

文章编号: 1001-7372(2005)03-0054-06

考虑邻梁碰撞的多跨长筒支梁桥落梁震害分析

王东升¹, 杨海红², 王国新³

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:以1976年唐山地震破坏的滦河桥为例,选择合适的地震波并以行波方式输入,利用时程分析法研究了邻梁碰撞对多跨长筒支梁桥落梁震害的影响问题,得到了几点共性认识:①碰撞一般首先发生在近震源的桥台处,为几跨几乎同时发生的同向追赶碰撞,此类碰撞以行波方式向桥梁远端传递,并因伸缩缝宽度的累加作用而使碰撞逐渐减弱;②桥梁中部各跨因远离桥台,运动受约束较弱,加之受桥梁端部各跨的碰撞推顶作用,墩梁间将会发生更大的相对位移,易在强烈地震中首先发生落梁;③输入加速度峰值正、负不同,邻梁碰撞对全桥墩梁最大相对位移发生与分布的影响有很大不同。基于实际震害和纵桥向非线性地震反应分析,提出了近断层地震动可能是造成滦河桥落梁震害重要外因的新观点。

关键词:桥梁工程;多跨长筒支梁桥;时程分析;落梁;碰撞;地震行波;近断层地震动

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A

Seismic analysis of girders falling down in multi span long simply supported bridges with adjacent pounding effects

WANG Dong sheng¹, YANG Hai hong², WANG Guo xin³

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Seismic damage of girders falling down in Luan River Bridge during Tangshan earthquake in China in 1976 is studied using nonlinear time history analysis, and attention is concentrated on the effects of pounding between adjacent girders induced by the seismic wave propagation effect. It is demonstrated that the pounding firstly occurs at the expansion joint on one abutment in the side of the bridge closing to the epicenter. Several bridge girders move towards the same direction and come into collision with each other. The pounding travels from the side of the bridge where it occurs to the mid span of bridge, but the pounding force becomes smaller because of the accumulation of gap size. Girders at the middle of the bridge are far from abutments and can move relative freely, so the relative displacement of bridge girders to the piers increased by pounding may be large enough to cause damage of girders falling down at the mid span firstly during severe earthquakes. Effects of pounding on the distributions of the maximum relative displacement of bridge girders to the piers along the global bridge strongly depend on that the peak value is negative or positive if the same one acceleration earthquake record is input. It is

收稿日期: 2004-10-03

基金项目: 地震科学联合基金项目(101056)

作者简介: 王东升(1974),男,内蒙古库伦人,大连海事大学副教授,工学博士,博士后. E-mail: wdszxb@dlut.edu.cn

concluded that near fault ground motion effects may cause the collapse of Luan River Bridge on the basis of earthquake damage investigation and global bridge structural damage analysis.

Key words: bridge engineering; multi span long simply supported bridge; time history analysis; falling down of girder; pounding; traveling seismic wave; near fault ground motion

0 引言

落梁是桥梁最严重的震害,它直接导致交通中断。多跨简支梁桥在地震中易发生落梁,已被历次震害所证实。中国1976年唐山大地震中滦河桥的落梁破坏曾引起桥梁抗震工作者们的广泛关注,他们对可能造成震害现象的各种原因进行了解释,在不同程度上提到了相邻主梁的碰撞作用^[1~3]。但这些研究限于当时条件,都未进行邻梁碰撞的全桥模型非线性地震反应分析工作。

近年来,随着桥梁震害经验的积累和减(隔)震设计的发展,地震中邻梁碰撞及其对桥梁结构地震反应的影响问题开始受到人们重视^[4~9]。笔者主要关心邻梁碰撞对多跨长简支梁桥落梁震害的影响问题。采用全桥整体模型,考虑桥墩及下部基础、支座、伸缩缝碰撞等非线性因素,选择合适的地震波并以行波方式输入,分析了造成滦河桥落梁震害的可能原因。

1 滦河桥地震反应分析模型

滦河桥位于津秦公路跨越滦河处,为35孔跨径22 m的简支T型梁桥,全长789 m。在1976年唐山大地震中该桥在7.1级强余震(滦县地震)时自西边滦县一侧第二孔起连续23孔落梁。刘恢先对其地震破坏情况进行了详细介绍^[10]。

