

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.I-0195-06

# 桥梁群桩基础-水耦合系统动力特性数值模拟

\*魏 凯, 伍勇吉, 徐 灿, 庞于涛, 袁万城

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 该文首先介绍了基于势流体单元的结构-水相互作用完全数值分析方法, 并对基于该方法的桥梁群桩基础-水耦合系统动力特性分析的实现及建模进行了研究。以某深水桥梁群桩基础为工程背景, 利用有限元分析软件 ADINA 分别建立了结构的三维实体单元和水体的势流体单元模型, 分析了结构在不同水深条件下的动力特性。基于简化模型, 通过参数分析研究了桩基、承台的设计与流固耦合效应间的关系。主要结论有利用完全数值分析方法进行结构-水耦合系统的动力特性分析是有效的, 但分析结果收敛性受流固边界两侧网格尺寸控制; 水体-结构相互作用对结构动力特性有明显影响, 水深越大, 影响越强; 桩基、承台的设计都会对水-结构相互作用产生影响, 通过合理设计可以减小水体对结构振动的影响。

**关键词:** 深水群桩基础; 动力特性; 结构-水相互作用; 完全数值方法; 势流体单元

**中图分类号:** U443.13; U441<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A

## NUMERICAL DYNAMIC ANALYSIS FOR WATER-PILE GROUP BRIDGE FOUNDATION INTERACTED SYSTEM

\*WEI Kai, WU Yong-ji, XU Can, PANG Yu-tao, YUAN Wan-cheng

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

**Abstract:** The numerical method for fluid-structure interaction analyses based on potential-fluid element was introduced, then the detail of the water - group pile foundation interacted modeling was studied. Taking a deepwater group pile foundation of a bridge as an example, a three-dimensional solid finite element model of the structure and a potential fluid model of water were built in finite element analysis program ADINA, and the dynamic analyses of the model with different depth of water were carried out. In order to investigate the relationship between the hydrodynamic influence and the design geometry of piles and caps, parameter analyses were performed. Main conclusions are: the complete numerical method is an efficient method for dynamic analysis of water - structure interacted system; the convergence of analyses was controlled by the ratio of the gird size of fluid elements on the fluid-structure interface to that of adjacent solid elements; the water-structure interaction has significant influence on dynamic characteristics of the deepwater bridge group foundation; the design of caps and piles causes variation of the fluid-structure interaction, and the hydrodynamic influence can be reduced through reasonable design.

**Key words:** deepwater pile-group foundation; dynamic analysis; water-structure interaction; complete numerical method; potential-fluid element

收稿日期: 2010-10-31; 修改日期: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778131, 50978194, 90915011)

作者简介: \*魏 凯(1984—), 男, 山东人, 博士生, 从事桥梁抗震研究(E-mail: 10weikai@tongji.edu.cn);

伍勇吉(1986—), 男, 湖南人, 硕士生, 从事桥梁抗震研究(E-mail: wuyongjihon@163.com);

徐 灿(1987—), 女, 黑龙江人, 学士, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: cloverwish2008@163.com);

庞于涛(1988—), 男, 浙江人, 硕士生, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: pangyutaoyy@163.com);

袁万城(1962—), 男, 江西人, 教授, 博士, 从事桥梁抗震与振动研究(E-mail: yuan@tongji.edu.cn).

