

文章编号 : 1000-4750(2004)02-0157-10

基于直杆共轴碰撞理论的 桥梁地震反应邻梁碰撞分析模型

王东升¹, 冯启民², 王国新¹

(1. 海岸与近海工程国家重点试验室, 大连理工大学, 大连 116024; 2. 中国海洋大学, 青岛 266071)

摘 要: 桥梁结构在强烈地震动作用下, 伸缩缝两边的主梁会因运动的相对位移大于伸缩缝间距而发生碰撞, 造成桥梁结构损坏, 甚至引发落梁。研究目的是建立较合理的邻梁碰撞问题分析模型。通过引入表征邻梁碰撞相互作用的碰撞弹簧, 基于直杆共轴碰撞理论建立了邻梁碰撞问题的分析模型, 采用解析与数值结合的方法研究了碰撞弹簧刚度比 α 、邻梁长度比 l_2/l_1 和阻尼比 χ 等参数对碰撞力、碰撞持续时间和耗能的影响。利用美国加州强震观测计划(CSMIP)获得的邻梁碰撞强震记录, 估计了碰撞弹簧刚度约为 0.5 倍的较短主梁轴向刚度。

关键词: 桥梁; 地震反应; 碰撞; 强震记录

中图分类号: P315.9, U442.5+5 文献标识码: A

ANALYSIS MODEL OF POUNDING BETWEEN ADJACENT BRIDGE GIRDERS DURING EARTHQUAKES BASED ON COLLINEAR IMPACT BETWEEN RODS

WANG Dong-sheng¹, FENG Qi-min², WANG Guo-xin¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

Abstract: Pounding will occur between adjacent bridge girders if the maximum relative displacement is larger than the expansion joint gap during earthquakes. Pounding may result in structural damage or even lead to collapse of superstructures. The study is aimed at establishing a reasonable analysis model of pounding between adjacent bridge girders during earthquakes. Bridge girders are modeled as elastic rods with the same cross section and collinear impact between them is expressed by a impact spring. Effects of parameters including impact spring stiffness ratio α , length ratio l_2/l_1 between adjacent bridge girders and damping ratio χ on impact force, impact duration and energy loss are discussed on the basis of analytical solution and numerical simulation. In determining a suitable value of impact spring stiffness, the strong-motion data recorded on a concrete bridge instrumented by the California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP) are used. The impact spring stiffness is found to be about 0.5 times that of axial stiffness of the shorter bridge girder.

Key words: bridge; seismic response; pounding; strong-motion record

收稿日期: 2002-10-09; 修改日期: 2003-04-23

基金项目: 地震科学联合青年基金资助(100015)

作者简介: 王东升(1974), 男, 内蒙古库伦旗人, 副研究员, 博士, 从事桥梁抗震研究(E-mail: wds@up369.com);

冯启民(1943), 男, 黑龙江兰西县人, 教授, 博士生导师, 从事地震工程研究;

王国新(1961), 男, 山西沁水县人, 副研究员, 从事地震工程研究

1 引言

伸缩缝是桥梁为适应桥跨结构在温度变化下和活载作用下所引起的变形而设置的装置,在强烈地震动作用下,伸缩缝两边的主梁会因平面内、外运动的相对位移大于伸缩缝间距而发生碰撞。这种碰撞行为一般会带来诸如主梁梁端开裂、桥台胸墙局部混凝土脱落、伸缩缝挤压等对桥梁结构轻微的破坏。但在某些情况下,碰撞也会引起桥梁结构发生严重的落梁破坏。我国1976年唐山大地震中,滦河大桥的严重落梁破坏曾引起桥梁抗震工作者们的广泛关注,他们以各种可能原因对震害现象进行了解释,在不同程度上都提到了伸缩缝处相邻主梁的碰撞作用^[1]。日本1995年Kobe地震桥梁震害经验再次表明,支座破坏后发生的碰撞作用是引起桥梁局部损坏和落梁破坏的原因之一^[2,3]。碰撞还可以发生在多层立交桥高度不同的相邻结构之间,即标高较低的上部结构与相邻较高结构的桥墩发生碰撞。1989年美国Loma Prieta地震中China Basin/Southern高架桥I-280截面处,因下层路面与支承上层路面的桥墩之间预留的150mm的间距不足,两者在地震中发生了冲撞,桥墩和下层路面都发生了中等左右的破坏现象^[4]。

