

相邻梁段周期比对伸缩缝处的碰撞响应分析*

武芳文^{1,2}, 杨草方¹, 薛成凤¹, 申林¹, 李宇¹, 谢礼立²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对相邻两联连续梁桥伸缩缝处的碰撞现象, 基于其周期不一致而表现出的动力差异性, 进行动力时程分析, 采用直接积分法研究了地震作用下相邻联的非同向振动和伸缩缝处的碰撞响应。分析结果表明: 不同周期比的相邻梁体, 在地震动作用下产生的碰撞响应不同, 加速度峰值小持续时间长的地震波对伸缩缝处的碰撞响应较小; 碰撞对严重不同向振动的相邻两联 ($T_2/T_1 < 0.5$) 的地震响应影响很大, 随着相邻两联周期比的增大, 碰撞对结构地震反应影响逐渐减小。

关键词: 地震作用; 非规则梁桥; 周期比; 碰撞响应; 弯矩; 伸缩缝

中图分类号: TV352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0386-05

0 引言

近几十年来, 世界范围内发生了多次地震灾害, 造成了巨大的损失, 但历次桥梁结构的震害表明: 地震作用下的桥梁连接构造处的碰撞以及落梁是引起结构破坏的主要原因。由于梁式桥结构简单, 施工方便, 考虑综合效益, 当下数量居多, 占有桥梁的比重最大。因此, 小跨径桥梁碰撞效应的研究应该引起重视。

在地震作用下引起的桥梁落梁因素中, 相邻联梁段自身周期大小和周期比是重要因素之一。周光伟等(2012)对行波输入下连续梁桥不同周期的墩梁相对位移碰撞效应进行了分析, 指出当周期比较小 ($T_1/T_2 < 0.5$) 时, 碰撞效应最大, 当周期比较大 ($T_1/T_2 > 0.7$) 时, 碰撞效应较大, 而介乎中间的周期比的碰撞效应则较小。王军文等(2006)认为碰撞对基本振动周期比大于0.7的相邻联的地震反应影响不大。Reginald, Susendar(2002)对双边碰撞效应进行了初步研究, 发现双边碰撞可减小较柔框架的位移, 增大较刚框架的位移。目前国内外学者对地震作用下相邻桥跨间碰撞对位移的影响进行了大量的研究(许祥等, 2013; 高玉峰, 2007; 张文学等, 2013), 但对于碰撞对桥梁地震效应影响因素存在不同的观点, 并且对于碰撞效应没有系统的研究。因此,

研究碰撞对梁桥地震反应的影响规律对于桥梁抗震设计具有重要的现实意义。

为深入了解碰撞对非规则梁桥地震反应的影响, 本文计算分析时考虑连续梁跨质量的影响, 采用集中质量节点模拟, 将顺桥向质量作为连续梁上部结构与桥面质量的总和来建立碰撞模型, 并应用该模型研究纵向地震作用下非规则梁桥之间伸缩缝处的碰撞效应。

1 理论模型

本文选用两联连续梁桥作为研究对象(图1), 两联连接处为过渡墩, 分析非规则梁桥伸缩缝处之间的碰撞对结构地震响应的影响规律(Elias, Dimitrakopoulos, 2011; 武芳文等, 2014)。分析时, 假设地震动的空间不发生变化, 考虑不同地震波作用下的地震响应。

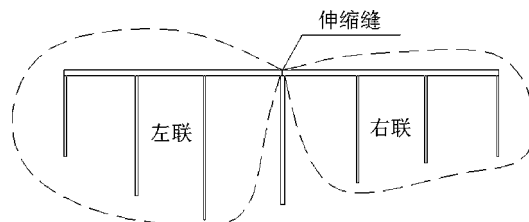


图1 桥梁总体布置图

Fig. 1 Diagram of the layout of general design of the bridges

* 收稿日期: 2014-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51408040, 51408042)和中央高校基本科研业务费专项资金(2013G1211012)联合资助。

考虑因桥梁结构为多自由度体系, 进行时程分析, 采用直接积分法, 其结构动力微分方程可表示为

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{F\}. \quad (1)$$

式中, $\{\ddot{y}\}$ 、 $\{\dot{y}\}$ 、 $\{y\}$ 分别为桥梁节点的加速度、速度和位移向量; $[M]$ 为桥梁的质量矩阵; $[C]$ 为桥梁的阻尼矩阵; $[K]$ 为桥梁的刚度矩阵; 作用在桥梁节点上的力列向量, 质量矩阵和刚度矩阵用有限元法直接生成, 阻尼计算方法采用质量因子和刚度因子从模型阻尼中计算 (Clough, 彭津, 1979)。

