

深水高桩承台基础地震动水效应数值解析混合算法

魏 凯, 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: 针对桥梁深水高桩承台基础—水体耦合动力问题, 首先建立了深水高桩承台基础简化数值分析模型, 针对桩身, 给出了基于水下桩基尺度的桩身动水附加质量解析算法, 并计入群桩效应的影响; 针对承台, 提出了动水附加质量简化有限元计算方法, 依靠基于势流体单元的合理的流体动力学数值表达, 即考虑了承台真实几何尺寸, 又兼顾了其振动周期对承台动水效应的影响, 从而得到了地震作用下高桩承台基础地震动水效应数值解析混合算法. 以四桩高桩承台试验模型为研究对象, 利用该方法进行模态及时程分析, 通过与试验及其他数值、解析结果比较, 表明本算法与试验及完全数值方法吻合良好, 其计算精度与计算效率得到有效改善. 该研究对深水高桩承台基础的抗震分析和设计具有参考价值.

关键词: 深水桥梁; 高桩承台基础; 动水附加质量; 地震工程; 势流体单元

中图分类号: TU 311.3

文献标志码: A

A Numerical-analytical Mixed Method of Hydrodynamic Effect for Deep-water Elevated Pile Cap Foundation Under Earthquake

WEI Kai, YUAN Wancheng

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

Abstract: This paper focuses on the dynamic analyses of the deep-water elevated pile foundation in contact with water. A simplified analysis model of the pile foundation considering the hydrodynamic effect is proposed firstly. The numerical-analytical mixed method for earthquake induced hydrodynamic added mass is provided as follows: for piles, an analytical solution based on the scale of the underwater pile is given including the effect of pile group; for cap, a simple finite element method based on the potential-based fluid formulation is developed considering the geometry and vibration periods of the cap. The proposed mixed method is applied to a 4-pile

experimental specimen for the modal and time history analyses. The results agree well with the experimental data in comparison with the finite element solutions and other analytical solution in the literature. The method improves the calculation accuracy and efficiency and is a valuable reference for the seismic analysis and design of the deep-water elevated pile cap foundation.

Key words: deep-water bridge; elevated pile cap foundation; hydrodynamic added mass; earthquake engineering; potential-based fluid element

跨越江河、海峡和海湾深水桥梁的规划与建设, 给桥梁工程界带来巨大的机遇和挑战. 高桩承台基础因其造价低廉、施工方便在我国跨江海大跨度桥梁工程中得到了广泛应用. 前人通过对海洋钻井平台的研究^[1]发现, 柱状结构与水的相互作用会改变结构的动力特性, 进而影响结构在地震作用下的受力情况. 这一现象在深水桥梁高桩承台基础中同样存在^[2], 且因承台(如苏通大桥^[3]、东海大桥^[4])整体或多半位于水线以下, 更增加了地震动水效应对结构的影响.

Westergaard^[5]在1933年首先提出了用“附加质量”的概念求解水平地震作用下在垂直坝面产生的动水压力问题. 这一方法为地震反应中考虑结构与水的相互作用提供了最便捷的手段, 至今仍被各国规范广泛采用. Morison^[6]针对与波长相比尺度较小的细长柱体, 以表面光滑的刚性圆柱体为模型, 推导出了经典的波浪力解析公式 Morison 方程. 基于这一思想, 文献^[7-9]对桥墩—水耦合系统的地震响应进行了大量卓有成效的研究, 得出了很多有意义的结论及求解方法, 但上述成果多为研究单一悬臂柱体侧壁与水体的相互作用问题. 而深水群桩基础包含群桩和承台, 群桩之间的相互耦合效应不可忽

收稿日期: 2012-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51278376, 90915011); 同济大学土木工程学院光华基金

第一作者: 魏 凯(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震与振动. E-mail: 10weikai@tongji.edu.cn

通讯作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为桥梁抗震与振动. E-mail: yuan@tongji.edu.cn

