2 修正系数 K_c 曲线

Fig.2 Correction factor K_c curve

矩形桥墩和矩形承台单位高度上水平向地震动水力效应的附加质量和阻尼可由截断圆柱体的水平地震动水力效应的附加质量和阻尼乘上修正系数 K_c 得到。

由于缺少相关试验和理论研究成果，尚难对与矩形承台顶面和底面地震动水压力效应的竖向和转动水附加质量和附加阻尼进行较精确的等效计算。本文建议参照《海港水文规范》(JTJ 213—98)中

矩形截面墩柱波浪力的等效计算方法，按照截面面积相等原则将矩形截面承台等效为圆截面承台，等效圆截面半径为 $a = \sqrt{DB/\pi}$ 。将该等效圆截面承台顶面和底面地震动水压力对应的动水压力附加质量和附加阻尼，近似作为矩形截面承台相应的动水压力附加质量值和附加阻尼值。

在地震作用下，桥梁群桩承台绕水平轴的转动一般非常小，采用上述等效方法可近似分析深水桥梁中矩形截面承台的辐射波浪问题。

2 地震作用下深水桥梁在水中的运动方程

当静水中小直径圆柱体在沿 x 轴方向的地震作用下运动时，对于单个桩采用Morison方程表达水对桩的动力效应。桥梁基础的混凝土桩的直径一般都大于1.5 m，根据文献[8]的研究，忽略Morison方程中阻尼项对桥梁结构地震反应的影响不超过1.5%。群桩的地震动水力效应可以通过群桩系数 K_g 加以考虑。这样，作用在单位桩长上的动水力可以写为

$$P(z, t) = -C_a \rho A \ddot{u}_x(z, t) K_g \quad (8)$$

式中： C_a 称为动水附加质量系数； \ddot{u}_x 为结构在 x 轴方向的绝对加速度； $C_a \rho A$ 即为柱体单位长度的地震动水力效应的附加质量。

根据式(8)可以得到群桩的动水力列向量

$$\mathbf{f}_{pg} = -\mathbf{M}_{apg} \ddot{\mathbf{u}}_{pg} \quad (9)$$

式中： $\ddot{\mathbf{u}}_{pg}$ 为群桩结构的绝对水平加速度向量； \mathbf{M}_{apg} 为群桩结构的动水附加质量矩阵，为对角阵。对于圆截面桩，对应于结点 i 的动水附加质量为

$$m_{a_{ii}} = K_g C_a \frac{\pi}{4} \rho D_i^2 l_i \quad (10)$$

式中： D_i 为结点 i 所在桩的桩直径； l_i 为集中至结点 i 的动水力分布长度。

设地震动加速度时程为 $\ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \{\ddot{u}_{gx}, \ddot{u}_{gy}, \ddot{u}_{gz}\}^T$ ，其中 \ddot{u}_{gx} 、 \ddot{u}_{gy} 和 \ddot{u}_{gz} 分别为沿 x 、 y 和 z 轴方向的地震动加速度时程。通过Fourier变换求得它在频域中的谐波函数

$$\ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

这样，频域内桥梁结构在空气中的运动方程为

$$[-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}] \mathbf{u}_s(\omega) = -\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) \quad (12)$$

式中: \mathbf{K} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{M} 分别为桥梁结构的刚度、阻尼和质量矩阵; $\mathbf{u}_s(\omega)$ 为结构相对位移反应。

频域内桥梁结构在水中的运动方程为

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{u}_s(\omega) = -\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) + \mathbf{f}_{Rp} + \mathbf{f}_{Rc} + \mathbf{f}_{Pg} \quad (13)$$

式中: \mathbf{f}_{Rp} 、 \mathbf{f}_{Rc} 和 \mathbf{f}_{Pg} 分别为桥墩、承台和群桩结点的动水动力向量。

分别将桥墩、承台和群桩各部分的结点动水力表达式代入式(13),有

$$[-\omega^2 (\mathbf{M} + \mathbf{M}_p^{(2)} + \mathbf{M}_{ac} + \mathbf{M}_{apg}) + i\omega (\mathbf{C} + \mathbf{C}_p^{(2)} + \mathbf{C}_{ac}) + \mathbf{K}] \mathbf{u}_s(\omega) = -[\mathbf{M} + \mathbf{M}_p^{(1)} + \mathbf{M}_{ac} + \mathbf{M}_{apg}] \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) - i\omega [\mathbf{C}_p^{(1)} + \mathbf{C}_{ac}] \mathbf{u}_g(\omega) + \omega^2 [\mathbf{M}_p^{(1)} - \mathbf{M}_p^{(2)}] \mathbf{u}_{sp}^{(1)}(\omega) - i\omega [\mathbf{C}_p^{(1)} - \mathbf{C}_p^{(2)}] \mathbf{u}_{sp}^{(1)}(\omega) \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}_p^{(1)}$ 和 $\mathbf{C}_p^{(1)}$ 分别为各桥墩上由于桥墩刚体运动产生的动水附加质量矩阵和附加阻尼矩阵; $\mathbf{M}_p^{(2)}$ 和 $\mathbf{C}_p^{(2)}$ 分别为各桥墩上由于桥墩弹性振动产生的动水附加质量矩阵和附加阻尼矩阵; \mathbf{M}_{ac} 和 \mathbf{C}_{ac} 分别为各承台上的动水附加质量矩阵和附加阻尼矩阵;

