

文章编号:1005-0523(2014)02-0026-06

高速列车引起的深水桥墩流固耦合的振动分析

卢华喜, 李 军, 周叶威, 梁平英

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究水体对桥墩结构振动特性的影响,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,分析了桥墩在高速列车作用下,不同水深对其振动特性的影响。分析后得出结论:当水体深度小于墩高50%时,桥墩的自振频率降低不明显;当水体高度大于墩高50%时,桥墩自振频率出现明显降低。高速列车作用下,桥墩墩顶纵向位移出现极值的时间,随淹没比的增加向后推迟;桥墩墩顶纵向加速度随淹没比的增加而增加。因此,高速列车作用下,水体对于涉水铁路桥梁桥墩的自振与动力振动特性有着明显的影响,且这种影响不可忽视。

关键词:自振频率;激振力;流固耦合;纵向位移;纵向加速度;

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

当前涉水铁路桥梁的建设,基本都是在向深水和跨度发展,在已建和在建的涉水铁路桥梁中,桥墩入水深度最深已达168 m。当前的涉水铁路桥梁设计中,大部分将桥墩所处的环境视为静态环境来考虑,即将桥墩周围的流体考虑为空气而不是水体^[1]。但实际上,涉水铁路桥梁的桥墩特别是深水桥墩都是浸没在不同深度的水中,在高速列车的作用下,这些处于深水中的桥墩会发生一定振动和变形,并引起周围水体的晃动,水体又以动水压力的形式反作用于桥墩,改变桥梁墩身的振动和变形状态,这种作用与反作用伴随着高速列车的通过。桥墩作为桥梁的下部承载结构,对整个桥梁的安全和稳定起着至关重要的作用。因此,深入研究桥墩在考虑水体的影响下自振与动力振动特性,对桥墩乃至整座桥梁结构安全和稳定是至关重要的。本文主要分析在高速列车作用下,桥墩与外部水体流固耦合的振动问题,使用ANSYS有限元软件建立桥墩-水流固耦合有限元模型,分析得出不同水深情况下桥墩的自振和动力振动特性。

1 有限元模型的建立

为了研究水体对桥墩振动特性的影响程度,本文选用几种几何尺寸不同的桥墩模型进行模拟分析,桥墩的材料属性取弹性模量 $E=3.0\times10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu=0.2$,密度 $\rho_1=1\,460\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,且桥墩底部为固定端,梁体对墩顶面有一定的约束作用,故墩顶施加弹性约束。由于桥墩周围水域的宽度相对桥墩可以认为是无限大的,所以在建立水体模型时,取水域半径为桥墩界面半径的5倍较为合适^[2],水体的材料属性取密度 $\rho_2=1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,水中的声速取 $V=1\,460\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,吸收系数 $\beta=0.8$ 。

利用ANSYS有限元软件中的Solid45单元来模拟实体桥墩部分,Fluid30流体单元来模拟水体部分。当KEYOPT(2)=0时,流体单元与结构单元接触,可建立与桥墩结构相接触的水体模型;当KEYOPT(2)=1时,流体单元与结构单元没有接触,可建立没有与桥墩结构直接接触的水体模型。Fluid30单元还必须和Fluid130单元联合使用,用Fluid130单元构造包围Fluid30单元的无限外壳,此外壳被认为是第二阶吸收边

收稿日期:2013-09-20

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,研究方向为地基—基础—上部结构动力机组作用研究。

界。当压力波(水波)到达这个边界时,将会被吸收,然后以最小的反射吸收到流体域内^[3-9]。选择Fluid30流体单元作为水体模型,模拟与桥墩结构流固耦合的模态频率分析时,应该满足以下假定:假设水体是可压缩的、非粘性的、无平均流量且不考虑水体的热传导性。模型建立完成后,在桥墩与水体的接触面上施加FSI流固耦合标签,即可实现流固耦合,在水体外围施加压力为零的边界条件。流固耦合有限元模型和模型截面类型分别见图1、图2。