略,且承台作为悬浮柱体,其流固耦合边界复杂,简单套用前述方法也会造成较大误差.文献[10]基于Morison方程提出了针对圆柱体承台的动水力简便分析方法,并结合振动台试验进行了验证;文献[6, 11]在动水效应计算中引入水中悬浮圆柱体横荡时的辐射、散射效应解析式^[12],通过经验公式进行形状修正,对矩形承台的地震动水问题进行了数值分析.近年来,基于有限元、边界元理论的一系列结构—水相互作用数值研究方法^[13],为复杂结构的流固耦合动力问题求解提供了有效手段,特别是基于势流体理论的流固耦合分析方法的提出,实现了对高桩承台基础—水耦合系统动力响应的精确数值分析^[2],但是面对拥有数十根桩的巨型群桩基础,三维实体建模及网格划分将十分困难,难以在全桥分析中实现.

鉴于研究对象的复杂性及解析、数值方法各自的优势,本文首先提出了深水高桩承台简化分析模型,基于此模型分别对圆柱体桩—水耦合及承台—水耦合系统的动水效应计算进行了研究.最后,通过对比本文方法与高桩承台模型水池试验、有限元、解析方法的模态、时程分析结果,对算法的准确性进行了验证.

1 高桩承台简化分析模型

考虑到深水高桩承台基础与水体耦合动力分析的复杂性,确定一个合理高效的有限元计算模型对考虑动水效应的地震分析非常重要.通过对本文第2节四桩试验模型建立结构全实体单元、全梁单元(承台简化为质心处质点)及图1所示实体、梁单元混合有限元模型,并将三种模型无水模态分析结果列于表1.图中, H_w 为水深, H_p 为桩高, H_c 为承台厚度, ρ_c 、 ρ_p 分别为承台、桩基材料密度, ρ_c^a 、 ρ_p^a 为承台、桩基动水附加质量密度.

图1模型与全实体模型精度相当,同时减少了运算规模.虽然桩基简化增大了承台—水竖向相互作用的面积,但考虑基础竖向振型对桥梁地震响应的贡献较小,因此这种简化是可接受的.考虑到动水附加阻尼项对于群桩基础影响较小^[7],本文未计入其影响.当假设水体为无黏、无旋、边界小变形及无限水体,且忽略承台与桩身动水效应间的影响,求解深水高桩承台基础地震作用下的动水效应即为分别确定考虑动水附加质量后水下桩基及承台的密度变化

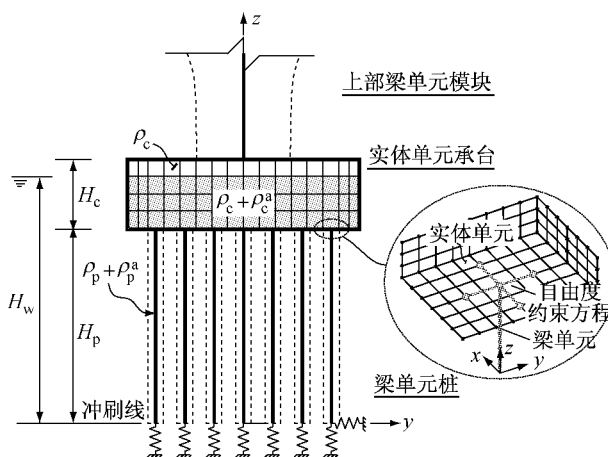


图1 深水高桩承台简化分析模型

Fig.1 Simplified finite element model of elevated pile group foundation in deep water

表1 不同有限元模型模态分析结果

Tab.1 Modal results of different finite element models

| 阶数 | 描述 | 实体模型 | 梁单元模型 | Hz |
|----|------|-------|-------|-------|
| | | | | 图1模型 |
| 1 | x向侧弯 | 3.080 | 3.123 | 3.086 |
| 2 | y向侧弯 | 3.084 | 3.126 | 3.089 |
| 3 | 扭转 | 7.009 | | 6.997 |

问题.

