

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.03.019

考虑支座摩擦滑移的高墩弯桥地震响应分析

张云周, 柴尚云

(甘肃恒通路桥工程有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究高墩弯桥在考虑支座摩擦滑移后地震响应的特点和规律,采用Midas civil软件建立了2联连续弯桥有限元模型。基于板式橡胶支座的双折线恢复力模型,研究了支座剪切刚度对地震响应的影响规律。研究表明:考虑支座的摩擦滑移效应后,墩顶最大位移减小了5.5%,墩底最大弯矩减小了4.7%,墩底最大剪力增大了27.1%;随着支座剪切刚度的增加,墩底弯矩和墩顶纵向最大位移先增大后减小,墩底剪力和梁体纵向最大位移逐渐减小。

关键词:高墩;弯桥;摩擦滑移;板式橡胶支座;双折线

中图分类号:U442.5+5

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)03-0080-05

0 引言

板式橡胶支座由于其构造简单和安全可靠的优点,在中小跨径公路桥梁中被广泛使用。但是,在支座质量和梁体受力不合理等因素,支座会出现各类病害^[1];同时,在较强的地震作用下,又不可避免的会出现挤压变形和剪切移位等破坏^[2],实际工程中此类问题也屡见不鲜^[3-5]。

关于考虑支座摩擦滑移对于桥梁地震响应影响的研究,众多学者已经开展了大量工作。文献[2]讨论了板式橡胶支座的摩擦滑移效应以及支座的剪切刚度和动摩擦系数等特性对斜交连续梁桥地震响应的影响,指出考虑摩擦滑移后会出现残余位移和转角,且与支座剪切刚度之间呈现相反的变化趋势。文献[6]对比了支座摩擦滑移效应对简支梁桥和连续梁桥地震响应影响的差异,指出支座的摩擦耗能可以减小桥墩的破坏风险,且对于简支梁桥的减震效果要强与连续梁桥。文献[7]分析了支座剪切滑移效应和剪切刚度对7×20 m斜交预应力混凝土连续梁桥自振周期的影响。文献[8]以5跨连续箱梁桥为研究对象分析了板式橡胶支座的摩擦滑移效应对地震响应的影响,并在此基础上提出了用铅芯橡胶支座替换板式橡胶支座来控制位移响应的方法。文献[9]以曲线梁桥为对象,对梁-桥台碰撞效应进行了模拟,研究了碰撞效应和支座模型系数对地震响应的影响,指出位于曲线外侧的橡胶支座更容易出现摩擦滑移。文献[10]结合山区桥梁特点构造7组桥梁进

行了非线性时程分析,研究了板式橡胶支座和铅芯橡胶支座组合试用下桥梁的地震响应,指出采用铅芯橡胶支座可以减小墩-梁间的相对残留位移。此外,还有诸多学者取得了大量研究工作并取得了十分有价值的研究成果^[11-14]。

本文以打庆高速打扮1号大桥为研究背景,在确定支座恢复力模型的基础上,采用有限元软件对比分析了考虑板式橡胶的摩擦滑移效应前后结果的地震响应结果,并分析了支座剪切刚度对墩、梁位移和墩底内力的影响。相应研究成果以期类似工程设计提供一定的参考。

1 工程概况

打庆高速打扮1号大桥桥位区地震动峰值加速度为0.05g,地震动反应谱特征周期为0.45 s。该桥位于R=800 m的右偏圆曲线上,采用8×40 m装配式预应力混凝土连续箱梁,桥梁全长328.5 m,正交布设,单幅桥宽12.5 m,为0.5 m(护栏)+11.5 m(车道)+0.5 m,由4片小箱梁组成。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,各墩尺寸见表1。桥台及4号桥墩采用GYZF400x86型四氟滑板式橡胶支座;5号桥墩采用JZQZ-4.0-GD-g150-T2.8-780x780x220型摩擦摆支座;其余桥墩采用GJZ450x500x99型板式橡胶支座。图1为全桥立面布置图。

