

## 在役桥梁结构延性系数的动力评价方法

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:**以桥墩的基本振型函数为基础,推导出基于试验动力参数的在役桥梁结构延性系数的计算公式,并给出了结构非弹性地震力的求解方法。对室内钢模型桥利用冲击力锤法进行了模态试验和静力对比试验,实测参数与理论值相差仅 2%,在此基础上利用给出的公式可以求得桥墩的变形增加系数为 2.78。结果表明,在场地土条件未知的情况下,利用动力试验法对在役桥梁结构延性系数进行评价是可行的。

**关键词:**桥梁工程;在役桥梁;延性;模态试验;强度折减系数;非弹性地震力

**中图分类号:**U442.55

**文献标识码:**A

### Dynamic assessment method of ductility coefficient for existing beam bridges

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, China)

**Abstract:** Based on the pier's mode shape function, this paper studied the methodology of structure ductility coefficient by modal test and the procedure of the structure's inelastic seismic force. A modal test using impact excitation method as well as static test was carried out indoors in a steel model. The dynamic parameter derived from the test had an error of 2% compared with the theoretical one. Using the formula presented in the paper, the pier's deformation coefficient was calculated, which was 2.78. The results indicate that if the foundation on which the bridge is sited is difficult to predominate, the dynamic test is an effective measurement for studying the bridge's ductility coefficient. The method can be used to evaluate the seismic resistance performance of existing bridges. 4 figs, 7 refs.

**Key words:** bridge engineering; existing bridges; ductility; modal test; strength reduction factor; inelastic seismic force

## 0 引言

在中国现有桥梁抗震规范中,结构地震力的求解是采用弹性反应谱理论<sup>[1]</sup>,因仅引入 1 个综合系数考虑结构的非线性、计算模式的简化、阻尼的影响,

故存在一定的误差。目前,用动测法评定桥梁抗震能力的研究为数不多,在实际操作中,还存在许多不确定因素的干扰,如结构的损伤、支承条件的改变、结构在破损状况下的非线性等,特别是服役时间较长的桥梁,由于缺乏完整的技术资料,场地土性质

收稿日期:2004-09-15

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2002 318 223 29)

作者简介:周勇军(1978-),男,湖北孝昌人,长安大学讲师,博士研究生。

不易确定,从而很难模拟真实结构。基于延性概念的三阶段设计是目前中国桥梁界研究的热点<sup>[2,3]</sup>,本文试图探讨梁桥结构延性与地震力的关系,寻求一种实用方法来掌握既有桥梁结构的延性,对在役桥梁结构抗震能力进行评估。

## 1 基本原理

### 1.1 振型函数

为方便起见,本文以位于弹性基础上的单柱式桥墩为例进行说明。

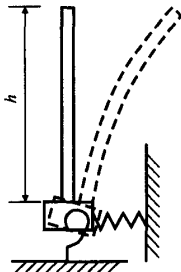


图1 桥墩变形示意

大量的数值试验表明,大部分梁桥的全桥低阶振动都是由桥墩的一阶振动形成的。这里取在墩顶作用单位集中力时桥墩的挠曲函数作为桥墩的一阶振型<sup>[4,5]</sup>。如图1,当单位集中力作用在墩顶时,桥墩的变形可以分为以下三部分:由于桥墩弹性变形发生的位移、由于基础转动引起的位移以及由于基础平动引起的位移,其对应的墩顶水平位移分别为 $y_1$ 、 $y_2$ 和 $y_3$ ,则有

$$y_1 = h^3/[EI] \quad (1)$$

$$y_2 = h^2\delta_{MM} + h\delta_{QM} \quad (2)$$

$$y_3 = \delta_{QQ} + h\delta_{QM} \quad (3)$$

式中: $EI$ 为桥墩的抗弯刚度; $h$ 为桥墩的高度(从地面一般冲刷线算起); $\delta_{MM}$ 、 $\delta_{QM}$ 、 $\delta_{QQ}$ 为地基柔度系数。

