DOI : 10. 19721/j. cnki. 1671 -8879. 2008. 05. 014

第28卷第5期 2008年9月 长安大学学报(自然科学版)

Journal of Chang an University (Natural Science Edition)

文章编号:1671-8879(2008)05-0058-05

在用简支梁桥横向地震动研究

周勇军1,彭晓彬2,宋一凡1

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064;
 2. 湖北省交通规划设计院,湖北 武汉 430051)

摘 要:为了研究在用简支梁桥的抗震性能,将弹性基础上桥墩的总变形分为三部分,即桥墩自身的弹性变形、基础转动和平动所产生的变形;以该变形曲线作为桥墩的振型函数,利用 Lagrange 方程推导了任意跨简支梁桥的横桥向地震振动方程,得到了相应的基频和振型参与系数的计算公式, 在此基础上给出了包含地基综合参数在内的地震力的求解方法。利用冲击力锤法对室内模型桥进 行了模态试验。试验结果表明:实测频率值与理论振型计算的频率值相差在5%以内,将桥墩的静 力挠度曲线作为桥墩的振型函数是可行的;该计算方法可供简支梁抗震评估参考。

关键词:桥梁工程;简支梁;基本振型;弹性地基;动力参数

中图分类号: U448. 217 文献标志码: A

Seismic vibration of existing simply-supported beam bridges

ZHOU Yong-jun¹, PENG Xiao-bin², SONG Yi-fan¹

 Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang an University, Xi an 710064, Shaanxi, China;
 Hubei Province Institute of Transportation Plan and Design, Wuhan 430051, Hubei China)

Abstract: In order to find out the seismic feature of the existing simply-supported beam bridges, the deformation function of pier sited on the elastic foundations is adopted as its fundamental vibration mode, which includes three parts: the elastic deformations only caused by force, and the deformations caused by the foundation's rotation and translation. Then, the transverse seismic vibration equations of simply-supported beams with arbitrary span is conducted by Lagrange equation, and the formulas for its fundamental frequency and participation factors are derived, so the seismic force including foundation integration parameters can be calculated. A modal test using impact excitation method is carried out indoor. The results show that the frequency from the test has an error of 5% compared with the theoretical one, and the static deformation function can be effectively adopted as the pier's fundamental vibration mode, so the method presented can give reference to the seismic evaluation of the existing simply-supported beam bridges. 1 tab, 3 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; simply-supported beam; fundamental vibration mode; elastic foundation; dynamic parameter

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200731881232)

收稿日期: 2007-09-25

⁽作育994:週夏季China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

钢筋混凝土简支梁桥是公路桥梁上普遍采用的 桥型之一。有关资料表明,该桥梁数量约占桥梁总 数量的 1/3。由于早期修建的桥梁设计标准不高, 抗震设防等级较低,随着自然条件的变迁以及设计 概念的更新,这些桥梁很多已经无法满足当地经济 的发展,因而急需对这些桥梁的结构现状进行抗震 能力评估。目前,中国对此桥梁的相关研究并不多, 现有规范[1] 对简支梁桥桥墩的地震力计算只给出了 单墩计算模型,对于采用板式橡胶支座的多跨简支 梁桥,只是给出了建议的计算图式,并未给出相应的 计算公式。为此,本文以实际工程中大量的具有桩 基础的简支梁桥为研究对象,提出了桥墩的振型函 数,利用能量法建立了弹性基础上简支梁桥的横向 地震动方程,给出了包含地基特性参数在内的频率 和振型参与系数的公式,并通过反应谱理论给出了 桥梁结构构件的地震力,借助某种试验手段[2-9 获得 地基的动力综合参数,就可对桥梁的抗震进行评估。

1 地震动方程

在地震作用下单个桥墩的 变形见图 1。图 1 中: m_i 为桥墩 单位长度质量 (i = 1, 2, ..., n);*E* 为桥墩的弹性模量; I_i 为桥墩 的抗弯惯矩 (i = 1, 2, ..., n);*H_i* 为第 *i* 个桥墩高度 (由一般



图1 桥墩振动位移

冲刷线算起, i = 1, 2, ..., n); M_i 为第 i 个承台或扩 大基础的集中质量(i = 1, 2, ..., n); M_i 为第 i 个盖 梁质量(i = 1, 2, ..., n); $y_g(t)$ 为地震作用下的地面 位移, 简写为 y_g ; $y_i(x, t)$ 为第 i 个桥墩相对地面的 水平横向位移, 简写为 y_i , x_i 为对应 y_i 的纵向位移; u(t) 为桥台上部结构相对位移。全桥为采用橡胶支 座的多跨简支梁桥, 其振动变形见图 2。

