

碰撞对隔震连续梁桥地震反应影响研究

王东升¹ 翟桐¹ 冯启民²

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

摘要: 分析了罕遇地震条件下多联隔震连续梁桥整体地震反应中, 因行波效应产生的邻梁碰撞对钢筋混凝土桥墩地震损伤性能的影响。邻梁碰撞会显著增加桥墩的位移延性需求和地震损伤程度, 可以采用在墩顶设置挡块或墩梁间设置拉索限位器, 并允许墩梁发生可以接受的较大相对位移来减轻碰撞对下部结构地震损伤的影响。

关键词: 连续梁桥; 碰撞; 地震反应; 损伤指数; 地震行波

1 引言

近些年来利用隔震技术提高桥梁的抗震能力已逐渐被工程界认可, 在桥梁中采用各类隔震橡胶支座, 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, 邻梁发生碰撞的可能性增大。R.Jankowshi 等研究了地震行波作用下采用高阻尼橡胶支座隔震的多联长连续梁桥, 相邻主梁碰撞对下部结构反应的影响问题^[1,2], 在他的研究工作中, 隔震支座采用了等效线性模型, 假定桥墩保持弹性, 主要从桥墩受力角度分析了邻梁碰撞影响和减轻碰撞影响的措施, 未考虑限制墩梁最大相对位移的构造措施, 如挡块等的作用。事实上在罕遇地震条件下, 因主梁与挡块发生碰撞等多种原因使隔震桥梁桥墩屈服是可能的^[3,4]。本文将以前唐山地震后新建滦河桥为参考, 考虑桥墩非线性和挡块等作用, 主要分析相邻主梁碰撞对多联隔震连续梁桥下部结构地震损伤性能的影响。

2 隔震连续梁桥地震反应分析模型

桥梁地震反应分析模型如图 1 所示, 为 6 联 4×40m 共 24 孔铅芯橡胶支座隔震连续梁桥, 在两侧桥台处为滑板橡胶支座。

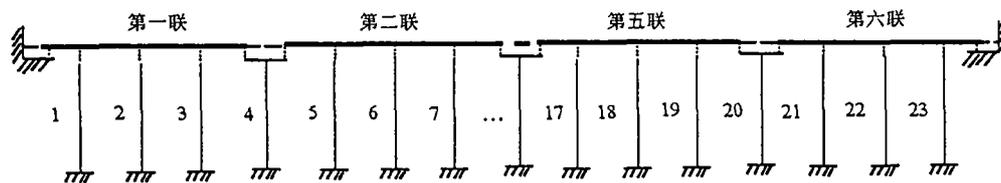


图 1 隔震连续梁桥地震反应分析模型

该桥桥墩为 5m×1.8m 矩形截面钢筋混凝土实体墩, 墩高 8m, 200 号混凝土, 纵筋配筋率为 0.4%。由截面弯矩一曲率分析得到在单调荷载作用下, 墩顶位移延性系数 $\mu=12$, 墩底屈服弯矩 $M_y=1.488 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 墩顶等效水平刚度 $K=6.2 \times 10^4 \text{ kN/m}$ 。桥墩采用力—位移滞回关系为 takeda 模型的弹塑性梁柱单元模拟。铅芯橡胶支座屈服强度为 720kN, 初始刚度为 $2.2 \times 10^4 \text{ kN/m}$, 硬化比 α 即初始刚度与屈服后刚度比为 6.5^[4]。力—位移滞回关系取为简化的双线性模型。滑板橡胶支座摩擦系数取为 0.05。伸缩缝处相邻主梁碰撞弹簧刚度取为主梁轴向刚度的一半, 约为 $5 \times 10^5 \text{ kN/m}$, 伸缩缝宽度跨中处为 0.08m, 桥台处为 0.12m。挡块假定为混凝土刚性挡块, 出于计算考虑刚度值取为墩顶等效水平刚度的 10 倍, 与主梁间隙跨中处为 0.10m,

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(1974.12),男,内蒙古库伦旗人,博士,副研究员,主要从事桥梁抗震研究