2 有限元分析模型

2.1 支座力学模型

(1)四氟滑板式橡胶支座

收稿日期:2022-05-10

作者简介:张云周(1982—),男,本科,高级工程师,从事桥梁施工工作。

表 1 桥墩尺寸

墩号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号
墩高/m	14.7	31.3	33.4	34.3	48.8	35.5	15.1
直径/m	1.6	2.0	2.0	2.0	6×3	2.0	1.6

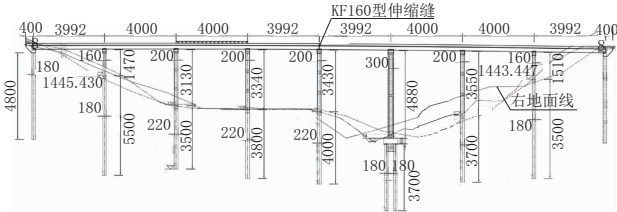


图 1 立面布置图(单位:cm)

四氟滑板式橡胶支座的恢复力模型可用图 2 表示^[2]:

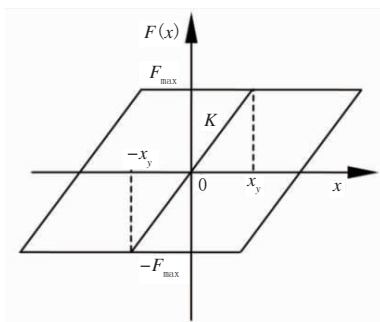


图 2 四氟滑板橡胶支座恢复力模型

图 2 中, K 为支座的剪切刚度(kN/m), x_y 为支座发生滑动时的临界位移(m); F_{\max} 为临界力(kN),是关于支座所承受反力 R (kN) 和滑动摩擦系数 μ 的参量,可由式(1)计算得到。

$$F_{\max} = \mu g R \quad (1)$$

(2)普通板式橡胶支座

文献[6]选择不同型号的板式橡胶支座进行了摩擦滑移试验,并建议在发生摩擦滑移后采用双线性滞回模型模拟其力学性能,其力学模型仍可用图 1 进行表示,并且其达到临界力后的剪切刚度较小,可认为 0。

(3)摩擦摆支座

摩擦摆减隔震支座的恢复力模型可用图 3 描述^[15]:

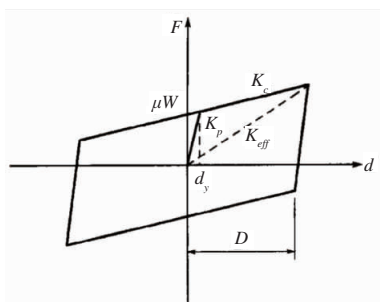


图 3 摩擦摆支座恢复力模型

图 3 中, K_p 为支座初始刚度 (kN/m); d_y 为屈服位移(一般取 2.5 mm); K_{eff} 为等效刚度(kN/m); μ 为

动摩擦系数(建议取 0.05); W 为竖向荷载(kN), K_s 为屈服后的刚度(kN/m)。

2.2 连续弯桥计算模型

采用 Midas civil 有限元软件建立分析模型。采用弹性折线梁单元的方式实现对平面曲率的模拟,且盖梁、桥墩、桩基础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,等代土弹簧的刚度采用“m 法”计算^[9]。将整体坐标系的原点取在 0# 台的中心位置,定义顺桥垂直于 0# 台的方向为 X 向,平行于桥台边界线为 Y 向,竖向为 Z 向。图 4 为有限元模型。

