

高菁阳.隔震曲线梁桥不同等级地震的振动特性模拟分析[J].地震工程学报,2020,42(3):607-612.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.607

GAO Jingyang.Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Isolated Curved Girder Bridges under Different Earthquakes [J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):607-612.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.607

隔震曲线梁桥不同等级地震的振动特性模拟分析

高菁阳^{1,2}

(1. 石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050081; 2. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050081)

摘要: 曲线桥梁抗震特性模拟分析对于曲线桥梁隔震、减震有着重要意义。基于隔震曲线桥梁设计过程中的特点,通过非线性水平弹簧单元对铅芯橡胶支座双向非线性的能力进行模拟,根据SAP2000 科学选择强震观测地震波,并考量曲线桥梁本身存在的特性对桥梁振动特性产生的影响,针对隔震曲线桥梁在不同等级地震下振动特征进行模拟分析,其中,通过隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座模型的构建和梁桥不同等级地震计算模型、输入地震波与传感器量测等步骤得到的模拟结果为:不同地震波与加速度峰值输入过程中,地震动较小下的支座水平刚度比较大,且结构相对稳定;地震幅值增大时,桥梁支座水平刚度减小,且支座的恢复力位移滞回变化曲线面积比较大,能够更多地在地震输入能量消散掉,减小能量不断向曲线桥梁上方传递的速度,可有效减轻地震反应,起到隔震的效果。

关键词: 隔震; 曲线梁桥; 不同等级; 地震; 振动特性; 模拟

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0607-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.607

Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Isolated Curved Girder Bridges under Different Earthquakes

GAO Jingyang^{1,2}

(1. Shijiazhuang Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;

2. Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract: The simulation analysis of the seismic characteristics of curved bridges is of great significance to the isolation and damping of curved bridges. Based on the design characteristics of isolated curved bridges, a nonlinear horizontal spring unit was used to simulate the bidirectional nonlinearity of the lead rubber bearing. Using SAP2000, a strong earthquake was selected, and the characteristics of the curved bridge were considered. The vibration characteristics of the bridge were simulated and analyzed considering different earthquakes. The simulation results are as follows: In the inputting process of different seismic waves and peak accelerations, under

收稿日期:2019-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51779069)

第一作者简介:高菁阳(1983-),女(满族),河北宽城人,硕士,讲师,研究方向:土木工程。E-mail:goajingyang5454@163.com。

small earthquakes, the horizontal stiffness of bearing was relatively large, and the structure was relatively stable; the horizontal stiffness of the bearing under large earthquakes was relatively small, and the restoring force-displacement hysteresis curve of the bearing was relatively large, which can dissipate the seismic input energy, thus effectively mitigating the seismic response and play the isolation effect.

Keywords: isolation; curved girder bridge; different grades; earthquake; vibration characteristics; simulation

0 引言

在城市立体式交通体系不断发展下,大众对于桥梁的功能以及美观方面提出了更多更广泛的要求,由此使曲线桥梁更为普遍地应用在交通体系中^[1-2]。在实际发展中,曲线桥梁抗震方面的研究相对较晚,一直到 1971 年美国的一场地震之后,相关人员才对曲线桥梁抗震问题进行研究。就此后,曲线桥梁抗震分析研究得到了很大的发展。然而在后来的几次强烈地震之中,曲线桥梁还是出现了较为严重的震害,这说明曲线桥梁抗震问题还是没有得到很好的解决^[3]。鉴于此,隔震曲线桥梁在不同等级地震下振动特性模拟研究对于桥梁未来的建设和发展意义重大。

