

文章编号: 1005-0523(2015)02-0018-05

液固耦合作用对不同截面深水桥墩的自振特性影响研究

卢华喜, 周珍伟, 王漪璇

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:介绍了深水桥墩液固耦合模型在 ANSYS 软件中模型的建立。利用 Morison 方程提出的附加质量概念考虑动水压力对桥墩作用, 采用 3 种截面积相等的不同类型桥墩, 即淹没水深相同时, 所受动水压力相等。利用 ANSYS 建立实体单元与 Fluid30 单元来分析液固耦合作用对不同类型桥墩的自振特性影响。通过实例分析发现液固耦合对桥墩自振频率的影响是显著的, 桥墩完全被水淹没时, 其自振频率最大下降了 24.2%。进一步研究发现相同截面面积的不同类型的桥墩, 在相同水深时, 由于其液固耦合接触面沿坐标轴方向上的正投影面积大小不一样, 造成桥墩沿该方向上自振频率下降量大不相同。且沿坐标轴方向正截面面积越大, 桥墩沿该轴方向上的弯曲自振频率和扭曲自振频率下降越大。

关键词:有限元方法; 深水桥墩; 液固耦合; 自振频率

中图分类号: U441.3; TU311.1

文献标志码: A

随着我国经济的快速发展, 人们对交通快捷的依赖越来越高, 建立了大量的跨海跨江深水桥梁。这些桥梁的桥墩大多处在深水之中。桥墩与水接触, 流体与桥墩存在相互作用和相互影响关系, 即在水流作用下, 桥墩结构发生变形, 同时桥墩的变形又反过来作用于水流, 从而改变了水的流场域。这种水与桥墩的相互运动不仅会影响结构的动力特性, 还会影响结构的动力响应。

高学奎等^[1]在 Morison 方程的基础上, 用附加质量来考虑水的影响, 分析了深水桥墩地震反应。李悦等^[2]基于势流体理论, 分析了动水对矩形截面桥墩在地震作用下的动力响应影响。黄信等^[3]采用 Morison 方程和辐射波浪理论建立了动水压力计算方法, 研究了动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响。柳春光等^[4]基于 Morison 非线性方程, 采用 Ariy 波浪理论, 建立了考虑液固耦合作用的深水桥墩有限元模型, 并进行了地震作用下的非线性分析。卢华喜等^[5]以 ANSYS 为计算平台, 建立了桥墩—水流固耦合有限元模型, 计算了不同几何尺寸和淹没比情况下桥墩的自振频率。刘保东等^[6]采用 Morison 方程, 利用有限元模型, 计算分析含水率与动水压力对深水桥墩地震影响的影响程度。研究表明动水压力增大了桥墩地震响应。这些研究中, 都直接或者间接地考虑了深水桥墩在地震作用下的液固耦合作用。然而对深水桥墩不受外界扰动的前提下是否应该考虑液固耦合作用却鲜有人研究。本文用 ANSYS 软件中的流体单元来模拟水体, 用实体单元来模拟桥墩, 用 FSI 标签来指定和标记液固耦合接触面。采用合理的有限元单元模型, 合适的网格划分尺寸和水域大小, 主要研究水体对桥墩动力特性的影响。为了增强对比性, 固体模型采用等截面积的圆柱型桥墩、圆端型桥墩以及矩形桥墩, 即淹没水深相同时, 各模型入水深度相同时, 忽略动水阻力的影响, 可近似为所受动水压力相等。采用相等的水域体积来研究不同的淹没深度对不同截面桥墩的影响。以期得到液固耦合作用深水桥墩振动的影响规律。

1 有限元建模单元的选择

1.1 模型的基本假定

建立单元模型进行墩—水模拟时, 应假设实体桥墩材料是各向同性的, 且忽略温度的影响, 材料的力

收稿日期: 2014-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50968007); 江西省青年科学家培养对象计划(2010DQ01800)

作者简介: 卢华喜(1976—), 男, 副教授, 博士, 研究生导师, 主要研究方向为土与结构动力相互作用。

学性能不随时间的变化而变化。假设流体是可压缩的、非粘性的,且没有平均流量,并且在流体中平均密度和压力保持不变^[7]。

1.2 单元选择

在建立有限元模型之前,一定要先分析实际结构的受力和变形特性,然后根据这些特性来选择与其力学性能相适应的单元模型,这样建立的模型才符合结构的实际性能。本文研究的是墩—水结构,桥墩结构建模选用SOILD45单元,如图1所示。该单元适用于三维实体结构模型,该单元由8个节点结合而成。每个节点有 X,Y,Z 三个方向平移的自由度,且具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变的特征,可以获得简化的、综合的微控选项。水体单元采用Fluid30和Fluid130单元模拟。其中用Fluid30来模拟与桥墩接触的水体和非接触水体两部分,该单元具有成本小、精度高的优点。Fluid130用来构造非接触水体的无限外壳,一般称之为第二阶吸收边界。当压力波传递到此水域边界时,将会被边界单元吸收,然后以最小的反射波被流体域吸收^[8]。建立模型后,在流体和固体交界面流体的一侧,用FSI标签来指定液固耦合截面来实现结构与流体的耦合作用,在进行模态分析时,由于流固耦合单元的单元矩阵为非对称矩阵,因此在模态分析中采用UNSYM方法。

