

碰撞对桥梁结构地震反应影响的初步研究

王东升¹ 冯启民² 翟桐¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 青岛海洋大学, 山东 青岛 266071)

摘要: 以 1 座 3 跨简支梁桥为例, 研究了桥梁地震反应中因墩(台)刚度不同引发的主梁梁端或主梁与桥台胸墙的碰撞问题。碰撞会加剧支座的破坏, 并在简支梁桥位移弱约束方向上显著加大墩、梁相对位移, 从而造成落梁震害。讨论了减轻桥梁碰撞效应的措施, 并就多跨长简支梁桥、桥台等的抗震设计提出了若干建议。

关键词: 简支梁桥; 碰撞; 地震反应

1 引言

主梁梁端碰撞或者主梁与桥台胸墙碰撞是桥梁结构常见的震害现象, 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, 它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碰撞作用^[1]。日本 1995 年 Kobe 地震桥梁震害经验再次表明, 随支座破坏后发生的碰撞作用是引起桥梁局部损坏和引发落梁破坏的原因之一^[2]。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 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^[3]。

碰撞产生的直接原因在于相邻结构间的相对位移反应超过了伸缩缝的允许间隙。在桥梁结构中, 产生这种相对位移的原因可以概括为: (1) 桥墩(台)的刚度、质量以及动力特性不一致; (2) 输入地震波的空间变化, 如差动效应; (3) 地基或场地的不均匀性或基础形式不同; (4) 由结构构件非线性变形、破坏带来的相对位移反应。近十几年来, 由于桥梁隔震、减震设计的发展, 在桥梁结构中大量采用柔性橡胶支座, 这将会导致桥梁上部结构在强烈地震作用下发生较大的位移反应, 而桥梁的伸缩缝宽度往往依据上部结构的温度伸缩、徐变、制造误差等因素决定, 要小于强震中产生的相对位移, 这就使桥梁上部结构在地震中发生碰撞的可能性增大。

W. G. Godden (1976)^[4]、R. A. Imbsen 和 J. Penzie (1984)^[5]等先后通过试验和理论研究指出考虑伸缩缝处碰撞等非线性因素对确定桥梁动力反应的重要性, 后者还在其开发的 NEABS 程序中建立了考虑碰撞、摩擦力、拉结措施等非线性效应的伸缩缝单元。1985 年墨西哥地震后, 由地震产生的结构碰撞行为引起了地震工程学者的广泛注意, 在建筑结构领域开展了大量研究^{[6][7]}。在此影响下和受近几次城市破坏性地震桥梁震害的直接推动, 碰撞对桥梁结构地震反应影响受到进一步关注。E. Maragakis 等^[8]研究了简单的单墩刚构桥与桥台的碰撞相互作用, 考虑了桥墩的材料非线性和台后填土的非线性性质, 认为碰撞效应在结构地震反应中起决定作用。R. Jankowski 等^{[9][10]}利用 S. A. Anagnostopoulos 建立的碰撞模型^[7], 考查了采用高阻尼橡胶支座 (HDRB) 隔震的长连续梁桥由行波效应产生的邻联主梁碰撞反应以及减轻碰撞效应的措施, 认为碰撞力大小与伸缩缝间距相关, 间距过大和过小都会显著降低碰撞效应, 并建议可以采用 Shock Transmission Units, 一种类似于液体油缸阻尼器的装置减轻碰撞。P. K. Malhotra^[11]基于经典圆杆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, 并认为碰撞持时可以取为较短主梁轴向振动基本周期。K. Kawashima 等^[12]和 J. M. Kim 等^[13]也分别建议利用橡胶冲击吸收垫和耗能拉结装置减轻碰撞效应, 这两种装置还可以有效地降低强烈地震中墩、梁相对位移, 防止落梁破坏。

基金项目: 地震科学联合青年基金资助项目 (100015)

