

采用摩擦摆支座的高墩弯桥邻梁碰撞响应研究

张晓军

(甘肃恒通路桥工程有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究高墩连续弯桥在地震作用下邻梁间的碰撞效应,考虑了板式橡胶支座的滑动效应以及摩擦摆支座的减震效应,基于 Kelvin 单元建立了非线性时程分析模型,分析了桩-土相互作用、邻梁初始间隙以及摩擦摆支座的等效活动半径等因素对结构地震响应的影响。研究表明:考虑桩-土相互作用后邻梁曲线外侧的碰撞力约减小 3.74%,而其他位置碰撞力则增大 8.07%左右;忽略邻梁碰撞效应会低估墩底内力;摩擦摆支座对墩梁相对位移的减小程度约为 4.89%;随着邻梁初始间隙的增加,碰撞次数会减小,但碰撞力的变化较为复杂;随着摩擦摆支座等效活动半径的增加,曲线外侧的碰撞力逐渐减小,变化率可达到 31.24%,曲线内侧碰撞力的变化率在 5.13% 以内。

关键词:高墩;弯桥;邻梁;碰撞效应;摩擦摆支座

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)10-0203-06

0 引言

高墩曲线连续梁桥可以很好地适应复杂的地形地貌,因此在山区桥梁的建造中得到了广泛的应用^[1]。但是,由于平面曲率、桥墩和梁体刚度差异等原因,也容易造成邻梁发生碰撞而损坏^[2]。桥梁碰撞不仅会使伸缩缝之间出现很大的撞击力,造成梁体的局部损坏,还会对桥墩及其基础带来损伤,甚至导致落梁和垮塌等灾害^[3]。

目前,国内外已有大量学者对桥梁在地震作用下的碰撞效应展开了研究工作。李正英等^[2]借助有限元软件研究了曲线梁桥采用双柱式桥墩的不均匀碰撞问题,指出考虑碰撞效应后,主梁的径向位移会显著增加,同时墩顶位移和墩底内力也会受到明显的影响。张常勇等^[4]研究了采用摩擦摆支座的三跨连续梁桥与相邻简支梁之间的碰撞效应,并分析了梁端初始间隙、摩擦摆支座的等效活动半径、摩擦系数对碰撞响应的影响,研究成果表明增大梁端间隙可减小梁端的碰撞次数,但对碰撞力的影响较为复杂。张学文等^[5]结合斜拉桥与引桥动力特性差异大的特点,研究了邻梁装置对其碰撞响应规律的影响,指出可以采用受拉连梁装置以达到减小邻梁相对位移及碰撞力峰值的目的。闫斌等^[6]采用大质量法分析了一致激励和考虑行波效应下铁路简支箱梁的碰撞效应,

并研究了梁缝宽度、线路纵向阻力等参数对碰撞效应的影响,研究成果表明轨道结构对桥梁的纵向位移可以起到一定的约束作用,可以减弱相邻梁体间的碰撞效应。石岩等^[7]建立了考虑支座非线性、上部结构与垫石偏心距以及墩柱弹塑性的碰撞分析模型,对抗落梁措施的抗震性能、桥墩线刚度、垫块类型及墩柱弹塑性等参数和结构地震响应之间的相互关系进行了评估。邓育林等^[8]考虑了“土-桥台-上部结构”的相互作用,对大跨桥梁伸缩缝处的碰撞效应进行了分析,研究成果表明,主、引桥梁体间以及引桥梁体与桥台背墙间的碰撞效应会使得桥台的背墙遭受到较大的冲击力的作用,造成桥台损坏。孙广俊等^[9]建立了考虑支座非线性、桥墩弹塑性以及碰撞效应的五跨简支梁桥模型,对比分析了墩-梁连接和梁-梁连接两种落梁失效控制模式下结构的地震响应。李娜娜等^[10]基于某小半径带坡匝道桥制作了缩尺模型,通过近断层和远场地震动输入研究了单向和双向激励条件下模型结构的地震响应,研究成果表明,近断层地震动作用下曲线梁桥的碰撞次数和碰撞力均大于远场地震动的情况。除此之外,还有张文学^[11]、闫聚考^[12]、徐略勤^[13]以及王军文^[14]等诸多学者都开展了相关工作,并取得了极具工程价值的研究成果。