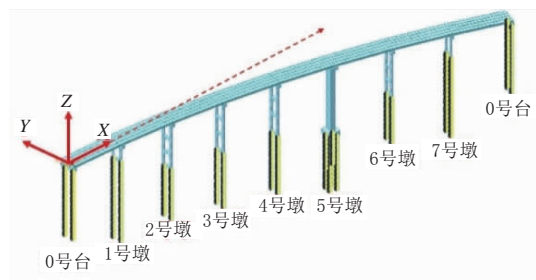


图 4 有限元模型图

参考文献[6],用双线性曲线模拟板式橡胶支座的支座力-位移滞回曲线。参考文献[15,16],四氟滑板式和普通板式橡胶支座的摩擦系数分别取为 0.02 和 0.2;抗压刚度分别取 $1.4 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 和 $6.2 \times 10^5 \text{ kN/m}$,剪切刚度分别取 $K_1=2\ 135 \text{ kN/m}$ 、 $K_2=3\ 232 \text{ kN/m}$,均忽略屈服后的剪切刚度;基于支座反力计算模型(限于篇幅此处不再赘述)和式(1),计算得到的两种支座的临界剪力分别为 45 kN 和 650 kN。

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,摇摆半径为 2.0 m,摩擦系数取 0.03。

2.3 地震动的输入

本文选取 1971 San Fernando、1940 El Centro 和 1952 Kern County 等 3 条实测地震波数据进行时程分析,且将 3 条地震波的加速度峰值调整为相等。计算结果取 3 条波下的最大计算值。限于篇幅,仅示意出一条典型地震加速度时程曲线,见图 5。

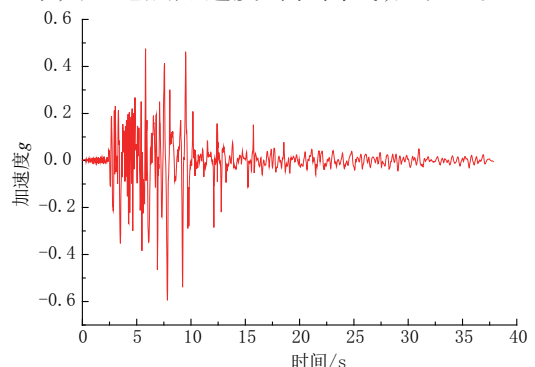


图 5 地震加速度时程曲线

3 地震响应及其影响因素分析

3.1 主梁动力特性

对该桥的动力特性进行了分析。限于篇幅,仅给出结构的前4阶振型(见图6)。前10阶自振周期见表2。

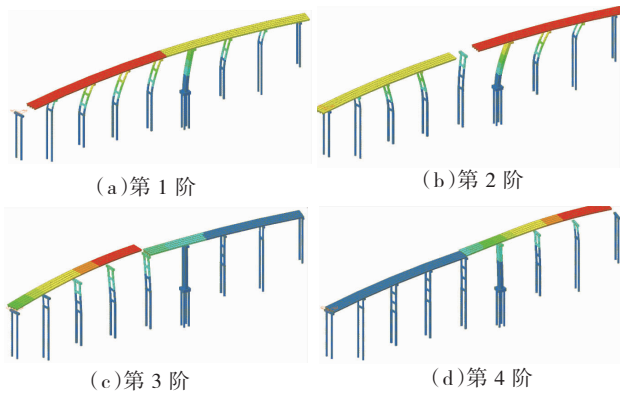


图6 主梁振型
表2 自振周期

阶数	1	2	3	4	5
周期/s	4.059	3.525	3.088	2.847	2.646
阶数	6	7	8	9	10
周期/s	2.447	1.468	1.430	0.930	0.916

由图6可以看出,前2阶振型主要表现为主梁的纵飘和各墩的纵弯;第3阶振型表现为第一联主梁的横飘和3号墩的纵弯;第4阶振型表现为第2联主梁的横弯和5~7号墩的纵弯。

3.2 支座摩擦滑移的影响

建立对比模型来分析支座摩擦滑移效应对高墩连续弯桥地震响应的影响,即认为支座始终处于弹性状态。下文分别对多个响应量进行分析,将不考虑支座摩擦滑移的模型记为模型1,而将考虑支座滑移的记为模型2。