贾俊峰等^[4]以发展新型三个隔震装置和分析不同等级、特性地震影响下三维隔震桥梁地震振动特征与效果为目的,设计制作了 1/25 缩尺比例隔震桥梁结构。其中设计了适用在桥梁模型中的三维隔震支座以及常用的一般叠层橡胶隔震支座。基于此,针对三维隔震桥梁与水平隔震单跨桥梁开展水平与竖向地震模拟,以此得到隔震连续桥梁不同强度地震下呈现出的振动特征。李青宁等^[5]以分析曲线桥梁隔震能力为目的,根据摩擦滑移隔震定义,分析了摩擦滑移隔震桥梁橡胶支座在不同工况下受力与变形以及位移之间的关联性,构建了摩擦滑移的本构关系,并以此推导和分析出了摩擦滑移支座具体计算方式与能量耗费的机理。与振动台测试相结合,分析了不同强度地震波和加速度荷载下不同刚度桥墩整体破坏规律性和隔震效果。王凯睿等^[6]以分析连续桥梁地震振动特征为目的进行研究,针对一座铅芯橡胶支座下三跨连续桥梁开展振动模拟测试。依据峰值加速度由小至大的顺序分别输入 El-Centro 波,拟合波及人工波三种地震波形式,分析桥梁结构地震振动特性,同时比较边墩和中墩在不同地震波下的反应,剖析墩柱损伤对于桥梁制作减隔震

能力的影响情况。

在上述研究成果分析的基础上,本文针对隔震曲线桥梁不同等级地震的振动特性进行模拟分析,以期进一步窥探隔震曲线桥梁地震响应情况。

1 隔震曲线桥梁不同等级地震的振动特性模拟

基于隔震曲线桥梁设计过程中的特点,通过非线性水平弹簧单元对铅芯橡胶支座双向非线性的能力进行模拟,根据 SAP2000 科学选择强震观测地震波,并考量了曲线桥梁本身存在的特性对桥梁振动特性产生的影响,针对隔震曲线桥梁在不同等级地震下振动特征进行模拟分析。

隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座模型的构建。隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座使用的是双向恢复力一位移滞回理论模型。图 1 为隔震支座模型示意图。根据两个正交水平非线性弹簧对隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座整体双向运转性状进行模拟,同时将屈服刚度 K_1 和屈服后刚度 K_2 及屈服强度 u 当作隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座力学控制参量,将如图 2 所示的非线性模型简化为双线性模型进行分析计算。

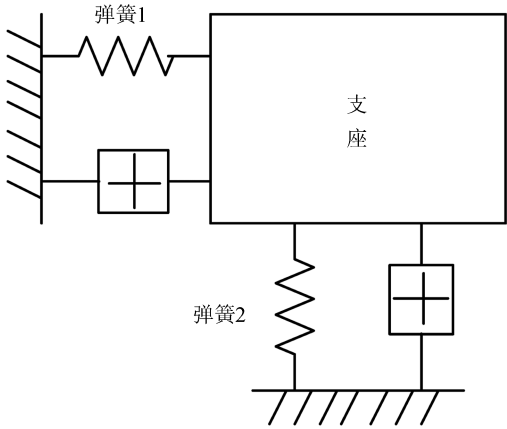


图 1 隔震支座模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the isolation bearing model

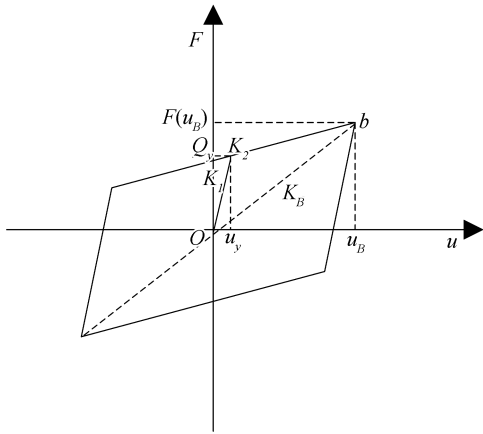


图 2 铅芯橡胶支座的双线性滞回模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of the bilinear hysteresis model of the lead rubber bearing

图 2 中, F 表示铅芯橡胶支座受力。 Q 表示双向运转系数。在实际计算过程中, 设定支座滞回特性与双线性模型相符, 同时支座在正交方向上恢复力模型相同^[7-8]。

2 模拟分析结果

隔震曲线梁桥不同等级地震计算模型、输入地震波与 TG-3 型加速度传感器量测中使用到的计算模型是曲线梁桥。图 3 为隔震曲线连续梁桥示意图, 其中将曲线形状设定成圆弧形。

