

# 动水压力对深水桥梁性能设计的影响

张国明 宋波

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

**摘要** 通过一个深水桥墩实例对中国与日本桥梁抗震规范的地震动水压力计算方法进行比较研究, 分析规范关于动水压力计算的异同点, 计算表明两者结果相差较大. 对桥墩的动水压力进行数值模拟计算, 考察动水压力沿深水桥梁高程的分布. 为研究动水压力对桥梁整体结构动力特性的影响, 以主跨 260 m 的牛根大桥为背景建立有限元计算模型, 采用附加质量法进行计算. 结果表明, 附加质量法求得的位移和弯矩比不考虑动水作用的情况有较大增幅, 也表明动水压力对桥梁的性能有较大的影响. 在深水桥梁的性能设计理论与应用领域中, 水与桥墩的相互作用问题有必要进行进一步的研究.

**关键词** 深水桥梁; 附加质量法; 动水压力; 性能设计

**分类号** U 442.5<sup>+</sup>9

## Effect of hydrodynamic pressure on performance-based design of a deepwater bridge

ZHANG Guo-ming, SONG Bo

School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** A comparative study was performed on the calculation methods of earthquake hydrodynamic pressure between Chinese and Japanese seismic codes of bridges through a calculation example of a deepwater pier, and the similarities and differences of both the methods were analyzed. A huge difference was obtained from both the results. The earthquake hydrodynamic pressure of a pier in deep water was calculated by numerical simulation and the distribution of pressure along the pier height was investigated. A finite element model of the 260-meter-span Ushine Bridge was built and an added mass method was applied to the model to study the influence of earthquake hydrodynamic pressure on the performance of the whole bridge. The results showed that the displacement and moment obtained by the added mass method was rather more than those without consideration of water. In the performance-based design theory of deepwater bridges and its application field, more studies were needed on the problem of the interaction between piers and water.

**KEY WORDS** deepwater bridge; added mass; hydrodynamic pressure; performance-based design

步入 21 世纪以来, 中国桥梁建设事业持续发展, 建造了许多大跨径桥梁, 其中也不乏大水深桥梁. 这些深水桥梁主要包括三类: 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<sup>[1]</sup> (最大水深 43 m)、苏通大桥<sup>[2]</sup>等; 第 2 类是位于水库库区内的桥梁, 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<sup>[3]</sup> (当三峡成库蓄水时, 2 号和 3 号主墩淹没水深达 95.784 m 和 83.591 m)等; 第 3 类是跨海桥梁, 作为跨海工程的关键, 跨海桥梁一般都面临较深的水,

例如中国正在规划和建设的沿海高速公路干线涉及五个大型跨海工程项目, 从北向南依次跨越渤海海峡、长江口、杭州湾、珠江口伶仃洋和琼州海峡. 在这些水域中有的水深在 80 m 左右, 最深达 120 m.

另外, 中国是一个地震多发的国家, 在地震作用下, 深水的动力作用对桥墩动力特性的影响极为重要, 其主要表现在桥墩周围的水在桥墩振动时, 作为桥墩质量的一部分随桥墩一起振动, 这些水的质量将转化为桥墩的等效质量. 由于墩体内的水增加了墩体的质量, 从而增大墩体在地震过程中的荷载, 给

收稿日期: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (No. 90715007)

作者简介: 张国明 (1982-), 男, 硕士研究生; 宋波 (1962-), 男, 教授, 博士, E-mail: songbo@ces.ustb.edu.cn

桥墩设计带来一定的困难,因此对水尤其是深水的动力作用需要加以考虑. 中国的《JTJ004-89 公路工程抗震设计规范》<sup>[4]</sup>中也规定“位于常水位水深超过 5 m 的实体桥墩、空心桥墩的抗震设计,应计入地震动水压力”. 在日本明石海峡大桥下部结构设计过程中,关于地震影响的考虑,除了结构自身的惯性力,对于海中的 2 号和 3 号桥墩(高 70 m)还考虑了地震动水压力进行设计<sup>[5]</sup>.

地震动水压力问题,实质上是结构与水的相互作用问题,因而是十分复杂的. 随着地震工程学科的不断深入以及工程实践的需要,各国学者曾先后研究过许多因素对动水压力的影响,并取得了一定的成果. 文献[3]利用有限元方法对奉节长江公路大桥主墩的地震动水压力进行计算分析,结果表明地震动水压力对深水桥墩有明显的影响,且塔顶位移有增大趋势. 文献[6]通过对位于库水中的大跨度连续刚构桥在地震荷载作用下的动力响应的分析结果也表明动水作用对桥梁抗震是不利的. 文献[7]对近场地震深水桥墩的地震反应行了模拟,并在 Morison 方程的基础上,用附加质量考虑水的影响,采用有限元方法来分析地震动水压力对深水桥墩的影响.

动水压力的研究与桥梁性能设计有着密切的联系. 目前,基于性能的抗震设计被广泛讨论和研究,并且被认为是未来抗震设计的主要发展方向,其目的是在不同强度的水平地震作用下,能够有效地控制结构的破坏状态,使结构实现不同的性能水平. 在抗震设计时,为了做到既经济又安全,不仅要防止结构发生倒塌破坏,而且要有效地控制结构的破坏状态. 使结构在整个生命周期内,在遭受可能发生的地震作用下,总体建造成本最小,既经济又实用. 因此,基于性能设计的考虑,研究地震作用下动水压力与桥墩的相互作用对于进一步提高桥墩的抗震性能和控制建设成本以及提高国民经济效益有着重要的意义.