虽然针对桥梁碰撞的研究成果较多,但是多基于直线桥梁,且忽略了普通支座的非线性性质,针对减隔震支座与碰撞响应之间关系的探索也相对较少。鉴于此,本文以打庆高速打扮梁 1 号连续梁桥为研究对象进行理论分析,基于 Kelvin 单元分析了高墩连续

收稿日期: 2022-12-04

作者简介: 张晓军(1978—),男,本科,高级工程师,从事桥梁施工工作。

弯桥在地震作用下的邻梁碰撞效应,研究了桩-土作用对碰撞效应的影响,并进一步从邻梁初始间隙和摩擦摆支座的等效活动半径两个角度分析了其对连续弯桥地震响应的影响。研究成果以为高墩弯桥的抗震设计提供一定的参考。

1 工程概况

打扮梁1号大桥的平面圆曲线半径为800 m,桥跨组合为8×40 m,采用装配式预应力混凝土连续箱梁,横向由4片小箱梁组成,共2联,采用先简支后连续的施工方法。桥台采用柱式台,1~4号墩和6、7号墩采用双柱墩,5号桥墩采用薄壁矩形空心墩。桥台及4号桥墩采用四氟滑板式橡胶支座;5号桥墩采用JZQZ-4.0-GD-g150-T2.8-780×780×220型摩擦摆支座;其余桥墩采用GJZ450×500×99型板式橡胶支座。两桥台处采用D80型伸缩缝,过渡墩顶采用D160型伸缩缝,技术指标符合《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》(JT/T 327-2016)。图1为全桥立面布置图。

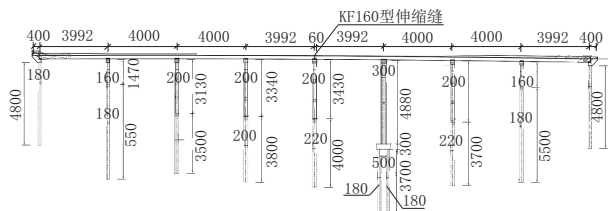


图1 立面布置图(单位:cm)

2 有限元分析模型

2.1 支座力学模型

描述四氟滑板式橡胶支座和普通板式橡胶支座的恢复力模型时采用双线性曲线模型^[15]。参考《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[16],四氟滑板式和普通板式橡胶支座的摩阻系数分别取为0.02和0.2;参考《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4-2019)^[17],四氟滑板式和普通板式橡胶支座的抗压刚度分别取为 1.4×10^6 kN/m和 6.2×10^5 kN/m,剪切刚度分别取为2 135 kN/m、3 232 kN/m。摩擦摆支座采用软件中的专门模块进行模拟,隔震周期为2.8 s,等效活动半径为2.0m,摩擦系数取0.03。

2.2 碰撞单元

参考文献[18],采用Kevin单元来模拟邻梁间的碰撞效应。如图2所示, Kevin单元包含线性弹簧、阻尼器和间隙单元三部分,其中线性弹簧和阻尼器并联后与间隙单元串联。邻梁间的碰撞力大小可以用式(1)进行描述。

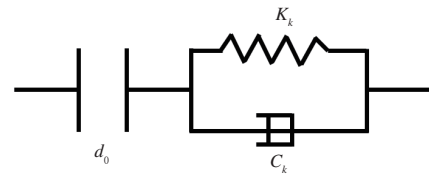


图2 Kevin 碰撞单元

$$F = \begin{cases} K_k(d + d_0) + c_k v & d + d_0 < 0 \\ 0 & d + d_0 \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_k 和 d 表示线弹簧的刚度及变形; c_k 表示阻尼器的阻尼系数; v 表示相对速度; d_0 表示初始间隙。

