

文章编号: 1671-8879(2007)03-0057-04

连续梁桥模态分析与试验

周勇军, 赵小星, 宋一凡, 贺拴海

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了研究弹性基础上连续梁的振动特性, 提出了连续梁桥墩的振型函数表达式。对室内连续梁桥模型进行静力试验和模态试验, 并与有限元模型对比分析, 研究了连续梁桥在纵桥向和横桥向的自振特性。结果表明: 考虑上下部结构共同作用时, 连续梁桥的低阶振动形式主要表现为桥墩的弯曲振动, 试验测得的频率和由理论振型函数计算的结果误差不超过 6%; 说明该桥墩振型函数可以较好地应用于连续梁桥的动力计算中; 这种方法可以为此类桥梁的动力和抗震分析提供参考。

关键词: 桥梁工程; 连续梁; 振型函数; 模态试验; 有限元

中图分类号: U448.215

文献标志码: A

Modal analysis and experiment test of continuous beam bridge

ZHOU Yong jun, ZHAO Xiao xing, SONG Yi fan, HE Shuan hai

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The mode shape function of the pier was offered to study the dynamic deformation feature of the continuous beam bridge sited on the elastic foundation. The static experiment and modal test for a continuous beam model were carried out indoor, the results were compared with those of finite element method (FEM), and some conclusions about the dynamic feature of continuous beam in the longitude and transverse direction were obtained accordingly. It is pointed that the whole structure's low vibration performs as the pier's flexural bending if the superstructure and substructure vibrate together. The dynamic parameters from the test have an error of 6% compared with the theoretical ones derived from modal analysis, which testifies the presented mode shape. The results indicate that: this mode shape can be well applied in analyzing the beam's dynamic feature; and the modal analysis method can give a good reference to the seismic analysis for the same type of bridge. 2 tabs, 11 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; continuous beam; mode shape function; modal test; FEM

0 引言

连续梁桥是一种常见的桥梁结构形式, 因其受力合理、构造简单和施工方便, 在中小跨径桥梁中得到了大量应用, 中国城市中的高架桥也多由连续梁

桥组成。对连续梁桥进行地震响应及控制分析^[1-5]已成为桥梁研究工作的热点问题。在理论分析方面, 文献[4-7]振型函数及地震力求解进行了分析; 在试验方面, 文献[5-10]对简支梁及连续梁的上部结构进行了模态试验研究。地震响应实际上就是结

收稿日期: 2006-03-15

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200231822329)

作者简介: 周勇军(1977), 男, 湖北孝昌人, 讲师, 博士研究生, E-mail: ZYJ@gj.chd.edu.cn

构在地震波作用下的强迫振动,而结构的动力反应是研究地震反应及抗震设计和评估的前提。本文针对弹性地基上连续梁的振动特性,提出了连续梁桥桥墩的振型函数,在此基础上制作了三跨连续梁桥室内模型,并进行整桥的模态试验,以研究连续梁桥振动特性和规律,为该类桥梁结构的动力及抗震分析提供参考。

1 振型函数

大部分的连续梁桥均采用深基础(桩基础),对于该类桥梁来说,桥墩的变形可以分解为桥墩墩底固接时自身的弹性变形以及由于基础的变位引起的桥墩变形,设 y_1 、 y_2 和 y_3 分别为在桥墩墩顶作用单位水平力所引起的墩顶弹性挠曲位移、刚性转动位移和刚性平动位移,由此可以得到桥墩的变形曲线为

$$\varphi(x) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{3y_1}{h^3} \left(\frac{h}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) + y_2 \frac{x}{h} + y_3 \right] \quad (1)$$
$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{h^3}{3EI} \\ y_2 &= h^2 \hat{q}_{MM} + h \hat{q}_{QM} \\ y_3 &= \hat{q}_Q + h \hat{q}_M \\ \alpha &= y_1 + y_2 + y_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: h 为桥墩的高度; EI 为桥墩的总抗弯刚度; $\hat{q}_{MM}$ 、 $\hat{q}_{QM}$ 、 $\hat{q}_Q$ 均为地基系数。

如果桥墩顶设有强大盖梁,因盖梁构造使桥墩顶处无相对转动(如多柱式桥墩在横桥向的振动),此时桥墩的变形曲线为

$$\varphi(x) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{3y_1}{h^3} \left[hx^2 - \frac{2}{3} x^3 \right] + y_2 \frac{x}{h} + y_3 \right] \quad (3)$$

$$\text{此时, } y_1 = \frac{h^3}{12 \sum_{i=1}^n EI_{pi}}, y_2、y_3 \text{ 同式(2)。} \quad (4)$$

