

文章编号:1007-6069(2010)03-0091-05

## 考虑水作用的桥墩自振特性计算方法对比分析

杨吉新,党慧慧,雷凡

(武汉理工大学 交通学院,湖北 武汉 430063)

**摘要:**地震作用下,深水中的桥墩在水流作用下动力特性会有很大的变化,《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)规定:在常水位以下的部分,对水深超过5m时,应计入地震动水压力对桥墩的影响。考虑水的作用,目前可以用于计算桥墩自振频率和周期的方法主要有解析法、数值分析法和规范中给出的公式法,文中对这3种方法做了简单的介绍,并通过对某连续钢构桥墩的周期和自振频率的计算,综合其他各个方面对这3种方法进行进一步对比分析。总结得出了这3种方法分别适用的范围:公式法可用于只需1阶频率、不用考虑地基土影响的圆形或圆端形桥墩;解析法则适用于结构形式简单,截面统一的桥墩;数值分析法可以用于所有形式的桥墩,灵活性强,但对建模能力要求较高。在此基础上对这3种方法的优缺点进行了分析,为考虑与水相互作用的桥墩自振特性计算方法的选择提供了参考依据。

**关键词:**动力特性;基本周期;自振频率;动水压力

**中图分类号:**U443.22;P315.95

**文献标识码:**A

### Comparison of methods for natural frequency calculation of piers considering interaction with water

YANG Jixin, DANG Huihui, LEI Fan

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Owing to the interaction of pier and water, the dynamic characteristics of pier in water have great change. Code for Seismic Design of Railway Engineering (GB50111-2006) prescribes that if the normal water level is deeper than 5 meters, the dynamic water pressure on piers should be considered. For calculating natural frequency and period of the pier in deep water, the available methods include analytic method, numerical method and the formula given in the Code. There is a short introduction of the 3 methods. The natural frequency of piers of a rigid frame bridge project is calculated. The results are found that the Code formula is suitable only for fundamental frequency calculation, and no considering the earth base effect of circle section shape piers. The analytic method is suitable for the piers with simple shape and constant section. The numerical method applies to all types of piers, but requires high techniques in creating calculation model. Based on the above relative merits of the three methods, the results can be for a reference of the method selection in calculating the dynamic characteristics of piers.

**Key words:** dynamic characteristics; fundamental period; natural frequency; dynamic water pressure

收稿日期:2009-07-03; 修订日期:2009-07-31

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA11Z107)

作者简介:杨吉新(1964-),男,教授,博士,主要从事土木工程和计算力学研究. E-mail:whutvses@163.com

## 引言

地震作用下,桥墩和周围水之间是一个非常复杂的动力相互作用问题<sup>[1-5]</sup>。水的存在不仅会使桥墩产生附加动水压力,还会改变桥墩的动力特性。由于经济发展的需要,我国还将在大江大河上修建许多大跨度桥梁及跨海大桥。大跨度桥梁的桥墩往往处于深水中,我国《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)规定:在常水位以下的部分,对水深超过5m时,应计入地震动水压力对桥墩的影响<sup>[6]</sup>。而在结构的动力特性的研究中,结构的自振频率被认为是进行其它动力分析的基础,因此准确的计算出桥墩的自振频率是桥墩动力特性分析结果有效性的前提。《铁路工程抗震设计规范》也给出了计算水位超过5m时桥墩的自振频率计算公式。在考虑水的作用下,目前可以用于计算桥墩自振频率和周期的方法主要有解析法、数值分析法和规范中给出的公式法,文中将对这3种方法做一个简单的介绍,并对这3种方法的有效性和实用性及存在的优缺点进行进一步对比分析。

将以某连续钢构桥桥墩为例,考虑水对桥墩动力特性的影响,利用规范中所给公式法、解析法和数值分析法分别对其进行自振频率和周期计算,对计算结果进行综合的对比分析,总结出水对桥墩自振频率和基本周期影响的基本规律,同时利用分析3种方法对比得出的结果,综合各个方面对这3种方法进行有效性和实用性分析及列出各自的优缺点,并针对其存在的缺点,提出初步解决的方法。文中得出的结论为在工程中选择合理的桥墩动力特性计算方法提供了重要的参考依据。

## 1 公式法、解析法和数值分析法简介

### 1.1 规范中桥墩基本周期公式介绍

《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)中规定,梁式桥梁结构的实体桥墩,在常水位以下的部分,当水深超过5m时,应计入地震动水压力对桥墩的作用。采用圆形或圆端形桥墩时,计算模型见图1,其基本周期可以按下式计算:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{H^3(0.236r \cdot A_1 H + m_b \cdot g)}{3E \cdot I_p \cdot g}}$$