作者简介: 王东升, 男, 内蒙古哲里木盟人, 硕士, 副研究员, 主要从事桥梁抗震研究

本文以刚度很大的弹簧元件模拟碰撞过程,研究了因墩(台)刚度不同引起的简支梁桥地震反应中的邻梁碰撞效应,希望能对碰撞作用有一个定性理解,并且通过碰撞问题的分析,为采取措施提高现有桥梁的抗震能力和改进桥梁的抗震设计提供参考。

2 计算分析模型与算法

用于分析的3跨简支梁桥计算模型如图1所示,其中桥墩假定保持弹性,桥墩 C_1 和 C_2 的水平刚度比 $K_{c1}/K_{c2}=2.1$ 。摩擦支座以双线性弹塑性模型模拟。阻尼模型采用瑞利阻尼,阻尼比为5%。有关参数详见文献[14]。

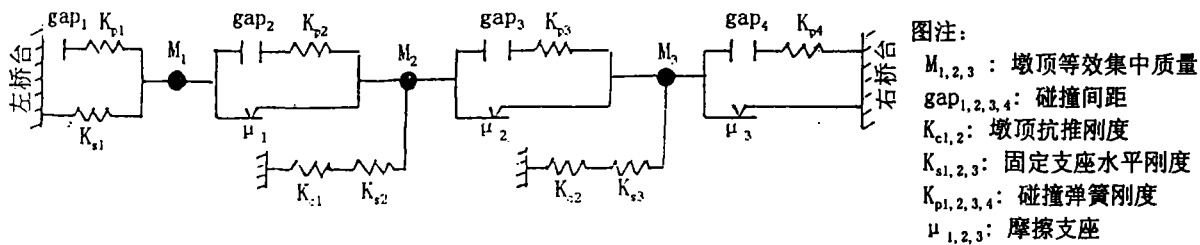


图1 计算分析模型

输入地震波采用天津波,地震反应采用逐步积分法求解。计算中采用两种步长,一种为常规步长,而在发生刚度突变时,则采用为常规步长 $1/10\sim 1/20$ 的较小的另一种步长。当发生碰撞时,由于碰撞刚度相当大,时间步长还会更小,以保证内力增量足够小,同时在碰撞分离时,要计算出此时刻的不平衡力,并以初始加速度的形式施加到下一步长的单元节点上。

3 分析结果与讨论

3.1 碰撞作用对支座破坏的影响

支座的破坏状态定义为固定支座滑动,所承受最大水平地震荷载近似按《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)计算(该桥8度设防),并假定支座破坏后符合双线性滞回关系。逐步增加输入地震动峰值,比较了考虑碰撞与否对支座破坏的影响情况,计算结果见表1。

表1 支座的破坏情况

地震动峰值	0.10g	0.15g	0.25g
不考虑碰撞	S_1 支座破坏	S_1 和 S_2 支座破坏	S_1 、 S_2 和 S_3 支座破坏
考虑碰撞	S_1 支座破坏, gap_2 处发生碰撞	S_1 、 S_2 和 S_3 支座破坏, 各处均发生碰撞	同左

从表1可以看出,碰撞的发生加剧了支座的破坏过程。碰撞产生很大的加速度反应(图2),但一般持续时间较短,不会立刻产生大的位移,因此在0.10g地震波输入条件下虽然在 gap_2 处发生了碰撞, S_2 支座并未发生破坏。