图 2 中: $u_{i,1}$ 、 $u_{i,r}$ 分别为与第 i 个桥墩相联的上 部结构在左、右支座处相对桥墩的横桥向水平位移 (i = 1, 2, ..., n); $K_{i,1}$ 、 $K_{i,r}$ 分别为与第 i 个桥墩相联 的左、右支座横桥向水平抗推刚度(i = 1, 2, ..., n); θ_i 为第 i 跨上部结构绕其自身形心轴的转角(i = 1, 2, ..., n); θ_i 为第 i 跨上部结构绕其自身形心轴的转角(i = 1, 2, ..., n+1); M_{bi} 为第 i 跨上部结构的质量(i = 1, 2, ..., n+1)。在这里,本文忽略桥梁结构的阻尼,不考 虑行波效应,也不计桥台变形,则体系的动能 T 为



式中: L_i 为第 i 个桥跨长度; J_i 为第 i 跨上部结构的转动惯矩(i = 1, 2, ..., n+1); 字母上圆点表示对时间求一阶导数。

体系的势能 V 为

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} EI_{i}(y_{i}^{"})^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} [y_{i} \ y_{i}^{'}] \circ \left[\frac{K_{QQi} \ K_{QMi} \ K_{MMi}}{K_{QMi} \ K_{MMi}} \right] \left[\frac{y_{i}}{y_{i}^{'}} \right] \Big|_{x_{i}=0} + \frac{1}{2} K_{0} u_{0}^{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} [K_{i1}(u_{i1} - y_{i})^{2} + K_{i,r}(u_{ir} - y_{i})^{2}] \Big|_{x_{i}=H_{i}} + \frac{1}{2} K_{n+1} u_{n+1}^{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (\frac{1}{2} M_{bi} + \frac{1}{2} M_{b(i+1)} + M_{i}) g \int_{0}^{H_{i}} (y_{i}^{'})^{2} dx_{i}$$
(2)

式中: $\begin{bmatrix} K_{QQi} & K_{QMi} \\ K_{QMi} & K_{MMi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Q}_{Qi} & \hat{Q}_{Mi} \\ \hat{Q}_{Mi} & \hat{Q}_{Mi} \end{bmatrix}^{-1}$,为弹性地基 的刚度矩阵;g为重力加速度; \hat{Q}_{Qi} 、 \hat{Q}_{Mi} 、 \hat{Q}_{Mi} 均为第 i个桥墩处的地基柔度系数^[7]; K_{QQi} 、 K_{QMi} 、 K_{MMi} 均 为地基的刚度系数; 上撇号表示对坐标求导。

仅考虑桥墩横向一阶振动,引入振型正则坐标 $y_i(x, t) = \varphi_i(x)q_i(t), u_{i,1}(t) = p_{i,1}(t),$ $u_{i,r}(t) = p_{i,r}(t), u_0(t) = p_0(t),$ $u_{n+1}(t) = p_{n+1}(t)$ (3)

式中: $\varphi_i(x)$ 为桥墩的振型函数; $q_i(t)$ 、 $p_{i,1}(t)$ 、 $p_{i,r}(t)$ 、 $p_0(t)$ 、 $p_{n+1}(t)$ 均为主坐标; $u_0(t)$ 、 $u_{n+1}(t)$ 均 为桥台处上部结构相对位移。

则式(1)、式(2) 可写为

 $T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} m_{i} (y_{i} + y_{g})^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} (y_{i} + m_{i}) \left[T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} m_{i} \left[\varphi_{i}(x) \dot{q}_{i} + \dot{y}_{g} \right]^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} (\dot{y}_{i} + m_{i}) \left[T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} m_{i} \left[\varphi_{i}(x) \dot{q}_{i} + \dot{y}_{g} \right]^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} (\dot{y}_{i} + m_{i}) \left[T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} m_{i} \left[\varphi_{i}(x) \dot{q}_{i} + \dot{y}_{g} \right]^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} (\dot{y}_{i} + m_{i}) \left[T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{H_{i}} m_{i} \left[\varphi_{i}(x) \dot{q}_{i} + \dot{y}_{g} \right]^{2} dx_{i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} (\dot{y}_{i} + m_{i}) \left[T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} M_{i} \left[T = \frac{1}{2} \sum$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing 花館式(名) 对应的齐次方程, 可得无阻尼多自

