

文章编号: 1671-8879(2008)02-0049-04

弹性地基上连续梁桥顺桥向地震振动分析

周勇军, 贺拴海, 宋一凡, 赵小星

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 根据位于弹性地基基础上连续梁的变形特性, 假设桥墩的基本振型函数由自身变形、基础转动和平动引起的变形 3 部分组成。由拉格朗日方程建立全桥的顺桥向的地震振动方程, 得到了包含地基特性综合参数的结构自振频率以及振型参与系数。仿真计算结果表明, 连续梁桥前两阶频率分别为 8.06 Hz 和 16.53 Hz, 其试验值分别为 7.43 Hz 和 16.80 Hz, 两者误差在 8% 以内。

关键词: 桥梁工程; 连续梁桥; 基本振型; 拉格朗日方程; 动力参数

中图分类号: U448.215 文献标志码: A

Longitudinal seismic vibration of continuous beam bridge on elastic foundation

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

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

Abstract: According to the static deformation behavior of piers sited on elastic foundation, the piers' basic vibration mode of continuous beam bridge was put forward, the mode included the elastic deformation only caused by force and the deformations derived from the foundation's rotation and translation. Using Lagrange equation, the longitudinal seismic vibration equation of continuous beam bridge was set up, thus the structure's frequency and the participation factors could be calculated, and it involved the foundation characteristic parameters. Simulation results show that the first and second frequencies are 8.06 Hz and 16.53 Hz respectively, and their corresponding test values are 7.43 Hz and 16.80 Hz respectively, their errors are not more than 8%. 1 tab, 3 figs, 9 refs.

Key words: bridge engineering; continuous beam bridge; basic vibration mode; Lagrange equation; dynamic parameters

0 引言

桥梁承载能力的评估是近几年来土木工作者研究的热点之一。20 世纪修建的大量桥梁在各种因素的作用下, 桥梁的使用性能, 特别是桥梁的动力性能随着结构刚度的下降、地质的变迁发生了较大的

变化, 而对现有桥梁抗震能力进行评估的研究则很少见。在桥梁设计时, 现有规范^[1]用反应谱法对桥墩的地震力做了较为详细的规定, 但对位于弹性地基上的连续梁却没有详细的规定, 而将梁和墩分开计算或认为墩底固结, 这将会产生较大的误差^[2-4]。文献^[5]对计入弹性基础效应的钢筋混凝土桥梁结

收稿日期: 2007-02-10

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200231822329)

作者简介: 周勇军(1978-), 男, 湖北孝昌人, 讲师, 博士, E-mail: ZYJ@gl.chd.edu.cn

构进行塑性倒塌分析;文献[6]对弹性地基上连续梁横桥向进行了动力分析;文献[7]研究了影响连续梁纵向地震碰撞的因素;文献[8]则对多跨简支梁桥的顺桥向地震力进行了分析,得到了一些重要的结论。这些研究成果对于研究桥梁地震力的合理取值并指导生产实践,具有重要的参考价值。本文根据弹性地基上连续梁的变形特点,采用半解析法,将桥墩的一阶振型分解为桥墩的弹性变形与基础转动和平动产生的刚体位移之和,将梁和墩整体考虑,由拉格朗日方程建立全桥的地震振动方程,应用振型分解法求解微分方程组,并通过反应谱理论求得地震力。