\mathbf{M}_{apg} 为群桩上的动水附加质量矩阵; $\mathbf{u}_{sp}^{(1)}(\omega)$ 为各桥墩水下部分的水平相对刚体运动的频域表示; $\mathbf{u}_{sp}(\omega)$ 和 $\mathbf{u}_{spg}(\omega)$ 分别为各桥墩水下部分和群桩的水平相对位移反应的频域表示; $\mathbf{u}_{sc}(\omega)$ 为各承台的相对位移的频域表示。

得到 $\mathbf{u}_s(\omega)$ 后,可利用 Fourier 逆变换求得时域解答 $\mathbf{u}_s(t)$ 。利用本文建立的理论方法,编制了杆系有限元计算机程序,可以完成上述计算过程。

3 算例分析

3.1 计算参数

作为算例的跨海峡大桥主桥为刚构桥,桥跨布置为 $95 + 3 \times 180 + 95$ m,见图3。从图中左2至左5编号为1#,2#,3#,4#墩。桥墩为实心双薄壁墩,壁厚2 m,墩壁净距8 m,主墩基础为24根直径2.5 m钻孔桩,桩净距4.5 m,基础处最大水深33 m,承台顶面距设计高水位3.2 m,详见图3。

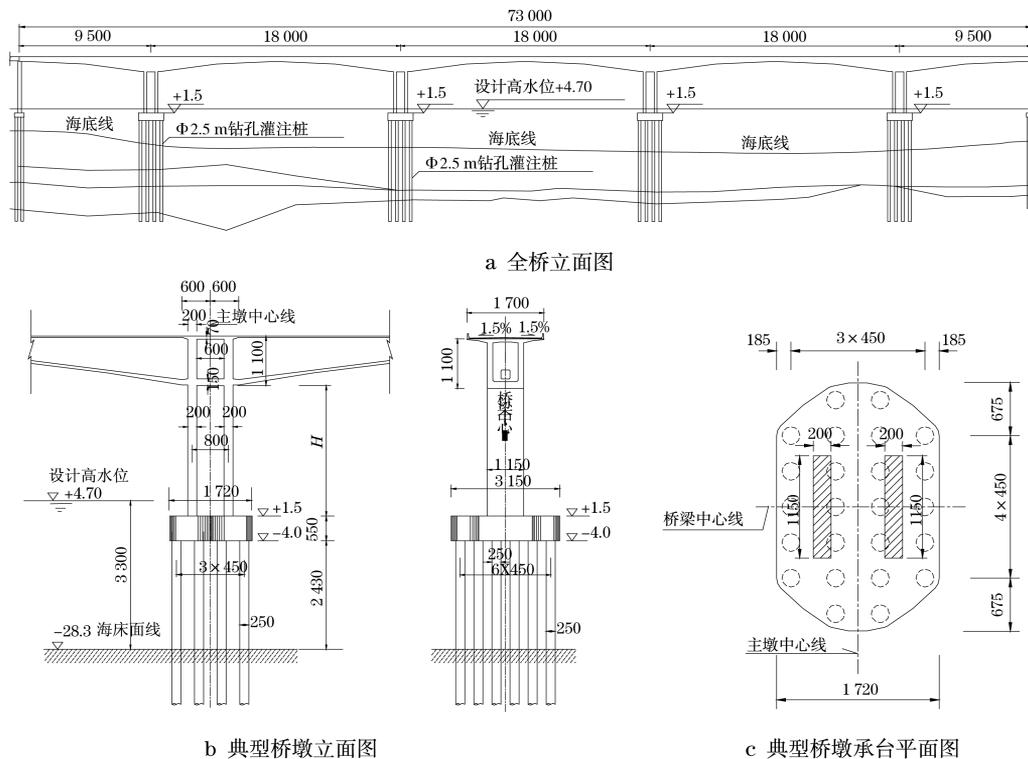


图3 某海峡大桥总体布置图(单位:结构尺寸为 mm,标高为 m)

Fig.3 Overall layout of a Strait Bridge (structure geometry: mm; elevation: m)