深水群桩基础是我国跨江海桥梁广泛采用的基础形式。但是，其抗震性能研究还有很多亟待完善的地方。其中，搞清地震作用下结构-水相互作用对群桩基础的影响是精确确定结构动力响应的前提。目前对结构-水耦合作用的力学分析方法大致分3类：解析法、解析-数值法和完全数值法。解析法主要采用特征函数扩展法来研究水对结构地震响应的影响，一般能得到响应的封闭解，其中Morrison<sup>[1]</sup>针对特征尺寸小于水流波长的圆柱体，推导出了目前被各国规范广泛采用的莫里森方程；MacCamy<sup>[2]</sup>等提出线性绕射理论，给出了大型水下圆柱体的一致波浪力表达；Bhatta 和 Rahman<sup>[3]</sup>研究了竖直漂浮圆柱体的散射和辐射问题，推导出波浪力、附加质量和附加阻尼的解析解。但是解析法多是将结构简化为圆柱体进行研究，无法对复杂结构进行精确求解。解析-数值方法综合了解析法和有限元方法的特点，对复杂结构离散为规则体，再将解析法计算得到的动水附加质量和附加阻尼集中到结构相应离散点上。我国《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[4]</sup>(JTG/T B02-01-2008)基于Morrison方程给出了作用于桥墩上的地震动水压力解析-数值简化计算公式；高永<sup>[5]</sup>根据Bhatta和Rahman的研究成果给出了作用于承台的动水力简化分析方法。解析-数值方法大大降低了计算的复杂程度，但是解的准确性受到近似及简化的限制。完全数值法<sup>[6]</sup>是一种基于多介质耦合建模技术，对结构和水体进行精确模拟和分析的数值手段，可用来分析各类复杂的流固耦合问题。但是，作为新兴手段，在我国应用目前还只限于简单桥墩与水体的耦合作用研究。因此，利用完全数值方法研究桥梁群桩基础-水耦合系统动力特性，不仅对提高长桥梁群桩基础的地震安全性具有重要指导意义，还可以为此类问题的求解提供新的技术手段。本文首先介绍了基于多介质耦合建模技术的结构-水相互作用完全数值分析方法，讨论了在ADINA软件中进行建模分析的相关技术细节，然后以某深水桥梁群桩基础为背景，利用ADINA分别对结构和水体进行了有限元多介质耦合建模，分析比较了结构在不同水深下的动力特性，并针对单桩模型进行了参数分析及必要的讨论。

## 1 结构-水耦合完全数值方法

### 1.1 基本方程

根据流体力学基本理论，势流体单元(图1所示)

应该满足以下基本方程<sup>[7]</sup>：

连续性方程：

$$\rho + \nabla \cdot (\rho \nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

能量守恒方程：

$$h = \Omega(x) - \dot{\phi} - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (2)$$

当假设流体中的压强仅与密度有关时，有如下关系：

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{p}{\kappa} \quad (3)$$

式中： $\rho$ 为流体密度函数； $\rho_0$ 为流体公称密度； $\phi$ 为速度势函数(流体速度 $v = \nabla \phi$ )； $h$ 为流体的焓，满足 $h = \int \frac{dp}{\rho}$ ， $p$ 为流体的压强； $\Omega(x)$ 为作用于 $x$ 点的外荷载加速度势函数； $\kappa$ 为体积模量。

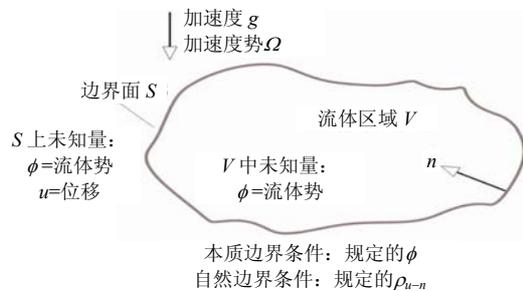


图1 势流体单元示意图

Fig.1 Potential-fluid element

分析静水或无穷低速运动的流体时，有 $\rho = \rho_0$ ， $\nabla \phi \approx 0$ ，将式(3)两边求导代入式(1)、式(2)，可得此时的流体基本方程为：

$$\rho + \nabla \cdot (\rho \nabla \phi) \approx \rho + \rho_0 \nabla^2 \phi \approx \frac{\rho_0 \dot{p}}{\kappa} + \rho_0 \nabla^2 \phi = 0 \quad (4)$$