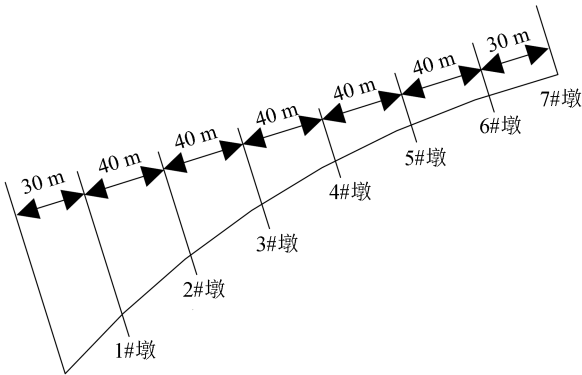


图 3 隔震曲线连续梁桥示意图
Fig.3 Schematic diagram of the isolation curved continuous beam bridge

由图 3 可知, 该曲线梁桥中 7 个桥墩为半幅, 考虑到实地差异, 每个桥墩相隔 30 或 40 m, 完整连续梁桥为 520 m。在本次模拟测试中输入地震波如下: 模拟测试选用的地震波需要考虑到当前地震记录中的持时、地表面的运动幅度以及频谱成分存在的特性等一系列因素, 与此同时考量此次测试不针对某特殊地区, 因此选取三组表示不同状况强震观

测下的地震波种类: El-Centro、Kobe、Chi-Chi1。在测试输入过程中, 实行了时间压缩与幅值调节以构成测试地震波。测试波即为对原地震记录时间进行压缩, 压缩成 $1/\sqrt{10}$, 其中的地震峰值加速度基于相应八度设防烈度和八度罕遇烈度以及九度罕遇烈度调节成 $0.2g$ 、 $0.4g$ 及 $0.6g$ 。为了描述方便, 利用小、中、大震的表示方式表示地震波的特性^[9-10]。壳幔结构和震源深度的变化特征反映着所在区域不同的地壳改造结果, 其中地震在震源深度等震源机制影响下^[11-12], 不同震动级别的破坏效应是不一样的, 因此要将其按照大、中、小三种震动级别, 采用小震 El-Centro、中震 Chi-Chi1 和大震 Kobe 为实验所用输入地震波。

隔震曲线桥梁模型在不同等级地震的振动特性试验量测主要内容为以下几个方面: 加速度特性、位移特性、恢复特性、竖向力特性。

(1) 隔震曲线桥梁模型加速度特性

图 4 中描述的是不同地震波沿着隔震曲线桥梁结构模型的顺桥方向输入过程中, 结构桥台和相应桥面位置加速度特性, 由图 4 可见, 地震波输入过程中, 桥面峰值加速度相比桥台位置的峰值加速度存在降低趋势, 桥面与桥台的加速度反应整体增减变化呈亦步亦趋的形态, 同时在地震等级不断增大的情况下, 减震的效果较为明显, 这说明地震幅值在输入增大的过程中, 桥梁支座的水平刚度有所减小, 且铅芯的塑性变形逐渐增加, 所吸收的地震能量就更多, 更能高效地将地面运动隔离开。综上可知, 在远场地, 不管是高烈度区域还是相对低的烈度区域, 使用隔震曲线桥梁系统均是科学合理的, 均可以高效减小地震加速度响应, 以此高效减轻与消除桥梁在不同等级地震中整体损伤与破坏。针对地震波 Kobe 与 Chi-Chi1, 隔震曲线桥梁模型的上部结构加速度幅值存在减少的情况, 然而幅值非常小, 且在时间不断变化下加速度局部还存在增大现象。

(2) 隔震曲线桥梁模型位移特性

在对桥梁结构振动反应控制过程中, 桥台墙面包括桥台主体、桥台支挡结构和台身抵挡台等, 其中最为主要的特性之一即为控制结构整体位移, 对比不同强度地震输入过程中结构模型桥面与柔性桥墩帽位置位移反应幅值与时程, 能够反映出不同等级地震在输入过程中隔震曲线桥梁反应性能。分析图 5 可知, 在地震强度(二次输入地震波)增加的情况下, 桥面的位移反应表现出了很明显的增加现象, 然