## 1 水-桥墩相互作用以及附加质量的研究

基于流体结构互动的基本原理,采用有限元分析中常用的方程式引入附加质量的概念. 设由于流体的非正常运动在振动结构上产生的作用力具有如下形式:

$$F(t) = -M_a \ddot{x} - C_a \dot{x} - K_a x \quad (1)$$

结构的振动方程为:

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = F(t) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得:

$$(M_s + M_a) \ddot{x} + (C_s + C_a) \dot{x} + (K_s + K_a) x = 0 \quad (3)$$

式中,  $M_s$ 、 $C_s$  和  $K_s$  分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵,  $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$  和  $x$  为加速度、速度以及位移向量,  $M_a$ 、 $C_a$  和  $K_a$  分别为流体作用对结构产生的附加质量矩阵及附加刚度矩阵. 一方面,附加质量矩阵、附加阻尼矩阵及附加刚度矩阵均为流动状态的函数,它们随流体运动状态的变化而变化,因此结构的振动是流体运动状态的函数;另一方面,结构的振动(或运动)以物面边界的形式对流体的流动产生影响,改变流体的运动状态. 这种流体与结构之间构成一个封闭的动力学系统,把其相互作用、相互影响的过程称为流体结构相互作用<sup>[8]</sup>,或称为流体结构的耦合振动,也称为 FSI (fluid structure interaction). 由式(3)可以得知,附加质量即为使周围流体达到一定加速度所需要的附加力与该加速度的比值.

对于水中桥墩来说,水体对桥墩侧面某点处产生的动水压力,等效于在这点附加一定质量的水与桥墩一起运动而产生的惯性力,而不再考虑除此之外的其他部分水体在这点处对桥墩动水压力的贡献. 这是一种解耦的算法,为分析此类工程问题提供了方便.

在地震作用下,由于桥墩受到地震加速度  $\ddot{U}_g$  的激励,桥墩的振动方程将变为:

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = -M_s \ddot{U}_g \quad (4)$$

在考虑附加质量时,其振动方程将变为:

$$(M_s + M_a) \ddot{x} + (C_s + C_a) \dot{x} + (K_s + K_a) x = - (M_s + M_a) \ddot{U}_g \quad (5)$$

关于附加质量的计算方法可参考文献[9]提出的附加质量公式:

$$\frac{b}{h} \leq 2.0 \text{ 时, } m = \frac{\omega_0 A_0 b}{b} \frac{1}{a} \left( 1 - \frac{b}{4h} \right) \sqrt[3]{\frac{y}{h}} \quad (6a)$$

$$2.0 < \frac{b}{h} \leq 4.0 \text{ 时, } m = \frac{\omega_0 A_0 b}{g} \frac{1}{a} \left( 0.7 - \frac{b}{10h} \right) \sqrt[3]{\frac{y}{h}} \quad (6b)$$

$$\frac{b}{h} > 4.0 \text{ 时, } m = \frac{3}{10} \frac{\omega_0 A_0 b}{g} \frac{1}{a} \sqrt[3]{\frac{y}{h}} \quad (6c)$$

式中,  $m$  为水面以下桥墩单位长度的附加质量, kg;  $b$  为地震时与动水压力作用方向垂直的边长, m;  $h$  为水深, m;  $\omega_0$  为单位体积的水的重量,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A_0$  为桥墩断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $a$  为地震时动水压力作用方向的桥墩边长, m;  $y$  为水面以下桥墩某点至水面的距离, m.

深水桥墩地震反应时,附加质量与结构自身质

量的比值是决定动水压力大小的主要因素. 在此, 参照日本学者小坪高西关于动水压力的研究方法<sup>[10]</sup>, 采用附加质量比重系数  $r$  来表征地震时动水压力对桥墩作用的影响程度. 此系数取值越大, 则表明动水压力越大, 对桥梁的影响越大.

$$r = \frac{M_a}{M_s + M_a} \quad (7)$$

例如, 日本在 1995 年阪神地震之后进行了明石海峡大桥 2 号桥墩为原型的模拟试验, 以测定深水桥墩在地震作用下的动水压力<sup>[10]</sup>. 根据试验测定的桥墩在水中和空气中的自振周期从而得出桥墩的附加质量  $M_a = 155.3 \text{ kg}$ , 通过计算得到试验模型的质量  $M_s = 198.7 \text{ kg}$ . 按照式(7)计算, 附加质量比重系数达到 44%. 同桥墩本身质量相比, 附加质量是不容忽视的, 也就是说, 动水压力对于桥墩地震反应的影响是很大的, 这一点在桥梁的抗震设计中必须加以考虑.

## 2 中日桥梁抗震设计规范中关于动水压力公式的比较研究

### 2.1 中国桥梁抗震设计规范

《公路工程抗震设计规范》(以下简称中国规范) 4.2.11 条规定, 地震时作用于桥墩上的地震动水压力应分别按下列各式进行计算:

$$\frac{b}{h} \leq 2.0 \text{ 时, } E_w = 0.15 \left[ 1 - \frac{b}{4h} \right] C_i K_h \xi_h \gamma_w b^2 h \quad (8a)$$

$$2.0 < \frac{b}{h} \leq 3.1 \text{ 时, } E_w = 0.075 C_i K_h \xi_h \gamma_w b^2 h \quad (8b)$$

$$\frac{b}{h} > 3.1 \text{ 时, } E_w = 0.24 C_i K_h \xi_h \gamma_w b^2 h \quad (8c)$$

式中,  $E_w$  为地震时在  $h/2$  处作用于桥墩的总动水压力,  $\text{kN}$ ;  $C_i$  为重要性修正系数;  $K_h$  为水平地震系数;  $\xi_h$  为断面形状系数, 对于矩形墩和方形墩取  $\xi_h = 1$ , 对于圆形墩则顺桥向取  $\xi_h = 0.9 \sim 1.0$ , 横桥向取  $\xi_h = 0.8$ ;  $\gamma_w$  为水的容重,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $b$  为与地震荷载方向相垂直的桥墩宽度, 可取  $b/2$  处的截面宽度,  $\text{m}$ , 对于矩形墩, 横桥向时  $b$  取长边边长, 对于圆形墩则两个方向  $b$  均取墩的直径;  $h$  为从一般冲刷线算起的水深,  $\text{m}$ .