图1 桥墩-水流固耦合有限元模型

Fig.1 The finite element model of bridge pier-water fluid-solid interaction

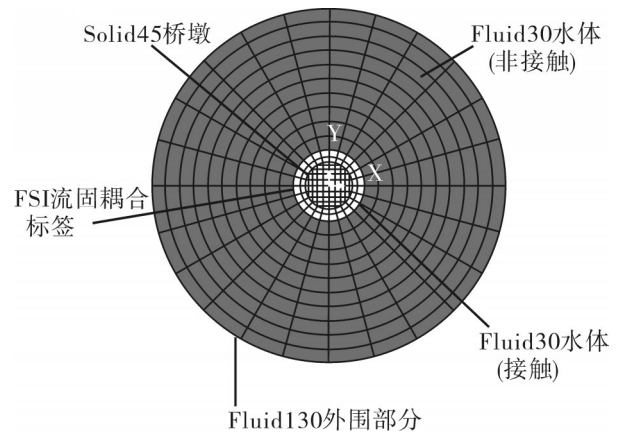


图2 模型截面类型

Fig.2 The section type of model

2 水深对桥墩自振特性的影响

为了分析只考虑不同水深对桥墩自振特性的影响,故选用不同半径和墩高不同的桥墩模型进行模拟计算,这样可以排除桥墩尺寸对结果的影响,以及可以得到较为普遍的结论。所以,取①桥墩半径 $R_1=1.0\text{ m}$,桥墩高度分别取 $H=10, 20, 30, 40, 50\text{ m}$;②桥墩半径 $R_1=2.0\text{ m}$,桥墩高度分别取 $H=60, 70, 80, 90, 100\text{ m}$ 。根据各种材料的属性,以及桥墩的几何尺寸、流体域的大小建立ANSYS有限元模型。为突出研究水深对桥墩自振频率的影响,选桥墩淹没比 h/H (水深/墩高)分别为 $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 。对模型进行模态化分析,可以得到桥墩在不同淹没比下的自振频率,见表1和表2。

表1 $R_1=1.0\text{ m}$ 时桥墩自振频率

Tab.1 The natural frequency of bridge piers when $R_1=1.0\text{ m}$					Hz
淹没比 h/H	墩高/m				
	10	20	30	40	50
0	9.646	2.439	1.086	0.611	0.391
0.1	9.646	2.439	1.086	0.611	0.391
0.2	9.645	2.439	1.086	0.611	0.391
0.3	9.637	2.437	1.085	0.610	0.391
0.4	9.614	2.431	1.082	0.609	0.390
0.5	9.557	2.415	1.075	0.605	0.387
0.6	9.445	2.385	1.061	0.597	0.382
0.7	9.258	2.335	1.039	0.584	0.374
0.8	8.985	2.263	1.006	0.565	0.362
0.9	8.626	2.168	0.963	0.541	0.346
1.0	8.193	2.055	0.912	0.512	0.328

表2 $R_1=2.0$ m时桥墩自振频率
Tab.2 The natural frequency of bridge piers when $R_1=2.0$ m

淹没比 h/H	墩高/m				
	60	70	80	90	100
0	0.547	0.402	0.308	0.243	0.197
0.1	0.547	0.402	0.308	0.243	0.197
0.2	0.547	0.402	0.308	0.243	0.197
0.3	0.546	0.401	0.307	0.243	0.197
0.4	0.545	0.400	0.306	0.242	0.196
0.5	0.541	0.398	0.304	0.241	0.195
0.6	0.534	0.392	0.300	0.237	0.192
0.7	0.522	0.384	0.294	0.232	0.188
0.8	0.506	0.371	0.284	0.225	0.182
0.9	0.484	0.355	0.272	0.215	0.174
1.0	0.458	0.336	0.257	0.203	0.165

由表1和表2可以看出,不同桥墩尺寸下,桥墩自振频率随着淹没比的增加呈减小趋势,与桥墩半径和高度无关。当桥墩淹没比 $h/H<0.5$ 时,桥墩自振频率无明显减小,最大减小幅度为0.5%,可以忽略不计;当桥墩淹没比 $h/H>0.5$ 时,桥墩自振频率出现明显减小,其减小幅度随着淹没比的增加而增加;当桥墩淹没比 $h/H=1.0$ 即桥墩被完全淹没时,其自振频率最小,相对无水情况下的自振频率,最大减小幅度达到16.5%,故不可忽略。桥墩自振频率变化曲线,见图3和图4。