进一步变换得：

$$-\rho \ddot{\phi} + \kappa \nabla^2 \phi = -\rho_0 \dot{\Omega}(x) \quad (5)$$

线性求解速度势函数 $\phi$ ，写成变分形式为：

$$-\int_V \rho \ddot{\phi} \delta \phi dV + \int_V \kappa \nabla \phi \delta \nabla \phi dV + \int_S \kappa \dot{u} \cdot n \delta \phi dS = -\int_V \rho_0 \dot{\Omega} \delta \phi dV \quad (6)$$

作用在结构上的动水压强：

$$\delta F_u = \int_{S_1} p n \cdot \delta u dS_1 \approx \int_{S_1} \left( \rho_0 \dot{\Omega} + \rho_0 \frac{\partial \Omega}{\partial x} u - \rho_0 \phi \right) n \cdot \delta u dS_1 \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可以得到势流体单元的动力学基本方程：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{M}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{C}_{FU}^T \\ \mathbf{C}_{FU} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_{UU})_S & 0 \\ 0 & -\mathbf{K}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{UB})_S \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\mathbf{R}}_{FB} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中： $\mathbf{M}_{FF}$  为由  $\ddot{\phi}\delta\phi$  项产生的质量矩阵； $\mathbf{K}_{FF}$  为由  $\nabla\phi\delta\nabla\phi$  项产生的刚度矩阵； $\mathbf{C}_{FU}$  为由  $\dot{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{n}\delta\phi$  项产生的阻尼系数矩阵； $(\mathbf{K}_{UU})_S$  为由  $\left(\rho_0 \frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{u}\right) \mathbf{n}\delta\mathbf{u}$  项产生的刚度矩阵； $(\mathbf{R}_{UB})_S$  为由  $(\rho_0 \Omega) \mathbf{n}\delta\mathbf{u}$  项产生的荷载向量； $\dot{\mathbf{R}}_{FB}$  为由  $\rho_0 \dot{\Omega} \delta\phi$  项产生的荷载向量； $\mathbf{U}$  为节点位移； $\phi$  为节点速度势。

### 1.2 模态分析理论

由式(8)求解得耦合系统特征值方程<sup>[8]</sup>：

$$\begin{bmatrix} -\omega_j^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{FF} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{C}_{FU}^T \\ \mathbf{C}_{FU} & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{K} + (\mathbf{K}_{UU})_S & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{FF} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}^{(j)} \\ \mathbf{F}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $\mathbf{F}^{(j)} = -i\phi^{(j)}$ ； $i = \sqrt{-1}$ 。动水效应产生的附加质量、附加阻尼，以及其对系统刚度的影响都被计入。求解式(9)，即可得到结构-水耦合系统的各阶频率及周期。

## 2 完全数值方法实现与建模讨论

本文选择 ADINA8.5 软件作为平台，基于完全数值方法，进行多介质建模和求解。

### 2.1 网格划分对耦合模型模态分析的影响

对于精细有限元模型来说，网格划分质量往往对数值分析结果的稳定性和收敛性有重要影响。而且水-结构耦合系统与传统单一介质在数值模拟分析方面最明显的区别体现在，水-结构之间存在耦合接触面，研究发现<sup>[9]</sup>，接触面两侧不同介质单元的网格尺寸对计算结果有明显影响。以浸没于水中的圆柱悬臂梁为对象，通过分别改变结构和水体的网格划分密度，研究接触两侧网格划分尺寸比例对耦合模型模态分析的影响。首先假设水体为圆柱体(图 2(a)示)，通过依次改变流固耦合边界两侧结构单元的网格划分尺寸  $l_s$  和水体单元的网格划分尺寸  $l_f$ ，计算不同  $l_s/l_f$  时圆柱悬臂梁-水体耦合模型的结构一阶频率。以结果一阶频率为纵坐标，以  $\log_2(l_s/l_f)$  为横坐标绘制频率计算结果随网格尺寸比变化的关系，如图 3 所示。