上式适用于跨径不超过 150 m 的钢筋混凝土和预应力混凝土梁桥、圬工或钢筋混凝土拱桥的桥墩的动水压力计算. 2008 年施行的《公路桥梁抗震设

计细则》<sup>[11]</sup>对斜拉桥、悬索桥、单跨跨径超过 150 m 的特大跨径梁桥和拱桥, 给出了抗震设计原则和有关规定, 但对于此范围跨径桥梁的动水压力并未给出相应的规定.

另外, 中国的《GB50111-2006 铁路工程抗震设计规范》<sup>[12]</sup>关于动水压力的计算采用附加质量法, 规范亦有相应的计算公式, 但其适用范围为圆形或者圆端形桥墩.

### 2.2 日本桥梁抗震设计规范

日本桥梁抗震设计规范——《道路桥示方书同解说(V 耐震设计篇)》<sup>[9]</sup>(以下简称日本规范)采用附加重量法来考虑动水压力的影响, 适用于跨径不超过 300 m 的桥梁.

$$\frac{b}{h} \leq 2.0 \text{ 时, } P = \frac{3}{4} K_h \omega_0 A_0 \frac{bh}{a} \left[ 1 - \frac{b}{4h} \right] \quad (9a)$$

$$2.0 < \frac{b}{h} \leq 4.0 \text{ 时, } P = \frac{3}{4} K_h \omega_0 A_0 \frac{bh}{a} \left[ 0.7 - \frac{b}{10h} \right] \quad (9b)$$

$$\frac{b}{h} > 4.0 \text{ 时, } P = \frac{9}{40} K_h \omega_0 A_0 \frac{bh}{a} \quad (9c)$$

式中,  $P$  为地震时桥墩的动水压力,  $\text{kN}$ ;  $b$  为地震时与动水压力作用方向垂直的边长,  $\text{m}$ ;  $h$  为水深,  $\text{m}$ ;  $K_h$  为水平地震系数;  $\omega_0$  为单位体积水的重量,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A_0$  为桥墩断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $a$  为地震时动水压力作用方向的桥墩边长,  $\text{m}$ .

在中国规范给出的动水压力计算式中, 用水平地震系数  $K_h$ 、重要性系数  $C_i$  和断面形状系数  $\xi_h$  对动水压力的大小进行了调整和修正.  $K_h$  与地震的基本烈度相关, 烈度分别为 7 度、8 度和 9 度时分别取 0.1、0.2 和 0.4.  $C_i$  对于高速公路和一级公路上的抗震工程取 1.7, 对高速公路和一级公路的一般工程、二级公路上的抗震重点工程、二三级公路上桥梁的梁端支座取 1.3, 其余情况也在规范中有所规定. 中国规范中也同时运用了断面形状系数  $\xi_h$  根据桥墩断面的形状进行了相应的折减, 其取值因桥墩截面形状的不同而有所不同, 对于矩形桥墩其取值为 1.0.

日本的规范公式与中国的规范一样, 都采用了水平地震系数  $K_h$ , 但与中国规范中的取值方法又有所不同, 其取值与结构的固有周期有关, 具体取法见表 1. 与中国规范不同的是, 日本的规范中没有考虑构筑物的重要性影响. 同时, 对于矩形截面桥墩和圆形或者其他形状桥墩来说, 日本规范中的公式都可以适用, 不因为形状的不同而折减不同.

表 1 日本规范中水平地震系数标准值  $K_h$

Table 1 Horizontal earthquake coefficient  $K_h$  in Japanese seismic design codes of bridges

地基类别	固有周期与 $K_h$ 的取值
I 类	$T < 0.1$ , $K_h = 0.431 T^{1/3}$ , 但 $K_h \geq 0.16$ ; $0.1 \leq T \leq 1.1$ , $K_h = 0.2$ ; $T > 1.1$ , $K_h = 0.213 T^{-2/3}$
II 类	$T < 0.2$ , $K_h = 0.427 T^{1/3}$ , 但 $K_h \geq 0.20$ ; $0.2 \leq T \leq 1.3$ , $K_h = 0.25$ ; $T > 1.3$ , $K_h = 0.298 T^{-2/3}$
III 类	$T < 0.34$ , $K_h = 0.430 T^{1/3}$ , 但 $K_h \geq 0.24$ ; $0.34 \leq T \leq 1.5$ , $K_h = 0.3$ ; $T > 1.5$ , $K_h = 0.393 T^{-2/3}$

### 2.3 计算模型

为了探求中日两国规范在计算动水压力时的差异, 本文选取了一个典型算例(图 1), 试算模型参数如下:  $b=10\text{m}$ ,  $h=20\text{m}$ ,  $C_i=1.3$ ,  $K_h=0.2$ ,  $\xi_h=1$ ,  $\gamma_w=9.8 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ . 同时, 根据地震烈度取水平地震系数为 0.2.

该模型的动水压力计算结果如图 2(a) 所示. 将模型的宽度  $b$  调整为 20, 30 和 40m 之后, 得到的计算结果如图 2(b)、(c) 和 (d) 所示.