为分析方便, 将两联连续梁分别记为左联与右联, 其基本周期分别为 T_1 、 T_2 , 分析时为模拟两联之间的碰撞效应, 混凝土结构的阻尼比取 5%。采用瑞利阻尼进行线性和非线性时程分析, 离散图如图 2 所示。

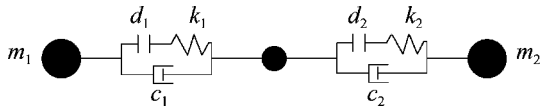


图 2 两联连续梁碰撞模型

Fig. 2 Pounding model of two continuous beam

为了模拟相邻联非同向振动导致伸缩处的碰撞, 采用如图 3 所示的接触单元模拟伸缩缝。伸缩缝处采用接触单元, 如图 2 所示。碰撞刚度取较短主梁纵向刚度 (张文学等, 2012; 王军文等, 2005; 陈学喜等, 2005), 恢复系数 e 取为 1.0, 即不考虑碰撞过程中的能量耗散。接触单元的非线性力—位移关系为

$$f = \begin{cases} k(d + x_s) & d + x_s < 0, \\ 0 & d + x_s \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

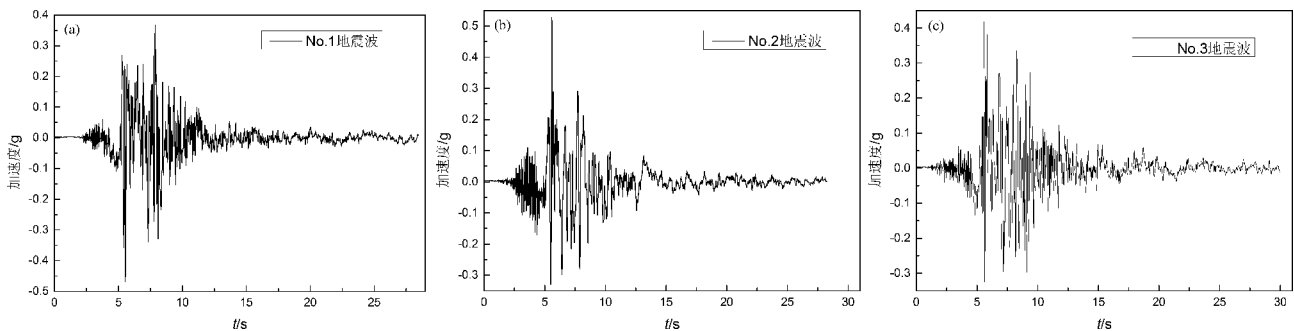


图 5 三条地震波纵向地震加速度时程曲线 (E2 概率)

Fig. 5 Longitudinal acceleration time-history curve of the selected 3 earthquakes (E2 probability)

式中, d 为伸缩缝初始间隙, x_s 为伸缩缝处相邻联梁体的相对位移, k 为接触刚度。系统受到同样的地震加速度, 忽略沿桥梁纵向的地震动空间变化。

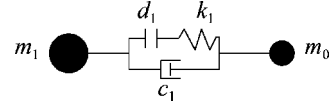


图 3 接触单元模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the contact element model

2 结构动力计算模型及地震动输入

基于上述方法, 结构动力计算模型中采用弹性梁单元来模拟主梁, 墩柱采用弹塑性梁柱单元模拟, 橡胶支座采用滞后系统来模拟, 伸缩缝采用接触单元模拟, 主梁、桥墩均考虑恒载引起的几何刚度的影响。三维有限元分析模型如图 4 所示。

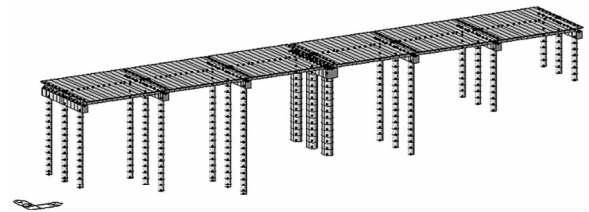


图 4 结构动力计算模型

Fig. 4 Calculation model of the structure dynamic

本文根据场地特征, 抗震设防烈度为 8 度, 地震动峰值加速度系数为 0.2 g, 设计场地类别为 II 类, 设计特征周期 T_g 为 0.40 s, 应用美国太平洋地震中心提供的 PEER Ground Motion Database (简称 PGMD) 来获取调整过的地震波 (scaled ground motions), 本文取与规范地震动加速度目标反应谱相近的 3 条波, 其加速度峰值分别为 0.366 g、