2 结构动水效应混合求解方法

2.1 桩身动水附加质量解析求解

桥梁桩基多为圆柱体,相比有限元分析中复杂的网格划分过程,解析方法更加简单实用.当进行地震作用下结构动水效应分析时,假设水体静止、柱体对波浪运动无显著影响,此时结构的振动频率即为波浪的入射频率,该波浪在结构上产生的效应即被认为是由地震产生的动水效应.根据Morison方程^[6],对直径为 D 的圆柱单桩,作用在桩身距水底高度为 z 处的动水附加质量为

$$m_a(z) = C_a \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水体密度; D 为桩径; C_a 为附加质量系数.Morison方程中,一般取为1.但是,对大跨桥梁的高桩承台基础来说,某些时候其桩径可达2.5 m以上^[3],这就带来了大尺度圆柱体的附加质量求解问题.Chopra等^[14]基于波浪方程精确推导了水中圆柱体的动力方程,桩身动水附加质量精确解为

$$m_a(z) = 4\rho_w \pi D \sum_{m=1}^{N_m} \frac{I_m}{2\lambda'_m H_w} E_m(\lambda'_m \frac{D}{2}) \cos(\alpha_m z) \quad (2)$$

式中: H_w 为水深, 当大于桩高 H_p 时, 取 $H_w = H_p$;

$E_m(x) = \frac{K_1(x)}{K_0(x) + K_2(x)}$, K_n 为第二类 n 阶修正贝

塞尔函数; $I_m = \int_0^{H_w} \cos(\alpha_m z) dz$, $\lambda'_m = \alpha_m =$

$\frac{(2m-1)\pi}{2H_w}$, $m=1, 2, 3, \dots, N_m$; N_m 为项数, 为保

证得到平稳收敛解, 建议取 50 项以上. 用函数 D/H_w 表示水下桩基尺度, 针对 $H_w = H_p$ 的情况, 通过 Matlab 对式(2)编程分别计算了桩基尺度 D/H_w 等于 0.2, 0.1, 0.05 和 0.02 时的动水附加质量系数 $C_a(z)$ 并绘于图 2. 同时, 通过对不同尺度的水下桩进行模态分析, 计算了采用 Morison 方程附加质量与采用 Chopra 方法附加质量计算所得频率的误差, 见表 2. 由分析知, 对于相对尺度较大 ($D/H_p > 0.1$) 的圆柱体桩, 结构对波动的影响不可忽略, 采用 Morison 方程频率 f_M 与采用 Chopra 解频率 f_C 相比有大于 5% 的误差. 但对于小尺度圆柱体, 则精度较高, 且便于使用.

因此, 本文给出了基于水下桩基尺度的动水附加质量计算方法, 同时为根据我国的《海港水文规

表 2 水下桩-阶频率随桩基尺度变化情况

Tab.2 The 1st frequencies as a function of the dimension of the immersed pile

| 桩基尺度 D/H_w | 一阶频率比 (f_M/f_C) | 误差/% |
|--------------|---------------------|------|
| 1/5 | 0.90 | 10 |
| 1/10 | 0.94 | 6 |
| 1/20 | 0.97 | 3 |
| 1/50 | 1.00 | 0 |

范》(JTJ 213—1998), 计入群桩效应的影响, 为便于有限元分析, 用附加密度表达

$$\rho_p^a(z) = 4K_g/(\pi D^2) \cdot m_a(z) \quad (3)$$

当 $D/H_w \leq 0.1$ 时, 将式(1)代入式(3), 当 $D/H_w > 0.1$ 时, 将式(2)代入式(3).

式中, K_g 为群桩系数, 同桩列方向还有相邻桩的间距 S 与桩径 D 之比值有关, 其取值见表 3.