计算中,对于桩,在 Morison 方程中 $C_a = 1.0$,海水质量密度取 $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于相邻桩的间距与桩径之比值 = 1.8,小于4倍桩径,尚须考虑群效应。根据我国《海港水文规范》(JTJ 213—98),对

于本文情况,群桩系数 $K_g = 1.275$ 。

3.2 自由振动特性的计算

算例跨海大桥自由振动特性的计算结果见表1。表中, f_a 是无水状态下的自由振动频率, f_w 为有水

状态下的自由振动频率.从表1可以看出,在结构前10阶振型中,水对结构动力特性有一定影响,与 f_a 相比各阶 f_w 均有所降低.从运动方程式看,这是由于结构上的动水力附加质量降低了结构自振频率.在前10阶振型中结构自振频率的降低幅度最大约达10%.由于水的作用,一些振型的出现次序发生了改变,与无水时相比,有水时第6和10阶振型分别被提前到了第5和9阶振型.

表1 刚构桥动力特性

Tab.1 Dynamic characteristics of frame bridges

模态 顺序	空气中		水中		$(f_w/f_a)/\%$
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	
1	0.462	纵向振动	0.444	纵向振动	96.10
2	0.514	对称横 桥向振动	0.492	对称横桥 向振动	95.72
3	0.560	反对称横 桥向振动	0.536	反对称横 桥向振动	95.71
4	0.684	对称横桥 向振动	0.657	对称横桥 向振动	96.05
5	0.843	主梁对称 竖向振动	0.803	反对称横 桥向振动	95.26
6	0.863	反对称横 桥向振动	0.821	主梁对称 竖向振动	95.13
7	0.966	主梁反对称 竖向振动	0.932	主梁反对称 竖向振动	96.48
8	1.048	主梁对称竖 向、纵向振动	0.987	主梁对称竖 向、纵向振动	94.18
9	1.221	对称横桥 向振动	1.162	主梁对称 竖向振动	95.17
10	1.313	主梁对称 竖向振动	1.170	对称横桥 向振动	89.11

3.3 地震反应的计算

地震反应计算采用了1941年美国帝国谷记录到的El-Centro地震波的NS分量,属于中硬场地强震记录,见图4.计算中地震波峰值均调整为 $0.2g$.

为考察水对结构地震反应的影响,定义了一个动水影响系数 R

$$R = \frac{P_{rsw} - P_{rsa}}{P_{rsa}} \quad (15)$$

式中: P_{rsw} 为有水情况下的地震反应最大值; P_{rsa} 是无

水情况下的地震反应最大值.本文后面分别以 R_D , R_N , R_Q 和 R_M 表示结构位移、轴力、剪力和弯矩影响系数.

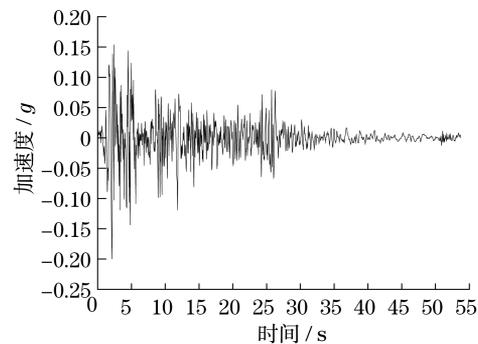


图4 El-Centro地震波

Fig.4 Earthquake waves used for calculation

表2列出了主梁典型截面内力影响系数.纵向地震作用下,3#墩顶处主梁截面轴力最大值的增幅为21.66%,该截面弯矩最大值的增幅为22.66%.横向地震作用下,3#墩顶处主梁截面剪力最大值的增幅为3.58%,该截面弯矩最大值的增幅为-13.47%.

表3列出了3#墩下部结构典型截面内力影响系数.纵向地震作用下,3#墩墩底截面剪力最大值增幅为19.78%,该截面弯矩最大值增幅为21.06%.在3#墩底最不利桩桩底截面上,剪力最大值增大了24.03%,该截面弯矩最大值增大了21.72%.横向地震作用下,3#墩墩顶截面剪力最大值减小了3.23%,该截面弯矩最大值增幅为0.89%.3#墩墩底截面剪力最大值增幅为4.71%,该截面弯矩最大值减小了7.82%.在3#墩底最不利桩桩底截面上,剪力最大值增幅为21.63%,该截面弯矩最大值增幅为20.76%.3#墩墩底最不利桩轴力最大值增幅较小,为2.68%.

可以看到,相同地震波分别沿纵桥向和横桥向输入时,水对3#墩和墩底最不利桩控制截面内力响应的程度和影响效果上有较大差别.