1.1 滦河桥地震反应分析模型

采用全桥整体模型,如图1所示。桥梁建模情况限于篇幅仅就桥墩、支座和伸缩缝作简要介绍。

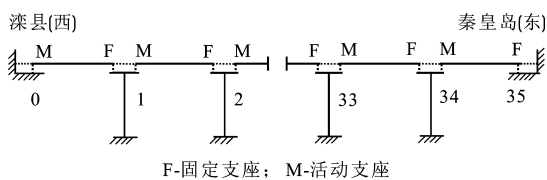


图1 滦河桥整体分析模型

Fig. 1 Analysis model of Luan River Bridge

1.1.1 桥墩及下部基础

在详细分析单墩模型的非线性工作基础上^[1],将桥墩及下部基础简化成力-位移滞回关系为TAKEDA模型的梁柱单元。梁柱单元弹性刚度为

$8.03 \times 10^3 \text{ kN/m}$,并认为近似考虑了土-结构相互作用的影响^[11,12]。分析中,当墩顶位移超过了0.15 m时,认为桥墩会倒塌。

1.1.2 支座和伸缩缝

假定支座可理想化为库仑摩擦力模型,用DRAIN 2DX程序的连接单元模拟。将固定支座摩擦系数 μ_f 取为0.15^[2],活动支座摩擦系数 μ_s 取为0.05^[1]。考虑支座受力和破坏过程的复杂性,还选取了不同的摩擦系数进行了参数分析。伸缩缝处的碰撞效应采用笔者基于直杆共轴碰撞理论建立的等效并联弹簧-阻尼器模型模拟,利用DRAIN 2DX程序的只压联系单元实现。弹簧刚度取为主梁轴向刚度的0.5倍,即 $4.04 \times 10^6 \text{ kN/m}$,因邻梁长度比为1.0,未考虑碰撞耗能^[13]。

1.2 输入地震波选择

不同地震波输入下,结构反应会有相当大的差异。滦河桥桥址距滦县7.1级的地震微观震中(商家林),宏观震中(三山院一带)距离约十几公里,距可能发震断层(滦县西断裂)距离也在十几公里左右,场地为II类^[10]。以震级、震中距或断层距、场地类型为约束条件,并考虑加速度峰值在0.3 g以上,在PEER强震记录数据库内检索得到的选择Wvc270地震记录作为输入地震波进行详细的计算分析。该记录是1989年洛马普里埃塔(Loma Prieta)地震中在西谷学院-单层钢筋混凝土体育馆附近地表得到的,为非自由场记录^[14]。图2给出了Wvc270地震记录波形,在速度和位移时程中可见到明显的脉冲波形,具有近断层地震动特点。