由上述结果可见, 对于同一模型, 依据不同规范所求解出的动水压力相差很大, 日本规范计算出的动水压力大小为中国规范计算式的 3~4 倍甚至更多. 究其原因, 系两规范采用的系数不同所致. 例如, 比较式(8a)和式(9a)可发现, 两式的根本区别在于系数(即 0.15 与 3/4)的取值, 在  $K_h$  取 0.2,  $C_i$  取

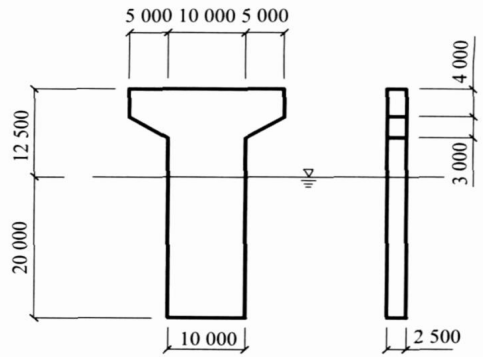


图 1 算例模型参数(单位: mm)

Fig. 1 Parameters of a calculation example model(unit: mm)

1.0 时, 后面的各项是完全一致的( $A_0 = ab$ ). 这种现象出现的原因可能是动水压力公式推导中所作的假定不同, 因此导致结果相差比较大; 但究竟哪一个更符合实际情况则需要进一步的研究来验证.

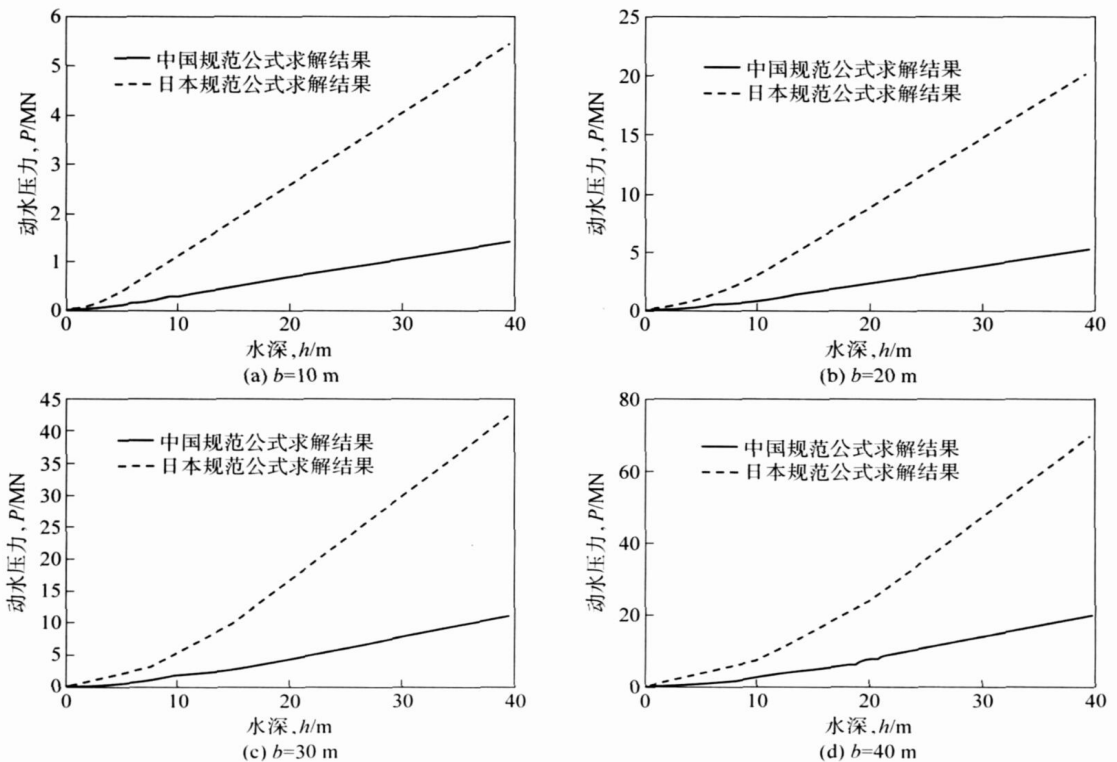


图 2 中日规范关于动水压力计算结果的比较

Fig. 2 Results of earthquake hydrodynamic pressure between Chinese and Japanese seismic design codes

### 3 桥墩动水压力的数值模拟

某桥墩高 35 m, 截面边长为 10 m × 2.5 m, 水深 20 m. 考虑到水体的无限性, 在计算模型的建立过程中, 取边长为桥墩短边尺寸 20 倍的 50 m 水体为边界; 在地震波的垂直方向上也取同样的 50 m 为水体边界, 并且全部水体边界上的水压力计为零. 采用 ANSYS 计算单元中的混凝土单元 Solid65, 水体结构采用 Fluid30 这一特殊流体单元以考虑水与桥

墩结构相互作用的影响. Fluid30 单元是用来模拟流体介质, 流体和固体之间的耦合问题的三维流体单元. 该单元有八个节点, 每个节点上有四个自由度, 分别是 X、Y 和 Z 三个方向的位移自由度和压力自由度, 并且位移自由度只作用在流固耦合交接面的节点上. 关于流体和固体的耦合采用 ANSYS 内嵌的命令(流固耦合标签)进行相应的设置. 桥墩的三维有限元分析模型如图 3 所示.