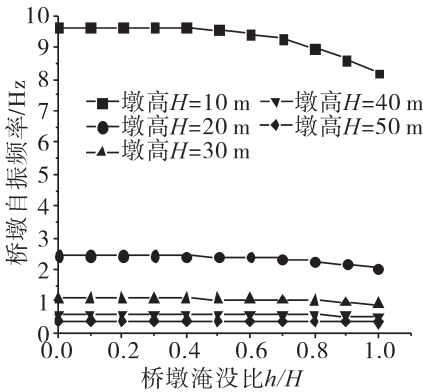


图3 $R_1=1.0$ m时桥墩自振频率变化曲线

Fig.3 The curve of the natural frequency when $R_1=1.0$ m

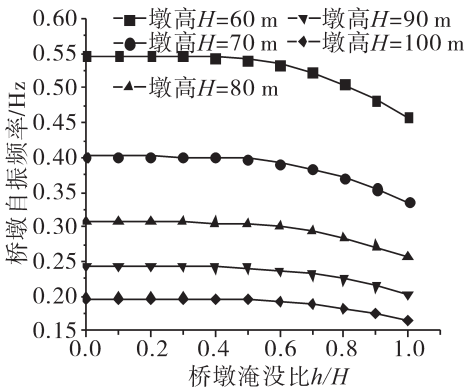


图4 $R_1=2.0$ m时桥墩自振频率变化曲线

Fig.4 The curve of the natural frequency when $R_1=2.0$ m

3 桥墩的动力振动特性分析

3.1 纵向激振力及模型加载^[10]

本文主要分析车速为 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,车桥结构体系对桥墩的纵向激振力引起桥墩-水流固耦合的振动问题,纵向激振力时程图,见图5。这种激振力分布作用在墩顶上,根据圣维南原理,可将分布力等效为集中荷载作用在墩顶的中心,桥墩-水流固耦合模型加载图,见图6。

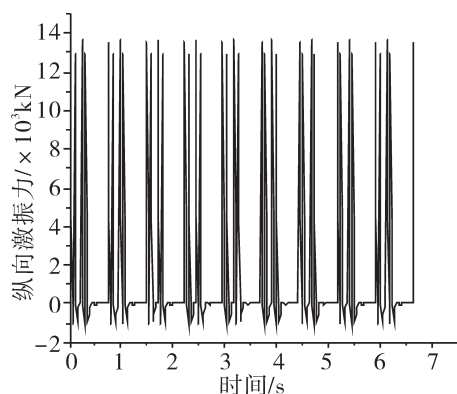


图5 激振力时程

Fig.5 Time history curve of exciting force

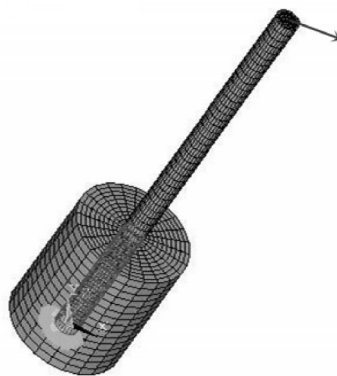


图6 模型加载图

Fig.6 The picture of model loading

3.2 水深对墩顶纵向位移的影响

为了研究水体对桥墩墩顶纵向位移的影响,选用桥墩的几何尺寸分别为①桥墩半径 $R_1=2.0$ m,墩高 $H=90$ m, 100 m, ②桥墩半径 $R_1=2.5$ m,墩高 $H=90$ m, 100 m。由第3结可以看出,当桥墩淹没比 $h/H=1.0$ 时,水体对桥墩自振频率的影响最为突出,故桥墩的淹没比 h/H 分别取 0, 1.0 即无水 and 满水,这样有利于分析和对比,桥墩墩顶纵向位移的时程曲线,见图7、图8。

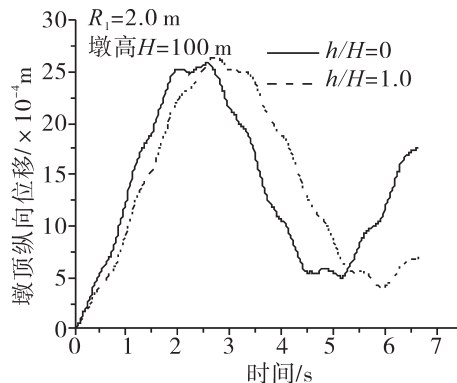
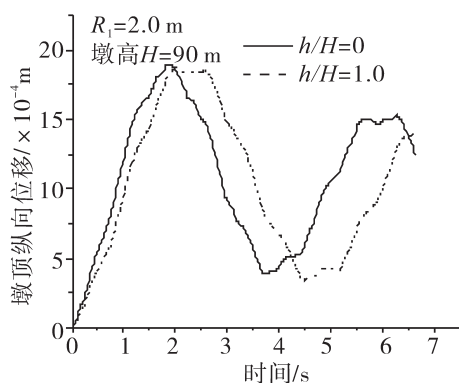