式中: EI_{pi} 为单个墩柱的抗弯刚度。

根据振型的构造特点,假设连续梁桥墩振型采用以上的静力变形曲线,为了研究其在实际工程中的适用性以及连续梁桥的振动特性,制作了连续梁桥的室内模型,并进行了相关的静、动力试验。

2 模态分析理论

当系统作无阻尼固有振动时,其动能与位能反复交换,对于保守系统,根据能量守恒,可以写出

$$T + V = \text{常数}$$

式中: T 、 V 分别为系统的动能和位能。

对于无阻尼固有振动,桥墩和梁的位移可以分别表示为

$$y_{i,j}(x,t) = \varphi_{i,j}(x) q_{i,j}(t) \quad (5)$$

系统的动能为

$$T = \sum \frac{1}{2} \int_0^{h_i} m_{i,j} \dot{y}_{i,j}^2 dx + \sum \frac{1}{2} M_i \dot{y}_i^2 \Big|_{x_i=M_i} \quad (6)$$

系统的位能为

$$V = \sum \frac{1}{2} \int_0^{h_i} EI_{ij} (y''_{i,j})^2 dx + \sum \frac{1}{2} k_i (y_i - y_j)^2 \Big|_{x_{ij}=h_i} \quad (7)$$

式中: m_i 、 m_j 分别为桥墩和梁的质量; EI_i 、 EI_j 分别为桥墩和梁的抗弯刚度; $q_i(t)$ 、 $q_j(t)$ 分别为桥墩和梁的振动主自由度; M_i 为桥墩盖梁或者承台的集中质量; k_i 为支座系统的剪切刚度。

$$\text{将上式代入拉氏方程} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial V}{\partial q_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = 0,$$

并利用振型的正交性,可以得到标准的振动方程

$$[M] \{\ddot{x}\} + [K] \{x\} = 0 \quad (8)$$

式中: $[M]$ 、 $[K]$ 分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵。该方程的特征值和特征向量表示系统的各阶固有频率和振型,详细计算可参考文献[6-7]。

3 模型试验

3.1 模型概况

试验模型为三跨连续梁桥,其桥跨布置为 3×2 m,上部结构为 T 梁焊接的组合截面;下部结构为空心薄壁钢管柱式桥墩,墩高为 0.90 m,钢管外径为 4.20 cm,壁厚为 0.30 cm,中心间距为 0.42 m,刚性桥台,纯橡胶支座。模型的总体布置如图 1 所示。

3.2 静力试验

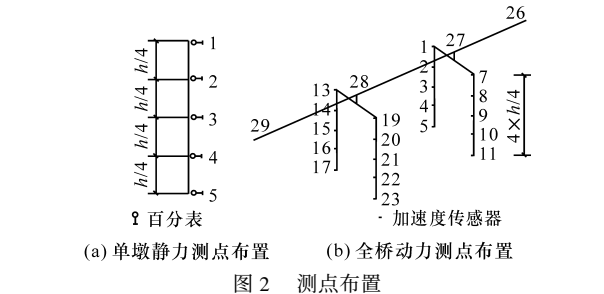
沿桥墩的每 4 分点布置一挠度计如图 2(a) 所示,在墩顶分级施加水平荷载,测量桥墩各个测点的水平变位,回归得到桥墩的静力挠度曲线,并与式(1)、式(3)进行对比分析。在拼装构件前,严格记录各构件的尺寸和质量,为以后的理论计算提供参考。



图1 全桥试验模型

3.3 动力试验

在组装构件之前,将单跨结构支撑于支座上,并安置在刚性基础上,通过测量上部结构的基频,反推支座的动水平剪切刚度为 $k = 1.4 \times 10^5$ N/m。采用人工激励的方式,进行了全桥模态试验。为了比较激励的方式对结构动力性质的影响,分别利用悬挂激励器与冲击锤激励的方式对结构施以激励。全桥动态测点布置如图 2(b) 所示。响应信号与激励信号经电荷放大器后作傅立叶变换,形成传递函数并导入模态分析软件,对结构进行频域法分析。由于测点较多,在测试过程中,采用了单点激励多点拾振的方法



收集信号。

4 仿真模型

依据实际尺寸及静力试验数据, 建立了三维有限元模型。其中, 梁、墩、盖梁均采用空间梁单元来模拟, 支座采用非线性连接单元模拟, 承台为板单元。同时, 为了研究下部结构的计算模式对结构动力的影响程度, 采用两种不同的分析模型: 模型 1 为基础用弹簧单元模拟(弹性支撑); 模型 2 为墩底固结。