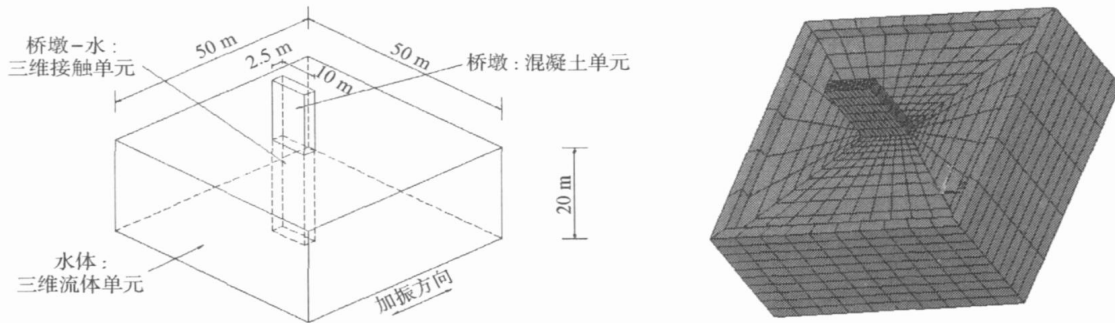


图 3 桥墩三维有限元分析模型

Fig.3 3D finite element analysis model of a pier

由于采用的地震波形式对计算结果有较大影响, 根据场地特性和地震设防烈度, 本文采用经过调整后的 El-Centro 波, 地震加速度时程曲线如图 4 所示, 地震波的输入方向为顺桥向, 求得的桥墩位移、内力的时程曲线如图 5 所示.

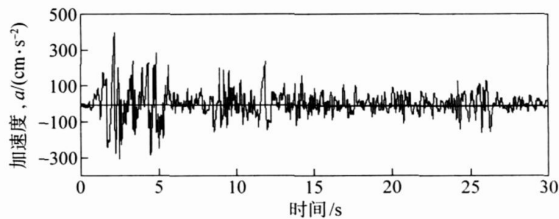


图 4 El-Centro 波加速度时程

Fig.4 Acceleration-time history curve of El-Centro wave

水与桥墩相互作用结果如图 6 所示. 可以看出, 动水压力的影响主要集中在桥墩的中下部, 而在桥墩中上部动水压力的影响变化很快, 而且呈减小的趋势. 通过对桥墩与水体单元接触面上的节点应

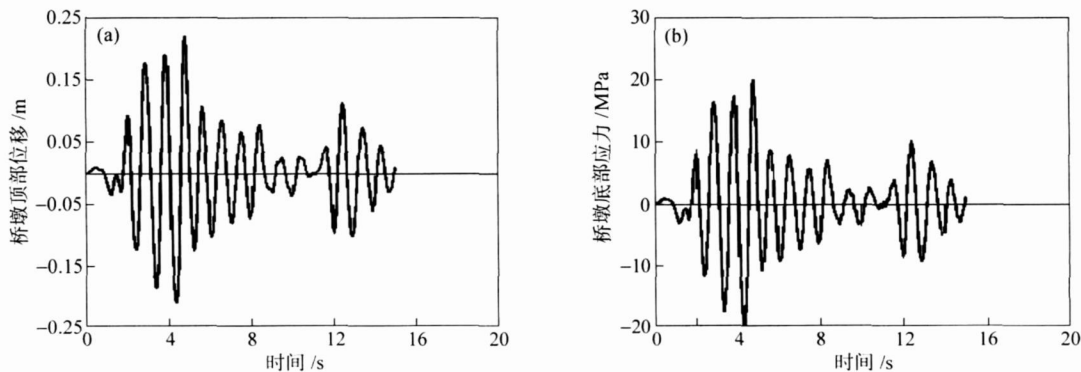


图 5 水与桥墩相互作用分析结果. (a) 墩顶位移时程曲线; (b) 墩底应力时程曲线

Fig.5 Analysis results of interaction between the pier and water: (a) displacement-time history curve of the pier top; (b) stress-time history curve of the pier foot

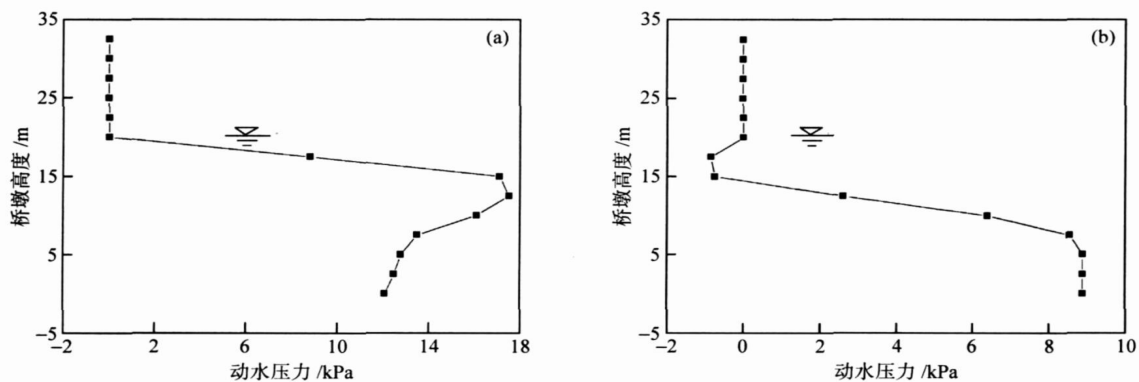


图 6 不同时刻动水压力沿桥墩高度的分布. (a)  $t=4.52\text{ s}$ ; (b)  $t=12.40\text{ s}$

Fig. 6 Distribution of hydrodynamic pressure along the pier height at different times; (a)  $t=4.52\text{ s}$ ; (b)  $t=12.40\text{ s}$

力计算, 选取了不同时刻沿桥墩高度动水压力的大小,  $t=4.52\text{ s}$  对应应力最大时刻,  $t=12.40\text{ s}$  对应位移最大时刻.