地震波以行波方式自西向东输入,视波速为 300 m/s ^[1,3]。加速度峰值依研究目的不同调整到0.33~0.63 g,以与地震烈度IX度适应。

2 滦河桥落梁震害分析

以Wvc270地震波为输入,对滦河桥落梁震害进行分析。为方便将西桥台表述为0#桥墩。

2.1 墩梁最大相对位移

滦河桥主梁均是从西端活动支座处坠落,因此,主要研究了活动支座处落梁方向墩梁最大相对位移反应。

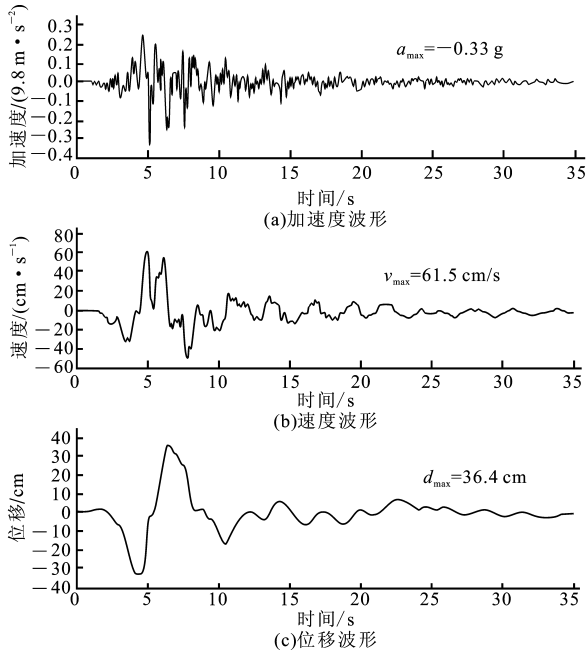


图2 Wvc270地震记录

Fig. 2 Wvc270 earthquake record

图3给出了输入加速度峰值为正0.33、0.50、0.56、0.63 g,固定支座和活动支座摩擦系数分别取0.15和0.05、0.20和0.05、0.30和0.05、0.15和0.10时,各桥墩活动支座处落梁方向墩梁最大相对位移反应,可以看出影响墩梁最大相对位移的主要因素是加速度峰值和桥墩位置,摩擦系数对其影响要小。当加速度峰值较小时,墩梁最大相对位移沿纵桥向自西向东呈现多跨一联的长阶梯式增长趋势;当加速度峰值较大时,墩梁最大相对位移在最西边的5跨左右处变化较小,各跨墩梁最大相对位移相近,此东侧墩梁最大相对位移呈逐跨阶梯式增长,至桥中部16[#]~24[#]桥墩处达到最大,以后又逐跨降低。从整体上看,墩梁最大相对位移沿纵桥向分布接近于长圆弧形,最易发生落梁部位在全桥中部。在输入加速度峰值为正0.63 g,固定支座和活动支座摩擦系数分别取0.15、0.05时,全桥墩梁最大相对位移为0.62 m,发生在21[#]桥墩处,已接近墩顶有效支承宽度0.63 m。若此时发生落梁,全桥中部各跨都可能会塌落。

图4给出了输入加速度峰值为负,其他条件相同时,各桥墩活动支座处落梁方向墩梁最大相对位移反应。与图3相比,墩梁最大相对位移沿纵桥向分布明显不同,当加速度峰值较小时,墩梁最大相对位移各桥墩处几乎相等,与桥墩位置无关;当加速度峰值较大时,除东侧靠近桥台的几跨外,墩梁最大相对位移仅在某个桥墩处发生阶跃式增长,而其他各

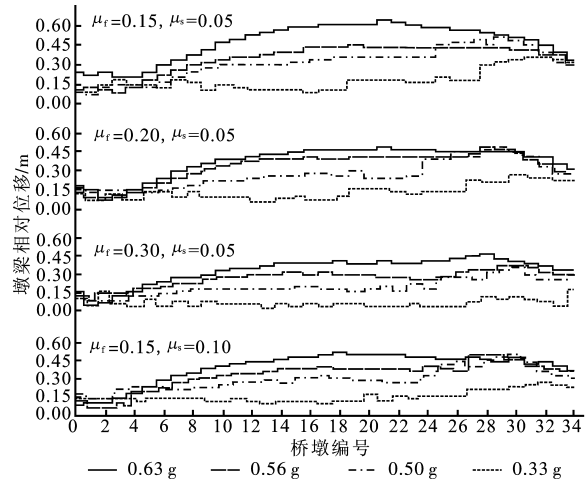


图3 正加速度峰值输入下墩梁最大相对位移

Fig. 3 The maximum relative displacement of bridge girders to piers when the peak value of acceleration is positive

桥墩处墩梁最大相对位移接近相同。摩擦系数对墩梁最大相对位移影响较明显,摩擦系数越小,墩梁最大相对位移越大。全桥最易发生落梁部位在墩梁最大相对位移发生阶跃式增长处。在输入加速度峰值为负0.63 g,其他条件相同时,全桥墩梁最大相对位移为0.59 m,发生在23[#]桥墩处。若此时发生落梁,除东侧靠近桥台的32[#]~35[#]桥台处的几跨外(图4中实线),全桥其他跨都存在塌落可能。