1 基本理论

在地震作用下,单个桥墩变形如图1所示。对一联均采用弹性支座沿顺桥向振动的连续梁,可采用如图2的简化模式。

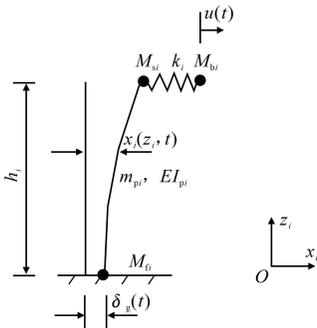


图1 桥墩变形

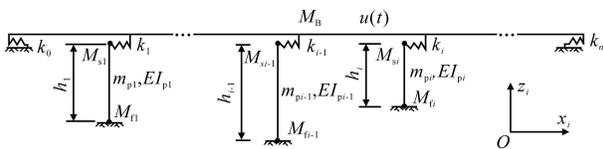


图2 连续梁桥纵桥向振动计算

图中: M_{bi} 为第*i*跨梁体的质量($i = 1, \dots, n + 1$); M_B 为一联上部结构总质量($M_B = \sum_{i=1}^{n+1} M_{bi}$); M_{si} 为盖梁的质量($i = 1, \dots, n$); M_{ti} 为承台的质量($i = 1, \dots, n$); m_{pi} 为桥墩单位长度的质量($i = 1, \dots, n$); E 为桥墩的弹性模量; I_{pi} 为桥墩的抗弯惯矩($i = 1, \dots, n$),对非等截面墩,可采用换算刚度; h_i 为桥墩的高度(从地面一般冲刷线算起, $i = 1, \dots, n$); k_i 为弹性支座的水平剪切刚度($i = 0, 1, \dots, n$); $x_i(z_i, t)$ 为桥墩相对地面的广义位移; $u(t)$ 为上部结构相对地面的水平位移; $\hat{q}(t)$ 为地面位移。

1.1 基本假定

- (1) 忽略阻尼影响。
- (2) 桥台为无限刚性体。
- (3) 梁在顺桥向为一刚体,且只发生平动,没有

转动位移。

(4) 不计行波效应。

1.2 地震方程的建立及求解

系统动能 T 为

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_0^{h_i} m_{pi} (x_i + \cdot \hat{q})^2 dz_i + \sum_{i=1}^n M_{si} (x_i + \cdot \hat{q})^2 \Big|_{z_i=h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_{ti} (x_i + \cdot \hat{q})^2 \Big|_{z_i=0} + \frac{1}{2} M_B (u + \cdot \hat{q})^2 \tag{1}$$

系统势能 V 为

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_0^{h_i} EI_{pi} (x_i'')^2 dz_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k_i (x_i - u)^2 \Big|_{z_i=h_i} + \frac{1}{2} k_0 u^2 + \frac{1}{2} k_n u^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [x_i \ x_i'] \cdot \begin{bmatrix} K_{QQi} & K_{QM_i} \\ K_{QM_i} & K_{MM_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_i' \end{bmatrix} \Big|_{z_i=0} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \int_0^{h_i} \left(M_{si} + \frac{M_{bi} + M_{bi+1}}{2} \right) g x_i'^2 dz_i \tag{2}$$

式中: $\begin{bmatrix} K_{QQi} & K_{QM_i} \\ K_{QM_i} & K_{MM_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Q}_{Qi} & \hat{Q}_{Mi} \\ \hat{Q}_{Mi} & \hat{Q}_{M_i} \end{bmatrix}$ 为弹性地基的刚度矩阵; K_{QQi} 、 K_{QM_i} 、 K_{MM_i} 均为刚度系数; \hat{Q}_{Qi} 、 \hat{Q}_{Mi} 、 \hat{Q}_{M_i} 均为桥基处的地基系数^[9]; x_i 、 \hat{q} 、 u 分别为 $x_i(z_i, t)$ 、 $\hat{q}(t)$ 、 $u(t)$ 的简写; x_i 、 $\cdot \hat{q}$ 、 u 分别为对应函数对时间的导数; x_i' 为对应函数对 z_i 的导数; z_i 为位移变量;其余依次类推; g 为重力加速度。

一般来讲,全桥低阶振动主要是桥墩的一阶弯曲振动,于是设 $x_i(z_i, t) = \varphi_i(z_i)q_i(t)$, $u(t) = p(t)$, $\varphi_i(z_i)$ 为第 i 个桥墩的振型函数。其中, $q_i(t)$ 、 $p(t)$ 分别为桥墩和上部结构的广义自由度。则式(1)、式(2)变为