由此可得桥墩的静挠度曲线(即桥墩的基本振型函数)为

$$\varphi(x) = \frac{1}{y_1 + y_2 + y_3} \left[ \frac{3y_1}{h^3} \left( \frac{h}{2}x^2 - \frac{x^3}{6} \right) + y_2 \frac{x}{h} + y_3 \right] \quad (4)$$

同理,对整体式基础双(多)柱框架墩,因强大的盖梁使桥墩墩顶无相对转动,则桥墩的振型函数为

$$\varphi(x) = \frac{1}{y_1 + y_2 + y_3} \left[ \frac{3y_{1h}}{h^3} \left( hx^2 - \frac{2}{3}x^3 \right) + y_2 \frac{x}{h} + y_3 \right] \quad (5)$$

其中, $y_1 = \frac{h^3}{12 \sum_{i=1}^n [EI_i]}$ ,  $EI_i$ 为单柱的抗弯刚度。

对分离式基础双(多)柱框架墩,墩顶仅有水平位移而无转动位移<sup>[6]</sup>,则桥墩的振型函数为

$$\varphi(x) = \frac{1}{y_{1h} - y_{1m} + y_2 + y_3} \left[ \frac{3y_{1h}}{h^3} \left( \frac{h}{2}x^2 - \frac{x^3}{6} \right) - y_{1m} \frac{x^2}{h^2} + y_2 \frac{x}{h} + y_3 \right] \quad (6)$$

式中: $y_{1h}$ 为桥墩基础固结时墩顶作用单位力产生的墩顶弹性挠曲位移, $y_{1h} = \frac{h^3}{3[EI_i]}$ ;  $y_{1m}$ 为桥墩基础固结时墩顶作用单位力因约束力矩所产生的墩顶弹性挠曲位移, $y_{1m} = \frac{h^2}{2[EI_i]}M_a$ ;  $M_a$ 为约束力矩,可由力法或位移法解得到

$$M_a = h - \frac{\frac{h^2}{2[EI_i]} - \delta_{QM}}{\frac{h}{[EI_i]} + \delta_{MM}}$$

### 1.2 延性系数

图2为单柱式桥墩水平变位的计算示意图。

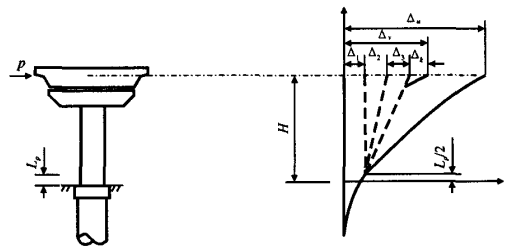


图2 单柱式桥墩在水平地震作用下的变位

设水平地震力 $p$ 作用在上部结构质量中心,忽略盖梁变形,质量中心的水平位移主要由桥墩、支座和基础变位引起的位移组成,墩底达到屈服前桥墩处于弹性状态。记墩底到上部质量中心的距离为 $H$ (如果忽略盖梁和上部结构梁高,则 $H=h$ ),支座总的抗推刚度为 $k$ ,则质量中心处由于桥墩发生弹性变形所产生的水平位移 $\Delta_1$ 为

$$\Delta_1 = p y_1 = \frac{p H^3}{3[EI]} \quad (7)$$

由于基础转动引起的水平位移 $\Delta_2$ 为

$$\Delta_2 = p y_2 \quad (8)$$

由于基础平动引起的水平位移 $\Delta_3$ 为

$$\Delta_3 = p y_3 \quad (9)$$

由于支座剪切变形引起的水平位移 $\Delta_4$ 为

$$\Delta_4 = p/k \quad (10)$$

墩底屈服时的曲率 $\varphi_y$ 为

$$\varphi_y = \frac{pH}{[EI]} \quad (11)$$

则结构的屈服位移 $\Delta_y$ 为

$$\Delta_y = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = C \frac{H^2}{3} \varphi_y \quad (12)$$