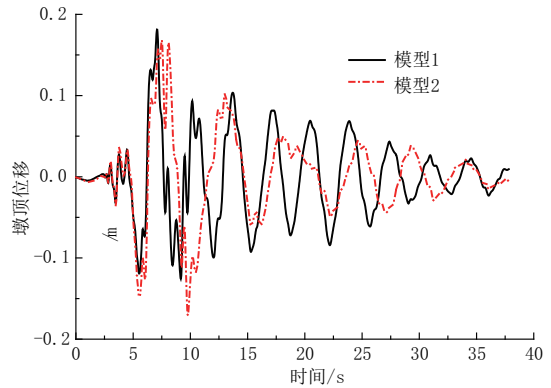
(1)墩顶位移

提取过渡墩(4号墩)和空心墩(5号墩)墩顶纵向位移随时间的变化,见图7。

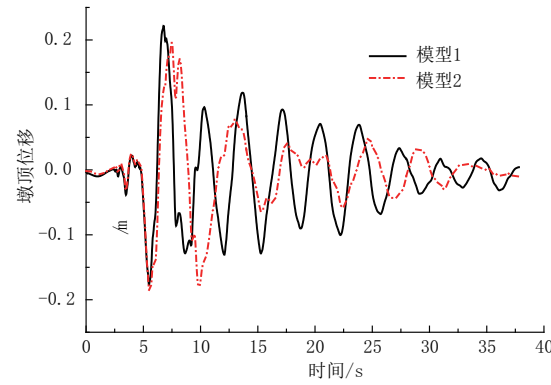
由图7可知,在地震作用的初期阶段,2个模型的位移变化趋势基本吻合,其中模型1的最大位移为0.181 m,模型2为0.171 m,减小了5.5%;当墩顶纵向位移达到最大值以后,两个模型的数据逐渐偏离,且10s后模型1对地震作用的响应要较模型2明显,位移时程曲线达到波峰的次数也相对较多。

(2)墩底内力

经分析,墩底最大内力出现在5号墩。图8为5号墩墩底最大弯矩和最大剪力时程曲线。

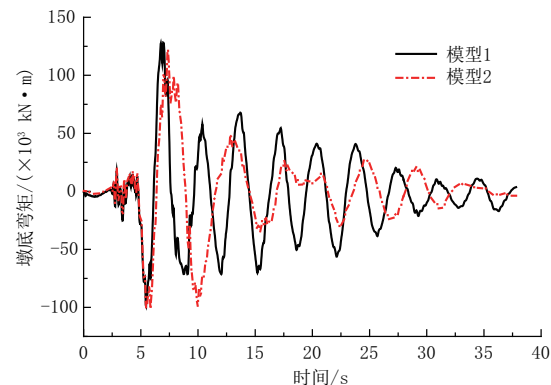


(a)4号墩

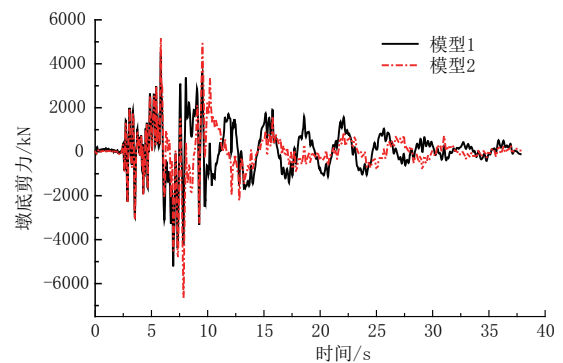


(b)5号墩

图7 墩顶位移时程曲线



(a)弯矩



(b)剪力

图8 墩底内力时程曲线

由图8可以看出,在地震作用的初期阶段,2个模型的墩底弯矩和墩底剪力的变化趋势基本吻合;模型1的最大弯矩为 $128.2 \times 10^3 \text{ kN/m}$,最大剪力为

5 215.888, 模型 2 的最大弯矩为 $122.1 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 最大剪力为 6 630.6 kN。对比可知,考虑支座的摩擦滑移效应后,墩底最大弯矩减小了 4.7%,墩底最大剪力增大了 27.1%,即考虑支座的摩擦滑移后,墩底受力更为不利。