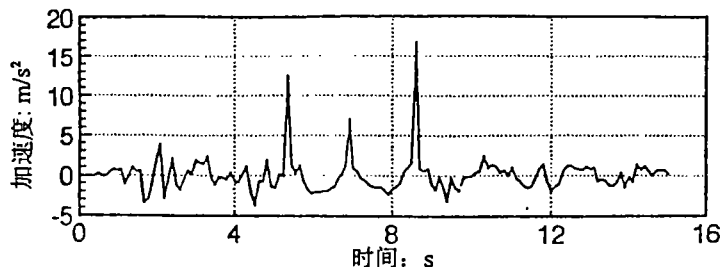


图2 主梁加速度时程

3.2 碰撞效应对落梁破坏的影响

对于图1所示计算模型,假定在右桥台处碰撞单元不发生碰撞,即 gap_4 足够宽。这个假定是考虑到

使本文的模型代表一般简支梁桥的边跨情况以及对于较长的多跨简支梁桥中间部分桥跨对边跨的弱空间约束作用。由于结构的显著不对称性，地震波输入考虑了正反两个方向。

落梁方向上墩、梁相对位移因地震动峰值，地震波输入方向不同的变化情况如图 3 所示。正向地震波输入时，若不考虑碰撞，主梁在支座破坏后有向左侧桥台滑动的倾向，而碰撞发生后，碰撞显著加大了墩、梁在位移弱约束方向（右侧）上的相对位移（图 3 (b)、(c)）。可以预见，当地震波反向输入时，此时滑动位移将倾向于位移弱约束方向，加之碰撞的显著放大作用，将会使墩、梁发生更大的相对位移。分析结果表明，在反向 0.5g 天津波作用 2.34 秒时，在 M₃ 主梁左端首先发生落梁破坏。在整个分析过程中，除近左桥台第一跨墩、梁相对位移变化不大外，由碰撞造成的其它跨在位移弱约束方向上的墩、梁相对位移远远大于不考虑碰撞时的情况。