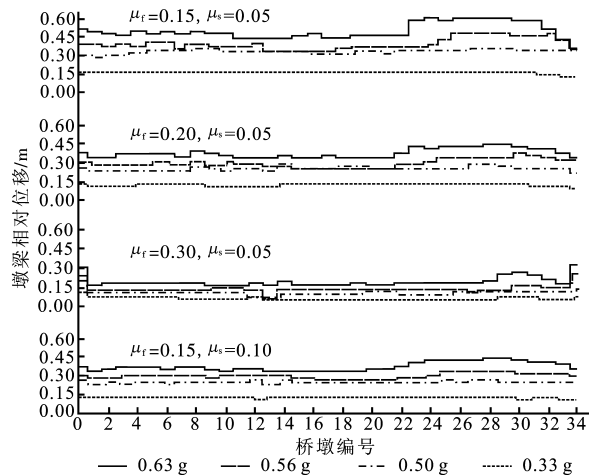


图4 负加速度峰值输入下墩梁最大相对位移

Fig. 4 The maximum relative displacement of bridge girders to piers when the peak value of acceleration is negative

下面结合邻梁碰撞相互作用及墩梁最大相对位移发生机制的分析,对图3、4墩梁最大相对位移沿纵桥向分布和影响因素的不同之处加以解释。

2.2 邻梁碰撞相互作用

以输入加速度峰值0.63 g,固定支座和活动支

座摩擦系数分别取 0.15、0.05 时为例,分输入加速度峰值为正和负两种情况进行分析。

第一种情况:加速度峰值为正。

注意到 Wvc270 地震波的位移波形主要由负和正的两个几乎对称的脉冲组成,类似一个长周期的简谐波(图 2),结构反应也具有相近的特点。图 5 给出了考虑是否碰撞 12[#]、23[#] 桥墩活动支座处主梁的绝对位移时程,主梁作先向西后向东的类似于简谐振动的运动,碰撞对主梁运动有一定影响。

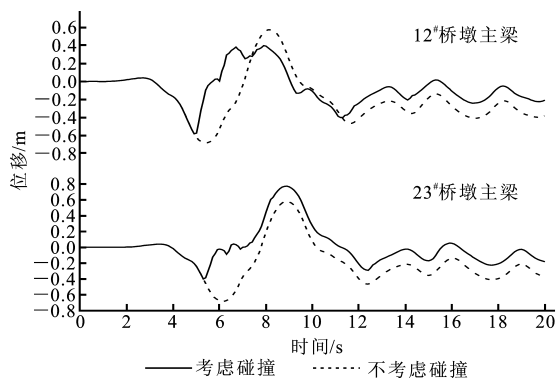


图 5 主梁绝对位移时程(向东为正)

Fig. 5 Time history of absolute displacement of bridge girders (east direction is positive)

图 6 给出了西桥台和 1[#]、12[#]、23[#]、34[#] 桥墩活动支座处主梁两端的碰撞力时程,它们分别位于桥梁两端和距两端 1/3 桥长处,可以通过图 6 对全桥整体地震反应有一个大致的了解。开始主梁和西桥台均向西运动,在 4.5 s 时西桥台处桥台与相邻主梁发生追赶碰撞。该碰撞主要发生在西边几跨,一直持续到 7.0 s 左右,持续时间较长。到 12[#] 桥墩,因伸缩缝宽度的累积作用,主梁西侧梁端碰撞力已经很小,但是却使该处主梁由向西运动转为向东运动,约 5.0 s 时与东侧相邻主梁发生相向运动的迎头碰撞,碰撞力很大。因行波效应在 0.5、1.0 s 后的 23[#]、34[#] 桥墩处可以看到同样的碰撞发生。在 6.0 s 前后,如图 6 所示各桥墩(台)主梁两端均几乎同时存在碰撞,推测此时全桥伸缩缝可能接近闭合,主梁同步向东运动,大多数桥墩落梁方向上墩梁最大相对位移都发生在这个阶段。

图 7 给出了 12[#]、23[#] 桥墩活动支座处墩梁相对位移时程及对应的主梁和墩顶绝对位移时程。可以看出落梁方向墩梁最大相对位移发生在主梁向东运动情况下,墩顶向西运动达到最大值(23[#] 桥墩)或已经开始向东运动(12[#] 桥墩)的情况下,前者墩梁相对位移值较大。

