

地震作用下连续梁桥伸缩缝处单边碰撞效应研究

吴伟弘¹, 刘国坤², 梁波¹, 单石亮¹, 吕文舒³

(1. 湖南中大检测技术集团有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南省交通科学研究院有限公司;
3. 中交水运规划设计院有限公司)

摘要:为研究多维地震作用下连续梁桥伸缩缝处的碰撞效应,基于接触单元法中 Kelvin 碰撞模型,利用 Ansys 建立了全桥有限元分析模型,并将 EI 地震波分为单向地震、双向地震、考虑扭转分量的多维地震 3 种不同工况,对比分析了 3 种地震作用工况下的连续梁桥伸缩缝处单边碰撞效应对梁体位移、墩顶位移及梁体应力的影响。研究表明:3 种不同工况地震波作用下,考虑扭转分量的地震波作用工况下碰撞效应对桥梁结构的影响尤为显著,且碰撞效应对梁体各跨跨中的压应力影响非常明显,碰撞效应下桥梁跨中最大压应力结果为不考虑碰撞效应结果的 7.8 倍。

关键词:地震作用;碰撞效应;梁桥;伸缩缝

一般在桥梁结构设计以及桥梁验算过程中很少对桥梁的碰撞分析方面做深入考虑,而在地震多发区,桥梁梁体之间伸缩缝处以及桥墩与主梁之间均会发生碰撞。目前中国对桥梁碰撞效应的研究甚少,其中陈天海对单跨公路简支斜交梁桥开展了碰撞反应的振动台试验及碰撞模拟的数值分析研究,对考虑不同本构之间的碰撞反应进行了研究;夏人杰针对特大连续梁桥进行了地震作用下的碰撞研究,提出了一种模拟梁体与挡块之间碰撞效应的碰撞模型;顾晓燕等对连续斜交桥进行了碰撞反应分析,研究了斜交角度与横向挡块间距等多个参数对碰撞效应的影响。

基于上述研究成果,该文拟研究连续梁桥伸缩缝处在地震作用下的碰撞对结构的影响规律,利用时程分析法结合全桥有限元模型提出连续梁梁体之间伸缩缝处的碰撞效应分析模型,即单边碰撞模型,研究在 3 种不同地震工况下碰撞效应对桥梁结构的影响,主要分析碰撞作用对梁体位移、墩顶位移、梁体应力的影响,以为梁桥防撞设计提供参考。

1 工程概况

依托工程主桥为三跨一联预应力混凝土连续梁桥。桥跨设置为(30+40+30)m。上部结构主梁截面形式为单箱三室,箱梁宽 15.5 m。桥墩采用直径为 1.6 m 的实心截面双柱式桥墩。

2 地震作用下碰撞理论分析

桥梁结构模拟碰撞分析一般采用经典力学法和接触单元法,其中经典力学法主要基于动量和能量守恒定律,通过构件的速度变化来反馈碰撞效应,且在碰撞分析过程中不考虑构件的应力和变形情况,一般适用于近似刚体的桥梁碰撞分析。

但接触单元法能更精准地模拟在地震作用下桥梁结构的碰撞反应分析过程。接触单元法主要有如下几种分析模拟方法。

(1) 线性弹簧碰撞模型

该碰撞模型将两个相互独立的刚体采用线弹性弹簧进行连接,根据弹簧变形量及线弹性刚度计算刚体之间的碰撞力大小。其原理简单但无法体现出刚体碰撞时所具有的非线性特性,且不能反映刚体碰撞时所产生的能量耗散。

(2) Hertz 碰撞模型

Hertz 模型用非线性弹簧替代了线性弹簧,根据非线性弹簧的应力强度分析两个刚体之间的碰撞情况。该模型在模拟碰撞时虽能很好地体现刚体非线性变化情况,却无法对刚体间碰撞所产生的能量及碰撞过程损耗能量情况进行分析。

(3) Hertz-damp 碰撞模型

该种碰撞模型利用非线性弹簧与阻尼原件并联来

模拟碰撞过程中的能量损耗,该模型优点是可以考虑碰撞过程中的复杂非线性规律,计算结果较为准确,但该模型复杂程度高,难以简便模拟碰撞过程,其适用范围相对较小。

(4) Kelvin 碰撞模型

通过并联弹簧元件及阻尼元件来模拟碰撞反应过程,不但结果计算精准,且能准确模拟刚体间碰撞反应造成的能量耗散。相较于 Hertz-damp 模型,二者计算精度基本相当,但 Kelvin 碰撞模型显然较 Hertz-damp 模型更为简便且在分析软件方面的适用性更高。