2.3 连续弯桥计算模型

采用Midas civil有限元软件建立分析模型。且主梁、盖梁、桥墩、桩基均采用弹性梁单元模拟。桩-土相互作用采用等代土弹簧模拟,其刚度采用“m法”计算^[19]。在4号墩(过渡墩)上的邻梁之间模拟弹簧单元,由于横向有4片小箱梁,故相邻位置处共有4个碰撞单元。坐标系方向及有限元模型如图3所示,将其记为模型1。



图3 有限元模型图

另外,为了分析桩-土相互作用对邻梁碰撞效应的影响,建立了仅在墩底施加固定约束的有限元模型,记为模型2;建立了不考虑邻梁碰撞效应、但考虑桩-土作用的模型,记为模型3。

2.4 地震动的输入

选取3条实测地震波数据进行时程分析,包括San Fernando波、El Centro波(见图4)和Kern County波,另将3条地震波的加速度峰值均调整为 $0.4g$,计算结果取3条地震波的最大值。

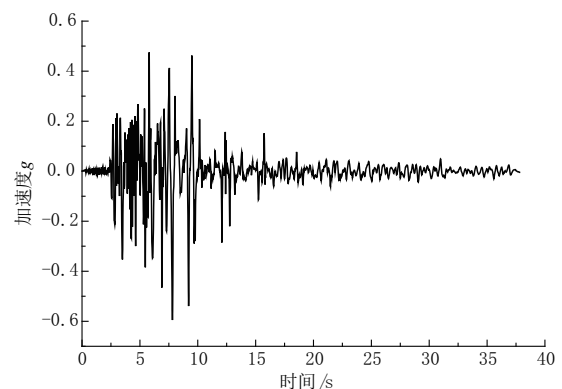


图4 El Centro波

3 地震响应分析

(1) 碰撞力

以4号墩上两联梁体间的碰撞力为研究变量,分析桩-土作用对碰撞力的影响,计算结果见图5。此处,1#~4#碰撞位置分别对应的是有限元模型中由曲线外侧至曲线内侧的4个小箱梁碰撞位置。

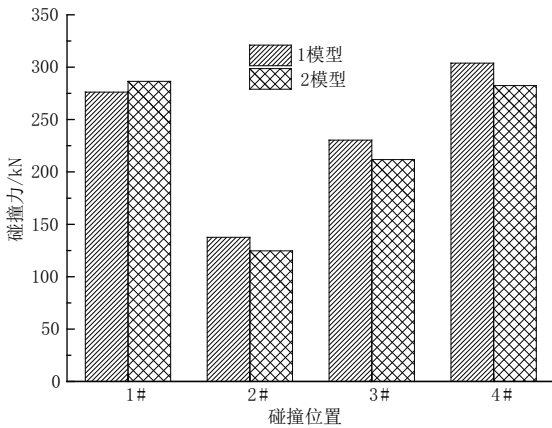


图5 不同模型的碰撞力

由图5可以看出,桩-土作用对本文分析的邻梁碰撞的不同位置的碰撞力影响不同。对于曲线梁的外侧(1#碰撞点),忽略桩-土作用后碰撞力会增大3.74%;而对于其他位置,忽略桩-土作用后碰撞力会减小,由曲线外侧至内侧(2#~4#碰撞点)的减小率依次为9.43%、8.07%和7.05%,即变化程度依次减小。

(2) 墩底内力

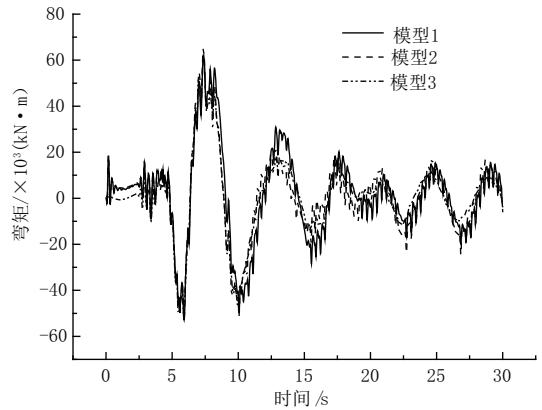
通过初步分析,墩柱最大内力出现在5号墩墩底,故以该墩的墩底内力为研究变量,分析结果见图6。