图7 位移时程

Fig.7 Time history curves of displacement

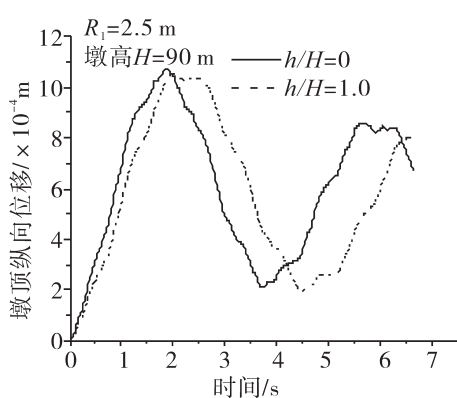
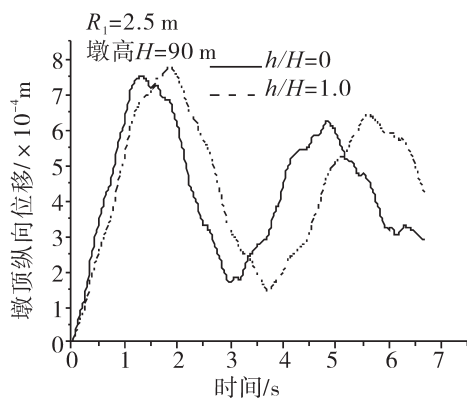