其中, $C$ 为变形增加系数,且

$$C = 1 + \frac{y_2}{y_1} + \frac{y_3}{y_1} + \frac{1}{k y_1} \quad (13)$$

如果以某种方式测得桥墩的 $\frac{y_2}{y_1}$ 和 $\frac{y_3}{y_1}$ 值,由式

(13) 就可以得到  $C$  值。对比文献[2],可以看出这里  $C$  的意义更加明确,具有更强的可操作性。

结构达到极限状态时,质量中心的总位移  $\Delta_u$  为

$$\Delta_u = \Delta_y + \theta_p(H - 0.5L_p) \quad (14)$$

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y)L_p \quad (15)$$

式中:  $\varphi_u$  为墩底截面的极限曲率;  $L_p$  为塑性铰长度。

引入 Eurocode8 规范规定的塑性铰长度

$$L_p = 0.08H + 0.022f_y d_s \geq 0.044f_y d_s \quad (16)$$

式中:  $f_y$  为纵向钢筋屈服强度;  $d_s$  为纵向钢筋直径。

由结构的位移延性定义有

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (17)$$

将式(12)、式(14)代入式(17)中有

$$\mu_\Delta = 1 + \frac{3}{C} \left( \frac{\varphi_u}{\varphi_y} - 1 \right) L_p \left( \frac{1}{H} - 0.5 \frac{L_p}{H^2} \right) \quad (18)$$

同理,对双柱式(多柱式)桥墩也可以推得类似公式。

### 1.3 非弹性地震力

目前,各国的抗震设计规范仍都采用基于强度的设计方法,通过折减弹性力来确定结构的设计强度水平,并利用结构的延性能力来弥补结构强度的不足,期望在结构容许的变形范围内充分发挥其塑性耗能的能力来抵御地震作用。鉴于中国规范中综合系数取值模糊,意义不明确,这里给出3类不同场地土相应的平均强度折减系数的函数表达式<sup>[3~7]</sup>。

(1) I类场地

$$R_\mu(T, \mu_\Delta) = 1 + (\mu_\Delta - 1)(1 - e^{-4.48T}) + \frac{\mu_\Delta - 1}{0.8 + 0.89\mu_\Delta} T e^{-0.4T} \quad (19)$$

(2) II类场地

$$R_\mu(T, \mu_\Delta) = 1 + (\mu_\Delta - 1)(1 - e^{-3.95T}) + \frac{\mu_\Delta - 1}{0.76 + 0.09\mu_\Delta - 0.003\mu_\Delta^2} T e^{-0.65T} \quad (20)$$

(3) III类场地

$$R_\mu(T, \mu_\Delta) = 1 + (\mu_\Delta - 1)(1 - e^{-1.38T}) + \frac{\mu_\Delta - 1}{0.41 + 0.06\mu_\Delta - 0.003\mu_\Delta^2} T e^{-0.87T} \quad (21)$$

则非弹性地震力  $F_y$  为

$$F_y = F_e / R_\mu \quad (22)$$

式中:  $F_e$  为结构在线弹性状态时的地震力。

## 2 动测法原理

传感器测点位置一旦确定,由式(4)~式(6)可得传感器位置矩阵为  $A$ ,将测得的桥墩一阶振型对墩顶模态位移归一化得到向量为  $\varphi$ ,则

$$AY = \varphi \quad (23)$$

式(23)左乘  $A$  的广义逆矩阵  $A^{-1}$  得

$$Y = A^{-1} \varphi \quad (24)$$

即可求得式(13)中的参数值。

通常精确测量桥墩的振型,所需传感器数量较多,若传感器数量有限,建议选择适当的测点位置以使矩阵  $A$  可逆,从而保证求解的顺利进行,另外,如果将  $\varphi$  视为挠度曲线,则可以通过静力的方法获得参数  $y_1, y_2, y_3$ ,从而求出  $C$  值。

## 3 非弹性地震力计算过程

第一步:根据外观调查和现有资料获取桥梁的基本信息,计算塑性铰截面曲率延性  $\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$ ,参数  $y_1, k, L_p$ ;

第二步:实测模态参数(频率、振型),由式(24)求出  $y_2 / y_1$  和  $y_3 / y_1$  值;

第三步:由式(18)求  $\mu_\Delta$ ;