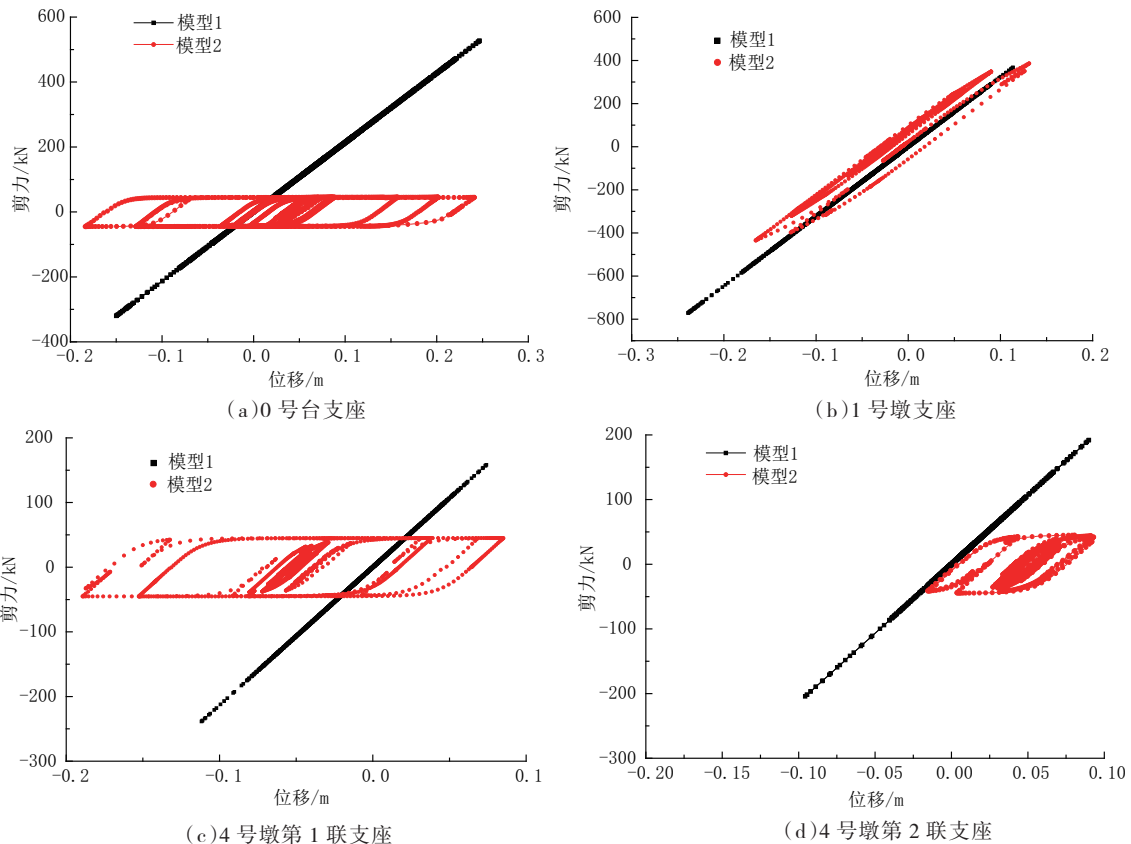


图9 支座力-位移曲线

由图 9 可知,不考虑支座摩擦滑移的情况下,支座的力-位移曲线近似于直线;模型 2 中的橡胶支座在达到临界剪力后,发生了滑移现象。对于 0 号台以及 4 号墩的四氟滑板式橡胶支座而言,模型 1 的最大剪力要远远大于模型 2;对于 1 号墩的普通板式橡胶支座而言,2 中不同模型计算得到的支座剪力变化趋势相对要吻合一些。