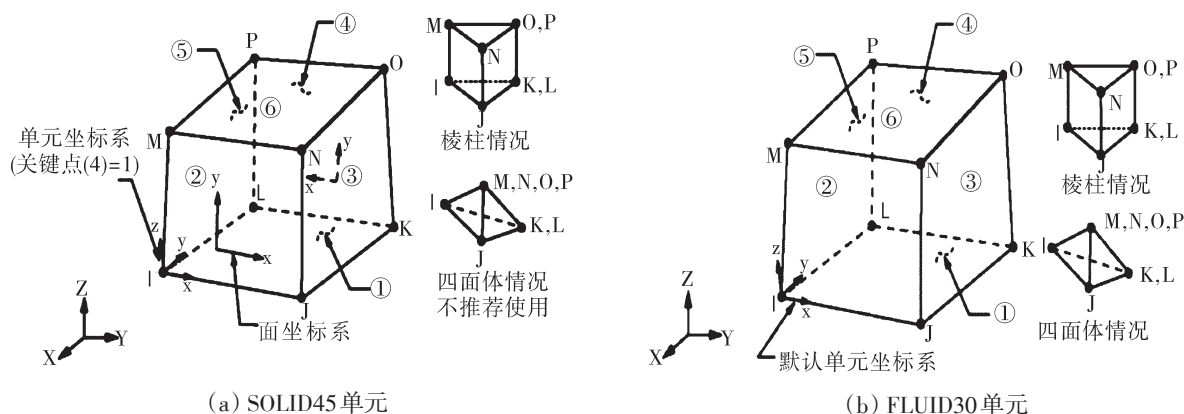


图1 单元几何图

Fig. 1 The geometric figure

2 算例及计算结果

本文采用等截面面积的圆形、圆端形、矩形截面3个不同的深水桥墩,高度均为60 m,截面面积为 12.56 m^2 ,圆柱型桥墩采用半径为2 m圆形截面,圆端型桥墩截面采用中长1.832 m,两边为半径1.5 m的半圆。矩形截面桥墩采用短边为2.5 m,长边为5.025 m的矩形截面。改变桥墩的入水深度,分析研究其前4阶自振频率。桥墩周围水体的范围取半径为20 m的圆柱体水域,材料特性取混凝土密度 $\rho_1=2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;弹性模量 $E=3.0\times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比 $\nu=0.2$;水体的密度为 $\rho_2=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;水中的声速 $\nu=1460 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不考虑桥墩下面桩基和地基的影响,也忽略桥面对桥墩的约束作用和相邻桥墩的相互作用。因此,桥墩模型底部视为固定端,即底部固结,顶部为自由端,即将其近似看作为悬臂梁来分析,其水平面上施加压力为零的约束。表1~表3分别是桥墩在不同淹没水深下的自振频率值。ANSYS建立的圆柱型模型如下图2所示。

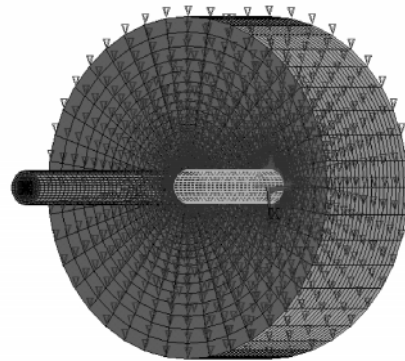


图2 水深20 m时圆柱型桥墩有限元模型

Fig.2 The finite element model of cylindrical pier in 20 m depth

表1 圆柱型桥墩自振频率
Tab.1 Natural frequency of cylindrical pier

方向	无水/Hz	满水/Hz	频率最大下降率/%
沿 x 方向弯曲	0.548 04	0.469 84	14.3
沿 y 方向弯曲	0.548 04	0.469 84	14.3
沿 x 方向扭曲	3.389 10	2.909 60	14.1
沿 y 方向扭曲	3.389 10	2.909 60	14.1

表2 圆端型桥墩自振频率
Tab.2 Natural frequency of mid-round pier

方向	无水/Hz	满水/Hz	频率最大下降率/%
沿 x 方向弯曲	0.684 31	0.612 90	10.4
沿 y 方向弯曲	0.440 69	0.352 20	20.1
沿 x 方向扭曲	4.199 60	3.772 00	10.2
沿 y 方向扭曲	2.738 30	2.194 10	19.9