图 6 中桥墩所受的地震动水压力在某些时刻全部正值, 也有可能正负压力皆有, 这与大坝的动水压力有所不同. 由于大坝仅一面受动水压力作用, 而桥墩则在其周围都受的动水压力的影响, 故在振动过程中出现了负压力的情况. 通过动水压力在水与桥墩作用面上积分可以计算出其合力, 示意图如图 7 所示, 计算结果如表 2 所示.

表 2 动水压力的计算合力值

Table 2 Resultant force of the hydrodynamic pressure

时刻	动水压力 合力值/kN	对墩底弯矩 值/(kN·m)	合力作用 点位置/m
$t=4.52\text{ s}$	2 686	38 953	14.5
$t=12.40\text{ s}$	1 849	10 428	5.64

通过比较表 2 与图 2(a) 中的动水压力数据可看出, 桥墩所受的动水压力的合力在地震过程中并非一成不变, 因而引起桥墩的内力也有较大幅度的变化. 由数值计算求出的结果更加接近于日本规范的结果, 而比中国规范求解的结果要大很多. 同时也表明动水压力对桥梁性能有着重要的影响, 有必要将动水压力的研究与桥梁的性能设计结合起来.

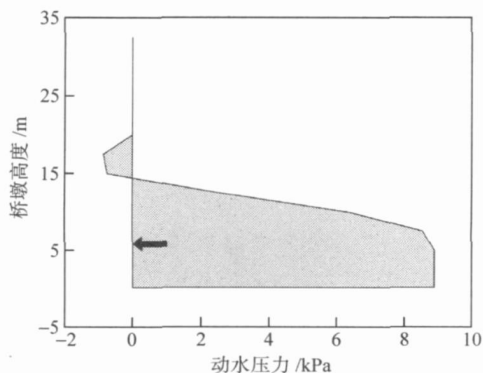


图 7 动水压力合力示意图

Fig. 7 Schematic diagram of resultant force of the hydrodynamic pressure

#### 4 地震动水压力对某拱桥特性影响的数值模拟

图 8 所示桥梁为日本樱岛与大禹半岛之间的中承式大跨度系杆钢拱桥——牛根大桥. 结构主体采用全钢结构, 下部桥墩采用柱式钢管混凝土结构, 桥台为框架式结构. 此桥主跨 260 m, 左右边跨分别为 63.5 m 和 57.5 m, 主拱计算矢高 45 m, 矢跨比 1/5.8, 桥墩高度为 14.05 m, 其中常年位于水位以

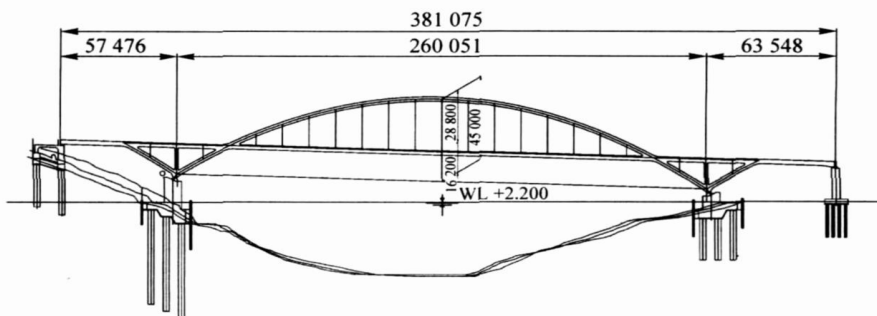


图 8 牛根大桥正立面(mm, 水位为 m)

Fig. 8 Facade of the Ushine Bridge (mm; water level; m)

下的高度为 10 m 左右. 拱面为 1:5 的角度向内侧倾斜, 桥梁上部结构采用的钢材为 Q235 钢, 其屈服强度为  $215 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , 桥墩采用混凝土为 C40.

本文计算钢拱桥自振特性时选用结合 Reyleigh-Ritz 法和逆迭代法优点的子空间迭代法, 该法基本思路是把 Reyleigh-Ritz 法和逆迭代法结合起来, 既利用 Reyleigh-Ritz 法来缩减自由度, 又在计算过程中利用逆迭代法使振型逐步趋近其精确值. 由于它吸收两个方法的优点, 因而计算效果比较好, 适用于大模型的少数阶模态. 牛根大桥主要自由振动频率值及振型特点见表 3. 为了考虑动水压力的影响, 采用附加质量法求解, 所求得的桥梁结构频率见表 4. 通过比较附加质量前后的频率变化可知, 附加质量后相应阶的频率有所降低, 但降幅不大. 附加质量前后前四阶振型一致, 见图 9.

表 3 牛根大桥自振特性

Table 3 Natural vibration characteristics of the Ushine Bridge

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.35	2.86	主拱和桥面板反对称竖弯
2	0.69	1.45	主拱和桥面板对称侧弯
3	0.82	1.22	主拱和主梁侧弯竖弯耦合
4	0.84	1.19	主拱和主梁反对称竖弯

表 4 考虑附加质量的牛根大桥的自振特性

Table 4 Natural vibration characteristics of the Ushine Bridge in consideration of added mass

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.33	3.03	主拱和桥面板反对称竖弯
2	0.65	1.54	主拱和桥面板对称侧弯
3	0.76	1.32	主拱和主梁侧弯竖弯耦合
4	0.82	1.22	主拱和主梁反对称竖弯