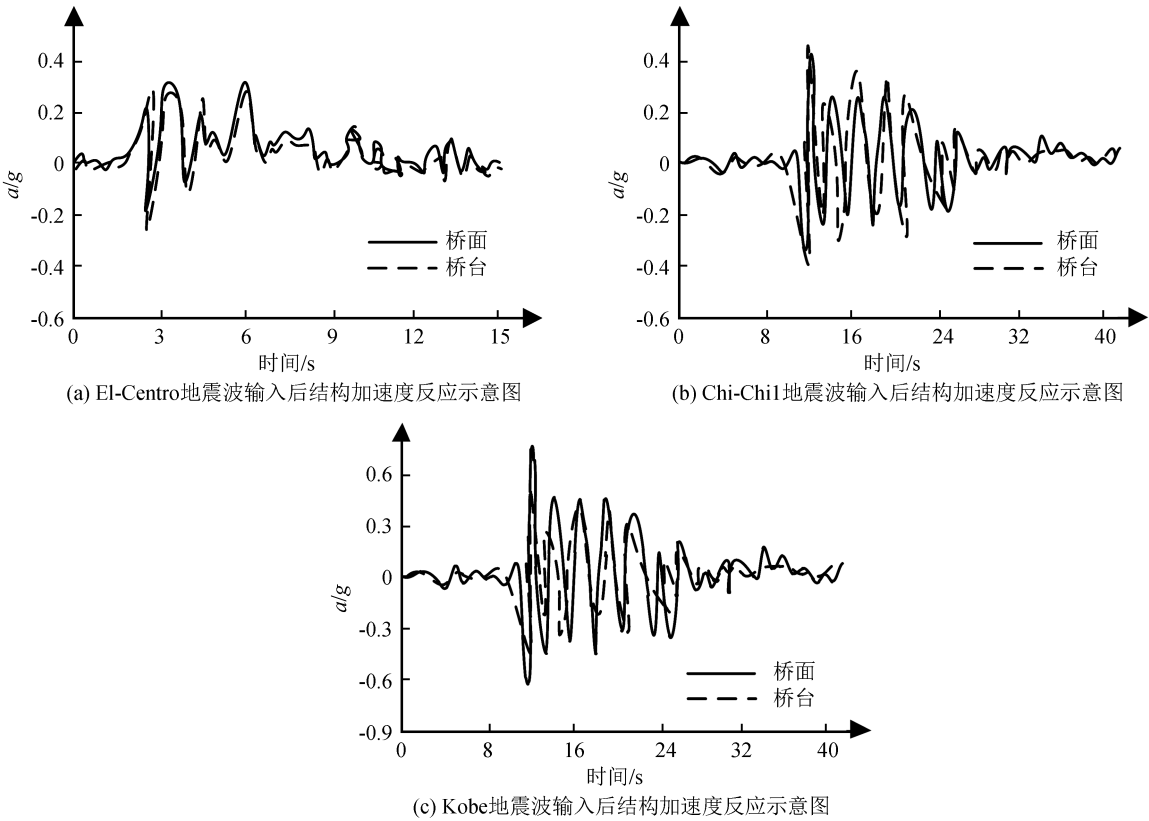


图 4 隔震曲线梁桥模型加速度特性

Fig.4 Acceleration characteristics of the model for isolation curved beam bridge

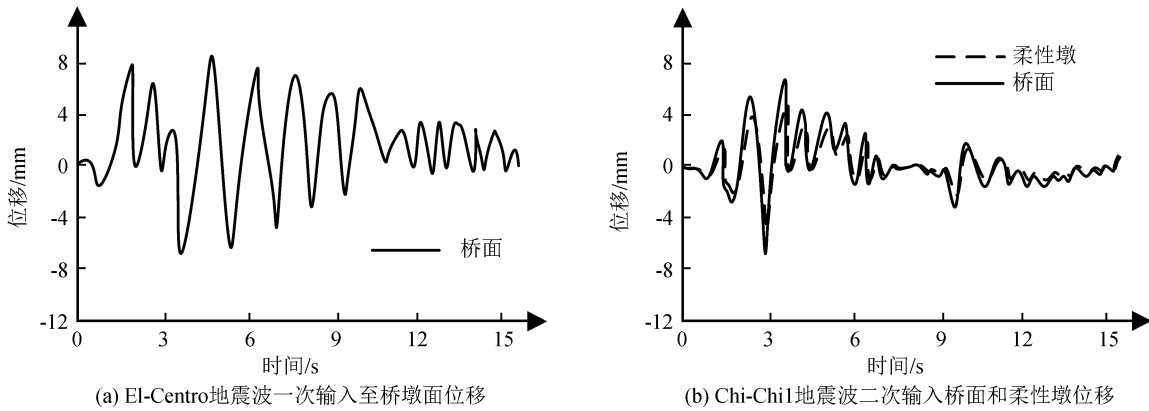


图 5 隔震曲线梁桥模型位移特性

Fig.5 Displacement characteristics of the model for isolation curved beam bridge

而因桥墩还处在弹性变形过程，桥墩的墩帽位置位移尽管有增加的趋势，但幅值却略小于桥面。由此进行各个工况测试，并针对隔震曲线桥梁支座进行了检查，其中在地震波两次输入的影响下，支座的复位情况良好，且最大的残余变形在可控范围内。

(3) 隔震曲线桥梁隔震层的恢复特性

输入不同地震波后，桥梁隔震层的总体水平力和水平位移滞回变化情况如图 6 所示。由图 6 中可以看出，不同地震波与加速度峰值输入过程中，隔震