表 3 群桩系数 K_g

Tab.3 Coefficient K_g for pile group effect

| 桩列方向 | S/D | | |
|-------|-------|------|-----|
| | 2 | 3 | 4 |
| 垂直于波向 | 1.50 | 1.25 | 1.0 |
| 平行于波向 | 0.85 | 0.90 | 1.0 |

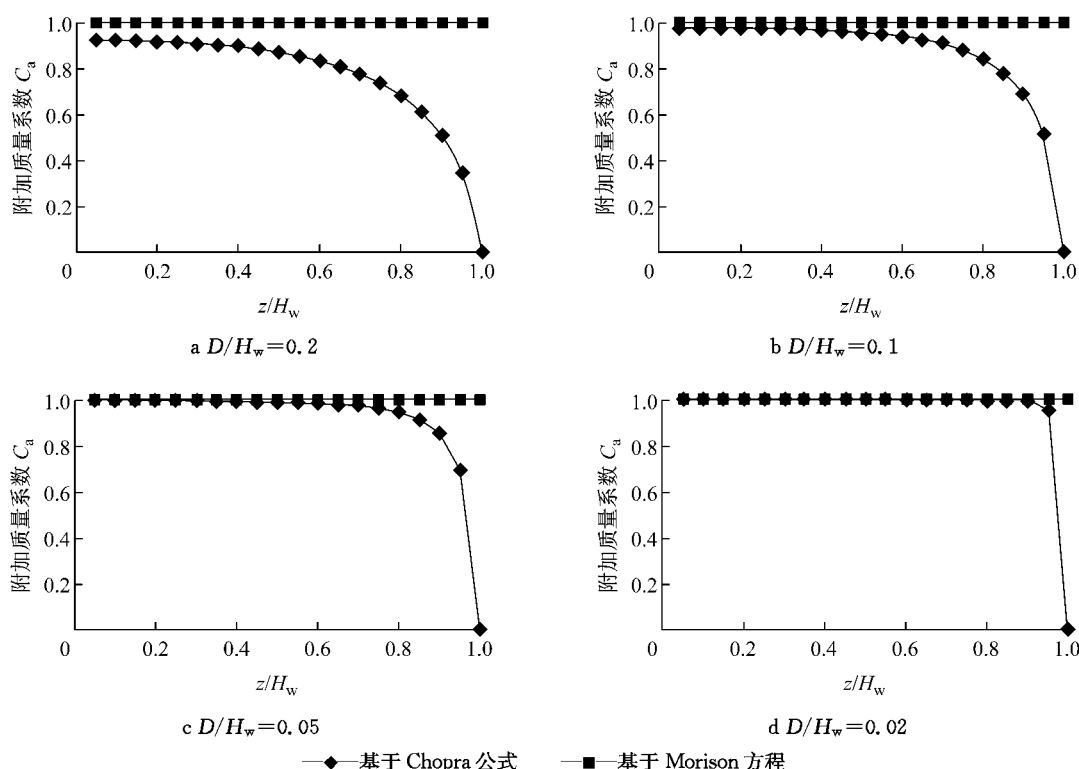


图 2 桩身附加质量系数 C_a 与桩基尺度 D/H_w 的关系

Fig.2 Relationship between C_a and D/H_w

2.2 承台动水附加质量数值求解

根据文献[11-12]知, 承台的动水附加质量不仅与承台迎水面积、水深有关, 还与承台振动周期相

关. 因此若想准确计算动水附加质量, 需满足以下条件: ① 合理的流体动力学表达; ② 符合真实承台外形尺寸; ③ 拥有相同的无水振动周期. 根据上述需

求,结合势流体单元在解决复杂流固耦合系统动力问题上的强大功能^[2],本文提出采用图3所示三维承台—水耦合模型对承台动水附加质量进行计算,图中 B 为水体宽度, m_b 为虚拟梁密度;承台完全依照真实承台进行三维实体建模,避免了承台边界条件简化对结果造成的误差;下部结构采用与桩同长虚拟梁单元,通过合理设置虚拟梁的刚度,能实现对

承台振动特性的模拟.水体采用势流体单元建模,通过在承台与水体间设置流固耦合接触,实现对该耦合系统的模态分析,在避开复杂数学解析计算的同时,计算该模态下承台的动水附加质量.对于水体宽度 B ,本文建议按文献[13]取大于等于2倍水深以近似模拟无限水体.