另外,由于在第 2 联在 5 号墩采用了摩擦摆减隔震支座,所以考虑支座的摩擦滑移效应后 4 号墩上的两联不同支座的力-位移曲线差别较大,其中第 1 联的最大剪切位移达到了 189 mm 左右,而第 2 联最大为 93 mm 左右,减小了 50.7%,证明了减隔震支座在均匀支座受力方面起到了良好的效果;且模型 2 中第 2 联 4 号墩的支座剪力在任一时刻均比模型 1 的要小。

3.3 支座剪切刚度的影响

为了充分了解支座剪切刚度对高墩弯桥地震响应的影 响,以考虑支座剪切滑移效应的模型 2 为基

(3) 支座力-位移

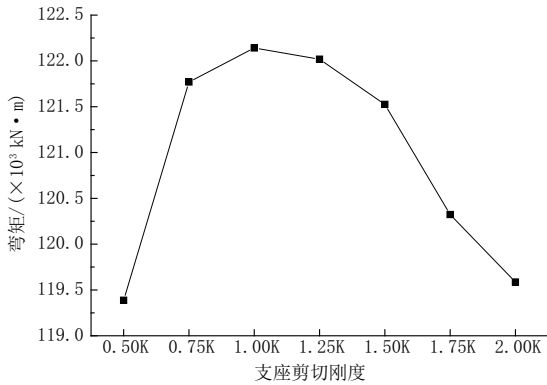
为了分析不同位置、不同类型支座的力-位移变化关系,选择 1 号墩的普通板式橡胶支座和 0 号台与 4 号墩的四氟滑板式橡胶支座进行讨论,结果见图 9。

础,同时改变普通板式橡胶支座和四氟滑板橡胶支座的剪切刚度来进行分析。这里将原设计中两种支座的剪切刚度 K_1 和 K_2 统一记为 K ,另取 0.50 K 、0.75 K 、1.00 K 、1.25 K 、1.50 K 、1.75 K 和 2.00 K 进行对比分析。

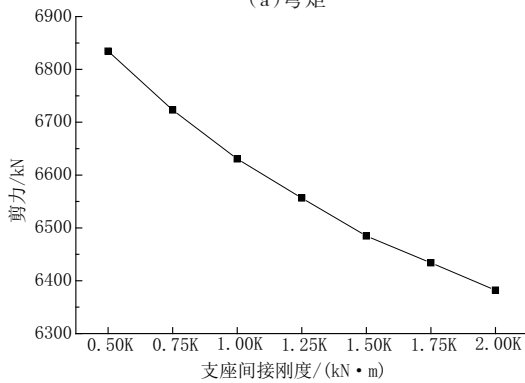
图 10 为不同支座剪切刚度下 5 号墩墩底内力极值的变化情况,图 11 为墩顶和支座处梁体的纵向最大位移的变化情况。

由图 10 可以看出,随着支座剪切刚度的增加,5 号墩墩底弯矩和墩底剪力的极值呈现出不同的变化趋势:墩底弯矩随着支座剪切刚度的增加先增加后减小,最小值为 $119.4 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$,出现在 0.50 K 的情况下,最大值为 $122.1 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$,出现在原设计 1.00 K 的工况下,变化率仅为 2.3%;墩底剪力则由 6 834.6 kN(0.50 K)逐渐减小到 6 383.2 kN(2.00 K),变化率达到 6.6%;可知墩底剪力对于支座剪切刚度的变化要较墩底弯矩明显。