层的制作恢复性能比较理想，且隔震支座的竖向压力整体变化针对隔震层恢复性能不会产生比较显著的影响。通过对比各图能够看出，在小震时支座的水平刚度比较大，且呈现出显著弹性性质，显示出的位移比较小，这表示结构较为稳定；在大震时支座的水平刚度比较小，且呈现出双线性的特点，呈塑性变形趋势，支座力—位移滞回变化曲线的面积比较大，能够比较多地将地震输入能量消散掉，并阻止能量向着桥梁的上方部位传递。

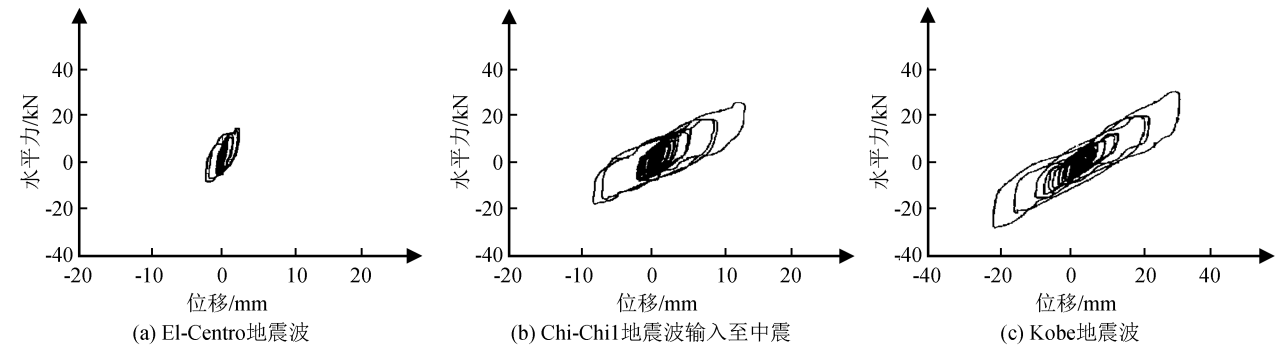


图 6 隔震曲线桥梁隔震层的滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curve of isolation layer of bridge

(4)隔震曲线梁桥模型支座整体竖向力特性

桥梁的隔震支座竖向力在各种地震波与峰值加速度输入过程中变化相对较大。就总体而言,在地震强度不断增大的趋势下,支座的变化也呈现出愈来愈大的趋势。

图 7 描述的是三种桥梁中单个隔震支座的竖向力变化情况。当地震波输入峰值加速度幅值比较大时,支座竖向力呈现出的整体反应显著增大,如在输入 El-Centro 波情况下,桥梁的隔震支座整体竖向力有变化比较大的趋势,但还没有产生拉伸应力。