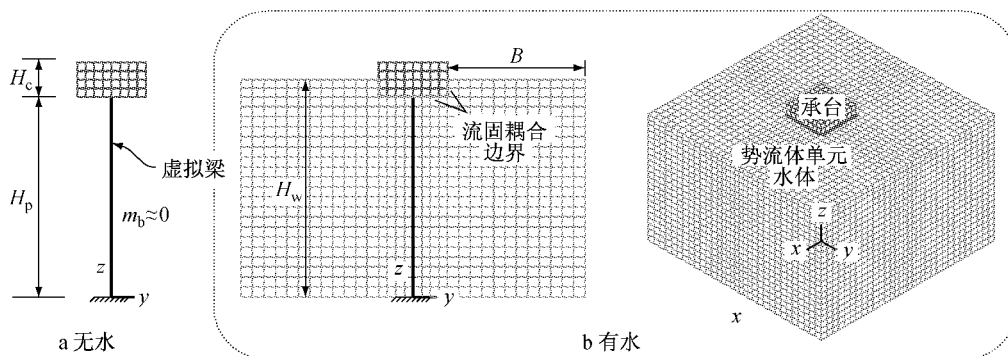


图3 承台动水附加质量求解模型

Fig.3 Analysis model for the added mass of the cap

(1) 图3简化模型参数确定

为使图3无水模型具有与原高桩承台基础有相同的无水振动周期 T_n ,需要首先确定虚拟梁刚度.鉴于虚拟梁与上部刚性承台的运动会在虚拟梁顶同时产生转角和位移,二者同时具有弹性、惯性耦合的特性,试图将其简化为单自由度体系进行分析是行不通的,因此虚拟梁刚度按如下步骤确定:

当虚拟梁密度为0时,无水模型自振周期可以写为

$$T_n = \frac{2\pi}{a_n} \sqrt{\frac{M_c}{EI}} \quad (4)$$

式中: T_n 为第 n 阶周期; a_n 为第 n 阶振型系数; M_c 为承台总质量; E 为虚拟梁刚度; I 为虚拟梁截面惯矩(对于三维梁单元包含抗弯惯矩 I_{xx} , I_{yy} 及抗扭惯矩 I_{xy} 三项).假设虚拟梁截面的初始截面惯矩为1,可以通过数值计算得到其无水状态下不同阵型的自振周期 T'_n .根据式(4),当简化模型在无水情况下目标自振周期为 T_n 时,虚拟梁截面惯矩 I 为

$$I = \left(\frac{T'_n}{T_n} \right)^2 \quad (5)$$

将所得截面惯矩定义在下一步有水模型的虚拟梁上,完成模型确定.

(2) 动水附加质量数值计算

将承台有水状态下第 n 阶振型的自振周期记为 T_{nw} .围绕上述模型建立水体,通过对有水模型进行模态分析,可得到承台简化模型有水状态下各振型

的自振周期 T_{nw} ,此时,承台的实际质量为 $M_c + M_a$.根据文献[7]的试验验证,水中与空气中结构一阶阵型基本保持不变,即近似认为振型系数 a_n 在空气中及水中保持不变,故有

$$\frac{M_c + M_a}{M_c} = \left(\frac{T_{nw}}{T_n} \right)^2 \quad (6)$$

从而,可得承台水面以下部分的(承台水下部分体积为 V')附加密度

$$\rho_c^a = \frac{M_c}{V'} \left[\left(\frac{T_{nw}}{T_n} \right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

以上即为利用本算法进行结构—水体耦合系统模态分析的基本流程.当进行考虑承台动水效应的地震时程反应分析时,可按以下步骤计算:①首先对无水结构进行时程分析;②取承台迎水面中点的加速度时程进行傅里叶变换,根据频域分析结果确定承台在该地震波下的峰值周期;③以此作为简化模型的目标自振周期,按照式(4)~(7)求得此时的承台动水附加质量;④根据附加密度,修正结构模型,重新进行时程分析即得到结构在考虑动水效应时的地震响应.