图8 位移时程

Fig.8 Time history curves of displacement

由图7和图8可以看出,在高速列车作用下,同一墩高时,墩顶纵向位移随着半径的增加而减小;同一

半径时,墩顶纵向位移随着墩高的增加而增加;同一半径和墩高时,墩顶纵向位移最大值和最小值,随着淹没比的增加向后延迟。

3.3 水深对墩顶纵向加速度的影响

为了研究水深对墩顶纵向加速度的影响,桥墩模型尺寸同4.2节。在桥墩模型顶部施加纵向激振力,可以分析得到墩顶纵向加速度的大小,其时程曲线,见图9、图10。

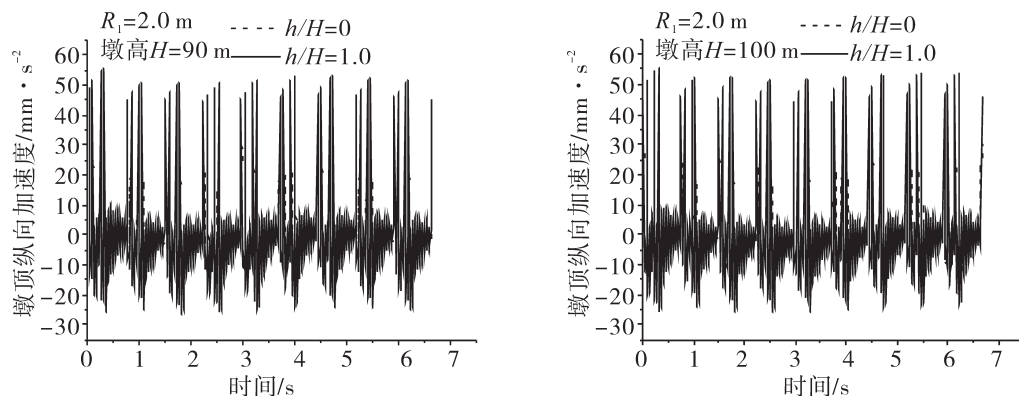


图9 加速度时程

Fig.9 Time history curves of acceleration

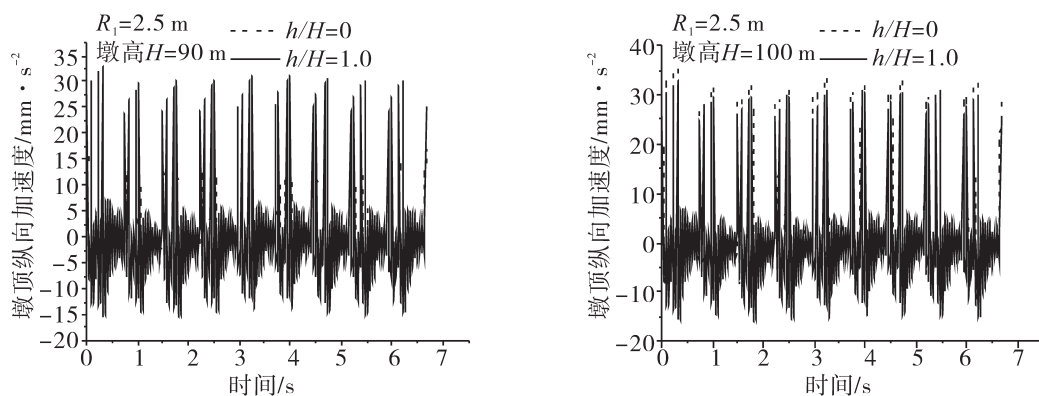


图10 加速度时程

Fig.10 Time history curves of acceleration

由以上各图可知,在高速列车作用下,同一墩高时,墩顶纵向加速度的大小随半径的增大而减小;同一半径时,墩顶纵向加速度的大小随墩高的增加呈减小趋势,减小幅度并不明显;同一半径和墩高时,墩顶纵向加速度的大小随淹没比的增加而增加。这是由于高速列车作用产生的激振力引起桥墩的振动,桥墩将这种振动部分传递给周围水体,并引起水体的晃动,水体又以动水压力的形式反作用于桥墩,改变桥梁墩身的振动和变形状态。

4 结语

本文建立了不同几何尺寸和桥墩淹没比情况下桥墩-水流固耦合有限元模型,分析了水深对桥墩自振特性的影响;通过在墩顶施加纵向激振力,研究了不同淹没比情况下,桥墩的动力振动特性。并得出以下结论:①当桥墩淹没比 $h/H < 0.5$ 时,水体对桥墩自振频率的影响十分微小,可以忽略不计。②当桥墩淹没比 $h/H \geq 0.5$ 时,桥墩自振频率随着桥墩淹没比的增加出现明显降低,最大降低幅度达到16.5%。③当桥墩淹没比 $h/H = 1.0$ 即桥墩被完全淹没时,桥墩自振频率达到最小值,且桥墩自振频率随淹没比的变化规律与

桥墩几何尺寸无关。④墩顶纵向位移出现最大值和最小值的时间,随着桥墩淹没比的增加向后延迟,且与桥墩几何尺寸无关。⑤墩顶纵向加速度随淹没比的增加呈增大的趋势,且与桥墩几何尺寸无关。

参考文献:

- [1] 屈爱平,高淑英. 梁-桥墩-桩基础的动力特性研究[J].西南交通大学学报,2001,36(6):641-644.
- [2] 柳春光,齐念. 考虑流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):433-437.
- [3] 杨万理,李乔. 深水桥墩流固耦合下的自振特性研究[J].四川建筑科学研究,2012,38(3):164-170.
- [4] 钱若军,董石麟,袁行飞,等. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构,2008,14(1):3-15.
- [5] 杨吉新,雷凡,李昆,等. 水下桥墩结构的振动分析[J].世界桥梁,2009,(3):40-42.
- [6] 崔涛.高速列车流固耦合振动及运行安全性研究[D].西南交通大学,2011.
- [7] 赖伟,王君杰,韦晓,等.桥墩地震动水效应的水下振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(6):164-171.
- [8] 傅作新. 结构与水体的动力相互作用问题[J].水利水运科学研究,1982,(2):104-119.
- [9] 高芒芒,李永强,许北军,等. 高速列车作用下的芜湖长江大桥车桥耦合振动分析[J].中国铁道科学,2001,22(5):34-40
- [10] 罗文俊,雷小燕,练松良,等. 车辆-高架桥耦合系统竖向振动分析车辆轨道新模型[J].华东交通大学学报,2013,30(2):1-8

Vibration Analysis of Deepwater Bridge Pier Based on Fluid-Solid Interaction Caused by High-speed Train

Lu Huaxi, Li Jun, Zhou Yewei, Liang Pingying

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

Abstract: To research the effect of water on the vibration characteristics of bridge pier structure, this study built a bridge pier-water fluid-solid interaction finite element model based on the computing platform of ANSYS, calculated the natural frequency of the bridge pier at different water depths, and then analyzed effects of water depths on the bridge pier vibration characteristics under the role of high-speed train. The conclusions drawn from the analysis were: when the water depth was less than 50% height of the pier, the natural frequency of bridge pier did not decrease significantly; when the water depth was higher than 50% height of the pier, the natural frequency of bridge pier reduced obviously; under high-speed train, with the increase of the water height the time of the longitudinal displacement extreme appeared lingeringly and the longitudinal acceleration of the pier increased. Therefore, it concludes that water structure has obvious effects on the static and dynamic vibration characteristics of bridge pier, which can not be neglected.

Key words: natural frequency; exciting force; fluid-solid interaction; longitudinal displacement; longitudinal acceleration