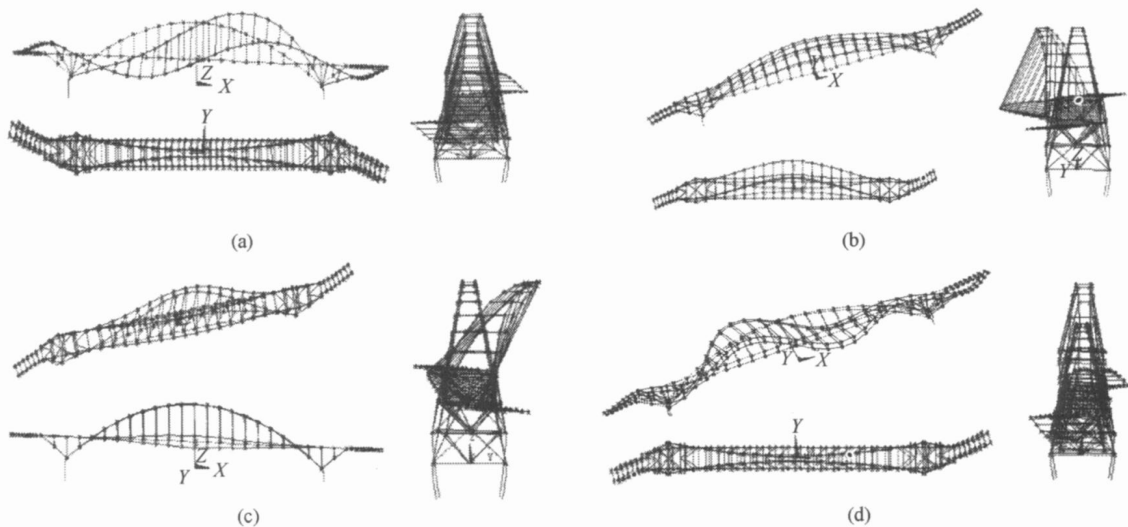


图 9 牛根大桥前四阶自振振型. (a) 第 1 阶振型; (b) 第 2 阶振型; (c) 第 3 阶振型; (d) 第 4 阶振型

Fig-9 The first four mode shapes of the Ushine Bridge: (a)the 1st mode shape; (b)the 2nd mode shape; (c)the 3rd mode shape; (d)the 4th mode shape

从图 9 中可以看出: 第 1 阶振型为上部结构沿桥轴方向的主振型, 铅直方向反对称侧弯; 第 2 阶振型为上部结构沿垂直桥轴方向的主振型, 主拱和主梁呈对称侧向弯曲; 第 3、4 阶振型为上部结构沿桥轴方向与桥轴垂直方向的复合振型, 分别为主拱和主梁反对称的铅直方向弯曲, 以及主拱和主梁对称侧向弯曲. 第 1 阶自振频率低于竖平面内的自振频率, 表明结构面内的刚度较面外刚度大, 扭转振动出现的较晚, 频率较高, 抗扭刚度较大. 对于大跨度拱桥来说, 高阶振型的震动特性比较复杂, 与结构的形式、支撑连接等条件有关, 因此应当取较多的阶数, 以此反映高阶振型对结构受力的贡献.

牛根大桥所在场地属二类场地, 根据地震波的

调整原则, 本文采用了结构地震响应分析中常用的 El-Centro 地震波(图 4)作为沿桥轴向输入地震波, (加速度峰值为  $341.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ , 主要周期  $0.55 \text{ s}$ ). 由于该记录的峰值较大, 波频范围较宽, 较其他地震波更适用作为设计依据, 多年来被工程界作为大地震的典型例子加以广泛使用. 根据研究罕遇地震的需要将加速度峰值调整为  $400 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ .

附加质量法是一种考虑水体对结构作用的简化的动力分析的计算方法, 它将动水压力等效成质量附加在结构上, 达到等效的动力响应. 为了研究不同动水压力计算方法计算结果的影响, 本文采用有限元分析程序 ANSYS 建立了牛根大桥的有限元模型, 如图 10 所示.

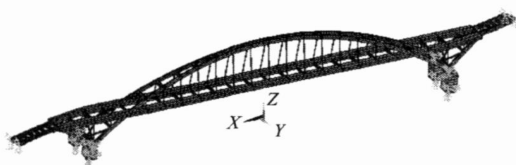


图10 牛根大桥的有限元模型

Fig.10 Finite element model of the Ushine Bridge

约束条件如下. ①桥上部结构约束条件为: 桥

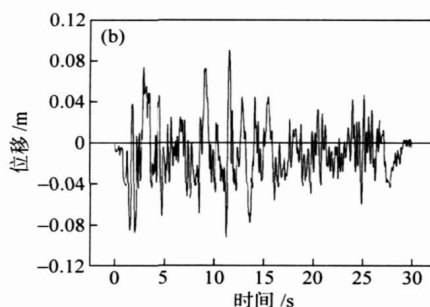
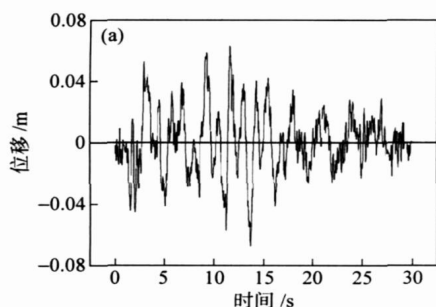


图11 地震作用下桥墩顶端的位移时程曲线. (a) 不考虑动水压力; (b) 附加质量法

Fig.11 Displacement time history curves of the pier top under earthquake: (a) without consideration of hydrodynamic pressure; (b) added mass method for calculating water effect

由表5中的计算结果可以看出,在罕遇地震作用下采用附加质量法求解出的位移和弯矩比不考虑动水压力作用的工况相差比较明显.位移增大25 mm,增幅37%,弯矩增大 $0.54 \times 10^4$  kN·m,增幅21%.因此,动水压力的作用对桥梁性能的影响不可忽视,在对桥梁进行基于性能的抗震设计时应考虑动水压力的影响.