由图6所示结果可以看出,墩底内力值由大到小依次为:模型2>模型1>模型3,且模型2和模型3之间的弯矩差距达到6.82%,剪力差距达到8.91%,即忽略邻梁碰撞效应会低估墩底内力。对于考虑邻梁碰撞效应的模型1和模型2,当考虑桩-土相互作用后墩底内力有所减小,其中弯矩减小了4.20%,剪力减小了6.44%;另外,在墩底弯矩和剪力的地震响应达到峰值之前,二者时程曲线的变化规律基本一致,此后开始出现偏差。

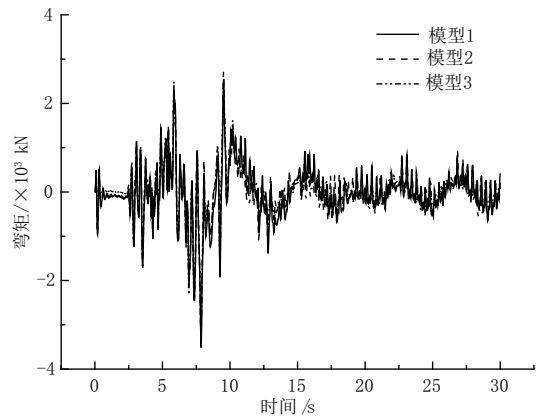
(3) 墩梁相对位移

以4号墩(过渡墩)上两联梁的梁体与该墩间的相对位移为研究变量,分析结果见图7。

由图7所示结果可以看出,对于第一联,墩梁最大相对位移为0.095 m(模型3),最小为0.037 m(模型1),二者的差距达到155.38%;对于第二联,墩梁

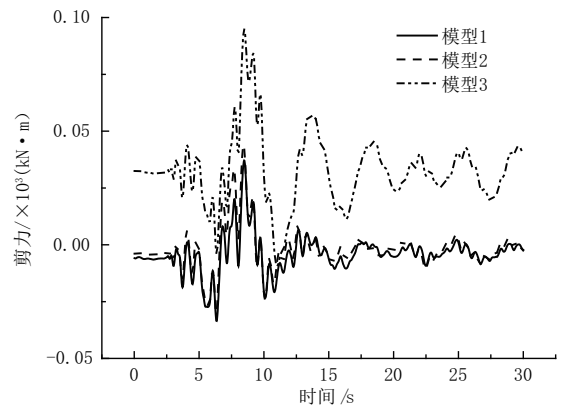


(a)墩柱弯矩

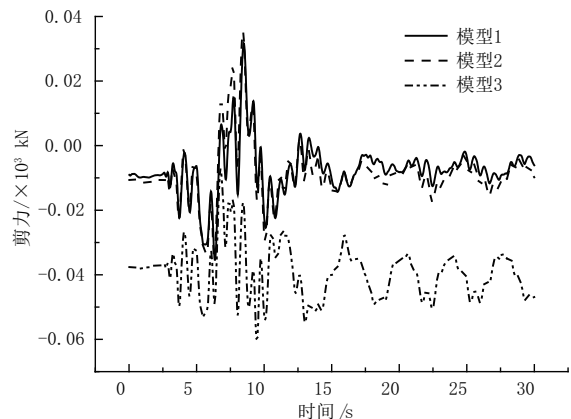


(b)墩底剪力

图6 墩底内力时程曲线



(a)第1联



(b)第2联

图7 墩梁相对位移时程曲线

最大相对位移为 0.061 m(模型 3),最小值为 0.035 m(模型 1),二者间的差距达到 100.06%。造成以上差异的主要原因是第二联梁体对摩擦摆支座的使用起到了减震效果。并且第二联梁体的最大墩梁相对位移较第一联有所减小,但是不同的模型减小程度不同,其中模型 3 减小了 56.17%,模型 2 减小了 23.69%,而模型 1 仅减小了 4.89%。