3 方法验证

3.1 水池试验

为验证本文算法的正确性,作者在一座 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ (长、宽、高)砖混水池中对如图4所示

高桩承台模型进行了水深为 0.30、0.75、1.15、1.55、1.75、1.90 和 2.05 m 时的模态试验。模型由 4 根钢管桩、混凝土承台(为便于焊接,外围及下侧采用 1 cm 厚钢板)以及钢筋混凝土桥墩三部分组成,结构尺寸详见图 4。混凝土密度为 $2\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为 22 GPa;钢材密度为 $7\,830\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为 210 GPa;水体密度为 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,压缩模量为 2.07 GPa。为测得结构沿图 4a 所示 x 、 y 向一阶侧弯及一阶扭转模态,分别在模型 x 、 y 面布置 6(共计 12)处加速度传感器,分别位于桩身 1/2、3/4 处,承台中央、边沿处,墩顶及其中央位置。水下拾振采取普通传感器外包硅胶防水套实现。使用单点激励,多点拾振,基于数据采集和信号处理(DASP)系统进行信号采集与分析,采样频率 400 Hz,采样时间 20 s。

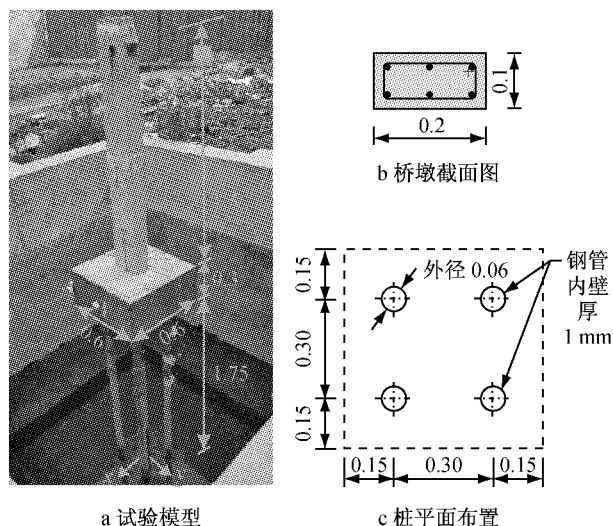


图 4 四桩高桩承台试验模型(单位:m)

Fig.4 4-pile specimen of elevated pile group foundation (unit: m)

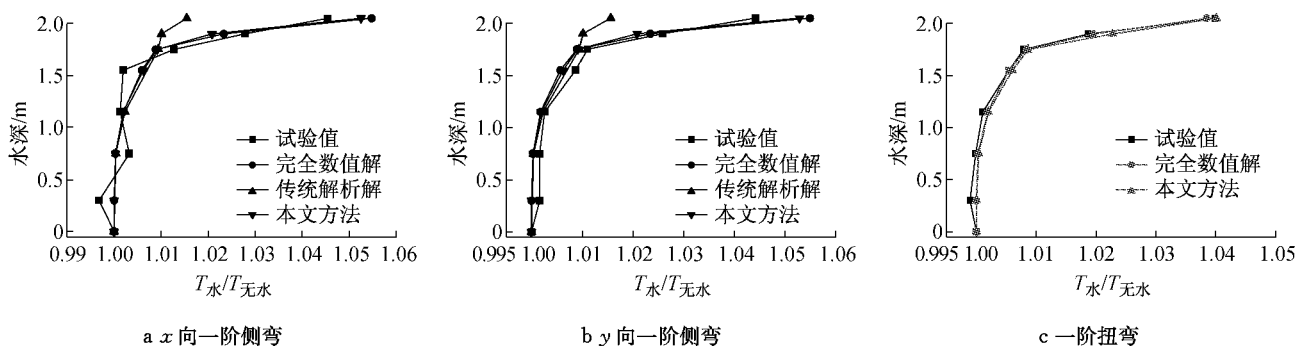


图 6 模型周期比 T_w/T_{w0} 随水深变化情况

Fig.6 The periods of the model as a function of the water levels

化上完全吻合,计算精度较高,这也说明第 1 节提出的高桩承台基础简化模型及其假设是合理可靠的。而文献[11]方法在承台-水体耦合作用的计算上与试验值出入较大,仅仅基于辐射和散射计算承台附