第四步:由式(19)或式(20)或式(21)求  $R_\mu$ ;

第五步:通过规范反应谱法<sup>[1]</sup>求得弹性地震力,由式(22)求得非弹性地震力。

## 4 模型试验

试验模型为3跨连续,双柱式桥墩,桥墩结构尺寸如图3所示。地基土以弹簧来模拟,试验模型如图4所示。桥墩刚度  $EI = 3.1 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,支座刚度  $k = 1.4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。试验时,在桥墩平面外(顺桥向)对桥墩激励,在顺桥向桥墩平面内每  $\frac{i}{4} (i=0, 1, 2, 3, 4)$  的高度处安放加速度传感器,全桥共  $4 \times 5 = 20$  个测点。首先在墩顶沿顺桥向施加水平集中力,测量桥墩的挠度,由静力试验求得  $y_1 = 0.7734 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$  (理论值  $0.786 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$ ),然后采用力锤冲击法进行了模态试验,测得桥墩各测点(由上到下)振动幅值向量的平均值为  $[12.98 \ 9.14 \ 5.97 \ 3.01 \ 1.45]$ ,经分析处理可得  $y_2 / y_1 = 0.7073, y_3 / y_1 = 0.1526$ ,则由式(13)有  $C = 2.78$ 。

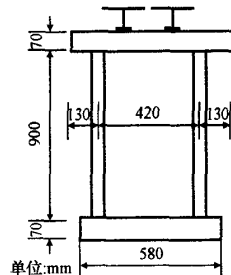


图3 模型桥墩尺寸



图4 全桥试验模型

由以上计算可知,  $\gamma_1$  的试验值与理论值误差为 2%, 说明动力试验求解变形增加系数的方法是可行的。

## 5 结 语

(1) 由于规范中的综合系数涉及因素较多, 建议对诸因素展开单独分析。

(2) 考虑到混凝土结构在破损时进入塑性区域这一性质, 对于钢筋混凝土桥梁结构, 应采用延性来反应桥梁结构的塑性耗能能力, 并在此基础上计算结构的非弹性地震力。

(3) 对于在役桥梁结构, 由于场地条件的变化、环境和边界条件等的改变, 对结构进行评估时很难模拟结构的真实状况, 可利用本文建立的动力参数与结构延性系数之间的关系, 借助动力试验手段, 对在役桥梁抗震能力进行评估。

### 参考文献:

#### References:

- [1] JTJ004-89. 公路工程抗震设计规范[S]. 1989.  
JTJ004-89. Specifications of earthquake resistant design for highway engineering[S]. 1989.
- [2] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.  
FAN Li-chu. Seismic resistance of bridge [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [3] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
FAN Li-chu, ZHUO Wei-dong, Seismic design of ductility for bridge [M]. Beijing: People's Communications Press, 2001.
- [4] 陈兴冲. 桥墩自振频率的能量公式[J]. 北京: 土木工程学报, 1999, 32(5): 76-80.  
CHEN Xing-chong. Formulas of energy method for the natural frequency of bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(5): 76-80.
- [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, 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.
- [7] 范立础, 聂利英, 李建国. 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.

## 《中国公路学报》2005 年征订通知

《中国公路学报》(季刊)是中国公路学会主办的公路交通行业最权威的学术性刊物, 主要刊载道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济与工程经济等专业应用技术及理论性文章, 并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。《中国公路学报》网络版——中国公路网延伸了《中国公路学报》的信息传播功能, 为读者提供全方位的公路交通信息服务。中国公路网的网址为: <http://www.highway-china.com>。

《中国公路学报》(大 16 开本)读者对象为: 公路交通界的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。《中国公路学报》每期定价 15.00 元(含邮资费), 2004 年 4 期共 60.00 元。

另外, 《中国公路学报》编辑部现有少量 2002 年合订本, 100 元(含邮资费)/册。欢迎订阅!

收款单位: 长安大学杂志社(西安市南二环路中段)

帐号: 3700021609014486011

开户行: 西安市工商行小寨分理处 邮编: 710064

联系人: 赵文义 电话: (029) 82334387