关于地震中桥梁碰撞问题的分析,目前主要是基于刚体碰撞理论^[5,6],分别用等效的弹簧元件和粘滞阻尼器表示结构碰撞过程中的相互作用特性和能量耗散特性,模型参数选取很大程度上依赖于研究者的主观判断。1992年美国CSMIP(California Strong Motion Instrumentation Program)在位于南加利福尼亚I-10/215公路连接处的1座多跨曲线梁桥上获得了多组完整的强震记录,表明伸缩缝处碰撞

发生的机理相当复杂,包括横向运动的摩擦碰撞、纵向运动的不均匀正碰、限位器引起的碰撞等,同时碰撞产生的加速度脉冲还以波动的形式向远端传播^[7]。P. K. Malhotra据此认为采用直杆共轴碰撞理论分析邻梁碰撞问题更为合理,他基于经典直杆共轴碰撞理论建立了恢复系数、主梁材料阻尼比和邻梁长度比的关系,并认为碰撞持续时间可以取为较短主梁的轴向振动基本周期^[8]。

事实上,认为桥梁结构地震反应邻梁碰撞介于刚体碰撞和直杆共轴碰撞之间可能更为合理,由此本文引入刚体碰撞模型中表征碰撞相互作用的等效弹簧元件,在P. K. Malhotra工作基础上基于直杆共轴碰撞理论建立了邻梁碰撞问题分析模型,并利用CSMIP获得的邻梁碰撞强震记录近似估计了碰撞弹簧刚度。如无特殊说明,在本文中邻梁碰撞是指邻梁纵向正碰情况。

2 基于直杆共轴碰撞理论分析邻梁碰撞问题

2.1 邻梁碰撞理论分析

邻梁碰撞理论分析模型如图1所示。主梁简化为弹性杆1和弹性杆2(以下依模型简化称之为杆),桥墩对主梁的约束作用简化为水平弹簧 k_1 和 k_2 ,邻梁间的相互作用以碰撞弹簧或接触弹簧 k 表示。为分析方便,暂不考虑阻尼作用。设杆1以速度 v_0 向右运动,杆2处于静止,在 $t=0$ 时刻杆1和杆2通过弹簧 k 相互接触,发生碰撞。设杆1和杆2具有相同的截面积 A 、质量密度 ρ 、弹性模量 E 和纵波波速 c ,但杆长 l_1 和 l_2 不等,且满足 $l_2 > 2l_1$ 。

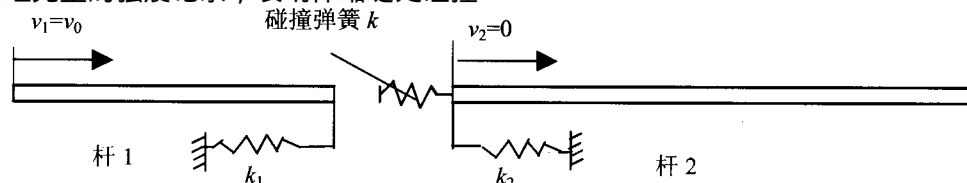


图1 邻梁碰撞理论分析模型

Fig.1 Analysis model of pounding between adjacent bridge girders

定义 $-I = \frac{k}{Ar}$, $-I_1 = \frac{k_1}{Ar}$, $-I_2 = \frac{k_2}{Ar}$, 由力的平衡条件和波动力学中的波阵面动量守恒条件可建立系统运动微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \mathbf{s}_1}{dt^2} \\ \frac{d^2 \mathbf{s}_2}{dt^2} \end{cases} = \begin{bmatrix} I + I_1 & I \\ I & I + I_2 \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{d\mathbf{s}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{s}_2}{dt} \end{cases} - \begin{cases} 2(I + I_1) \frac{d\mathbf{s}_r}{dt} \\ 2I \frac{d\mathbf{s}_r}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{s}_1 和 \mathbf{s}_2 分别表示杆1和杆2与碰撞弹簧接