桥台处为 0.15m。主梁假定为只具有平动自由度的刚性块体，分布质量为 $1.2 \times 10^4 \text{kg/m}$ 。桥台假定为刚体。

阻尼模型仅考虑了钢筋混凝土桥墩的阻尼耗能作用，取为与刚度成比例的瑞利阻尼，假定等效阻尼比 $\zeta=0.05$ ，通过 DRAIN-2DX 程序试算得到瑞利阻尼系数 $\beta=0.067$ 。全桥整体一阶自振周期 $T=1.09\text{s}$ 。

输入地震波选择 Loma Prieta 地震 Wvc270 地震记录，加速度峰值调整到 0.63g 并考虑正负两种可能，以行波方式从左向右输入，视波速 $c=300\text{m/s}$ 。

3 钢筋混凝土桥墩地震损伤分析

采用改进的 Park-Ang 双参数地震损伤模型^[5]计算了隔震连续梁桥钢筋混凝土桥墩的损伤指数。对该模型，临界延性系数 μ_0 取为 2，等效能量系数 γ_E 取为 0.10，组合参数 β 取为 0.20。

图 2 给出了在“正”峰值 Wvc270 地震波输入下，考虑相邻主梁碰撞与否各桥墩的损伤指数，可以看出当不考虑相邻主梁碰撞时，全桥各联桥墩损伤情况相近，但同一联桥墩损伤情况存在差异，损伤最严重的是临近伸缩缝右侧的第 1 个桥墩，损伤指数接近 0.4，为中等可修复破坏，其它桥墩完好或轻微破坏；考虑相邻主梁碰撞后，除左侧第 1 个桥墩外，各桥墩损伤指数都明显加大，尤以中间第 3、4、5 联为甚，损伤指数超过了 0.8，显示此时桥梁会发生垮塌。

图 3 给出了考虑相邻主梁碰撞与否各桥墩的位移延性系数，同样可以看出相邻主梁碰撞很大程度上提高了桥墩的位移延性需求。

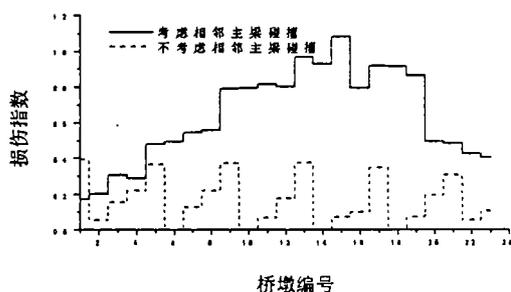


图 2 桥墩地震损伤指数

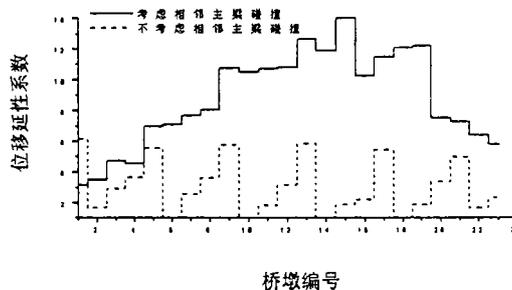


图 3 桥墩位移延性系数

图 4 给出了在“负”峰值 Wvc270 地震波输入下，考虑相邻主梁碰撞与否各桥墩的损伤指数，与“正”峰值情况有所不同，当不考虑相邻主梁碰撞时，各联桥墩损伤情况不是很相近，主要是由各联通过伸缩缝处墩顶挡块产生了相互作用引起。损伤最严重的桥墩位于伸缩缝处，为不可修复的严重破坏，其它桥墩轻微到中等破坏；考虑相邻主梁碰撞后，除 3 号和 15 号桥墩损伤指数增长较大外，其它桥墩损伤指数仅略有增加或降低。从全桥来看，考虑相邻主梁碰撞与否桥墩损伤情况相近，桥梁将会发生严重破坏，但不会垮塌。图 5 给出了考虑相邻主梁碰撞与否各桥墩的位移延性系数，变化情况与损伤指数相似。