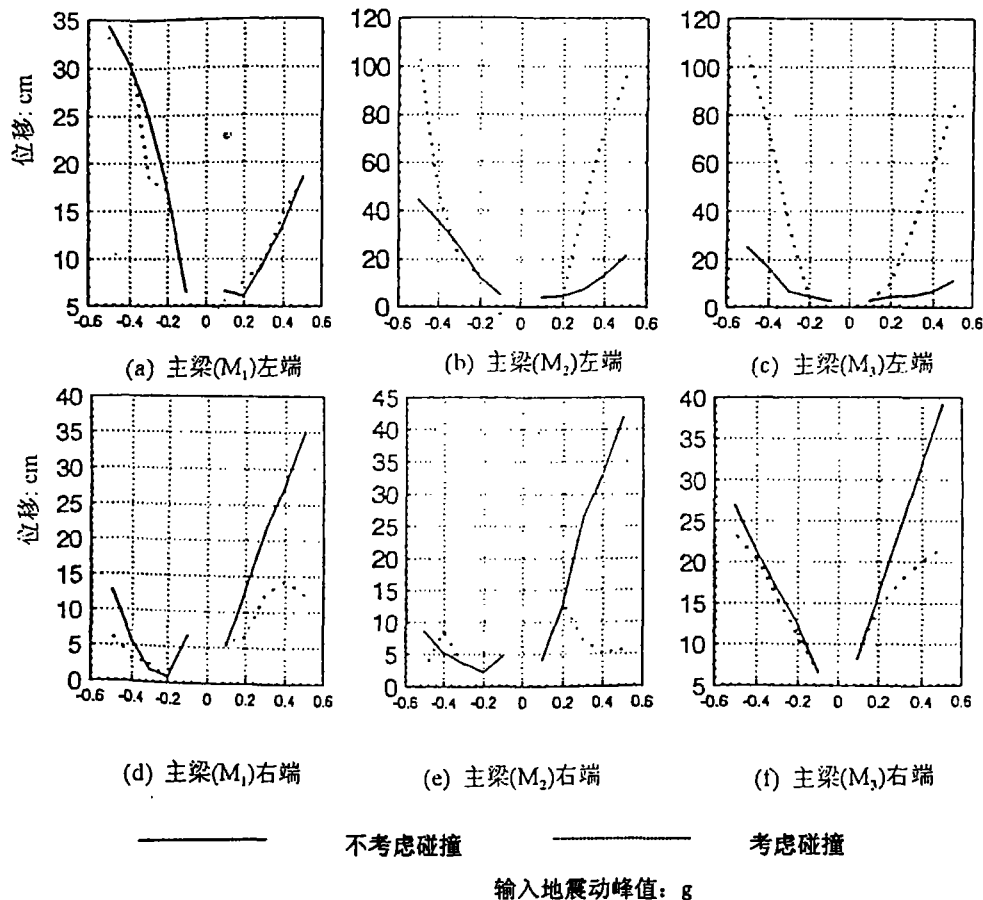


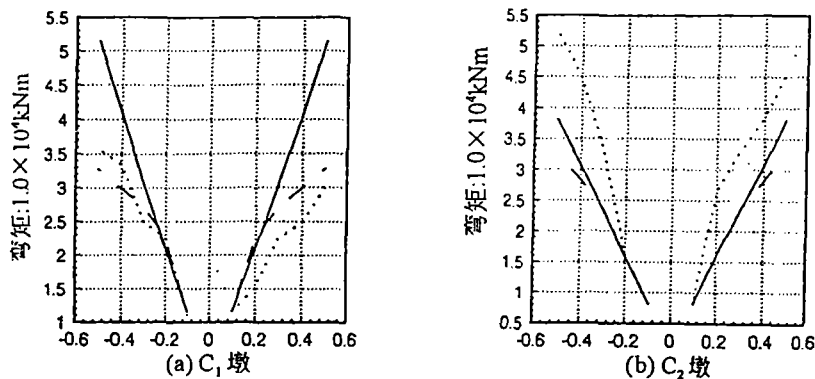
图 (3) 落梁方向上墩梁相对位移

另外，观察碰撞首先发生位置，发现它大多发生于左侧桥台胸墙与主梁间。若考虑右侧桥台胸墙参与碰撞作用，则在落梁方向上产生的最大相对位移与不考虑碰撞时相当，甚至要小些，但碰撞力明显增加。这说明仅就落梁破坏而言，碰撞对于较长的多跨简支梁桥是比较危险的。对于桥台的胸墙，由于强烈地震时，碰撞总是易于在这里首先发生，因此应采用适当的方法对胸墙加以保护，包括合理地考虑伸缩缝间距和增设碰撞缓冲装置或拉结措施，否则胸墙破坏后，由于一侧位移失去约束和支座的破坏，很容易发生落梁破坏，特别是对于长持时的地震。作者认为滦河大桥的震害就是这方面惨重的教训^[1]。

3. 3 碰撞效应对桥墩受力的影响

仍采用 3.2 中的模型假设，计算了桥墩内力随加速度峰值的变化情况，对考虑支座破坏、碰撞等各种因素的桥墩内力作了对比（图 4）。不考虑碰撞时，支座破坏后桥墩内力有所降低，在降低幅度上刚度较大的 C₁ 墩要大于 C₂ 墩。支座破坏和碰撞效应同时考虑时，碰撞效应使刚度较小的 C₂ 墩的内力显著增长，

对 C_1 墩影响不大, 并且与地震波的输入方向有关。这点也可能与 C_1 墩和 C_2 墩的相对位置有关, C_2 墩更靠近位移弱约束方向。



————— 不考虑碰撞和固定支座滑动 - - - - - 不考虑碰撞, 考虑固定支座滑动 考虑碰撞和固定支座滑动

输入地震动峰值: g

图 4 桥墩最大内力反应

4 减轻碰撞的措施

以上研究了因墩(台)刚度不同引起的简支梁桥地震反应中的碰撞效应, 这种情况很可能出现在一般简支梁桥的边跨或因地形造成的立面不规则简支梁桥中。通过算例对碰撞这一非线性效应有了一定的认识。碰撞效应加剧了支座的破坏, 在简支梁桥位移弱约束方向上墩、梁相对位移显著增大, 强大的碰撞力造成伸缩缝、梁端、桥台胸墙等局部损坏, 因此在桥梁抗震设计中应该考虑避免碰撞的发生或采取措施减轻碰撞效应。

防止碰撞的直接措施是增加伸缩缝的间距, 但是由于受行车方便和伸缩缝产品的限制, 特别是地震中墩、梁相对位移很难估计准确, 或者因伸缩缝损坏使间距减少等诸多原因, 很可能使这种方法不再有效。碰撞效应与其产生的巨大冲击力有关, 应切实地研究和设计降低碰撞冲击力的缓冲装置, 合理地考虑伸缩缝处间距及拉结措施, 尽可能地降低由碰撞产生的冲击力, 从而减小碰撞效应, 同时也会带来减震效果。需强调的是桥台在防止因碰撞造成落梁破坏方面具有重要作用, 应仔细地设计桥台胸墙的防护措施。