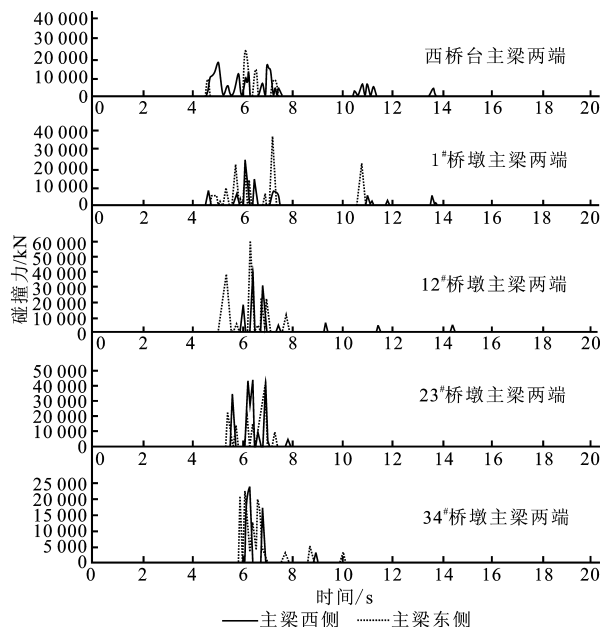


图 6 主梁两端碰撞力时程 1

Fig. 6 Pounding force time history with both ends of girders 1

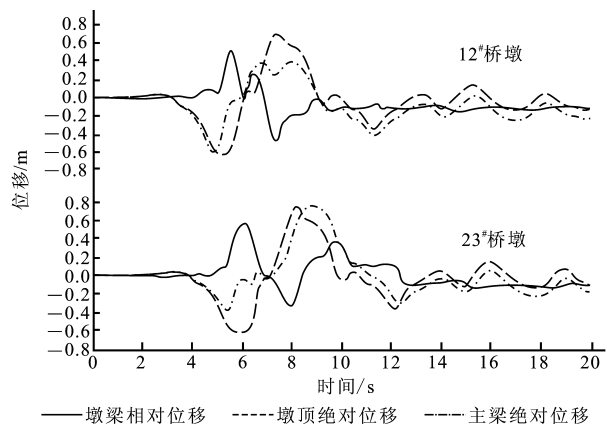


图 7 墩梁相对位移时程 1(向东为正)

Fig. 7 Time history of relative displacement of bridge girders to piers 1(east direction is positive)

基于以上分析,对图 3 墩梁最大相对位移沿纵桥向分布可作如下解释:最靠近西侧的几跨,因受桥台和桥中部各跨的碰撞作用,伸缩缝很长一段时间处于闭合,主梁与桥台几乎同步运动,墩顶相对桥台(地面)最大位移约 0.10 m,因此,主梁与墩顶相对位移较小;桥梁中部各跨首先向西运动发生追赶碰撞后,又转而向东运动与相邻东边各跨发生迎头碰撞,全桥伸缩缝顶紧,主梁共同向东运动,而此时 1[#]~12[#] 桥墩墩顶处于向东运动状态,12[#]~34[#] 桥墩墩顶处于向西运动状态,这种运动状态改变因行波作用逐跨渐近,这就使 5[#]~16[#] 桥墩之间的墩梁最大相对位移呈逐跨阶梯式增长;最东侧几跨由于东侧桥台限制了主梁向东运动,墩梁相对位移有所降