3.2 模态结果对比分析

建立图 5a 所示简化分析模型,根据本文算法,计算了不同水深情况下结构的 x 向侧弯、 y 向侧弯、扭转振动周期。因为模型桩基尺寸, $S/D=5>4$,群桩系数取 1;当水深为 0.30 m,水下桩基尺度为 0.2,桩基附加质量用式(2)计算,此时,需要细化梁单元,根据各单元中点处的附加密度分别进行模型定义;对其他水深则用式(1)计算。作为验证,利用 ADINA 软件建立了试验模型在不同水深下的势流体单元完全数值模型(图 5b)并进行频率分析;基于文献[11]方法建立图 5c 所示简化模型得到了模型 x 、 y 向侧弯频率。为消除各方法无水模态的误差,使用结构考虑水体的周期 T_w 与无水周期 T_{w0} 的比值表征周期随水深的变化情况,并将试验、本文方法、完全数值方法和文献[11]方法得到的结构 x 向一阶侧弯、 y 向一阶侧弯、扭转振型的结果绘于图 6。

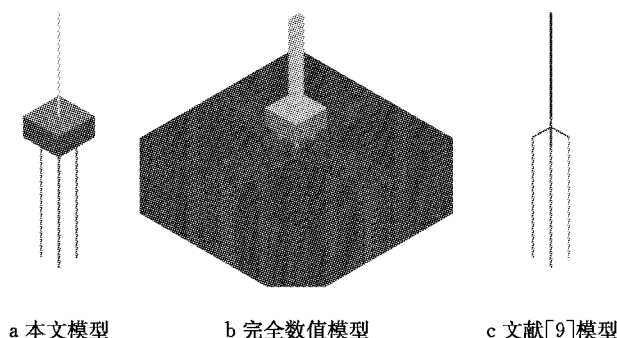


图 5 四桩高桩承台试验数值分析模型

Fig.5 Numerical models for the 4-pile specimen

由图 6 知,结构各阶周期随水深增大而增加,且承台与水体相互作用对结构周期的变化贡献最大。本文方法与试验及完全数值解在三阶振型的周期变

加质量低估了水体对承台的影响。

3.3 时程分析结果比较

以水深为 1.90 m 时的四桩试验模型为对象,沿 y 向输入 Elcentro 波,峰值加速度 0.26 g (g 为重力

加速度),利用图 5a 简化模型与图 5b 完全数值模型分别进行地震反应时程分析,两模型均采用 5% 的瑞利阻尼. 图 7 所示为两方法得到的墩顶及承台中心位移及加速度时程曲线. 通过对比发现,本文算法与完全数值模型计算得到的位移、加速度结果吻合良好,方法在时程分析中同样具有较高精度. 此外在计算效率方面,使用一台配置四核 2.5 GHz 处理器、8

G 内存的计算机,基于完全数值模型进行时程计算约耗时 1 820 s,而本文算法基于同样网格划分的简化模型从首次时程分析求解附加质量到得到二次时程分析得到结果,仅耗时 830 s,在相同精度的情况下,计算效率提高一倍还多. 且随着分析模型的单元增多,性能提升越明显.