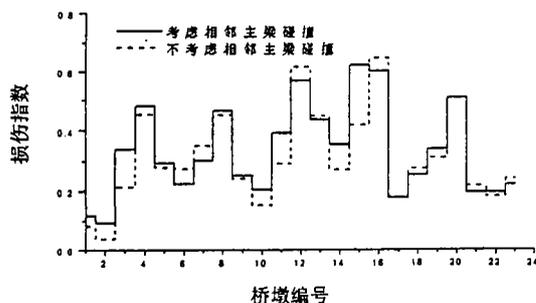


图 4 桥墩地震损伤指数

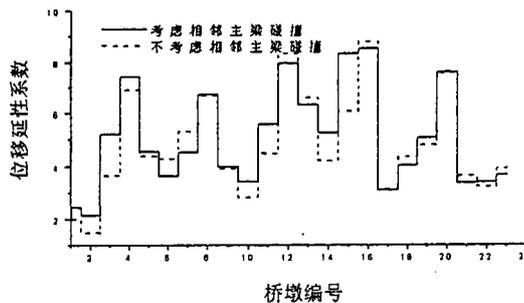


图 5 桥墩位移延性系数

4 减轻邻梁碰撞对下部结构地震损伤影响的措施

前面分析表明邻梁碰撞会显著增加桥墩的位移延性需求和地震损伤程度，应该避免邻梁碰撞发生或采取有效措施降低邻梁碰撞对桥墩地震损伤的影响。防止邻梁碰撞发生的直接措施是增加伸缩缝的间距到一定程度，但是由于受伸缩缝产品和行车方便的限制，特别是对地震中邻梁相对位移难以准确估计，或者因伸缩缝损害、温度影响使间距降低等诸多原因，这种方法很可能不再有效。在隔震桥梁设计中，通常建议采用梁间设置碰撞缓冲装置和拉结措施、墩顶设置挡块等构造措施来减轻碰撞和限制墩梁最大相对位移^[2,3,4]。下面以 Wvc270 “正”峰值地震波输入为例，通过数值分析研究这些构造措施在减轻邻梁碰撞对桥墩地震损伤影响方面的有效性。

(1) 梁间设置碰撞缓冲装置

碰撞缓冲装置的刚度不宜过小，否则将不能起到相应作用，设碰撞缓冲装置的刚度取为 0.1 倍的主梁轴向刚度，为 $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ，厚度 0.04m。图 6 给出了有无碰撞缓冲装置，桥梁桥墩地震损伤指数的比较，碰撞缓冲装置对减轻桥墩地震损伤几乎未起到任何作用。

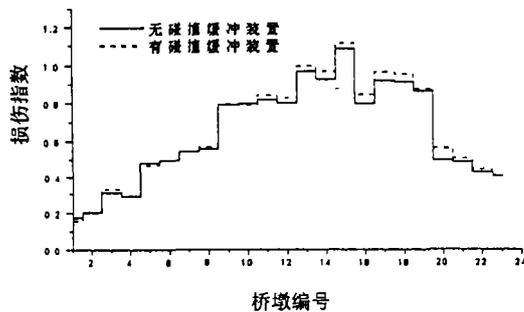


图 6 桥墩地震损伤指数

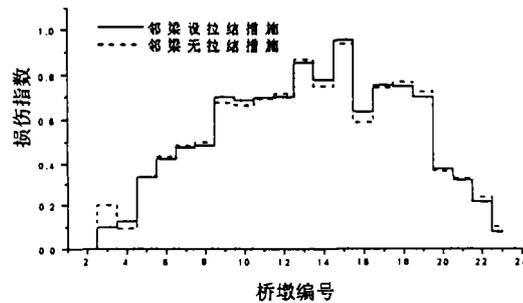


图 7 桥墩地震损伤指数

(2) 梁间设置拉结措施

拉结措施刚度不宜很大，否则突然张紧会使主梁承受很大的拉力。取拉结措施刚度为 0.5 倍的主梁轴向刚度，为 $5.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ，屈服力 $F_y = 2.64 \times 10^4 \text{ kN}$ ，初始间隙 $\delta = 0.12 \text{ m}$ 。图 7 给出了有无梁间拉结措施，桥梁桥墩地震损伤指数的比较，拉结措施对减轻桥墩地震损伤几乎未起到任何作用。