表2 主梁控制截面内力影响系数

Tab.2 Internal force coefficients of key cross-sections

位置	输入方向	$R_N/\%$	$R_Q/\%$	$R_M/\%$
2#—3#墩间跨中	纵桥向	12.04	-0.16	—
	横桥向	-15.76	14.07	17.94
3#墩顶主梁	纵桥向	16.74/21.66	-14.08/6.55	6.24/22.66
	横桥向	-2.38/3.58	-13.47/-12.76	16.28
3#—4#墩间跨中	纵桥向	34.33/30.00	-0.77/-0.61	—
	横桥向	-6.45/-7.83	-5.13	8.82

注:“/”两侧分别为主梁左、右截面内力最大值增幅.

表3 下部结构控制截面内力影响系数

Tab.3 Internal force coefficients of key cross-sections of piers and piles

位置	输入方向	$R_N/\%$	$R_Q/\%$	$R_M/\%$
3#墩墩顶	纵桥向	—	22.55	22.57
	横桥向	—	-3.23	0.89
3#墩墩底	纵桥向	—	19.78	21.06
	横桥向	—	4.71	-7.82
3#墩墩底最不利桩桩顶	纵桥向	11.63	12.11	16.77
	横桥向	2.78	11.99	16.96
3#墩墩底最不利桩桩底	纵桥向	11.58	24.03	21.72
	横桥向	2.58	21.63	20.76

通过算例计算结果得到总的结论是:①无论对于纵桥向地震激励还是对于横桥向地震激励,与空气中的情形相比,桥梁在水中的地震反应发生了较大的改变;②水的存在可能使桥梁结构的地震反应增大,也可能使桥梁的地震反应减小,取决于地震激励特点和所计算的反应量;③与纵桥向激励情形相比,横桥向激励下桥梁的地震反应受水的影响更为复杂.

4 结论

(1)推导出了进入水中截断圆柱体的地震水动力附加质量和附加阻尼的矩阵表达解析形式.

(2)对于非截断圆柱体,建议了修正方法,可以通过对截断圆柱体的地震水动力附加质量和附加阻尼的矩阵的修正,得到非截断圆柱体的地震水动力附加质量和附加阻尼的矩阵的近似估计.

(3)推导出了深水高桩基础桥梁,考虑地震水动力效应的振动方程,并根据本文的理论研究结果编制了计算机程序.

(4)应用本文的研究结果和编制的计算机程序,计算了一座跨海峡刚构桥的地震反应.结果显示,水动力效应对所计算大桥的地震反应有很大影响,可能使地震反应增大,也可能使之减小,典型的内力反应变化范围可以达到20%以上.

参考文献:

[1] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 3(1):33.

- [2] Byrd R C. A laboratory study of the fluid-structure interaction of submerged tanks and caissons in earthquakes [R]. Berkeley: University of California, 1978.
- [3] Zhang S. The dynamic response of bridge pier under seismic action[J]. J of Bridge Construction, 1998(2):52.
- [4] 郑史雄. 深水桥墩考虑液固相互作用的地震反应分析[J]. 桥梁建设, 1998(1):52.
ZHENG Shixiong. The effects of the fluid structure interaction seismic response of bridge piers[J]. Bridge Construction, 1998(1):52.
- [5] 赖伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2004.
LAI Wei. Study on dynamic response of deep-water bridges under earthquake and wave [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2004.
- [6] 赖伟, 王君杰, 胡世德. 桩基础承台水平附加质量分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10):1339.
LAI Wei, WANG Junjie, HU Shide. Analysis of horizontal added mass on pile cap[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(10):1339.
- [7] 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: 自然科学版, 2004, 32(1):1.
LAI Wei, WANG Junjie, HU Shide. Earthquake induced hydrodynamic pressure on bridge pier[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(1):1.
- [8] 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.
YUAN Yingchun, LAI Wei, WANG Junjie, et al. The effects of hydrodynamic damping on seismic response of bridge piles[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(4):88.
- [9] 赖伟, 王君杰, 韦晓, 等. 桥墩地震水效应的水下振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(15):164.
LAI Wei, WANG Junjie, WEI Xiao, et al. The shaking table test for submerged bridge pier [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(15):164.
- [10] 张海龙, 张鹏, 黄鹏. 深水桥梁结构的地震反应分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(9):83.
ZHANG Hailong, ZHANG Peng, HUANG Peng. Earthquake response of deep water bridge structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(9):83.
- [11] 朱唏, 高学奎. 桥梁抗震分析中动水压力的计算[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3):45.
ZHU Xi, GAO Xuekui. Calculation of hydrodynamic pressure in the seismic design of bridge[J]. China Railway Science, 2007, 28(3):45.
- [12] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
ZHU Yanrong. Wave mechanics for ocean engineering [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.