表3 矩形桥墩自振频率
Tab.3 Natural frequency of rectangular piers

方向	无水/Hz	满水/Hz	频率最大下降率/%
沿 x 方向弯曲	0.396 94	0.300 80	24.2
沿 y 方向弯曲	0.794 08	0.715 55	9.9
沿 x 方向扭曲	2.470 40	1.883 20	23.8
沿 y 方向扭曲	4.834 10	4.372 80	9.5

由图3可以看出桥墩的淹没深度在20 m以下时,桥墩沿 x 方向弯曲的自振频率下降缓慢。当水深超过20 m时,频率下降幅度增大,其中矩形桥墩下降最快,圆柱型桥墩次之,圆端型桥墩最末。其中桥墩以 x 轴为法线方向的截面面积为矩形桥墩最大,圆端型最小。当水深达到60 m时,桥墩自振频率下降量皆达到最大。从表1~表3可以看到,与其在空气中的自振频率相比,其中矩形桥墩自振频率下降率达到了24.2%,圆柱型下降率14.3%,圆端型下降率10.4%。

从图4中看出桥墩的淹没深度在20 m以下时,桥墩沿 y 方向弯曲的自振频率的下降也很缓慢,水深超过20 m后逐渐增大,其中自振频率下降趋势大体一致,圆端型桥墩下降最快,矩形桥墩下降最为缓慢。其中圆端型桥墩以 y 轴为截面法线方向的截面面积最大,矩形桥墩最小。当水深为60 m时,从表1~表3可以看到,与桥墩在空气中的自振频率相比,圆端型桥墩沿 y 轴自振频率的下降率达到了20.1%,圆柱型桥墩下降率最大达到了14.3%,矩形桥墩自振频率下降率最小达到9.9%。综上可以看出,桥墩沿 x 方向和 y 方向弯曲自振频率的下降量都与其液固耦合接触面积有关,接触面积越大,其外法线方向的自振频率下降越大,反之亦然。

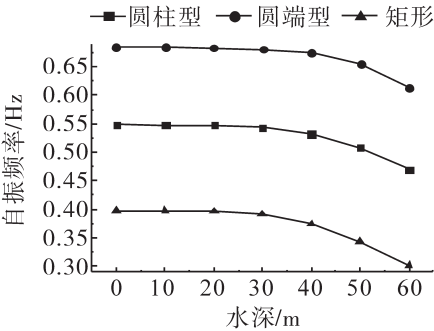


图3 桥墩沿 x 方向弯曲自振频率
Fig.3 Natural frequency of piers bending along the x direction

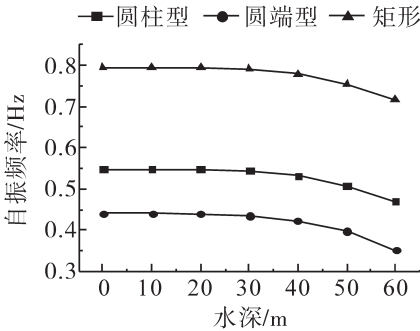
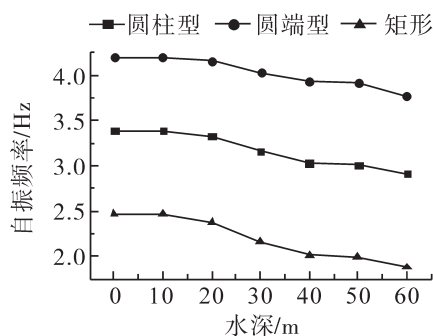
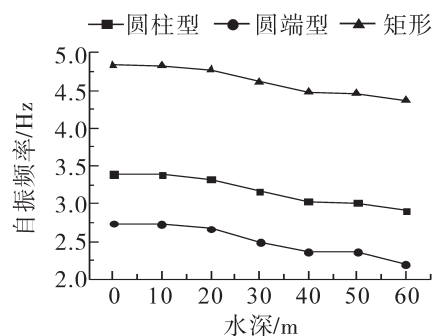


图4 桥墩沿 y 方向弯曲自振频率
Fig.4 Natural frequency of piers bending along the y direction

由图5可以看出桥墩的淹没深度在10 m以下时,桥墩沿 x 方向扭曲的自振频率下降非常缓慢,当水深超过10 m时,其自振频率下降幅度明显增大,但水深在40~50 m之间三者频率下降都非常缓慢。在水深达到60 m时,桥墩沿 x 方向扭曲的自振频率下降量皆达到最大,其中矩形桥墩自振频率下降最大,圆柱型桥墩次之,圆端型桥墩下降率最小。从表1~表3可以看到,与桥墩在空气中的自振频率相比,矩形桥墩自振频率下降率达到了23.8%,圆柱型下降率14.1%,圆端型下降率10.2%。其中桥墩以 x 轴为法线方向的截面面积为矩形桥墩最大,圆端型最小。而其 x 轴方向上的抗扭刚度为矩形桥墩最大。