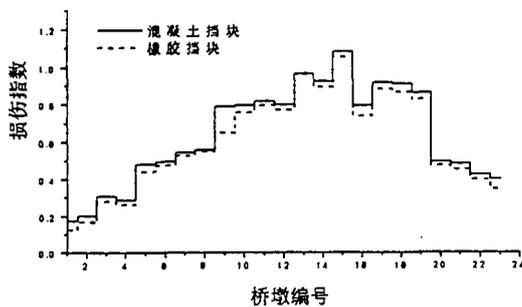


图 8 桥墩地震损伤指数

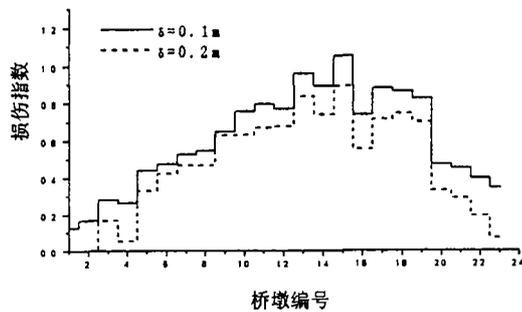


图 9 桥墩地震损伤指数

(3) 设置挡块

在 (1) 和 (2) 的分析中，已经考虑了钢筋混凝土挡块的作用，这里将进一步比较钢筋混凝土挡块和橡胶挡块的不同，以及挡块与主梁间隙 δ 对减轻桥墩地震损伤的影响。

设置 8 个橡胶挡块，总刚度取 $K_1 = 4.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$ ($0.0 \text{ m} \leq d \leq 0.015 \text{ m}$)， $K_2 = 2.4 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ($0.015 \text{ m} \leq d \leq 0.02 \text{ m}$)， $K_3 = 5 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ($d > 0.02 \text{ m}$)，力—位移关系为三折线形^[6]，其它参数同于钢筋混凝土

挡块。图 8 给出了分别采用橡胶挡块与钢筋混凝土挡块, 桥梁桥墩地震损伤指数的比较, 橡胶挡块略优于钢筋混凝土挡块。

图 9 以橡胶挡块为例给出了挡块与主梁间隙 δ 分别取 0.1m 和 0.2m 时, 桥梁桥墩地震损伤指数的比较, 可以看出增加挡块与主梁间隙 δ 可有效地降低邻梁碰撞对桥墩地震损伤的不利影响。但计算中也发现挡块要承受很大的水平冲击力, 以 $\delta=0.2\text{m}$ 为例, 橡胶挡块最大水平冲击力为 $6.9\times 10^3\text{kN}$, 钢筋混凝土挡块最大水平冲击力为 $8.4\times 10^3\text{kN}$, 挡块设计可能较为困难。

(4) 设置拉索限位器 (restrainers)

利用拉索限位器限制墩梁相对位移, 防止落梁震害已有较多研究与工程应用^[7,8,9]。图 10 给出了墩梁最大允许相对位移为 0.2m, 墩梁间设置拉索限位器和钢筋混凝土挡块时, 桥梁桥墩地震损伤指数的比较, 拉索限位器略逊于钢筋混凝土挡块。拉索限位器的设计参数为抗拉刚度 $K=9.3\times 10^4\text{kN/m}$, 约为桥墩墩顶等效水平刚度的 1.5 倍, 屈服力 $F_y=5.21\times 10^3\text{kN}$, 初始间隙 $\delta=0.15\text{m}$, 约由 30 根缆索组成。

拉索限位器具有较高的抗拉强度, 并且在同样墩梁最大允许相对位移条件下, 将先于挡块发挥作用, 有一定优势。

若墩梁最大允许相对位移为 0.25m, 在墩梁间设置挡块或拉索限位器 ($\delta=0.2\text{m}$), 全桥桥墩地震损伤指数基本上都未超过 0.8 (图 11), 能够满足“大震不倒”的设防水准。