综上所述,经典力学碰撞模型多用于碰撞时间短的情况。而各类接触单元法的碰撞模型中只有 Kelvin 模型不仅能对碰撞力的非线性变化进行精准分析,还能有效模拟碰撞反应中的能量消耗过程,并且更适合结合有限元软件来模拟桥梁结构间的碰撞过程。故该文拟采用接触单元法中的 Kelvin 碰撞模型(图 1)对地震作用下连续梁桥伸缩缝处的单边碰撞反应过程进行模拟计算分析。该模型的具体接触力学表达式见式(1)~(4)。

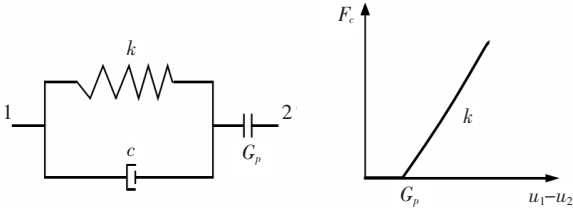


图 1 Kelvin 碰撞模型及碰撞力一位移模型

$$F_c = k(u_1 - u_2 - G_p)^{\frac{2}{3}} + c(u_1 - u_2), u_1 - u_2 - G_p \geq 0 \tag{1}$$

$$F_c = 0, u_1 - u_2 - G_p \leq 0 \tag{2}$$

根据能量守恒定律,可以求得阻尼系数 c :

$$c = 2\zeta \sqrt{k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \tag{3}$$

ζ 为振型阻尼比,表达式为:

$$\zeta = \frac{-\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \tag{4}$$

式中: e 为恢复系数; m_1 、 m_2 为两个相邻碰撞刚体的质量。

3 有限元模型建立

使用大型有限元软件 Ansys 对梁桥伸缩缝处的碰撞效应进行后处理分析,鉴于 Ansys 的前处理功能

可视化界面不够友好,而网格质量对分析结果有直接影响,因此使用 Hypermesh 软件代替 Ansys 进行前处理操作,伸缩缝处网格划分较密,其他区域网格较稀且均为正六面体网格,可为后续分析提供精度保障。

所建 Ansys 有限元分析模型中实体单元用作主梁与桥墩模拟,通过梁单元与壳单元组合模拟支座,模型共计壳单元 140 个,梁单元 120 个,实体单元 415 277 个及变形单元 427 381 个。鉴于该文主要分析地震作用下连续梁桥伸缩缝处的单边碰撞反应,故仅于结构伸缩缝位置采用 Ansys 中 Combin40 组合单元建立碰撞单元,采用箱式弹簧单元模拟支座阻尼,桥面与支座连接采用绑定接触。该模型单元繁多,网格划分密集、精细度高,全桥模型无法体现结构伸缩缝处精细化模拟,特提取结构伸缩缝处局部有限元模型图如图 2 所示。

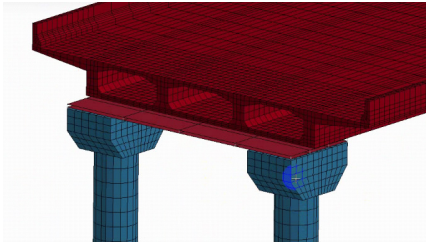


图 2 局部横断面 Ansys 有限元模型示意

4 地震作用下的碰撞效应分析

地震波的输入是研究的重点也是基础,采用使用最广泛的美国 EI 地震波进行地震作用模拟,并将其分为以下 3 种工况。工况 1:纵桥向单向地震工况;工况 2:纵桥向和横桥向双向地震工况;工况 3:考虑扭转效应的双向地震工况。分别对 3 种地震作用工况下碰撞对结构梁体位移、结构墩顶位移以及结构梁体应力的影响进行对比分析研究。

4.1 碰撞反应下梁体位移分析

根据 Ansys 有限元模型对碰撞反应下梁体位移的影响效应分析结果,第 1 跨至第 3 跨主梁跨中的切向(横桥向)和径向(纵桥向)位移峰值结果对比图分别如图 3、4 所示(其中切向 U_x 为横桥向位移;径向 U_z 为纵桥向位移。所有位移最大峰值均是绝对值比较后得出的结果)。

由图 3、4 可知:有无碰撞作用对梁体切向位移的变化有很大影响,且梁体切向位移的变化在不同地震作用工况下的碰撞反应也不一致,根据整体结果分析

可知,主梁向较大碰撞力一侧的运动趋势会因伸缩缝处的碰撞力而受限制,且会让主梁产生向碰撞力较小方向运动的趋势。不同地震工况下碰撞作用导致的主梁切向位移变化趋势不一致;主梁在受碰撞力作用时有向外即远离伸缩缝运动的趋势,且该碰撞力会阻碍主梁向内即靠近伸缩缝运动。