碰撞对于长的多跨简支梁桥的影响是不容忽视的, 并且这些桥梁往往是很重要的桥梁或重要桥梁的引桥, 应仔细地检查桥台的设计、桥台处伸缩缝的合理间距以及桥台胸墙的保护措施和全桥纵向的整体性、支座的可靠性, 防止位移弱约束方向出现。对于引桥, 还应注意引桥与主桥连接处伸缩缝间距和拉结措施的设计。

5 需进一步研究的问题

1992 年 1 座位于美南加利福尼亚 I-10 和 I-215 公路连接处的多跨曲线梁桥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、纵向运动的不均匀碰撞、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^{[3][15]}。

目前, 碰撞对桥梁结构地震反应影响研究工作的困难仍在于建立合理的碰撞模型。S. A. Anagnostopoulos 模型^[7]可以很好地与有限元法协调, 并可以通过建立合理的主梁模型反映碰撞产生的行波效应, 但无法反映碰撞持时和波传播过程的能量耗散。P. K. Malhotra 模型^[11]理论上可能是合理的, 但很难与现有的有限元法协调。另外, 结合智能材料、新型耗能阻尼器等开发安装方便、使用经济的减轻碰撞效应的装置也是今后需研究的重要内容。

参考文献

- [1] 范立础. 梁桥非线性地震反应分析[J]. 土木工程学报, 1981, 14 (2): 41~51
- [2] K. Kawashima, S. Unjoh. Impact of Hanshin/Awajie Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges[J]. Strural Eng./Earthquake Eng. JSCE, 1996, 13(2):211~240
- [3] M. J. N. 普瑞斯特雷, F. 塞勃勒等. 桥梁抗震设计与加固[M]. 袁万城等译. 北京: 人民交通出版社, 1997
- [4] D. Williams, W. Godden. Experimental Model Studies on the Seismic Response of High Curved Overcrossings[M]. Rep. UCB/EERC-76-18, Univ. Cal. Berkeley, 1976
- [5] R. A. Imbsen, J. Penzien. Evaluation of Energy Absorption Characteristics of Highway Bridges under Seismic Conditions[M]. Rep. UCB/EERC-84-17, Univ. Cal. Berkeley, 1984
- [6] K. Kasai, V. Jeng, B. F. Maison. Seismic Pounding Effects—Survey and Analysis[A]. 10WCEE, Netherlands, 1992
- [7] S. A. Anostopoulos, K. V. Spiliopoulos. An Investigation of Earthquake Induced Pounding between Adjacent Buildings[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1992, 21(4):289~302
- [8] E. Maragakis, R. Siddharthan, G. Thornton. Interaction Models for the Evaluation of the Response of Bridge Structures[A]. 9WCEE, Japan, 1988
- [9] R. Jankowski, K. Wilde, Y. Fujino. Pounding of Superstructure Segments in Isolated Elevated Bridge during Earthquakes[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1998, 27(5):487~502
- [10] R. Jankowski, K. Wilde, Y. Fujino. Reduction of Pounding Effects in Elevated Bridges during Earthquakes[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 2000, 29(2):195~212
- [11] P. K. Malhotra. Dynamic of Seismic Pounding at Expansion Joints of Concrete Bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1998, 124(7):794~802
- [12] K. Kawashima, G. Shoji. Effect of Restrainers to Mitigate Pounding between Adjacent Decks Subjected to a Strong Ground Motion[A]. 12WCEE, New Zealand, 2000
- [13] J. M. Kim, M. Q. Feng, M. Shinozuka. Energy Dissipating Restrainers for Highway Bridges[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2000, 19(1), 65-69
- [14] 王东升, 冯启民. 活动支座摩擦力对简支梁桥地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18 (4) : 30-38
- [15] P. K. Malhotra, J. H. Moh, F. S. Anthong. Seismic Interaction at Separation Joints of an Instrumented Concrete Bridge[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1995, 24(3):1055~1067