式中: $H$ 为桥墩的高度(m); $r$ 为墩身的重力密度( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $A_1$ 为桥墩高度 $H$ 的1/2处的截面面积( $\text{m}^2$ ); $m_b$ 为桥墩顶处的换算质点的质量(Mkg); $E$ 为墩身的弹性模量(kPa); $I_p$ 为桥墩高度 $H$ 的1/2处截面计算方向的惯性矩( $\text{m}^4$ )。

该基本周期公式计算简单,但在公式中没有任何与水深有关的参数,同时也没有考虑到地基土的情况,是相当近似的公式。

### 1.2 解析法简介

在文中所用到的解析法是指附加质量法,即用附着在结构面的一定质量的水体来代替水的动力学效应。这种方法假设水为无粘、无旋和不可压缩的理想流体,水中结构为刚体模型。对于圆柱体结构来讲,根据流场总动能与附连水质量的动能相等的条件,可得附连水质量 $m_f$ 。

$$m_f = \rho \pi R^2$$

即附连水质量恰等于圆柱体排开水的质量,通过实验证明此结论同样适用于其他截面结构,在用有限元求解流固耦合问题时,附加质量法也非常容易在程序中实施,因此在工程界中得到了广泛应用。

### 1.3 数值分析法简介

文中采用的数值分析法是指利用有限元实体建模的方式,同样将水假设为理想流体,并且认为对桥墩作用的水为无限水域,但通过反复试算及实验证明,当对桥墩作用的水域超过一定限值时,超出的水域对结构的影响微乎其微。因此在进行数值计算时,将假定结构周围只有有限范围的流体,这一假定的结果与假定流体为无限边界流体的结果的误差小于1%。同时流体与固体接触的部分采用流固耦合标签进行标记<sup>[7]</sup>。

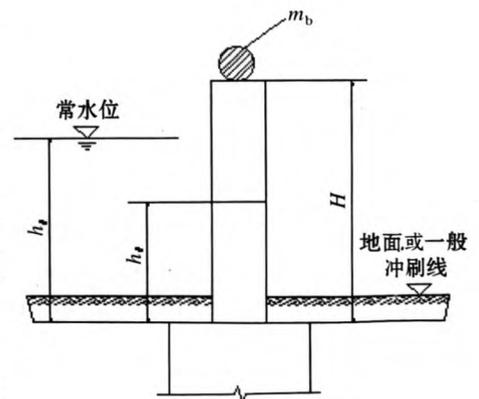


图1 桥墩计算图示

Fig.1 The calculation model of a pier

## 2 桥墩自振频率和周期计算

### 2.1 工程简介

我们选取某连续刚构桥中的其中一个主墩作为计算对象,根据该桥桥址特点,桥墩几乎全部位于水中,因此,在计算此桥墩动力特性时的有必要考虑水的影响。该墩尺寸示意图如图2所示,其中一侧跨度为145m,另一侧跨度为80m,上部结构采用预应力混凝土刚构连续梁。在利用解析法和数值分析法计算时分别计算了桥墩水位为5.9m、13.8m、21.7m、满水所对应的前3阶频率,经计算上部结构简化为 $16\ 823\ 105 \times 10^3\text{kg}$ 的质量块,作用于桥墩顶处。

### 2.2 利用规范公式计算

在常水位以下的部分,对水深超过5m时,根据规范公式计算基本周期结果如下:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{H^3(0.236r \cdot A_1 H + m_b \cdot g)}{3E \cdot I'_p \cdot g}}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{29.654^3(0.236 \times 25 \times 9.3794 \times 29.654 + 16\ 823.105 \times 9.8)}{3 \times 3.25 \times 10^7 \times 1.469 \times 9.8}}$$

$$= 11.0504\text{Hz}$$

即通过规范计算得出的基本周期为11.0504s,自振频率值为0.09049Hz。

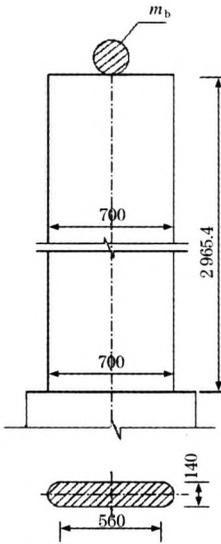


图2 桥墩尺寸示意图(cm)  
Fig. 2 Size diagram of the pier



图3 解析法桥墩模型图  
Fig. 3 The calculation model of the pier by analytical method

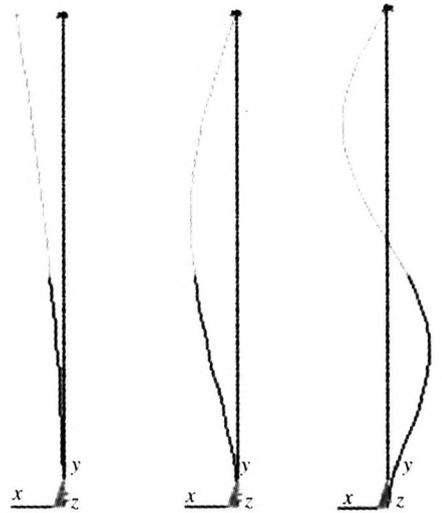


图4 利用解析法得出的桥墩前3阶振型图  
Fig. 4 The model graphs of the first 3 frequencies by analytical method