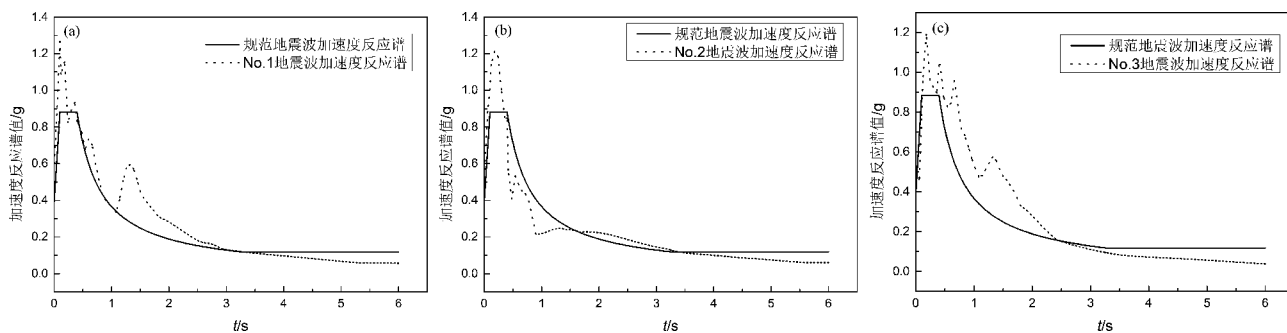


图6 3条地震波加速度反应谱与规范地震波加速度反应谱对比

Fig. 6 Acceleration response spectrum comparison of the selected 3 artificial and standard earthquake waves

0.526 g 和 0.417 g, 图5~6给出了所选地震波加速度时程曲线, 以及地震波加速度反应谱与规范设计地震动加速度反应谱对比, 可以看出 No. 1 地震波持续时间长, 峰值小; No. 2 地震波持续时间短, 峰值高; No. 3 地震波持续时间长, 峰值高。

3 不同周期比对梁桥碰撞的地震响应

根据计算分析, 3条地震波输入时, 周期比 T_2/T_1 对过渡墩墩底弯矩峰值比 M_p/M_n (p 表示考虑碰撞时的效应, n 表示不考虑碰撞时的效应) 和碰撞力峰值的影响如图7所示。取左联基本周期为中等周期, $T_1 = 2.4$ s, 伸缩缝初始间隙 $d = 0.08$ m, 分析时通过右联墩高调整相邻周期比 T_2/T_1 在 0.3 ~ 1.0。

当左联的周期中等时, 碰撞引起的过渡墩墩底弯矩变化较小, 如图7a所示。在 $T_2/T_1 < 0.5$ 时, No. 1 和 No. 3 地震波的碰撞效应使得墩底弯矩减小, 当 T_2/T_1 在 0.6 ~ 0.8 之间时, 碰撞效应使得墩底弯矩增大, 当 $T_2/T_1 > 0.8$ 时, 碰撞效应使得墩底弯矩逐渐减小, 当 $T_2/T_1 = 1$ 时, 碰撞效应引起墩底弯矩值与不考虑碰撞情况下墩底弯矩值一致。

随着 T_2/T_1 的变大, 碰撞力峰值也慢慢变大, 在 T_2/T_1 介于 0.4 ~ 0.6 之间时, 碰撞力按比例增加, 接近于线性变化, 如图7b所示。当 $T_2/T_1 = 0.6$ 时, 每条地震波作用下碰撞力峰值均达到最大值, 形成一个陡峭的尖峰并趋于稳定。随着周期比继续增加, 碰撞力峰值又表现出小幅度减小, T_2/T_1 介于 0.8 ~ 1 之间, 峰值很快下降。比较不同地震波, No. 1 地震波作用下碰撞力峰值比较稳定, 说明地震波加速度峰值越小持续时间越短, 碰撞力峰值变化幅度越小。

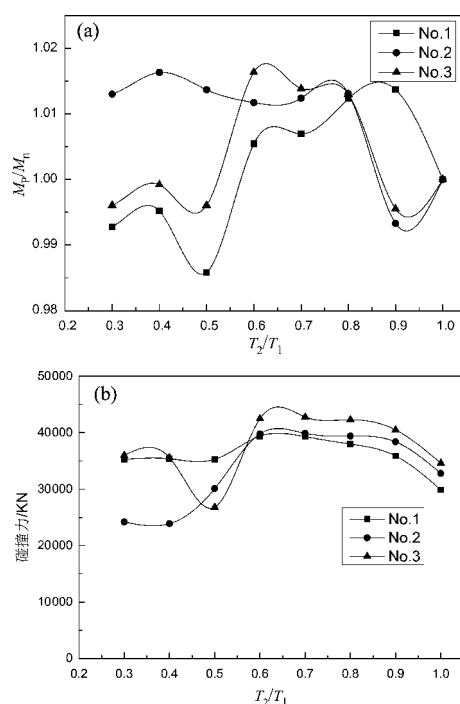


图7 周期比对墩底弯矩峰值比 (a) 和碰撞力峰值 (b) 的影响

Fig. 7 Influence of period ratio on peak ratio of bending moment at the bottom of the pier (a) and peak value of pounding force (b)