根据分析，对于圆形水体，模型收敛性与  $l_f/l_s$  有关。当相邻的水-结构单元的网格宽度比例接近或小于 1 时，结构一阶频率收敛于一恒定值，不在随网格尺寸比变化而变化。上述结论同样适用于水体为长方体的情况，只是解的收敛性由相邻的水-结构最大网格尺寸比控制，即图 2(b)中  $l_{f2}/l_s$ 。因此，基于以上研究，为使计算结果准确，本文建议进行结构-水耦合系统模态分析时，流固边界两侧相邻的水-结构网格尺寸最大比值应接近或小于 1。

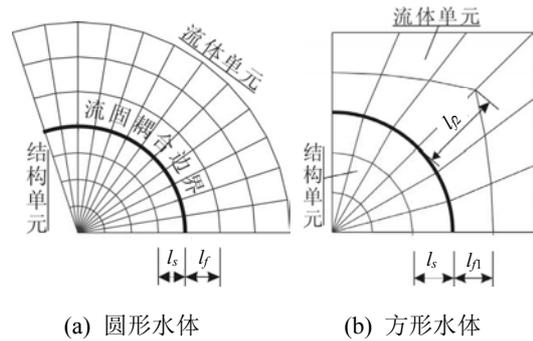


图 2 网格划分局部示意图  
Fig.2 Potential-fluid element

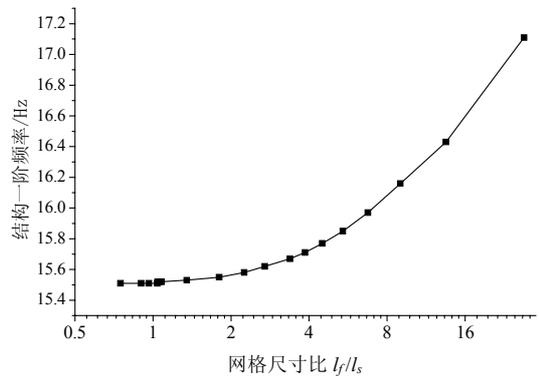


图 3 网格尺寸比与一阶频率的关系  
Fig.3 The relationship between the grid size ratio and the 1<sup>st</sup> frequency

### 2.2 方法准确性验证

为验证基于完全数值方法进行结构-水耦合系统模态分析的准确性，参照 2.1 节的数值分析建模建议对大连交通大学张敏所做的有机玻璃模型墩-水耦合系统的振动幅频特性试验<sup>[10]</sup>进行了数值模拟，并将数值模拟结果与其试验结果进行比较，如表 1 所示。通过比较发现，数值计算值与试验值误差小于 5%，即基于势流体单元的结构-水耦合系统模态分析能够精确的计算耦合系统的动力特性，与试验值吻合良好。

表 1 数值分析与试验结果的对比

Table 1 The comparison of numerical results and testing results

水体高度/mm	一阶频率/Hz		误差/(%)
	计算值	试验值	
550	15.51	15.9	2.52
520	16.29	17.09	4.68
440	18.21	18.31	0.55
0	20.6	20.75	0.72

2.3 水体模拟范围

对于真实水体，其边界范围是很难精确模拟的。为研究进行有限元计算时，水体范围对计算结果的影响，建立结构-水体耦合有限元模型，结构、水体网格在交界处保持连续，如图 4 所示。水面取为正方形，边长依次取 5m、10m、15m、20m 和 25m，水深 12m，水中浸没混凝土单桩承台模型，桩基直径 2m，高 10m，承台长、宽、高分别为 4m、4m、2m。在模型其他参数满足计算稳定的前提下，通过变化水体边长研究模型在不同水面边长时结构的动力特性。各工况部分模态计算结果列于表 2。由表 2 可知，水面越大，计算精度越好，但是效率也越低。综合计算精度与计算效率考虑，水体-结构耦合建模时，建议水体体积  $V_{水}$  取为被浸没结构体积  $V_{结构}$  的 40 倍—70 倍。