由度质点体系的第 *i* 阶频率 ω_i 和相应振型矩阵 φ_i ; 将式(6) 左乘 φ_i^T ,利用振型正交性可得第 *i* 阶振型参 与系数 γ_i 为

$$\gamma_i = \frac{\varphi_i^{\mathrm{T}} \Gamma}{\varphi_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \varphi_i} \tag{8}$$

由弹性反应谱理论可知,桥梁结构各部分地震 力分别为

 $F_{ji}(x) = C_1 C_2 K_{\rm H} \beta_i \gamma_i \varphi_{ij}(x) G_j$ (9) 式中:*i* 为振型编号;*j* 为构件号; $C_1 \setminus C_2 \setminus K_{\rm H} \setminus \beta_i G_j$ 分 别为重要性系数、综合系数、水平地长系数、动力放 大系数和构件主力。

2 半解析计算

大量计算表明,简支梁结构的第一阶振型地震 力占总地震力的 90% 以上,高阶振型对地震力计算 值的影响很小,可以忽略不计。因此,这里仅给出桥 墩横向一阶振型函数的分解形式^[8-10]。

2.1 单 墩

对于单柱墩,假设桥墩的一阶振型函数为 $\varphi_i(x) = \frac{1}{\alpha_i} \left[\frac{3y_{1i}}{H_i^3} (\frac{H_i x^2}{2} - \frac{x^3}{6}) + y_{2i} \frac{x}{H_i} + y_{3i} \right]$ (10)

式中: y1i、y2i、y3i 分别为在第i 个桥墩墩顶作用单位 水平力所引起的墩顶弹性挠曲水平位移、基础转动 和刚性平动引起的墩顶水平位移。

$$y_{1i} = \frac{H_i^2}{3EI_i}$$

$$y_{2i} = H_i^2 \, \delta_{IMi} + H_i \, \delta_{Mi}$$

$$y_{3i} = \, \delta_{Qi} + H_i \, \delta_{Mi}$$

$$\alpha_i = y_{1i} + y_{2i} + y_{3i}$$
(11)

由式(11),得桥梁等效计算参数为

$$M_{ei} = \frac{1}{\alpha_i^2} M_{pi} \left[\frac{33}{140} y_{1i}^2 + \frac{1}{3} y_{2i}^2 + y_{3i}^2 + \frac{1}{120} y_{1i} y_{2i} + \frac{3}{4} y_{1i} y_{3i} + y_{2i} y_{3i} \right] + M_i (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 + \frac{1}{\alpha_i^2} M_{fi} y_{3i}^2$$

$$K_{ei} = \frac{1}{\alpha_i^2} [y_{1i} + y_{2i} + y_{3i} + K_{i,r} (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 + K_{i,1} (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 - \frac{(M_{b(i+1)}/2 + M_i + M_{bi}/2)g}{H_i} \circ \frac{1}{H_i} \left[\frac{6}{5} y_{1i}^2 + 2y_{1i} y_{2i} + y_{2i}^2 \right]$$

$$\Gamma_{ei} = \frac{1}{\alpha_i} \left[M_{pi} (\frac{3}{8} y_{1i} + \frac{y_{2i}}{2} + y_{3i}) + M_i (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{3i}) + M_{fi} y_{3i} \right] \qquad i = 1, 2, ..., n$$

式中: $M_{pi} = m_i H_i$,为等截面墩身的质量。

2.2 双柱式墩

对于整体基础双柱式桥墩,假设其一阶振型函 数为

$$\varphi_{i}(x) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{3y_{1i}}{H_{i}^{3}} (H_{i}x^{2} - \frac{2}{3}x^{3}) + y_{2i} \frac{x}{H_{i}} + y_{3i} \right]$$
(13)