不同的地震波对梁体的位移效应不同, 如图8所示, No. 1 地震波作用下梁体的相对位移为 30 ~ 37 cm。当 $T_2/T_1 = 0.3 \sim 0.4$ (即相邻联不同向振动程度较重), No. 1 地震波作用下梁体的相对位移最小为 35 cm, No. 2 和 No. 3 地震波作用下梁体相对位移较大, 达到 50 cm 以上, 极可能出现落梁现象。当 $T_2/T_1 > 0.5$ 时, 梁体的相对位移逐渐减小, No. 2 地震波作用下梁体相对位移下降最快。由此可知, 当 $T_2/T_1 < 0.5$ 时, 加速度峰值大的地震波

对梁体的相对位移影响越大, 当 $T_2/T_1 > 0.5$ 时, 地震波作用下梁体相对位移出现下降趋势, 地震波加速度峰值越大, 下降幅度越大, No. 2 和 No. 3 地震波作用下梁体相对位移分别下降了 46.9% 和 30%。说明周期比越大, 梁体纵向位移越小, 对结构防止纵向落梁越有利。

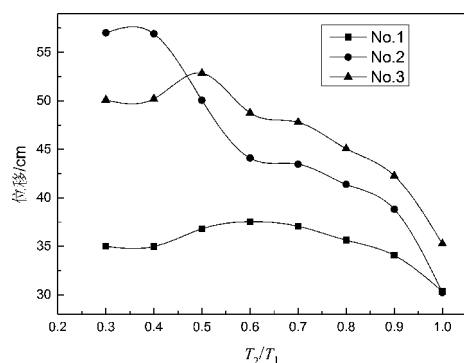


图8 碰撞时梁体的相对位移

Fig. 8 Relative displacement of the girder under pounding effects

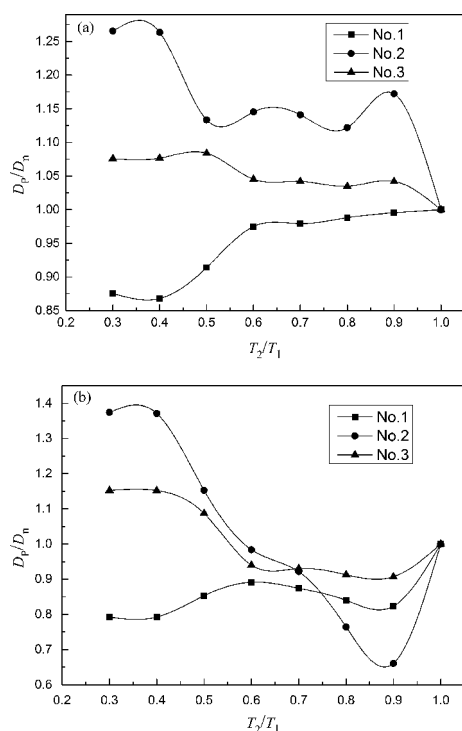


图9 左联梁端相对过渡墩顶位移峰值比曲线 (a) 及左联、右联相对位移峰值比曲线 (b)

Fig. 9 Displacement peak ratio of the beam end of left joint and the top of transitional pier (a) and the relative displacement peak ratio between left and right joints

No. 1 地震波作用下, 碰撞效应使左联梁端相对过渡墩顶位移及左联、右联相对位移均减小, No. 2、No. 3 地震波作用下, 碰撞效应使得左联梁端相对过渡墩顶位移增大, 及左联、右联相对位移均增大。当 $T_2/T_1 < 0.5$ 时, No. 2、No. 3 地震波作用下, 碰撞效应使得左联位移增大。当 $T_2/T_1 > 0.6$ 时, No. 2、No. 3 地震波作用下碰撞效应使得左联、右联相对位移减小, 并且 No. 3 地震波作用下碰撞效应使得左联、右联相对位移减小幅度更大 (图 9)。由此可知, 不同的地震波引起碰撞效应对梁体的位移效应不同。加速度峰值小的地震波作用对伸缩缝处相对位移的影响比加速度峰值大的地震波小, 地震动加速度峰值较大时, 碰撞作用引起的大周期联梁体相对过渡墩顶位移恒大于非碰撞作用。总体来说, 随着周期比的增大, 碰撞作用对梁体的相对位移影响越来越小。