触点的应力。这里为研究方便，将应力 s_1 写成左行波 s_l 和右行波 s_r 的和，即：

$$s_1 = s_l + s_r \quad (2)$$

由 $l_2 > 2l_1$ 假定，认为 s_2 永远是右行波。

若假定 $k \gg k_1, k \gg k_2$ ，即碰撞弹簧刚度远大于桥墩等效水平刚度，上式中的 I_1 和 I_2 可以忽略，在后面我们将具体说明这个假定的合理性。则(1)式变为：

$$\begin{Bmatrix} \frac{d^2 s_1}{dt^2} \\ \frac{d^2 s_2}{dt^2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & I \\ I & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{ds_1}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 2I \frac{ds_r}{dt} \\ 2I \frac{ds_r}{dt} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

为求解方程(3)，定义参数 a 表示碰撞弹簧刚度与杆1的轴向刚度之比， $a = k / (EA / l_1)$ 。因杆1的轴向振动基本周期 $T_0 = 2l_1 / c$ ，可以给出 I 、 a 和 T_0 三者的关系式： $I = -2a(T_0)^{-1}$ 。定义无量纲参数 $\{\bar{s}\} = [s_1, s_2]^T / (0.5rcv_0)$ ， $\bar{t} = t / T_0$ ，给出方程(3)的解：

(i) 当 $0 \leq \bar{t} < 1$ 时，杆1左端反射波尚未到达碰撞接触点， $s_r = 0$ ，则：

$$\{\bar{s}\} = [-(e^{-4a\bar{t}} - 1.0), -(e^{-4a\bar{t}} - 1.0)]^T \quad (4)$$

(ii) 当 $1 \leq \bar{t} < 2$ 时，反射波到达接触点，其表达式为：

$$s_r = \frac{1}{2} r v_0 (e^{-4a(\bar{t}-1.0)} - 1.0) \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式，有：

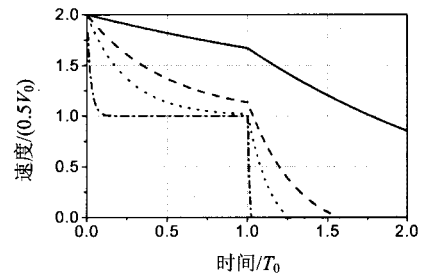
$$\{\bar{s}\} = [-\{e^{-4a\bar{t}} + [(-4a) \cdot (\bar{t} - 1.0) - 1.0]e^{-4a(\bar{t}-1.0)}\}, -\{e^{-4a\bar{t}} + [(-4a) \cdot (\bar{t} - 1.0) - 1.0]e^{-4a(\bar{t}-1.0)}\}]^T \quad (6)$$

由(4)式和(6)式 结合波动力学中的波阵面动量守恒条件可得到速度反应：

$$\begin{cases} \{\bar{v}\} = [e^{-4a\bar{t}} + 1.0, -e^{-4a\bar{t}} + 1.0]^T & 0 \leq \bar{t} < 1 \\ \{\bar{v}\} = [e^{-4a\bar{t}} + (-4a(\bar{t} - 1.0) + 1.0)e^{-4a(\bar{t}-1.0)}, -e^{-4a\bar{t}} - (-4a(\bar{t} - 1.0) - 1.0)e^{-4a(\bar{t}-1.0)}]^T & 1 \leq \bar{t} < 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\{\bar{v}\} = [v_1, v_2]^T / (0.5v_0)$ ， v_1 和 v_2 分别表示杆1和杆2与碰撞弹簧接触点的速度。