5 试验结果分析

图 3 是横桥向模态分析信号处理时的功率谱。全桥试验测得的频率和阻尼比如表 1 所示。

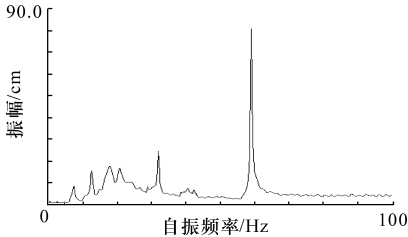
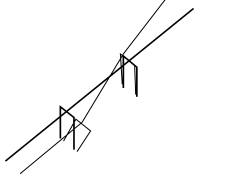
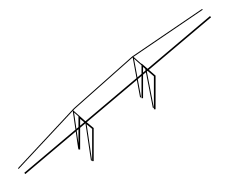
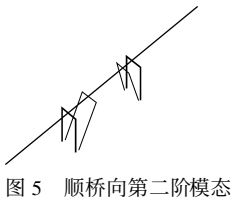
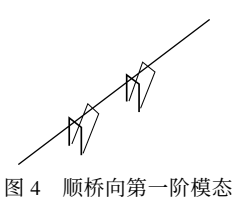


图 3 横桥向自功率谱

试验测得模型桥的顺桥向第一、二阶振型(图 4、图 5), 横桥向第一、二阶振型(图 6、图 7)。

表 1 试验模态的频率和阻尼比

项 目		激振器法		锤击法	
		频率/Hz	阻尼比/ %	频率/Hz	阻尼比/ %
顺桥向	第一阶	7.43	5.64	7.92	4.31
	第二阶	16.80	0.75	16.43	3.99
横桥向	第一阶	7.15	2.04	7.14	3.74
	第二阶	12.33	1.26	12.27	3.00



将桥墩的静力挠度曲线、动力试验的振型曲线以及两种有限元理论计算值在同一图中列出, 见图 8~图 11 所示。

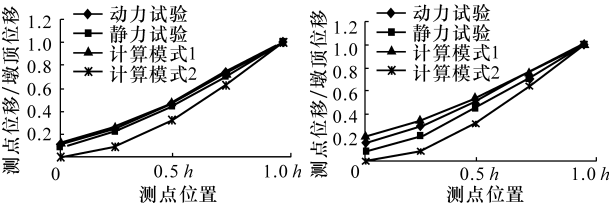


图 8 顺桥向第一阶模态
桥墩振型比较

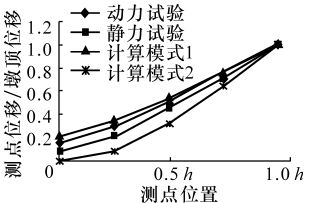


图 9 顺桥向第二阶模态
桥墩振型比较

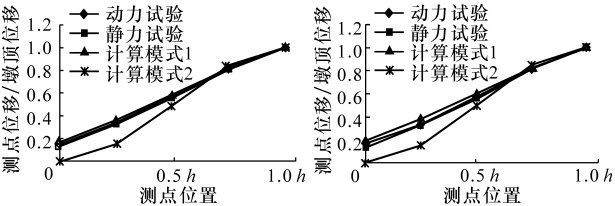


图 10 横桥向第一阶模态
桥墩振型比较

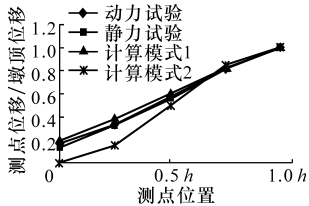


图 11 横桥向第二阶模态
桥墩振型比较

从图 4~图 7 可以看出, 连续梁桥顺桥向和横桥向的前两阶模态振动主要是由柔性桥墩的一阶弯曲振动引起的。顺桥向第一阶振动为两桥墩的同向振动, 第二阶振动则是桥墩的反向振动; 上部结构基本上是刚体位移; 横桥向第一、二阶振动同样是桥墩的横向弯曲振动形式, 分别作同向或反向的振动, 有限元分析模型 1 和模型 2, 均表现出类似的现象。

将支座刚度、桥墩理论振型函数及相关参数代入式(8), 可以得到模态分析的理论频率值, 同时, 对结构进行有限元分析, 得到有限元计算值, 将它们与试验值一并列入表 2。

表 2 频率对比

项 目		试验值			Hz		
		激振器法	锤击法	平均值	模态分析理论值	有限元模型 1	有限元模型 2
顺桥向	第一阶	7.43	7.92	7.68	8.06	7.86	8.70
	第二阶	16.80	16.43	16.62	16.53	15.63	18.28
横桥向	第一阶	7.15	7.14	7.14	6.81	6.31	7.82
	第二阶	12.33	12.27	12.30	11.60	10.88	11.67