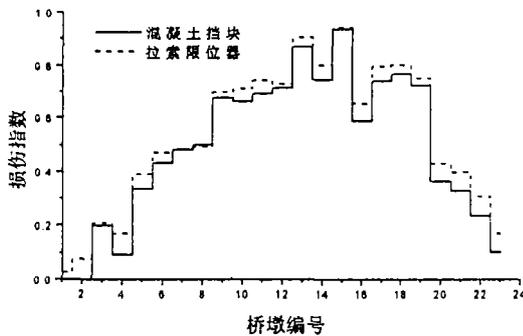


图 10 桥墩地震损伤指数

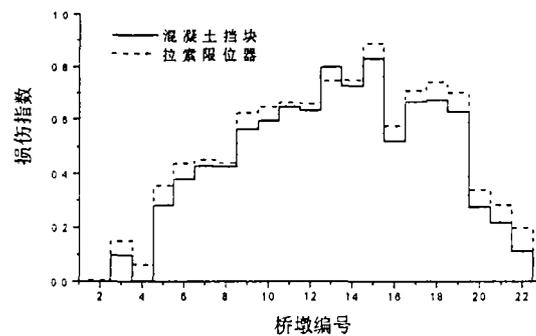


图 11 桥墩地震损伤指数

5 本文与 R. Jankowshi 研究结果的比较

将本文与 R. Jankowshi 研究结果作一比较是有意义的, 二者都认为邻梁碰撞会增加下部结构的地震损伤程度, 但在提出的减轻邻梁碰撞影响的措施中, R. Jankowshi 侧重在梁间设置碰撞缓冲装置、可压碎装置 (Crushable devices) 和 STU (Shock transmission Unit) 装置等, 本文侧重在墩梁之间设置挡块和拉索限位器, 并允许墩梁发生较大的相对位移。产生这种认识差异的原因, 认为一方面与地震动输入有关, 本文采用的是近断层地震波, 速度波形可见明显长周期脉冲波形; 另一方面可能与模型简化有关, R. Jankowshi 分析工作采用了等效线性的支座模型并假定桥墩保持弹性, 邻梁碰撞产生的较大碰撞力向下传递的大小与支座和桥墩的刚度是成正比的, 降低邻梁碰撞产生的碰撞力, 可以一定程度降低桥墩的受力, 因此他建议的减轻邻梁碰撞影响的措施, 更多是从降低碰撞产生的碰撞力方面考虑。本文考虑了支座和桥墩的屈服后状态, 邻梁碰撞对下部结构影响主要是通过墩梁相对位移施加, 挡块和拉索限位器及允许墩梁发生较大的相对位移自然成为主要的减轻措施。最后需补充说明的是作者对日本隔震桥梁设计具体情况认识有限, 以上讨论仅是就分析工作的一个对比, 并不否认 R. Jankowshi 建议的各类措施在减轻邻梁碰撞对下部结构地震损伤影响方面的有效性。

6 结论

本文分析了大震条件下多联隔震连续梁桥整体地震反应中,邻梁碰撞对钢筋混凝土桥墩地震损伤性能的影响。邻梁碰撞会显著增加桥墩的位移延性需求和地震损伤程度,可以采用在墩顶设置挡块或墩梁间设置拉索限位器,并允许墩梁发生可以接受的较大相对位移来减轻碰撞对下部结构地震损伤的影响。

参考文献

- [1]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
- [2]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
- [3]Sun Limin, Yozo Goto. Simulation on Effective of Energy Dissipating Buffer for Reducing Response of Bridge during Large Earthquake[C]. 11WCEE, 1996, NO.1331
- [4]王志强. 隔震桥梁分析方法及设计理论研究[D].上海: 同济大学, 2000
- [5]王东升. 钢筋混凝土梁式桥地震破损研究[D].哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002
- [6]郝尧生. 两种新型橡胶缓冲挡块的研究[D].上海: 同济大学, 1997
- [7]R. Desroches, G. L. Fenves. Design Procedures for Hinge Restrainers and Hinge Seat Width for Multiple-Frame Bridge[R]. University of California, Berkeley, MCEER Report:98-0013
- [8]M. J. Randall, M. Saiidi, E. M. Maragakis, et al. Restrainers Design Procedures for Multi-Span Simply-Supported Bridge[R]. University of California, Berkeley, MCEER Report:99-0011
- [9]戴福洪. 桥梁限位器抗震设计方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2000