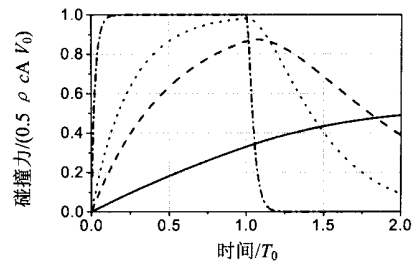
图2和图3分别给出了不同碰撞弹簧刚度比条件下杆1接触点的速度波形和两杆之间碰撞力波形的变化情况，可以看出 a 越大(碰撞弹簧刚度越大)，速度波形和碰撞力波形变化越剧烈，会在很短的时间内达到其极限值。当 $a=10$ 时，分析结果已经很接近于直杆共轴碰撞的理论解。



— $\alpha=0.10$, - - - $\alpha=0.50$, $\alpha=1.0$, - · - · $\alpha=10$

图2 杆1接触点速度变化

Fig.2 Variation of velocity at contact point of rod 1



— $\alpha=0.10$, - - - $\alpha=0.50$, $\alpha=1.0$, - · - · $\alpha=10$

图3 碰撞力变化

Fig.3 Variation of impact force at interface

2.2 邻梁碰撞数值分析

以上研究工作为获得解析解，没有考虑碰撞中的耗能(阻尼作用)以及邻梁的长度比小于2时的情况，所考虑的时间过程也仅是2倍的较短主梁的轴向振动基本周期，存在诸多局限性。为更好地反映上述各类因素对邻梁碰撞的影响，采用有限元法进行了数值分析。

邻梁碰撞有限元分析模型如图4所示，同样未考虑桥墩对主梁约束作用。主梁(以下依模型简化称之为杆)采用桁架单元离散，碰撞弹簧以只能承受压力的联系单元模拟。阻尼模型取为与刚度成比例的瑞利阻尼，单元阻尼矩阵为 $[c_i] = \frac{2.0x}{w} [k_i]$ ， x 为阻尼比， k_i 为单元刚度， w 依据单元位置取杆1或杆2的一阶自振频率(零频除外)。采用这种阻尼模型的优点是对刚体运动不存在能量耗散，比较符合直杆共轴碰撞问题的实际情况。分析程序为 DRAIN-2DX。

设杆1长 $l_1=100m$ ；杆2长 $l_2=300m$ ，并依据参数讨论需要作相应调整；截面积 $A=6.45m^2$ ；弹性模量 $E=2.79 \times 10^{10}N/m^2$ ；质量密度 $r=2.28 \times 10^3kg/m^3$ ；波速 $c=3500m/s$ ；阻尼比 $x=0.02-0.06$ 。取单元步长 $Dx=2.5m$ ，时间步长 $Dt=0.0001s$ 。

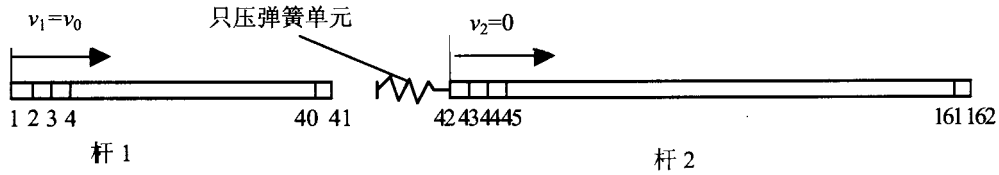
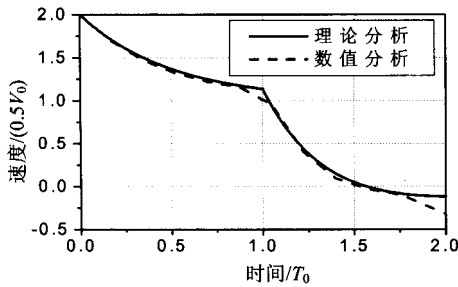