低。若不考虑碰撞,全桥活动支座处落梁方向墩梁最大相对位移仅 0.18 m,考虑碰撞后变为 0.62 m,若发生落梁破坏,可认为碰撞起到了重要作用。

第二种情况:加速度峰值为负。

图 8 给出了西桥台和 1[#]、12[#]、23[#]、34[#] 桥墩活动支座处主梁两端的碰撞力时程,与图 6 比较,碰撞力大小、碰撞次数和持续时间都明显小于加速度峰值为正时的值。全桥整体运动开始时主梁和西桥台均已改为向东运动,因桥墩和主梁运动滞后,在 3.5 s 左右西桥台与邻近主梁发生追赶碰撞。图 8 中 1[#] 桥墩活动支座处主梁两端碰撞力成对出现,推断该碰撞是相邻几跨几乎同时发生,并以行波方式向东侧传播,在 0.5、1.0 s 后的 13[#]、23[#] 桥墩处可以看到同样的碰撞存在,但因伸缩缝宽度的累积作用,碰撞力越来越小。至 8.0 s 前后全桥从 1[#] ~ 23[#] 桥墩主梁两端可能都同时发生了碰撞,伸缩缝顶紧,这是由于西侧桥墩主梁已经完成了先向东,后向西的运动过程,再次向东运动,而东侧桥墩主梁仍处于向西运动状态中,二者发生了迎头碰撞,碰撞力较大。从总体上看:全桥邻梁碰撞主要发生在 1[#] ~ 23[#] 桥墩之间,这当然也与模型假设东桥台处伸缩缝宽度为 0.27 m 有关。进一步的分析表明:伸缩缝间距假定仅影响 23[#] ~ 34[#] 桥墩之间的墩梁最大相对位移值,影响范围约为全桥长的 1/3,对墩梁最大相对位移沿全桥的分布规律几乎没有影响。

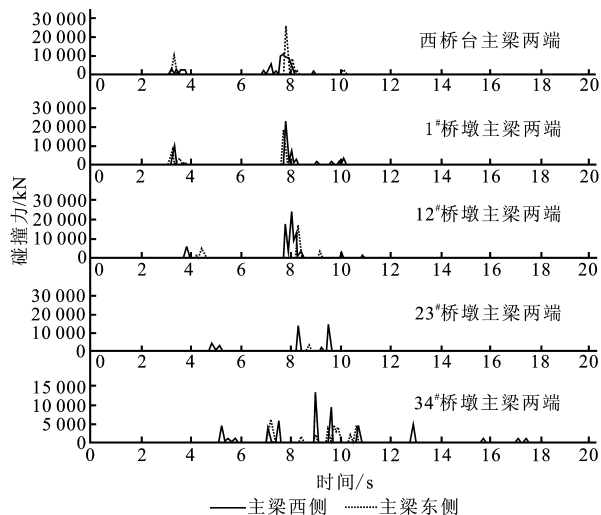


图 8 主梁两端碰撞力时程 2

Fig. 8 Pounding force time history with both ends of girders 2

图 9 给出了 12[#]、23[#] 桥墩活动支座处墩梁相对位移时程及对应的主梁和墩顶绝对位移时程,可以看出:此时墩梁最大相对位移发生在主梁和桥墩都向西运动过程中,由主梁在墩顶向东滑移引起。

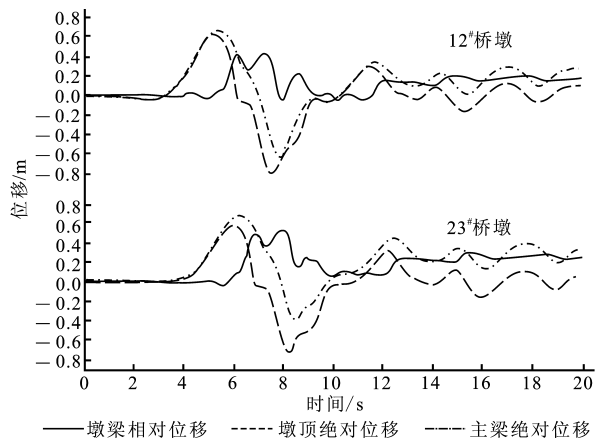


图 9 墩梁相对位移时程 2(向东为正)

Fig. 9 Time history of relative displacement of bridge girders to piers 2 (east direction is positive)

在不考虑碰撞的条件下,主梁将在墩顶向东滑移,落梁方向墩梁最大相对位移为 0.55 m。考虑碰撞后,1[#] ~ 23[#] 桥墩上的主梁受邻梁碰撞约束作用,墩梁相对位移有所降低;23[#] 桥墩及其以东桥墩上的主梁运动相对自由,且受西侧邻梁碰撞影响,主梁向东滑移有所增加,这样就在 23[#] 桥墩处墩梁最大相对位移形成一个阶跃式增长。总的看来:全桥墩梁最大相对位移主要由主梁在墩顶向东滑移引起,因此摩擦系数成为重要的影响因素之一。