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_0^{h_i} m_{pi} [\varphi_i(z_i) \dot{q}_i + \cdot \hat{q}]^2 dz_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_{si} \cdot [\varphi_i(h_i) \dot{q}_i + \cdot \hat{q}]^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_{ti} [\varphi_i(0) \dot{q}_i + \cdot \hat{q}]^2 + \frac{1}{2} M_B (p + \cdot \hat{q})^2 \tag{3}$$

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_0^{h_i} EI_{pi} [\varphi_i''(z_i)]^2 q_i^2 dz_i + \frac{1}{2} k_0 p^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k_i [\varphi_i(h_i) q_i - p]^2 + \frac{1}{2} k_n p^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot$$

2 算例

某室内三跨等截面连续梁模型桥,采用等高双柱式桥墩、刚性桥台基础、橡胶支座, $M_B = 123.27 \text{ kg}$, $M_{si} = 18.25 \text{ kg}$, $M_{ti} = 46.67 \text{ kg}$, $m_{pi} = 2.867 \text{ kg/m}$, $EI_{pi} = 3.1 \times 10^4 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)$, $h_i = 0.9 \text{ m}$, $k_i = 1.4 \times 10^5 \text{ N/m}$, 实测 $y_{11} = 0.7259 \times 10^{-5} \text{ m/N}$, $y_{21} = 0.5289 \times 10^{-5} \text{ m/N}$, $y_{31} = 0.1144 \times 10^{-5} \text{ m/N}$, $y_{12} = 0.7734 \times 10^{-5} \text{ m/N}$, $y_{22} = 0.547 \times 10^{-5} \text{ m/N}$, $y_{32} = 0.1186 \times 10^{-5} \text{ m/N}$ 。模型试验见图3。按本文方法计算的频率值和频率试验值对比见表3。



图3 模型试验

表1 频率计算与试验值对比

阶数	振型描述	频率试验值/Hz	频率计算值/Hz	误差/%
第一阶	两桥墩同向振动	7.43	8.06	8
第二阶	两桥墩反向振动	16.80	16.53	2

由表1可知,试验误差在8%以内,说明试验结果是可信的。

3 结语

(1)根据动力学原理,利用拉格朗日方程推导了包含地基参数的连续梁顺桥向地震振动方程,给出了相应的基频和振型参与系数的近似计算公式。

(2)试验和有限元计算表明,弹性地基上连续梁顺桥向整体低阶振动的原因是由桥墩的一阶振动引起的。

(3)对于现役桥梁结构,由于场地条件的变化,对结构进行评估时很难模拟结构的真实状况,本文建立了地基参数与结构模态参数之间的关系,只要借助试验手段测出地基综合参数,并结合桥梁结构的基本尺寸,就可以获得桥梁结构真实的动力参数。

参考文献:

References:

[1] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范[S] .
[2] 周勇军, 贺拴海, 宋一凡, 等. 在役桥梁结构延性系数

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.

[3] 周勇军, 赵小星, 宋一凡, 等. 连续梁桥模态分析与试验[J] . 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(3): 57-60.

ZHOU Yong-jun, ZHAO Xiao-xing, SONG Yi-fan, et al. Modal analysis and experiment test of continuous beam bridge[J] . Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(3): 57-60.

[4] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton R. Bending strength of beams with corrugated webs[J] . Journal of the Structural Division, 1997, 136(3): 772-782.

[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] 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.

[7] 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.

[8] 周勇军, 彭晓彬, 赵煜, 等. 简支梁桥顺桥向地震动分析[J] . 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 86-89.

ZHOU Yong-jun, PENG Xiao-bin, ZHAO Yu, et al. Analysis of longitudinal seismic vibration for simply-supported beam bridge[J] . Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 86-89.

[9] JTJ 024-85. 公路桥涵地基与基础设计规范[S] .