结合对图 4 的分析结果可知,相比较墩底内力而言,邻梁碰撞效应对墩梁相对位移的影响要更加明显,这是由于两联梁体位间的碰撞效应起到了相互限位的作用。

4 设计参数影响分析

4.1 初始间隙

过渡墩上的两联梁体间的初始间隙是影响邻梁碰撞效应的重要因素之一^[4]。本文选取摩擦摆支座的等效活动半径为 2 m、摩擦系数为 0.03,邻梁初始间隙在 0.05~0.10 m 之间变化时,碰撞次数和碰撞力的变化情况见图 8、图 9。

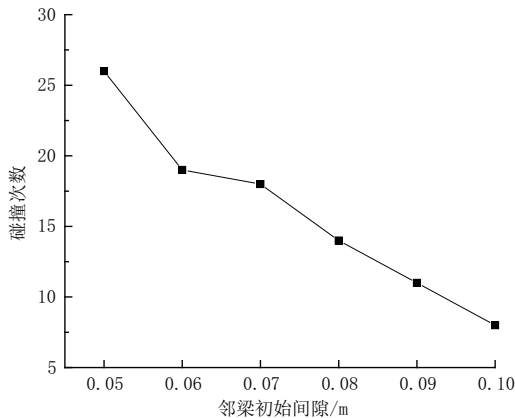


图 8 邻梁碰撞次数

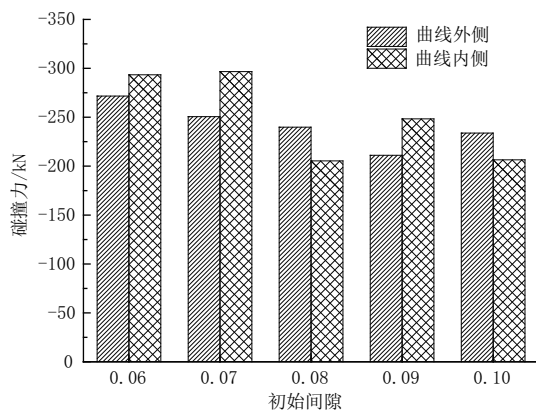


图 9 不同初始间隙下的碰撞力

结合图 8 和图 9 所示结果可以看出,随着支座初始间隙的增大,邻梁碰撞次数由间隙 $d=0.05$ m 时的 26 次逐渐减小至 $d=0.10$ m 时的 8 次。但是支座

碰撞力的变化相对较为复杂,未呈现出一定的变化趋势;且曲线外侧和内侧碰撞力的变化规律也不一致,二者间的差距可以达到 18.37%,出现在 $d=0.08$ m 的工况下。就曲线外侧而言,碰撞力最大为 276.16 kN,出现在 $d=0.06$ m 的工况下,最小为 211.13kN,出现在 $d=0.10$ m 的工况下;就曲线内侧而言,碰撞力最大为 303.83 kN,出现在 $d=0.05$ m 的工况下,最小为 205.38 kN,出现在 $d=0.09$ m 的工况下。

4.2 摩擦摆支座的等效活动半径

摩擦摆支座最主要的 2 个设计参数是等效活动半径和摩擦系数。目前常见规格的摩擦摆支座的摩擦系数差别不大,一般为 0.03;因而等效活动半径决定了结构的振动特性,对地震作用下结构的碰撞效应有着不可忽略的影响^[4]。

为分析摩擦摆支座活动参数对弯曲桥梁地震响应的影响,将支座的摩擦系数取为 0.03,邻梁初始间隙取为 0.10 m,支座等效半径 R 分别取为 2、3、4、5、6 m。对不同等效半径下的地震响应差异进行分析。