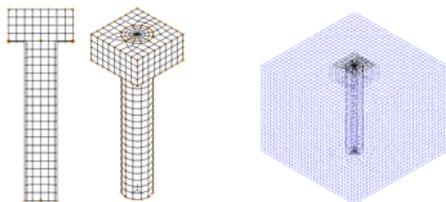


图 4 单桩承台基础-水耦合系统模型

Fig.4 Single pile-cap foundation-water interacted model

表 2 水体边界对模态分析精度及效率的影响

Table 2 The influence of water size on the accuracy and efficiency of modal analyses

体积比 $V_{水}/V_{结构}$	计算 运行 时间/s	不同振型自振周期/s				
		一阶 侧弯	一阶 扭转	二阶 侧弯	一阶 竖向	三阶 侧弯
3.7	31.33	0.3042	0.07327	0.03763	0.02168	0.01524
17.9	58.28	0.2934	0.07285	0.03752	0.02283	0.01524
41.6	61.80	0.2931	0.07285	0.03752	0.02289	0.01519
74.7	75.87	0.2931	0.07285	0.03751	0.02291	0.01519
117.3	117.7	0.2931	0.07285	0.03751	0.02291	0.01519

3 工程实例分析

以某特大型桥梁作为工程背景，该桥总长约 3000m，所选高桩承台原型为该桥中航道桥的固定

墩。墩高 10m，上部结构质量约 3000t，群桩基础布置如图 4 所示，桩全长 58m，桩径 1.80m，间距 4.5m，考虑水流最大冲刷时，桩基础的自由段长度为 20m；场地类型 II 类。桩基、承台、墩柱材料均采用 C40 混凝土和 II 级钢筋。图 5 给出了桥梁深水群桩基础布置图。分析时忽略桩土相互作用的影响，将桩在最大冲刷线处截断并固结。忽略主梁及其他桥墩对全桥振型的贡献，将上部结构质量作为集中面质量加在墩顶。结构采用实体单元模拟。水体采用势流体单元模拟，假设为正方体，边长取 30m，水位 23m 时水体积约为结构体积的 44 倍，有限元模型如图 6 所示。

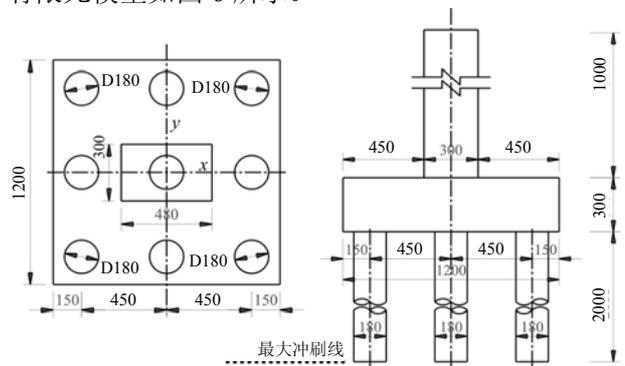


图 5 群桩基础布置图

Fig.5 Configuration of a group pile foundation

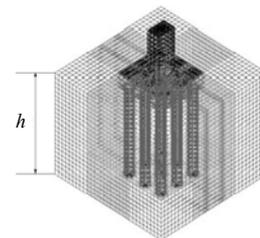
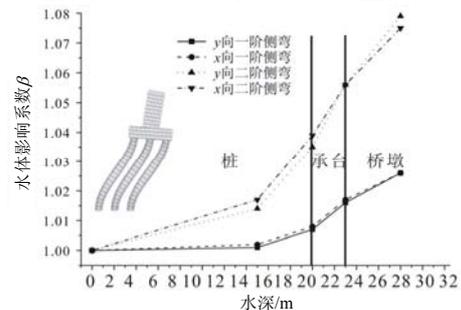


图 6 群桩基础数值模型

Fig.6 Numerical model of a group pile foundation

定义水体影响系数  $\beta^n = T_h^n / T_0^n$  来衡量水体对结构动力特性的影响程度，其中  $T_h^n$  为水深  $h$  米时结构第  $n$  阶模态的周期， $T_0^n$  为不考虑水影响时结构第  $n$  阶模态的周期。图 7 给出了不同水深下，水体对桥梁群桩基础-水耦合系统的各阶振型的影响。