表5 各种工况下的墩顶最大位移及墩底最大弯矩

Table 5 Maximum displacement at the pier top and maximum moment at the pier foot under various cases

工况	墩顶最大位移/mm	墩底最大弯矩/(kN·m)
不考虑动水作用	67	$2.54 \times 10^4$
附加质量法	92	$3.08 \times 10^4$

## 5 结论

本文通过选取一个桥墩实例进行计算对中国与日本桥梁抗震规范的地震动水压力计算方法进行比较研究,分析了中日规范在计算地震动水压力方法上的异同.通过计算结果可知,日本规范所算得的动水压力是中国规范计算结果的3~4倍甚至更多.为了研究动水压力对桥梁整体结构动力特性的影响,以主跨260 m的日本牛根大桥为背景建立了有限元计算模型,采用附加质量法对动水压力影响进

面板(模拟为主梁+横梁)及拱肋与吊杆铰接;拱肋与桥面主梁相交处为刚节点;拱肋支撑在墩柱上采用限制平动自由度及Z方向转动自由度,其余方向自由.②边界处的引桥节点的Y和Z方向的平动自由度被约束,同时桥墩底部的结点完全固结.

加载地震波的同时分别依据附加质量法(附加质量按式(6)取值)考虑动水压力对桥墩的影响,得出的桥墩顶部的位移时程曲线如图11所示.

行计算.结果表明,附加质量法求得位移和弯矩比不考虑动水作用的情况有较大增幅.

本文还通过数值模拟对桥墩的动水压力进行计算,考察动水压力沿深水桥梁高程的分布.通过计算比较可知,日本规范对于动水压力的计算与数值模拟求解的结果比较接近,而中国规范的计算结果比数值模拟求解结果相差较大.另外,中日两国规范动水压力公式的适用范围有所不同:中国的规范适用于跨度在150 m以下的桥梁,而日本的则适用于300 m以下的桥梁.在本例中,牛根大桥的跨度为260 m,中国规范对于此跨度的桥梁未给出动水压力的计算公式,而现有的桥梁设计中多依据数值计算软件来计算动水压力的影响.展望未来,在深水中桥梁的性能设计理论与应用领域中,水与桥墩相互作用问题有必要进行进一步的研究.

## 参考文献

- [1] Construction Department of the Third Yangtze River Bridge in Nanjing. *Technical Summary of the Main Bridge of the Third Yangtze River Bridge in Nanjing*. Beijing: China Communications Press, 2005  
(南京长江第三大桥建设指挥部. 南京长江第三大桥主桥技术总结. 北京:人民交通出版社,2005)
- [2] Zhang X G, Yuan H, Wu G M. General design of Su-Tong Bridge// *Proceedings of China Bridge Conference Hold by the Bridge and Structure Subcommittee of China Road Society*. Kunming, 2004



- (张喜刚,袁洪,吴国民. 苏通大桥总体设计//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2004 年全国桥梁学术会议论文集. 昆明, 2004)
- [3] Zhong M Q, Yao X S, Pan Y S. Analysis and study on earthquake hydrodynamic pressure of piers in Fengjie Changjiang Highway Bridge// *Proceedings of the 1st Highway Science and Innovation High-Level Forum: Highway Design and Construction*. Beijing, 2001  
(钟明全,姚小松,潘亦苏. 奉节长江公路大桥桥墩地震动水压力的分析研究//第一届全国公路科技创新高层论坛论文集:公路设计与施工卷. 北京,2001)
- [4] The Ministry of Transport of the People's Republic of China. *JTJ004-89 Seismic Design Code of Highway Engineering*. Beijing: China Communications Press, 2003  
(中华人民共和国交通部. JTJ004-89 公路工程抗震设计规范. 北京:人民交通出版社,2003)
- [5] Yoshida. Substructure design of Akashi Kaidyo Bridge. *Soil Found*, 2003(10):23
- [6] Xia Z H. *Seismic Response Analysis of Long Span Continuous Rigid Frame Bridges* [Dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003  
(夏志华. 大跨度连续刚构桥地震反应分析[学位论文]. 成都:西南交通大学,2003)
- [7] Li H. Seismic response analysis of deep water pier under near-fault earthquake. *Earthquake Resistant Eng Retrofitting*, 2006(3): 83  
(李辉. 近场地震作用下深水桥墩的地震响应分析. 工程抗震与加固改造, 2006(3): 83)
- [8] Zhang L X, Yang K. *Theory and Application of Fluid Structure Interaction*. Beijing: Science Press, 2004  
(张立翔,杨柯. 流体结构互动理论及其应用. 北京:科学出版社,2004)
- [9] Japan Road Association. *Road and Bridge Design and Explanation: Chapter V. Seismic Design*. Tokyo: Japan Road Association, 1996
- [10] *Report on Investigation of Earthquake Hydrodynamic Pressure Experiment*. Honshu-Shikoku Bridge Construction Corporation, Institute of Foundation Technology, 1995
- [11] Chongqing Communications Research and Design Institute, The Ministry of Transport of the People's Republic of China. *JTG/T B02-01-2008 Detailed Rules and Regulations of Seismic Design of Highways and Bridges*. Beijing: China Communications Press, 2008  
(重庆交通科研设计院,中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则. 北京:人民交通出版社,2008)
- [12] The Ministry of Railways of the People's Republic of China. *GB 50111-2006 Seismic Design Code of Railway Engineering*. Beijing: China Planning Press, 2006  
(中华人民共和国铁道部. GB 50111-2006 铁路工程抗震设计规范. 北京:中国计划出版社,2006)