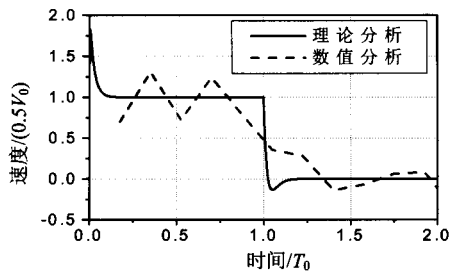
图4 邻梁碰撞有限元分析模型

Fig.4 Finite element model of pounding between adjacent bridge girders

图5和图6分别给出了在阻尼比 $\alpha=0.0$ 时，杆1接触点的速度波形和两杆碰撞力波形的理论分析和数值分析结果的比较，二者具有很好的一致性。当碰撞弹簧刚度比 $a=10$ 时，理论分析和数值分析结果存在一定误差，尤其是速度波形。考虑到实际中，即便在试验室条件下，两杆共轴碰撞因接触截面并非完全光滑等原因，也不可能得到理论上的“阶跃”波形，因此 $a=10$ 并不具备实际意义。综上所述，认为所建立的有限元分析模型是合理的。



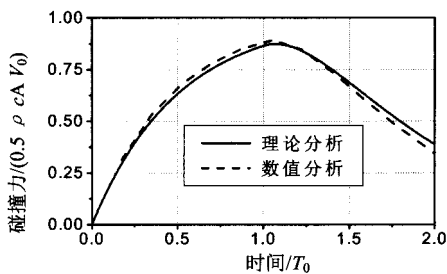
(a) $a=0.5$



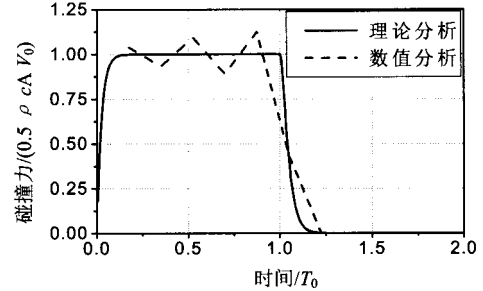
(b) $a=10.0$

图5 杆1接触点速度数值分析与理论分析对比

Fig.5 Comparison of velocity at contact point of rod 1 between analytical solution and numerical simulation



(a) $a=0.5$



(b) $a=10.0$

图6 碰撞力数值分析与理论分析对比

Fig.6 Comparison of impact force between analytical solution and numerical simulation

2.3 参数分析

取两杆(邻梁)阻尼比 $\alpha=0.00\sim 0.06$ ，碰撞弹簧刚度比 $a=0.5\sim 5.0$ ，邻梁长度比 $l_2/l_1=1.0\sim 3.0$ ，研究了这些因素对邻梁碰撞的影响。碰撞力、碰撞持续时间和碰撞过程中的能量耗散是我们关心的重点。

(1) 碰撞力和碰撞持续时间

图7给出了不同阻尼比 α 、碰撞弹簧刚度比 a 和邻梁长度比 l_2/l_1 参数条件下，碰撞力波形变化情况。阻尼比对碰撞力波形几乎没有影响。碰撞弹簧刚度比 a 是决定碰撞力波形的主要因素，这点与前述理论分析结果一致。邻梁长度比 l_2/l_1 主要影响碰撞力的下降段， l_2/l_1 越大，下降段越平缓。观察最大碰撞力发生时刻，发现它总在 $t=T_0$ 时，即较短主梁的轴向振动基本周期，此时从左端反射的拉伸波刚好到达碰撞接触面，两杆趋于分离。

从图7中还可以看出碰撞持续时间的变化情况，碰撞持续时间约在 $1.5T_0\sim 2.5T_0$ 之间。一般情况下 a 越小， l_2/l_1 越大，碰撞持续时间越长，但 a 的影响要大于 l_2/l_1 的影响。