(a) 侧弯振型

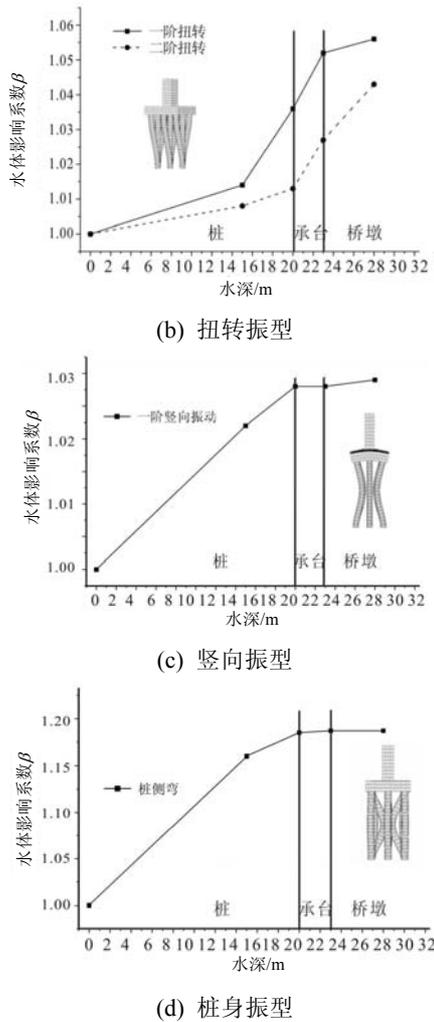


图7 考虑结构-水耦合作用对结构动力特性的影响

Fig.7 Influence of water-structure interaction on the structural dynamic characteristics

由图7可得：1) 考虑水-结构相互作用后，群桩基础的各阶振型周期延长；2) 水越深，水对结构动力特性的影响越大；3) 水深变化对不同振型的影响规律不一致，但水体影响规律均会在结构几何形状突变的地方(承台顶、底面)发生变化。

### 4 参数分析与讨论

由上节知，桩、承台的几何特征会影响结构-水相互作用。为了深入研究考虑结构-水相互作用后，桩基、承台变化与动水影响的关系，以第2节中所用单桩承台模型为研究对象，假设水体范围15m×15m，水深12m，此时结构刚好完全浸没于水中。以水对结构一阶侧弯振型的影响为研究对象。当桩径、正方形承台边长、承台厚度等参数分别变化时，计算水体对结构动力特性的影响。

图8给出了水体影响系数 $\beta^1$ 随桩径的变化情况；图9、图10则给出了水体影响系数 $\beta^1$ 随承台边长及承台厚度的变化情况。由图8发现，桩径变化对结构一阶振型动力特性影响明显，且水体影响随桩径增大逐渐下降。由图9、图10知，水对结构动力特性的影响随着承台厚度加厚而增大，而随承台边长加长而减小。这些结论对于指导工程实践有非常重要的指导价值。我们可以在满足结构需求的合理范围内通过对群桩基础进行合理设计，比如采用大直径桩、较为宽大且厚度较小的承台等措施，有效减小水对结构振动的影响。