由表 1~表 2 可以看出:

(1) 在顺桥向, 试验测得的频率值与模态分析理论值相差不超过 5%, 与模型 1 计算得到的频率的最大误差为 6%, 而模型 2 计算得到的频率与试验值的最大误差达到了 12%。而在横桥向, 试验值与模态分析的理论值相差不超过 6%。误差数据对比说明, 利用本文提出的桥墩振型函数进行模态分析, 得到的结果要比有限元计算结果更接近于实测结果, 并且其值基本上位于两者中间。从图 8~图 11 计算结果可以看出, 无论是哪个方向的振动, 模型 2 的频率与其他 3 种结果相差较大, 说明位于弹性地

基上的连续梁不能简单地将基础作为固结来计算。

(2) 试验过程中, 对全桥的不同部位分别进行了激振, 结果表明, 在振型的节点位置处激励并不能得到很好的模态, 例如横桥向激励第二跨跨中时得到横桥向二阶振型不理想。这也说明了要获得较好的某阶模态, 激振点应位于该阶模态振幅最大或接近最大值处。

(3) 由两种不同的激励方法得到的频率和振型差别不大, 表明试验方法及结果是可信的。

(4) 虽然桥墩的振型函数是针对位于弹性地基上的桩柱式桥墩提出的, 但模态分析的方法及试验方法也可供其他结构参考。

6 结 语

(1) 提出了位于弹性地基上连续梁桥桥墩的振型函数, 试验证明该函数可以应用于实桥的理论振动分析。

(2) 一般说来, 处于弹性地基上的连续梁桥, 在理论计算时不能简单地将地基当作固结来处理。

(3) 柔性墩台体系的连续梁桥, 全桥顺桥向和横桥向前几阶振型中, 桥墩是以一阶的弯曲振动形式参与振动的, 连续梁桥顺桥向和横桥向的地震振动是可以按解耦方法分别进行分析的。

(4) 提出的模态分析方法可供其他结构动力分析参考。

参考文献:

References:

- [1] 王军文, 李建中, 范立础. 连续梁桥纵向地震碰撞反应参数研究 [J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 42 47
WANG Jun wen, LI Jian zhong, FAN Li chu. Parametric study of longitudinal seismic pounding response for continuous girder bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (4): 42 47.
- [2] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 30 35
FAN Li chu, NIE Li ying, LI Jian zhong. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 30 35
- [3] 于泳波, 万振江, 刘健新. 减震技术在公路桥梁中的应用及地震反应分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(2): 58 60
YU Yong bo, WAN Zhen jiang, LIU Jian xin.

Seismic reduction design for highway bridge and seismic response [J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 58 60

- [4] 宋一凡, 贺拴海, 曹继伟. 基于能量原理的框架桥墩地震力分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22 (1): 36 40
SONG Yi fan, HE Shuan hai, CAO Ji wei. Analysis for transverse seismic forces of the frame bridge piers based on energy principle [J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition, 2002, 22 (1): 36 40
- [5] 宋一凡, 王玉萍. 计入弹性基础效应的钢筋混凝土桥梁结构塑性倒塌分析 [J]. 交通运输工程学报, 2003, 3 (3): 26 31.
SONG Yi fan, WANG Yu ping. Plastic collapse mechanism of seismic assessment for existing RC bridges with flexible foundation and bearing pads [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 26 31.
- [6] 周勇军, 贺拴海, 宋一凡, 等. 在役梁桥结构延性系数的动力评价方法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4), 35 38.
ZHOU Yong jun, HE Shuan hai, SONG Yi fan, et al. Dynamic assessment method of ductility coefficient for existing beam bridges [J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition, 2005, 25 (4): 35 38.
- [7] 宋一凡, 周勇军, 贺拴海, 等. 连续梁桥横桥向地震动分析 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 147 151.
SONG Yi fan, ZHOU Yong jun, HE Shuan hai, et al. Transverse seismic analysis of continuous bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25 (2): 147 151.
- [8] 沈 松, 应怀樵, 雷速华, 等. 用锤击法和变时基技术进行黄河铁路桥的模态试验分析 [J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 492 495.
SHEN Song, YING Huai qiao, LEI Su hua, et al. Modal test for Yellow River bridge exciting with hammer [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 492 495
- [9] 周勇军, 赵小星, 贺拴海, 等. 弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(4): 20 24.
ZHOU Yong jun, ZHAO Xiao xing, HE Shuan hai, et al. Dynamic analysis and modal test of a cured steel box girder [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(4): 20 24
- [10] JTJ 024 85, 公路桥梁地基与基础设计规范 [S].