从图6可以看到桥墩沿 y 方向扭曲的自振频率下降趋势与其沿 x 方向扭曲的下降趋势大体一致,同样在水深在40~50 m之间桥墩自振频率下降突然放缓,在水深达到60 m时自振频率下降量皆达到最大。其中圆端型桥墩下降最快,矩形桥墩下降最为缓慢。其中圆端型桥墩以 y 轴为截面法线方向的截面面积最大,矩形桥墩最小。其中圆端型桥墩的抗扭刚度最大。当水深为60 m时,从表1~表3可以看到,与桥墩在空气中的自振频率相比,圆端型桥墩沿 y 轴自振频率的下降率达到了19.9%,圆柱型桥墩下降率最大达到了14.1%,矩形桥墩自振频率下降率最小达到9.5%。由此我们可以得到,桥墩沿 x 方向和 y 方向扭曲自振频率的下降量都与其液固耦合接触面积有关,接触面积越大,其外法线方向的自振频率下降越大,尽管其抗扭刚度最大。由此可知桥墩与水接触面积大小为桥墩扭曲自振频率下降的决定性因素。

图5 桥墩沿 x 方向扭曲自振频率Fig.5 Natural frequency of piers distortion along the x direction图6 桥墩沿 y 方向扭曲自振频率Fig.6 Natural frequency of piers distortion along the y direction

3 结论

利用ANSYS软件建立实体单元与Fluid30单元的耦合来研究墩—水耦合作用下桥墩的自振特性。研究了3种不同截面桥墩在理论所受动水压力相同的情况下,桥墩分别沿 x 、 y 方向弯曲的自振频率以及沿 x 、 y 方向扭曲的自振频率下降程度的分析。可以得出如下结论:

1) 桥墩在深水之中,即使不受其他外力作用,在水达到一定深度时,流固耦合作用对其自振频率产生的影响依旧十分显著,不可忽略。

2) 相同截面面积的不同类型的桥墩,在相同水深时,即所受的动水压力相同,由于其液固耦合面沿坐标轴的正投影面积大小不一样,造成桥墩自振频率下降率大不相同。且其坐标轴方向正截面面积越大,桥墩沿该轴方向的弯曲自振频率和扭曲自振频率下降越大。

参考文献:

- [1] 高学奎,朱晞.地震动水压力对深水桥墩的影响[J].北京科技大学学报,2006,30(1):56-58.
- [2] 李悦,宋波.地震时作用于深水桥墩上的动水力及对桥墩动力响应的影响[J].北京科技大学学报,2011,33(3):389-390.
- [3] 黄信,李忠献.动水压力作用下深水桥墩非线性地震响应分析[J].土木工程学报,2011,44(1):66-73.

- [4] 柳春光,齐念,考虑液固耦合作用的深水桥墩地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(4):434-436.
- [5] 卢华喜,李军,周叶威,高速列车引起的深水桥墩流固耦合的振动分析[J]. 华东交通大学学报,2014,31(2):27-29.
- [6] 刘保东,李鹏飞,高超,不同水深情况下水中桥墩地震响应研究[J]. 土木工程学报,2010,43(S):200-203.
- [7] 杨万里,深水桥墩液固耦合作用下的自振特性研究[J]. 四川建筑科学研究,2012,38(3):164-168.
- [8] 张敏.桥墩与河水流固耦合振动分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2006:40-43.

Impacts of Fluid-Solid Coupling Interaction on Natural Vibration of Deep-water Piers with Different Sections

Lu Huaxi, Zhou Zhenwei, Wang Yixuan

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper mainly analyzes the establishment of liquid-solid coupling model of deep-water piers in ANSYS software. Through the additional quality resulting from Morison equation, it explores the hydrodynamic pressure on three different types of piers with equal cross-sectional areas, which would subject to the same hydrodynamic pressure in water of the same depth. Then, it establishes a solid unit and Fluid30 unit by use of ANSYS to analyze effects of liquid-solid coupling on vibration frequency of different piers. Through the case study, it found out that effects of liquid-solid coupling on the pier's vibration frequency was significant and its biggest decrease of the vibration frequency was 24.2% when the pier was completely submerged in water. Further research showed that for the different piers of the same cross-sectional areas in water of the same depth, the vibration frequency declined differently due to different liquid-solid coupling orthographic projection of the contact surface area along the axis direction. It maintains that the greater the coordinate axis cross-sectional area along the positive direction is, the more the bending vibration frequency and distortional natural frequency along the axis decreases.

Key words: finite element method; piers in deep water; fluid-solid coupling; vibration frequency

(责任编辑 王建华)