### 2.3 解析法计算结果

图3给出了水位为13.8m时利用解析法计算的桥墩模型,计算所得的桥墩的前3阶频率值见表1,振型图形如图4所示。

表1 利用解析法计算的不同水位时桥墩的自振特性

Table 1 The natural vibration characteristics of the pier at different water levels calculated by analytical method

5.9/m		13.8/m		21.7/m		满水	
f/Hz	c/s	f/Hz	c/s	f/Hz	c/s	f/Hz	c/s
0.0905	11.051	0.0905	11.051	0.0904	11.062	0.0903	11.074
3.9480	0.2533	3.7481	0.267	3.429	0.297	3.350	0.299
12.737	0.0785	11.662	0.086	11.305	0.088	10.799	0.093

2.4 数值分析计算结果

数值分析法和解析法都是采用有限元计算软件<sup>[8]</sup>来实现的,图5为13.8m水深时利用数值分析法计算的模型图作为示例,计算出的前3阶频率值见表2,振型图形见图6。

表2 利用数值分析计算的不同水位时桥墩的自振特性

Table 2 The natural vibration characteristics of the pier at different water levels calculated by numerical analysis method

5.9/m		13.8/m		21.7/m		满水	
f/Hz	c/s	f/Hz	c/s	f/Hz	c/s	f/Hz	c/s
0.090 6	11.038	0.090 5	11.050	0.090 4	11.062	0.090 0	11.111
3.912 6	0.256	3.405	0.294	2.785	0.359	2.666	0.375
12.088	0.082 7	10.263	0.097 4	9.516	0.105	8.607	0.116

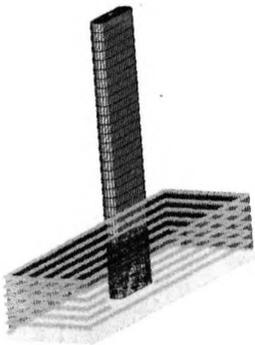


图5 数值法桥墩模型图  
Fig.5 The calculation model of the pier by numerical method

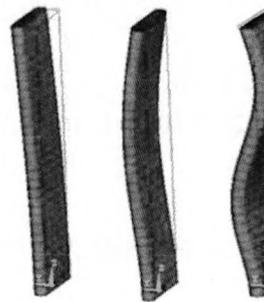


图6 利用数值法得出的桥墩前3阶频率图  
Fig.6 The mode graphs of the first 3 frequencies by numerical method

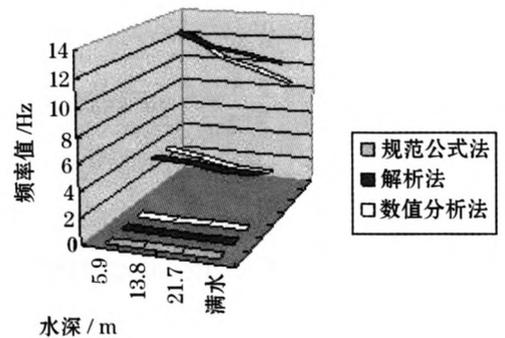


图7 利用三种方法得出的结果对比图  
Fig.7 Comparison diagram of results by the three method

3 结果分析及公式法、解析法和数值法的对比分析

3.1 结果分析

为了能够更为直观的观察结果,我们把利用规范公式法、解析法和数值法得出的结果汇总于图7,通过对比图可以看出,规范公式法、解析法和数值分析法计算所得的频率值基本一致,即结果是可靠的;其中规范公式法只能得出桥墩的1阶频率,解析法和数值分析法可以得到桥墩的多阶频率。

图8和图9分别为利用解析法和数值分析法得出的随着水深的变化前3阶自振频率值的变化情况,通过图8、图9可以发现,当水深超过5m时,随着水深的增加,桥墩的各阶频率值都有不同幅度的减少,其中通过解析法计算在不同水位作用下桥墩的前3阶自振频率变化幅度为17.9%,数值分析法最大的变化幅度为40.4%。