其中

$$y_{1i} = \frac{H_i^3}{12\sum_{i=1}^n EI^i}$$

$$y_{2i} = H_i^2 \,\delta_{\mathrm{IM}\,i} + H_i \,\delta_{\mathrm{M}\,i}$$

$$y_{3i} = \,\delta_{\mathrm{Q}i} + H_i \,\delta_{\mathrm{M}\,i}$$

$$(14)$$

则桥梁等效计算参数为

$$M_{ei} = \frac{1}{\alpha_i^2} M_{pi} \left[\frac{13}{35} y_{1i}^2 + \frac{1}{3} y_{2i}^2 + y_{3i}^2 + \frac{7}{10} y_{1iy} y_{2i} + y_{1iy} y_{3i} + y_{2iy} y_{3i} \right] + M_i (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 + \frac{1}{\alpha_i^2} M_{fi} y_{3i}^2$$

$$K_{ei} = \frac{1}{\alpha_i^2} [y_{1i} + y_{2i} + y_{3i} + K_{ir} (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 + K_{ir} (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})^2 - \frac{(M_{b(i+1)}/2 + M_i + M_{bi}/2)g}{H_i} \circ H_i$$

$$\left[\frac{6}{5} y_{1i}^2 + 2y_{1i} y_{2i} + y_{2i}^2 \right]$$

$$\Gamma_{ei} = \frac{1}{\alpha_i} \left[M_{pi} (\frac{1}{2} y_{1i} + \frac{1}{2} y_{2i} + y_{3i}) + M_i (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{3i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{3i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{3i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{2i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{2i} + y_{2i}) + M_{ii} (y_{1i} + y_{2i} + y_{2i}$$

3 算例分析

一室内三等跨等截面简支模型梁桥,采用等高 的双柱式桥墩,刚性桥台基础,橡胶支座,跨径 $L_i =$ 2 m,上部结构质量 $M_{bi} = 41.09$ kg,惯性矩 $J_i =$ 13.70 kg°m²,盖梁质量 $M_i = 18.25$ kg,承台质量 $M_i = 74.4$ kg,桥墩分布质量 $m_i = 2.867$ kg/m,桥 墩刚度 $EI_i = 1.55 \times 10^4$ N°m²,桥墩高度 $H_i =$ 0.9 m,支座水平刚度 $K_{i1} = K_{inr} = 1.4 \times 10^5$ N/m, 地基参数 $y_{11} = 0.2037 \times 10^{-5}$ m/N, $y_{21} = 0.5435 \times$ 10^{-5} m/N, $y_{31} = 0.1148 \times 10^{-5}$ m/N, $y_{32} = 0.1149 \times$ 10^{-5} m/N, $y_{22} = 0.5579 \times 10^{-5}$ m/N, $y_{32} = 0.1149 \times$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House: All rights reserved: http://www.cnki.net



图 3 试验模型布置 表 1 横桥向频率对比

项目	振型描述	试验值/Hz	本文计算值/ Hz	误差/ %
第一阶	两桥墩同向振动	6. 32	6.62	4.5
第二阶	两桥墩反向振动	7.37	7. 75	4.9

试验中发现,简支梁桥全桥的低阶振动是由桥 墩一阶振动(一阶振型)引起的。同时由表1可知, 本文的计算值与试验值吻合较好,说明本文计算方 法是可行的。

4 结 语

(1)根据动力学原理,利用拉格朗日方程推导了 包含地基参数在内的多跨简支梁桥横桥向地震振动 方程,给出了相应的基频及振型参与系数。

(2)模态试验结果表明,将桥墩的静力挠度曲线 作为桥墩的振型函数是可行的。

(3)考虑支座及弹性地基作用后,多跨简支梁桥 的低阶振动是由桥墩一阶振型引起的。

参考文献:

References:

- [1] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范[S].
- [2] 刘伯权,黄 华,刘 鸣.简支梁桥在车辆荷载谱作用 下的动力分析[J].土木工程学报,2006,39(3): 76-80.

LIU Bo-quan, HUANG Hua LIU Ming. Dynamic analysis of simply supported beam bridges under vehicle load spectrum [J]. China Civil Engineering Journal 2006 39(3): 76-80.

[3] 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.

[4] 周勇军,赵小星,贺拴海,等.弯钢箱梁桥的动力分析
 及模型试验[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 curved steel box girder[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(4): 20-24.

- [5] 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 capacity for continuous bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2):147-151.
- [6] 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.

- [7] JTJ 02485, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [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] 周勇军,贺拴海,宋一凡,等.弹性地基上连续梁桥顺桥向地震振动分析[J].长安大学学报:自然科学版, 2008,28(2):49-52.

ZHOU Yong-jun HE Shuan-hai, SONG Yi-fan et al. Longitudinal seismic vibration of continuous beam bridge on elastic foundation[J]. Journal of Chang an University: Natural Science Edition 2008, 28 (2): 49-52.

[10] 张建仁,王 磊.既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J].中国公路学报,2006,19(2):49-55.
ZHANG Jian ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2):49-55.

C) 1994-2020 China J. Control Effectionic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net