通过对以上两种情况的分析,可以得到在具有位移脉冲波形的近断层地震行波作用下,邻梁碰撞对多跨长筒支梁桥落梁震害影响的几点共性认识:①碰撞一般首先发生在近震源的桥台处,为几跨几乎同时发生的同向追赶碰撞,此类碰撞以行波方式向桥梁远端传递,并因伸缩缝宽度的累加作用而使碰撞逐渐减弱;②桥梁中部各跨因远离桥台,运动受约束较弱,加之受桥梁端部各跨的碰撞推顶作用,墩梁间将会发生更大的相对位移,易在强烈地震中首先发生落梁;③输入加速度峰值正、负不同,邻梁碰撞对全桥墩梁最大相对位移发生与分布的影响有很大不同。

2.3 滦河桥落梁震害可能原因

在正或负峰值的 Wvc270 地震波作用下,滦河桥落梁震害发生机制可能有所不同,但实际震害原因只能存在一个。滦河桥没有落梁的西侧第一跨和东侧 11 跨主梁相对于墩顶都向东纵移。笔者以此为判据分析输入地震加速度峰值的正、负可能性。

分析结果表明:当输入地震加速度峰值为正时,主梁相对桥墩都向西纵移;当输入地震加速度峰值为负时,主梁相对桥墩都向东纵移。由此判断滦河

桥输入地震加速度峰值应为负。

综上所述, 滦河桥落梁震害原因可归结为: ①滦河桥受到了与 $W_{ve}270$ 地震波类似的近断层地震动作用, 结构反应强烈; ②包括主震、邻梁碰撞在内的多种因素使薄弱的支座过早破坏, 主梁接近浮放并在地震时墩顶发生滑移, 但也由此使桥墩承受的地震力显著降低, 桥墩未首先发生倒塌(计算也表明墩顶位移未超过 15 cm); ③邻梁碰撞作用使全桥活动支座处落梁方向墩梁相对位移在某个桥墩(可能是 23[#])处达到最大, 首先发生落梁。必须指出: 笔者主要是基于实际震害和全桥纵向整体地震反应分析来探讨滦河桥落梁震害原因, 只能算是一种可能性的推论。对于分析近断层地震动及邻梁碰撞对多跨长筒支梁桥落梁震害影响来说, 却是一个很好的实例。

3 结 语

笔者以滦河桥为例, 研究了邻梁碰撞对多跨长筒支梁桥落梁震害的影响问题, 得到了几点共性认识。基于实际震害和纵桥向非线性地震反应分析, 提出了近断层地震动可能是造成滦河桥落梁震害重要外因的新观点。

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] 何度心. 桥梁振动研究[M] . 北京: 地震出版社, 1989. 103—109.
[3] 王 阜. 桥梁在地震行波作用下的反应[J] . 地震工程与工程振动, 1982, 1(3): 25—35.
[4] JANKOWSKI R, WILDE Y, FUJINO K. Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge

during earthquakes[J] . Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1998, 27(5): 487—502.

[5] JANKOWSKI R, WILDE Y, FUJINO K. Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes[J] . Earthquake Eng. Stru. Dyn., 2000, 29(2): 195—212.
[6] MALHOTRA P K. Dynamic of seismic pounding at expansion joints of concrete bridges[J] . Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1998, 124(7): 794—802.
[7] ZHU Ping. Seismic analysis and service ability evaluation of elevated bridge based 3D modelling with pounding effects of girders[D] . Tokyo: The University of Tokyo, 2001.
[8] 范立础, 聂利英, 李建中. 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.
[9] 刘健新, 胡兆同. 公路桥梁铅销橡胶支座的标准化[J] . 长安大学学报, 2003, 23(3): 56—59.
[10] 刘恢先. 唐山大地震震害[M] . 北京: 地震出版社, 1989. 33—160.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 王东升, 冯启民, 王国新. 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[J] . 工程力学, 2004, 21(2): 157—166.
[14] 美国地震工程研究会, 中国石油化工总公司抗震办公室. 洛马普里埃塔地震考察[M] . 北京: 地震出版社, 1991. 1—18.

欢迎浏览公路交通科技信息

<http://www.highwaychina.com>