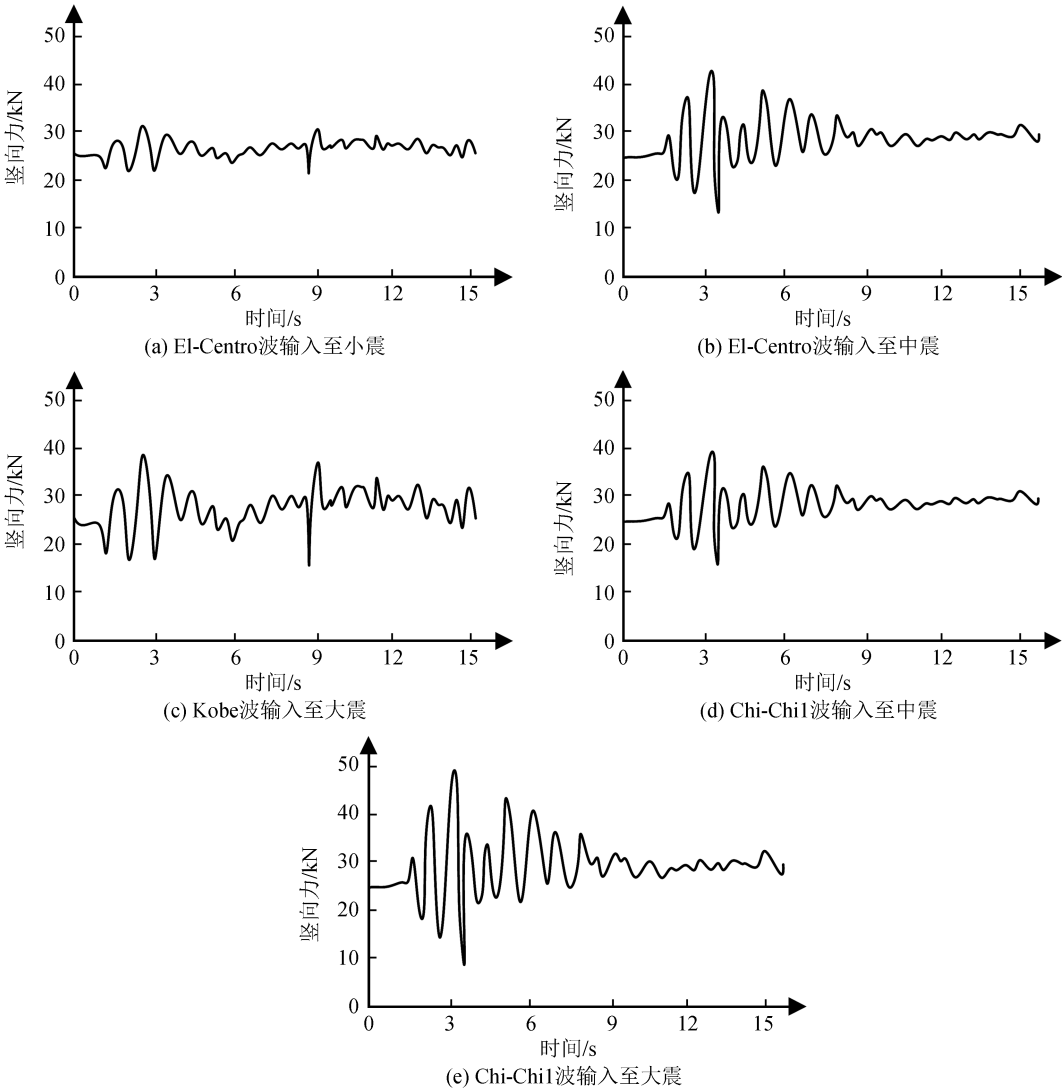


图 7 三组地震动情况下的单个隔震支座的竖向力反应

Fig.7 Vertical force response of single isolation bearing under three groups of ground motions

在中震过程中不仅要针对隔震支座的水平刚度实施科学设计,还需要考量到支座竖向力的承载情况。由于支座中出现的各种拉力不仅会对支座受拉整体性能产生一定影响,还会非常严重地影响支座的压剪能力。