(1) 邻梁碰撞力

图 10 为 4 号墩上邻梁曲线内侧和外侧的碰撞力计算结果。

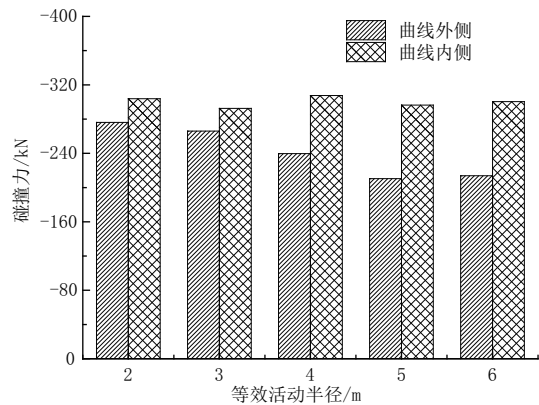
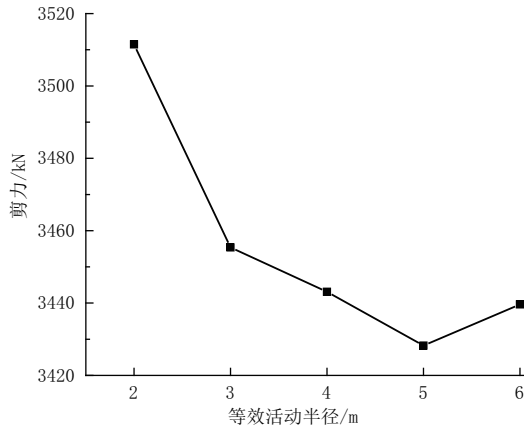


图 10 不同活动半径下的碰撞力

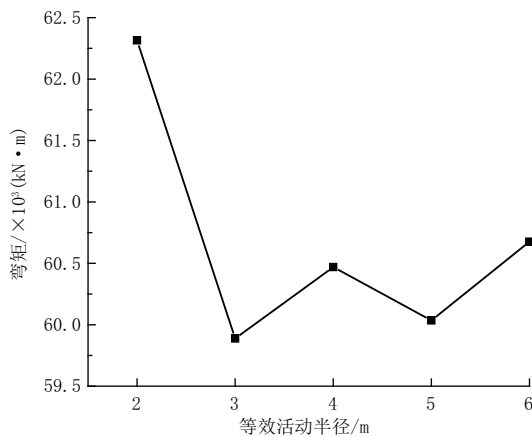
由图 10 所示结果可以看出,对于曲线连续梁桥而言,曲线内侧的碰撞力要明显大于曲线外侧;且随着摩擦摆支座等效半径的增加,曲线内外侧之间的碰撞力差距越明显;当等效半径在 2~6 m 的范围内变化时,曲线外侧的碰撞力逐渐减小,变化率可达到 31.24%;而曲线内侧的碰撞力变化程度较小,变化率为 5.13%。

(2) 墩底内力

以墩底内力最大的 5 号墩为研究变量,图 11 为不同等效半径下墩底剪力和弯矩的计算结果。



(a)剪力



(b)弯矩

图 11 墩底内力计算结果

由图 11(a)所示结果可以看出,随着支座等效半径的增加,墩底最大剪力呈现出先减小再增大的趋势,且在等效半径为 2 m 和 5 m 时剪力分别取得最大值 3 511.5 kN 和最小值 3 428.25 kN,二者间的差距为 2.43%。由图 11(b)所示结果可以看出,随着支座等效半径的增加,墩底弯矩变化较复杂,在等效半径为 2 m 时取得最大值,为 62.32×10^3 kN·m,在等效半径为 3 m 时取得最小值,为 59.89×10^3 kN·m,二者间的差距为 4.05%,即支座等效活动半径对墩底弯矩的影响程度要较墩底剪力更明显。