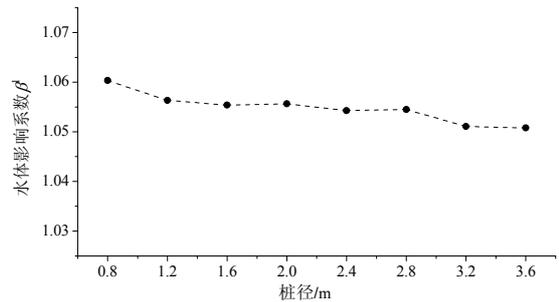


图8 水体影响系数随桩径的变化情况

Fig.8 The relationship between hydrodynamic influence and pile diameter

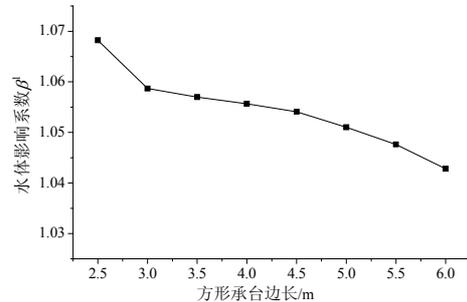


图9 水体影响系数随承台边长变化曲线

Fig.9 The relationship between hydrodynamic influence and cap width

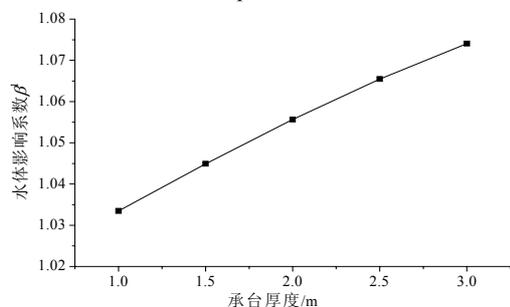


图10 水体影响系数 $\beta$ 随承台厚度变化曲线

Fig.10 The relationship between hydrodynamic influence and cap thickness

## 5 结论

通过对桥梁群桩基础-水耦合系统的动力特性进行数值模拟及分析研究, 本文得出以下结论:

(1) 利用完全数值方法分析深水桥梁群桩基础的动力特性有效且与试验数据吻合的, 但模型模态分析结果收敛性受流固边界两侧网格尺寸控制, 当相邻的水-结构单元的网格宽度比例接近或小于 1 时, 模态分析计算结果收敛。对于水边界无法精确模拟时, 建议将水体取为长方体, 水体体积宜取为浸没结构体积的 40 倍—70 倍。

(2) 水体-结构相互作用对深水群桩基础动力特性有明显影响, 水深越大, 影响越强, 且水面在结构几何突变位置处变化时, 水体影响的趋势也会产生明显变化。

(3) 桩基、承台的设计都会对水-结构相互作用产生影响, 可以通过对群桩基础的合理设计, 比如在满足结构需求的合理范围内, 采用大直径桩、较为宽大且厚度较小的承台等措施, 有效减小水对结构振动的影响。

### 参考文献:

- [1] Morrison J R, O'Brien M P, Johnson J W, Schaaf S A. The force exerted by surface waves on piles [J]. Petroleum Transactions, AIME, 1950, 189: 149—154.
- [2] MacCamy R C, Fuchs R A. Wave forces on piles: a diffraction theory [M]. Washington D C: US Army Beach Erosion Board, Technical Memorandum No.69, 1954.
- [3] Bhatta D D, Rahman M. On scattering and radiation problem for a cylinder in water of finite depth [J]. International Journal of Engineering Science, 2003, 41(9): 931—967.
- [4] JTGB/TB02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
JTGB/TB02-01-2008, Seismic design guidelines for highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 高永. 大型桥梁高桩承台群桩基础抗震能力研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
Gao Yong. Study on aseismic capacity of elevated pile-cap foundation of large bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [6] 戴大农. 流固耦合系统动力分析的若干基本问题与数值方法[D]. 北京: 清华大学, 1988.  
Dai Danong. Several basic issues and numerical methods for dynamic analysis of fluid-solid interacted system [D]. Beijing: Tsinghua University, 1988. (in Chinese)
- [7] Olson L G, Bathe K J. Analysis of fluid—structure interactions, a direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential [J]. Computer and Structure, 1985(21): 21—32.
- [8] Bathe K J. ADINA theory and modeling guide [M]. Watertown M A: ADINA R&D, 2004.
- [9] Olson L G, Bathe K J. An infinite element for analysis of transient fluid-structure interactions [J]. Engineering Computations, 1985, 2(4): 319—329.
- [10] 张敏. 桥墩与河水流固耦合振动分析[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2006.  
Zhang Min. Vibration analysis of solid-fluid interaction for the pier-river water [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2006. (in Chinese)