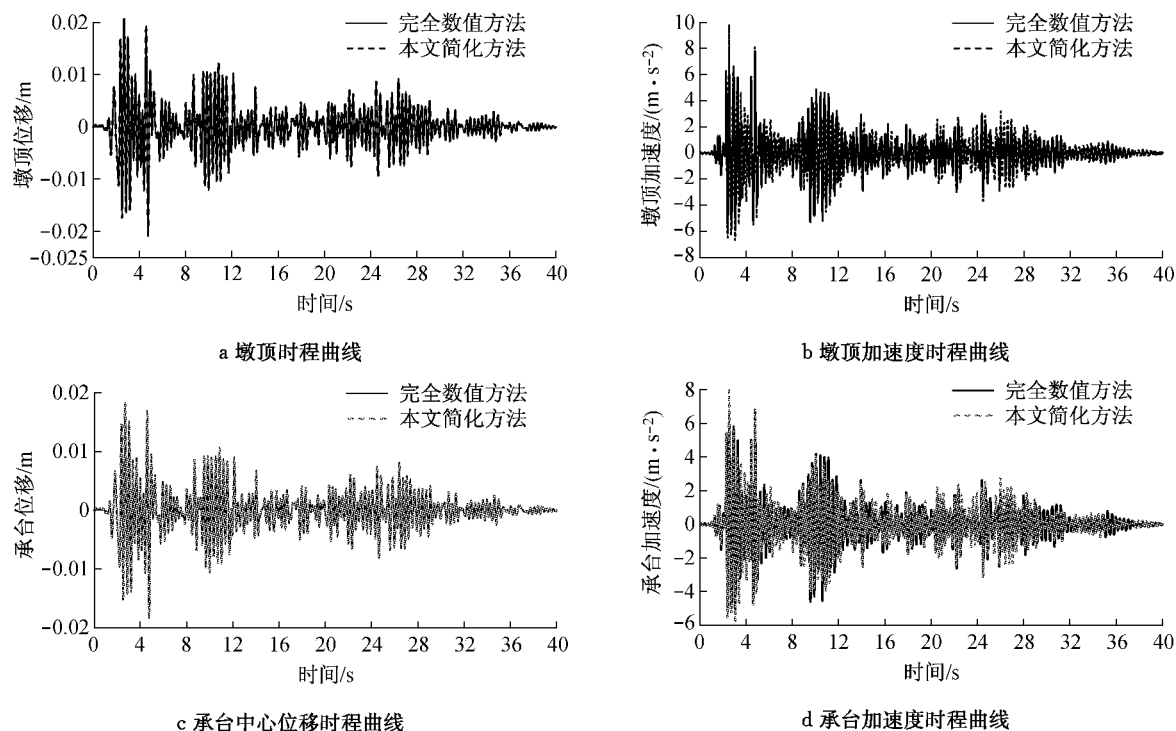


图 7 时程分析结果比较

Fig.7 Comparison of the time-history results

4 结论

本文在提出深水群桩基础考虑动水效应时的简化地震分析模型的基础上,结合解析及有限元数值方法各自的优势,给出了深水高桩承台基础地震动水效应数值解析混合算法. 算法即考虑了桩基尺度、承台真实几何尺寸,又兼顾了结构振动对地震动水效应的影响. 通过利用本文方法对四桩试验模型进行模态及时程分析,并与试验数据及其他数值、解析结果比较发现,算法很好地消除了传统高桩承台基础动水解析方法^[11]的误差,同时,大大缩减了有限元数值方法的工作量,从而能够高效精准地对地震作用下深水桥梁高桩承台—水耦合系统的动水效应进行计算. 此外,该算法可以方便地与基于梁单元的桥梁抗震分析方法相结合,既能考虑复杂的上部结构,又能计入桩土相互作用的影响,从而可以对深水桥

梁全桥的多相耦合地震响应进行快速而准确的分析. 考虑到由于目前水下地震模拟振动台的试验结果非常匮乏,本文研究成果对于理解桥梁深水高桩承台基础的地震响应及其抗震设计都具有较大参考及应用价值.

参考文献:

- [1] 尚久铨,杨连第,单文秀. 导管架式海洋平台模型的静态试验与计算[J]. 振动与冲击,1990,9(1):22.
SHANG Jiuquan, YANG Liandi, SHAN Wenxiu. Static experiments and analyses of the tube supported offshore platform model[J]. Journal of Vibration and Shock, 1990, 9(1): 22.
- [2] 魏凯,伍勇吉,袁万城,等. 桥梁群桩基础—水耦合系统动力特性数值模拟[J]. 工程力学,2010,28(增刊 I):195.
WEI Kai, WU Yongji, YUAN Wancheng, et al. Numerical dynamic analysis for water-pile group bridge foundation

(下转第 396 页)