(2) 两杆的运动状态

图8给出了不同阻尼比 α 、碰撞弹簧刚度比 a 和邻梁长度比 l_2/l_1 参数条件下，杆1和杆2与碰撞弹簧接触点的速度波形。与前面一样阻尼比 α 对速度波形影响很小，主要体现在碰撞分离后杆的自由衰减振动上。碰撞弹簧刚度比 a 对短杆1的影响要

大于长杆 2，而邻梁长度比 l_2/l_1 不同，接触点的速度波形则有相当大的差异。总体上看，在碰撞分离

后，杆的运动状态可以看成是刚体运动和自由衰减振动的合成。

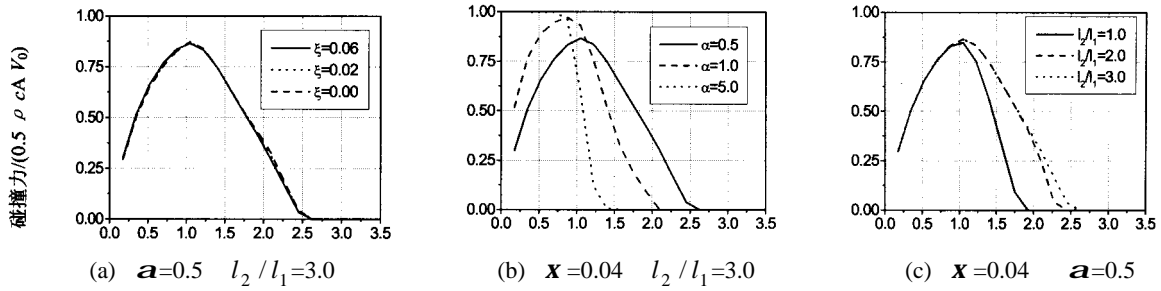


图 7 碰撞力变化情况

Fig.7 Results of impact force for varying parameters

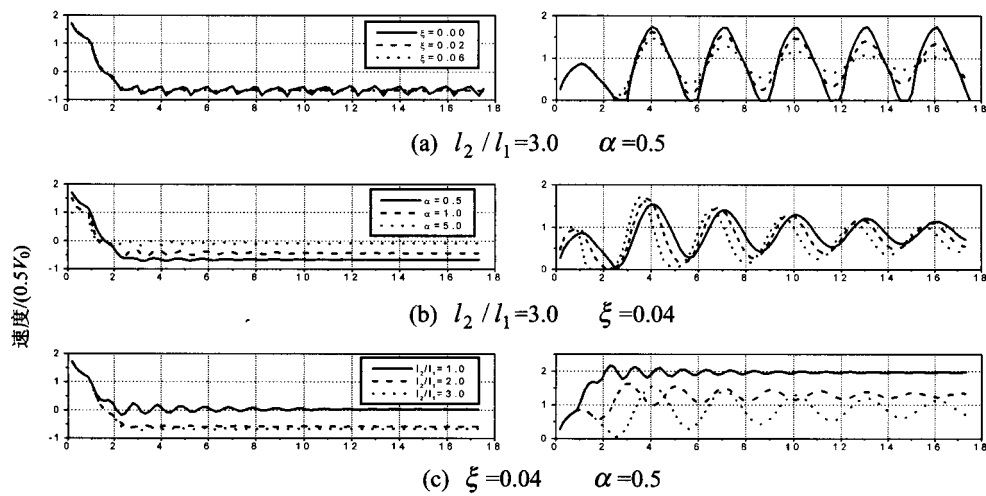


图 8 接触点速度时程(右：杆 1；左：杆 2)

Fig.8 Results of velocity at contact point for varying parameters (right: rod 1; left: rod 2)

图 9 邻梁碰撞能量耗散过程及影响因素

Fig.9 Decay of total system energy for varying parameters