由图 11 可以看出,墩最大位移随着支座剪切刚



(a) 弯矩



(b) 剪力

图 10 墩底内力变化

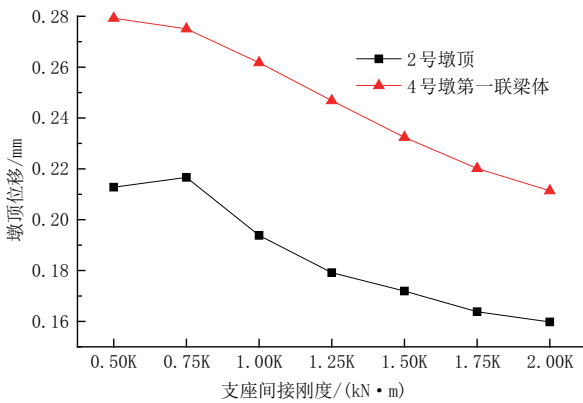


图 11 纵向位移变化

度的增加呈现处向增大后减小的趋势,在 0.75 K 的情况下达到最大,为 0.217 m,在 2.00 K 时最小,为 0.160 m,减小了 25.3%;支座处梁体的最大位移出现在 4 号墩第 1 联支座对应梁体,且随着支座剪切刚度的增加,梁体纵向位移由 0.279 m(0.50 K)逐渐减小到 0.211 m,变化了 24.3%。

由以上分析可知,在进行桥梁设计时因选择剪切刚度相对较大的板式橡胶支座,不仅可以减小墩底内力,还可以有效控制梁体位移,避免地震作用下落梁、梁-梁、梁-台碰撞等破坏的发生。

4 结 语

以打庆高速打扮 1 号大桥为研究对象,分析了

板式橡胶支座摩擦滑移效应对高墩弯桥地震响应的影 响,得到以下结论:

(1)在地震响应达到最大值之前,不考虑支座摩擦滑移效应时的墩顶位移和墩底内力的时程曲线与考虑摩擦滑移效应后的曲线变化趋势相对吻合,再达到最大值以后开始出现偏差。

(2)考虑支座的摩擦滑移后,墩顶最大位移由 0.181 m 减小到 0.171 m;墩底最大弯矩减小了 4.7%,墩底最大剪力增大了 27.1%,即考虑支座的摩擦滑移后,墩底受力更为不利。

(3)随着支座剪切刚度的增加,墩底弯矩先增加后减小,墩底剪力则逐渐减小;前者的变化率为 2.3%,后者为 6.6%。

(4)随着支座剪切刚度的增加,墩顶纵向最大位移先增大后减小,梁体纵向最大位移逐渐减小,前者的变化率达到 25.3%,后者为 24.3%。

参考文献:

- [1] 吴宜峰,徐泓,李爱群,等.桥梁板式橡胶支座运营病害及影响研究综述[J].工程抗震与加固改造,2021,43(5):104-113.
- [2] 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.
- [3] 刘鹏.地震作用下桥梁梁体与横向挡块动态碰撞研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [4] 范立础,李建中.汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J].公路,2009(5):122-128.
- [5] 康孝先.4.14 玉树地震对桥梁的损伤和应急处治[J].交通科学与工程,2010,26(2):42-47.
- [6] 李悦,李冲,李茜.地震作用下板式橡胶支座滑移对中小跨径梁桥抗震性能的影响[J].土木工程学报,2014,47(S1):124-129.
- [7] 卢明奇,郭建虎,杨庆山,等.斜度和支座剪切刚度对斜交连续梁桥自振周期的影响[J].地震工程与工程振动,2014,34(S1):379-382.
- [8] 汤虎,李建中.板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法[J].中国公路学报,2013,26(3):110-116.
- [9] 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.
- [10] 石岩,王进,王东升,等.采用板式橡胶和铅芯橡胶支座的山区桥梁地震损伤评价[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):237-41.
- [11] 孙建鹏,主父高林,赵健,等.钢板-板式橡胶复合式减隔震支座性能分析及工程应用[J].桥梁建设,2022,52(1):80-87.
- [12] 唐忠林,汪永林,沈慧,等.高性能板式减震橡胶支座性能研究[J].公路,2021,66(9):232-237.
- [13] 李悦,纪梦为,李冲.环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移性能的影响分析[J].地震工程学报,2021,43(3):672-678.
- [14] 徐略勤,傅冲瑶,李建中,等.板式橡胶支座梁桥的典型横向震害及其影响因素分析[J].振动与冲击,2020,39(2):209-217.
- [15] JT/T 4—2019,公路桥梁摩擦摆式减隔震支座[S].
- [16] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].