4 结论

通过分析两联多跨连续梁桥简化碰撞模型, 比较了相邻两联不同周期比的情况下, 不同地震动作用下对两联梁体之间的碰撞效应, 得出如下结论:

(1) 不同的地震动作用于相邻梁体上所产生的碰撞效应不尽相同, 和所输入地震波的频谱特性有关, 也与桥梁自身的动力特性相关, 加速度峰值越小的地震波作用对伸缩缝处的碰撞效应较小。

(2) 不同周期比的相邻梁体结构, 在地震动作用下产生的碰撞效应不同, 当周期比 T_2/T_1 介于 0.6 ~ 1 之间时, 碰撞使得伸缩缝处碰撞力、过渡墩墩底弯矩峰值比变化幅度不大, 伸缩缝处梁端相对位移逐渐减小。总体来说, 随着周期比的增大, 碰撞作用对梁体的相对位移影响越来越小。

(3) 碰撞对严重不同向振动的相邻两联 ($T_2/T_1 < 0.5$) 的地震响应影响很大, 随着相邻两联周期比的增大, 碰撞对结构地震反应影响逐渐减小。因此, 在进行桥梁抗震设计时, 尽可能采用相邻周期比接近一致的、等跨径、等墩高的桥跨结构, 并采用一些桥梁纵向限位装置, 尽可能减小伸缩缝处梁体的相对位移, 减少落梁及相邻梁体碰撞灾害的发生。

参考文献:

- 陈学喜,朱晞,高学奎. 2005. 地震作用下桥梁梁体间的碰撞响应分析[J]. 中国铁道科学,26(6):75-79.
- 高玉峰. 2007. 考虑碰撞效应的桥梁非线性地震反应特性研究[D]. 成都:西南交通大学.
- 王军文,李建中,范立础. 2005. 连续梁桥纵向地震碰撞反应参数研究[J]. 中国公路学报,8(4):42-47.
- 王军文,李建中,范立础. 2006. 非规则梁桥伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响[J]. 土木工程学报,30(1):54-59.
- 武芳文,杨草方,季正迪. 2014. 大跨度斜拉桥在随机地震激励下的动力可靠性分析[J]. 地震研究,37(3):462-466.
- 许祥,鞠三,刘伟庆,等. 2013. 桥梁结构地震碰撞分析模型的碰撞刚度计算方法研究[J]. 振动与冲击,32(12):31-39.
- 张文学,鲍艳,王景景. 2012. 伸缩缝间隙及纵向阻尼器对斜拉桥的碰撞影响[J]. 公路交通科技,29(8):61-63.
- 张文学,吴海军,陈士通. 2013. 橡胶缓冲装置对斜拉桥及引桥碰撞影响研究[J]. 振动与冲击,32(7):151-154.
- 周光伟,李建中,陈昌萍,等. 2012. 行波输入下连续梁桥纵向墩梁相对位移碰撞效应分析[J]. 世界地震工程,28(4):51-57.
- Elias G., Dimitrakopoulos. 2011. Seismic response analysis of skew bridges with pounding deck - abutment joints [J]. Engineering Structures,33:813-826.
- Clough R., 彭津 J. 1979. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社,14-15.
- Reginald D., Susendar M. 2002. Effect of pounding and restrainers on seismic response of multipule2 frame bridges[J]. Journal of Structural Engineering,128(7):860.

Analysis on Pounding Response of Period Ratio between Two Adjacent Continues Girders on Expansion Joint

WU Fang-wen^{1,2}, YANG Cao-Fang¹, XUE Cheng-feng¹, SHEN Lin¹, LI Yu¹, XIE Li-li²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

According to the pounding phenomena of expansion joints between two adjacent continues girders, we analyzed the dynamic time history basing on dynamic differences appeared from the inconsistent period. The out-of-phase vibration and pounding response of expansion joints were also investigated under the longitudinal earthquake by direct numerical integration method. The analysis results show that the pounding responses of the adjacent girder in different period ratios were different under earthquake. The pounding responses of the earthquake with small acceleration peak value and long duration on the expansion joints were small. The pounding had a remarkable influence on seismic response of two adjacent girders ($T_2/T_1 < 0.5$) of out-of-phase vibration. With the increase of the period ration between two adjacent girders, the seismic response of structure decreased under pounding effect.

Key words: under the earthquake; irregular bridge; period ratio; pounding effect; bending moment; expansion joint