(3)墩梁相对位移

以 4 号墩上两联梁的梁体与该墩间的相对位移为研究变量,图 12 为不同等效半径下的墩梁相对位移计算结果。

由图 12 所示结果可以看出,随着摩擦摆支座等效活动半径的增加,两联梁体与同一墩之间的相对位移变化规律是不同的:第 1 联的墩梁相对位移呈现出先增大再减小的变化规律,而第 2 联则更复杂;且等效活动半径相同时,第 1 联的墩梁相对位移要大于第 2 联。当等效活动半径取 5 m 时,两联梁体的墩梁相对位移均取得最大值,分别为 0.043 m 和

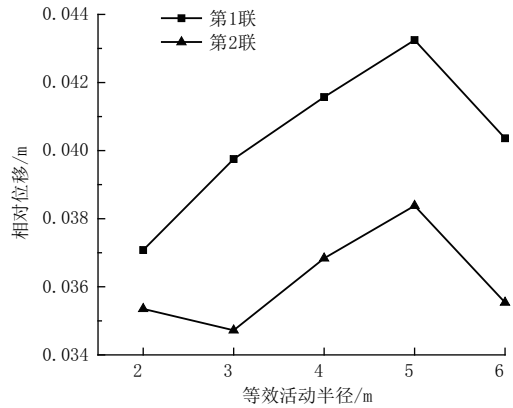


图 12 墩梁相对位移

0.038 m,差距达到 12.68%。

(4)支座剪力

以 7 号墩曲线内侧的普通板式橡胶支座为研究对象,图 13 为取不同的摩擦摆支座等效半径时的支座剪力变化情况。

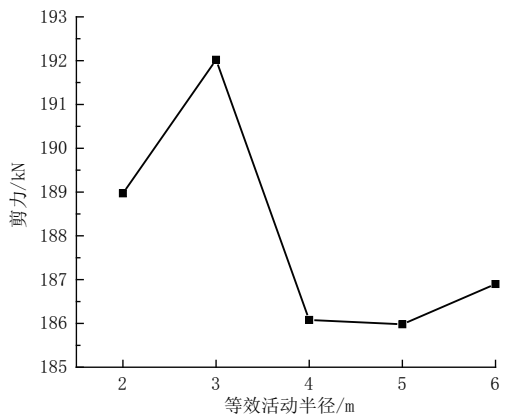


图 13 支座剪力

由图 13 可以看出,普通板式橡胶支座的支座剪力与摩擦摆支座等效活动半径间的变化关系较为复杂。当等效活动半径取 3 m 时得到最大的支座剪力,为 192.02 kN;等效活动半径取 5 m 时支座剪力最小,为 186.90 kN,二者间的差距达到 3.25%。

综合上述分析可以看出,考虑邻梁间的碰撞效应后,摩擦摆支座等效活动半径的变化对于连续弯桥地震响应的影响较为复杂,且对邻梁碰撞力的影响程度最为明显。

5 结论

本文采用非线性时程法对高墩弯桥在考虑邻梁碰撞效应后的地震响应进行了分析,得到以下结论:

(1)桩-土作用对本文分析的邻梁碰撞的不同位置的碰撞力影响不同,忽略桩-土作用后碰撞力要减小。

(2)忽略邻梁碰撞效应会低估墩底内力,且邻梁

碰撞效应对墩梁相对位移的影响要较墩底内力更为明显。

(3)随着邻梁初始间隙的增加,邻梁碰撞次数会减小;不同初始间隙下曲线外侧的邻梁碰撞力最大为 276.16 kN,最小为 211.13 kN,曲线内侧最大为 303.83 kN,最小为 205.38 kN。

(4)随着摩擦摆支座等效活动半径的增加,曲线外侧的碰撞力逐渐减小,变化率可达到 31.24%,曲线内侧碰撞力的变化率在 5.13%以内;墩底内力、墩梁相对位移以及板式橡胶支座剪力的变化则相对复杂。

参考文献:

[1] 邓育林,雷凡,何雄君.地震作用下高墩桥梁横向碰撞效应研究[J].桥梁建设,2014,44(3):25-31.
 [2] 李正英,刘斌,杨跃威.强震作用下曲线连续梁桥碰撞响应分析[J].建筑结构学报,2016,37(S1):349-355.
 [3] 杨孟刚,孟栋梁,卫康华,等.高铁简支梁桥横向地震碰撞效应及减震研究[J].西南交通大学学报,2020,55(1):100-108.
 [4] 张常勇,钟铁毅,董晓,等.摩擦摆支座隔震城轨连续梁桥碰撞响应研究[J].公路,2017,62(10):101-107.
 [5] 张文学,吴海军,王景景.连梁装置对斜拉桥与引桥碰撞影响分析[J].北京工业大学学报,2013,39(5):684-689.
 [6] 闫斌,戴公连,粟森.考虑轨道约束的高速铁路简支梁碰撞效应研究

[J].桥梁建设,2014,44(6):24-28.
 [7] 石岩,王军文,王东升,等.地震作用下高速铁路简支箱梁桥横向偏心碰撞反应分析[J].铁道学报,2013,35(2):99-105.
 [8] 邓育林,雷凡,何雄君.地震作用下考虑土-桥台-上部结构相互作用的大跨桥梁伸缩缝处碰撞效应研究[J].中国公路学报,2015,28(3):44-51.
 [9] 孙广俊,李鸿晶,赵鹏飞.简支梁桥地震落梁失效控制模式研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,36(2):40-47.
 [10] 李娜娜,许维炳,陈彦江,等.近断层地震作用下曲线桥碰撞效应及影响试验研究[J].振动与冲击,2020,39(12):40-47.
 [11] 张文学,寇文琦,汪振.曲线梁桥地震响应影响因素分析[J].世界桥梁,2016,44(4):64-70.
 [12] 闫聚考,李少华,王军文.强震下多跨斜交简支梁桥桥面旋转机理研究[J].桥梁建设,2017,47(1):29-34.
 [13] 徐略勤,魏晓龙.地震作用下双薄壁高墩刚构桥桥台处的碰撞效应及减碰措施[J].地震工程学报,2017,39(3):425-433.
 [14] 王军文,吴天宇,李少华,等.斜交简支梁桥纵向地震碰撞反应精细化研究[J].振动与冲击,2016,35(8):194-200.
 [15] 沈贤,胡玉娟,赵文,等.板式橡胶支座对斜交连续梁桥地震反应的影响[J].世界地震工程,2021,37(1):78-85.
 [16] JT/T 4—2019,公路桥梁板式橡胶支座[S].2019.
 [17] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].2020.
 [18] 焦驰宇,龙佩恒,李士铎,等.地震作用下中小跨度梁桥横向碰撞参数影响分析[J].振动与冲击,2014,33(8):48-53,77.
 [19] 韦杰,孙广俊,李鸿晶.板式橡胶支座曲线梁桥地震反应与参数影响分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(2):145-152,179.

 (上接第 202 页)

例进行计算分析,分析结果证明该评价技术具有一定的合理性和实用性,可为后续 TOD 模式下立交节点的开发利用评价提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

[1] 田文豪.TOD 模式下轨道交通站点地区土地利用评价研究——以广州主城区为例[D].广州:华南理工大学,2019.
 [2] 王一鸣.TOD 导向城市轨道交通站点地区规划研究——以济南 R2 线腊山站为例[D].济南:山东建筑大学,2017.

[3] 祝超.公交导向的土地开发模式评价指标体系及方法研究[D].北京:北京交通大学,2012.
 [4] 廖勇刚,郭凯,王晟,等.TOD 模式城市道路交通节点空间开发及综合设计技术[J].公路,2021(6):298-301.
 [5] 侯雪.基于 TOD 理念的轨道交通站点周边土地利用评价及优化模型[D].北京:北京交通大学,2012.
 [6] 张昊,张忠国.美国阿灵顿城市轨道交通发展模式的分析与借鉴[J].国际城市规划,2011(2):5.
 [7] 刘森森,鲁光泉,王云鹏,等.交叉口交通冲突严重程度量化方法[J].交通运输工程学报,2012,12(3):7.