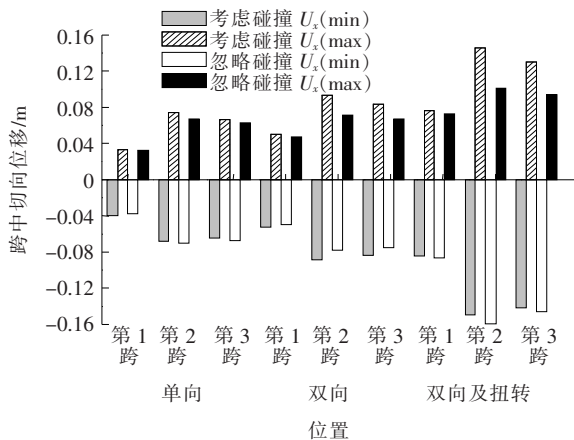


图3 各跨主梁跨中切向(横桥向)位移峰值对比

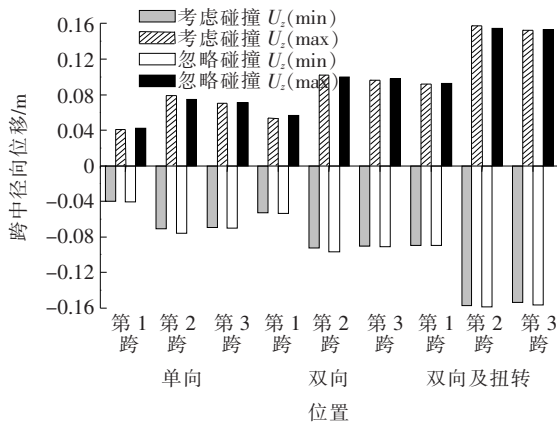


图4 各跨主梁跨中径向(纵桥向)位移峰值对比

通过3种不同地震工况下碰撞作用对主梁位移的影响结果对比分析可知:工况3即考虑扭转的双向地震作用下的主梁梁体位移峰值远大于工况1单向地震作用及工况2双向地震作用下的主梁梁体位移峰值。

4.2 碰撞反应下墩顶位移分析

为研究碰撞作用对桥梁桥墩墩顶位移的影响规律,现提取桥梁1#~4#桥墩在前述3种地震工况作用下考虑碰撞作用和不考虑碰撞作用各墩顶位移数据,绘制各桥墩墩顶的切向(横桥向)位移峰值对比图(图5)、各桥墩墩顶的径向(纵桥向)位移峰值对比图(图6)(其中切向 U_x 表示横桥向位移;径向 U_z 表示纵桥向位移)。

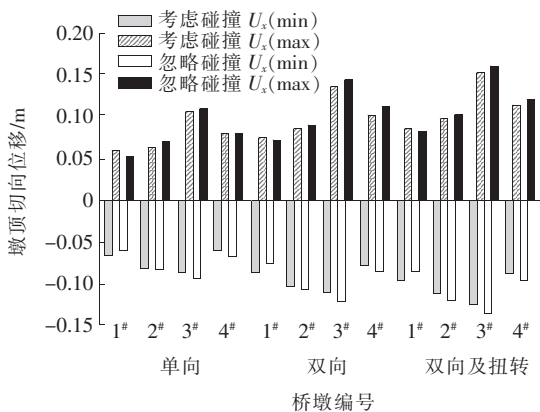


图5 各墩顶切向(横桥向)位移峰值对比

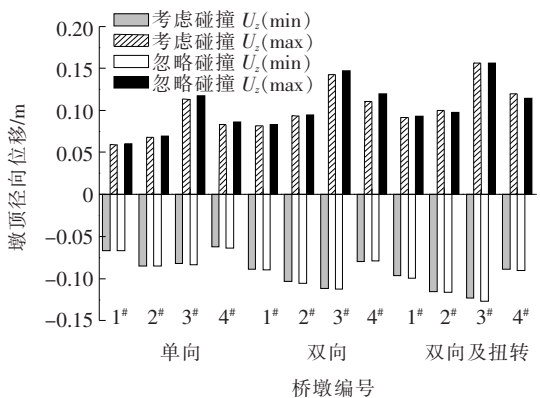


图6 各墩顶径向(纵桥向)位移峰值对比

由图5、6可知:桥墩墩顶会因碰撞作用向碰撞力较小的方向产生位移,并且碰撞作用会约束其向碰撞力大的方向移动。桥墩在碰撞力的作用下墩顶会产生向外运动的趋势。

根据图5、6并结合4.1节碰撞反应下梁体位移变化规律分析可知:墩顶位移变化与梁体位移变化在碰撞作用下规律基本一致,桥墩墩顶位移变化与梁体位移变化密不可分,具有很大的相关性,梁体与桥墩间采用支座进行连接,梁体位移会通过支座的剪切变形连带着桥墩发生位移,在地震工况碰撞作用下梁体位移变化很大程度上决定了墩顶位移变化。