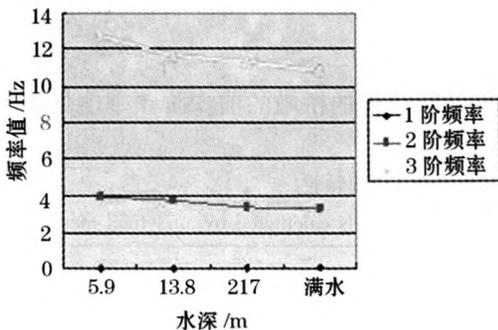


图8 频率随水深变化规律图(解析法计算)  
Fig.8 Variation of frequency with different water depth(calculated by analytical method)

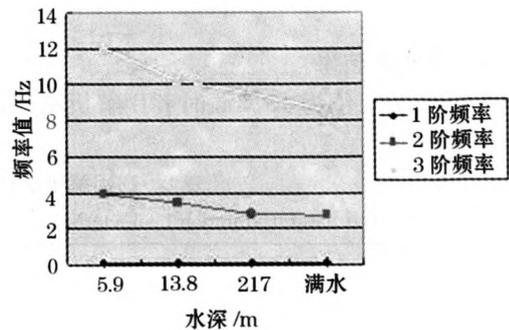


图9 频率随水深变化规律图(数值分析法计算)  
Fig.9 Variation of frequency with different water depth(calculated by numerical method)

### 3.2 公式法、解析法和数值分析法的对比分析结论

在利用这3种方法计算的过程中及对结果的分析可以发现这3种方法均可以用于计算桥墩的周期和自振频率,同时也发现了这3种方法各有利弊,并且适用的情况也各有不同。

利用公式法计算简单方便,可以快速的计算出桥墩的基本周期。但该方法只能计算出桥墩的1阶频率,但在工程中经常需要用到前3阶频率值甚至更多,并且规范中规定桥墩截面为圆形或者圆端形截面才可利用规范公式计算,实际工程中有很多其他截面桥墩。最重要的是在规范所给出的公式中,并没有考虑到地基土对自振频率值的影响,因此为了与规范进行直观的比较,在文中应用到的其他分析方法同样没有考虑地基土对结果的影响,但是在工程中,地基土的状态肯定会对结构的自振频率值有着不可忽略的影响,这也是我们接下来要研究的重点。

解析法是目前得到广泛利用的一种方法,该方法计算简单,实用性强,结果也比较精确,并且可以计算多阶频率,同时也可以考虑地基土对桥墩自振频率的影响。但解析法不能很好的模拟结构的截面形式,当桥墩结构形式复杂、或者采用变截面时,利用解析法通常得不到比较理想的结果。

数值分析法是采用实体建模的方式,计算过程和结果都非常直观明了,结果也比较精确,建模灵活性高,对于结构形式复杂的桥墩同样可以采用,可以解决利用解析法和公式法计算所遇到的问题,同时也可以用于其它类型结构的动力特性计算。数值分析法的缺点是建模困难,模型较大,需要有较强的建模能力和较高性能的计算设施。

## 4 结语

综上所述,在考虑水对桥墩动力特性影响下,这3种方法分别的适用范围为,公式法可以用于只需要1阶频率、并且不用考虑地基土影响的圆形或圆端形桥墩;解析法则适用于结构形式简单,截面统一的桥墩;数值分析法可以用于所有形式的桥墩,灵活性强,同时对建模能力要求也较高。这些结论同样可以应用于其他类型结构,但鉴于桥墩与水的相互作用非常复杂,涉及到很多方面的问题,如地基土状况、桥墩截面形式等,因此还需要做深入的研究。

## 参考文献

- [1] 张敏. 桥墩与河水流固耦合振动分析[D]. 大连:大连交通大学,2006.  
Zhang Min. Vibration analysis of solid-fluid interaction for pier-river water[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2006.
- [2] 居荣初,曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京:地震出版社,1983.  
Ju Rongchu, Zeng Xinchuan. An Coupled Vibration Theory Between Elastic Structures and Liquid[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1983.
- [3] 李彤. 地震作用下土-群桩-结构-水相互作用体系的动力反应分析[D]. 上海:同济大学,1999.  
Li Tong. Seismic response analysis of soil-piles group structure-water system[D]. Shanghai: Tongji University, 1999.
- [4] 赖伟,王君杰,胡世德. 地震下桥墩水压力分析[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.
- [5] Nilrat F. Hydrodynamic pressure and added mass for axisymmetric bodies[R]. [s. l.]: Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, UC, 1980.
- [6] GB 50111-2006, 铁路工程抗震设计规范[S].  
GB 50111-2006. Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].
- [7] 杨吉新,张可,党慧慧. 基于ANSYS的流固耦合动力分析方法[J]. 船海工程,2008,37(6):86-90.  
Yang Jixin, Zhang Ke, Dang Huihui. Dynamic analysis method for fluid-solid coupling based on ANSYS[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(6): 86-90.
- [8] 龚曙光. ANSYS基础应用及范例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
Gong Shuguang. ANSYS Foundation Application and Model Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.