4.3 碰撞反应下梁体应力分析

主梁梁端在地震作用下由于结构伸缩缝处的碰撞作用会产生较大的碰撞应力,随着碰撞应力的累积传递给主梁各跨梁体,可能会导致桥梁结构局部应力过大产生裂缝发生破坏。为研究梁体各跨跨中截面最大拉/压应力情况,现提取考虑碰撞和不考虑碰撞两种情况主梁在3种地震工况作用下各跨跨中截面的最大拉/压应力结果,如表1所示。

由表1可知:

表1 主梁各跨跨中截面最大拉/压应力对比 MPa

应力	是否考虑碰撞	单向(工况 1)			双向(工况 2)			双向及扭转(工况 3)		
		第 1 跨	第 2 跨	第 3 跨	第 1 跨	第 2 跨	第 3 跨	第 1 跨	第 2 跨	第 3 跨
拉应力	考虑碰撞	0.157	0.197	0.149	0.187	0.235	0.178	0.198	0.256	0.196
	不考虑碰撞	0.151	0.190	0.161	0.179	0.233	0.194	0.186	0.252	0.234
压应力	考虑碰撞	-0.519	-1.606	-0.907	-0.675	-1.815	-1.010	-0.736	-1.905	-1.106
	不考虑碰撞	-0.205	-0.207	-0.256	-0.266	-0.269	-0.333	-0.287	-0.277	-0.357

(1) 各地震作用工况下有无碰撞主梁各跨跨中截面最大拉应力无显著区别,且经应力结果对比分析发现,第 1、2 跨跨中截面最大拉应力考虑碰撞作用比不考虑碰撞作用偏大,但第 3 跨跨中截面最大拉应力考虑碰撞作用较不考虑碰撞作用小。

(2) 梁体考虑碰撞作用各跨跨中截面最大压应力为不考虑碰撞作用的 2.5~7.8 倍,其中第 1 跨和第 3 跨跨中截面最大压应力差异最大为 3.5 倍,第 2 跨跨中截面最大压应力差异最大达 7.8 倍。

5 结论

通过对 3 种不同地震工况作用下连续梁桥伸缩缝处的单边碰撞效应研究分析,得出以下结论:

(1) 不同地震工况下碰撞作用导致的主梁位移变化趋势不一致;在考虑扭转的双向地震作用下的主梁梁体位移峰值远大于单向和双向地震作用下的主梁梁体位移峰值,故在分析地震作用下桥梁结构梁体位移时应充分考虑地震作用的扭转效应。

(2) 墩顶位移变化与梁体位移变化在碰撞作用下规律基本一致,在地震工况碰撞作用下梁体位移变化很大程度上决定了墩顶位移变化。

(3) 各地震作用工况下有无碰撞主梁各跨跨中截面最大拉应力无显著区别,但梁体考虑碰撞作用各跨跨中截面最大压应力相较不考虑碰撞作用下各跨跨中截面最大压应力差异最大可达 7.8 倍。且碰撞作用对桥梁结构主梁第 2 跨跨中截面最大压应力影响最为

突出。

参考文献:

[1] 顾晓燕,游新,吴刚.考虑双向碰撞的斜交桥抗震性能分析[J].中外公路,2019(1).

[2] 刘津成,徐略勤,陈亮.长挑臂宽主梁斜拉桥地震响应及抗震分析[J].中外公路,2016(5).

[3] 陈天海.地震作用下公路简支斜交梁桥碰撞效应研究[D].福州大学硕士学位论文,2017.

[4] 夏人杰.地震作用下非规则多跨连续梁桥横向碰撞效应研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2017.

[5] 葛胜锦,熊治华,翟敏刚,高山.考虑主梁碰撞效应的减隔震连续梁桥设计与计算[J].中外公路,2012(3).

[6] 王军文,吴天宇,闫聚考.斜交简支梁桥地震碰撞反应参数分析[J].振动与冲击,2017(3).

[7] 程麦理,杨红霞.黄土地区小半径曲线梁桥地震响应规律研究[J].中外公路,2019(2).

[8] 秦昌,徐略勤,刘津成,等.高墩大跨连续刚构桥长周期地震响应对比研究[J].中外公路,2017(1).

[9] 韩雷雷.基于精细积分法的高低墩桥梁地震碰撞响应分析[C].第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册),2019.

[10] 刘鑫,罗伟斌,谢志鹏.考虑碰撞效应的多跨简支梁桥非线性地震响应分析[J].西部交通科技,2019(9).

[11] 孟栋梁,杨孟刚,费凡.碰撞对高铁简支桥梁横向地震响应影响的振动台试验研究[J].工程力学,2019(8).

[12] 吕文舒.多维地震作用下梁桥碰撞响应分析[D].长沙理工大学硕士学位论文,2019.