3 结束语

曲线桥梁在不同等级地震下的振动特性是一个相对复杂的问题,且其中包含着减震和隔震等因素。鉴于当前隔震曲线桥梁抗震特性研究的迫切性,本文针对曲线桥梁铅芯橡胶支座不同等级地震的振动特性进行模拟研究。经各方面实验测试,分析隔震曲线桥梁模型加速度特性、位移特性、隔震层的恢复特性以及支座整体竖向力特性;构建隔震曲线桥梁铅芯橡胶支座模型,对隔震曲线桥梁在不同强度地震下呈现出的振动特性进行多次试验,为隔震曲线桥梁的整体性能提升以及桥梁抗震安全性进一步研究奠定基础。在实际应用中,铅芯橡胶支座可以高效降低隔震曲线桥梁整体地震反应,还能够利于减小曲率半径对于桥梁结构地震响应产生的影响。在未来的研究中,综合考量材料具备的非线性、连接构件的非线性特性等一系列因素,重点研究曲线桥梁地震振动的影响,及在不同等级地震下振动响应规律分析。

参考文献(References)

- [1] 李喜梅,杜永峰.非平稳地震激励下隔震曲线梁桥振动控制研究[J].地震工程学报,2016,38(1):103-108,115.
LI Ximei, DU Yongfeng. Vibration Control of Isolated Curved Girder Bridges under Nonstationary Seismic Excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 103-108, 115.
- [2] 腾格,张于晔.强震下支座形式对曲线梁桥地震响应的影响[J].工程抗震与加固改造,2016,38(2):101-107.
TENG Ge, ZHANG Yuyue. Influence of Different Isolation Bearings on Seismic Response of a Curved Bridge under Strong Ground Motions[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 101-107.
- [3] 李一鸣,虞庐松,南鹏.高烈度地震区曲线连续梁桥的减隔震方案研究[J].铁道建筑,2017(9):43-47.
LI Yiming, YU Lusong, NAN Peng. Seismic Isolation Scheme of Curved Continuous Girder Bridge in High Earthquake Intensity Area[J]. Railway Engineering, 2017(9): 43-47.
- [4] 贾俊峰,赵建瑜,郭扬,等.三维隔震连续梁桥模型结构地震模拟振动台试验[J].中国公路学报,2017,30(12):290-298.
JIA Junfeng, ZHAO Jianyu, GUO Yang, et al. Shaking Table Tests on Seismic Simulation of Three-dimensional Isolated Continuous Girder Bridges[J]. China Journal of Highway and

- Transport, 2017, 30(12): 290-298.
- [5] 李青宁,程麦理,尹俊红,等.曲线桥梁摩擦滑移隔震性能分析及试验研究[J].世界地震工程,2017,33(1):34-40.
LI Qingning, CHENG Maili, YIN Junhong, et al. Analysis and Experimental Study on Performance of Curved Bridge Sliding Seismic Isolation[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 34-40.
- [6] 王凯睿,徐秀丽,李雪红,等.强震作用下减隔震桥梁抗震性能试验研究[J].桥梁建设,2016,46(5):59-64.
WANG Kairui, XU Xiuli, LI Xuehong, et al. Experimental Study of Seismic Performance of Seismically Mitigated and Isolated Bridges under Strong Earthquake[J]. Bridge Construction, 2016, 46(5): 59-64.
- [7] 郭军军,钟剑,袁万城,等.考虑桥台性能影响的连续梁桥地震易损性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(4):532-537.
GUO Junjun, ZHONG Jian, YUAN Wancheng, et al. Seismic Fragility Analysis of a Continuous Bridge Considering the Performance of Abutments[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 532-537.
- [8] 陈艳玮.材料参数对高速铁路连续梁桥地震易损性分析的影响研究[J].铁道标准设计,2017(7):88-92.
CHEN Yanwei. Study on the Effect of Material Parameters on the Seismic Fragility Performance of High-speed Railway Continuous Beam Bridge[J]. Railway Standard Design, 2017(7): 88-92.
- [9] 左烨,孙广俊,王志鹏,等.近断层地震动下曲线梁桥碰撞效应研究[J].振动与冲击,2018,37(21):52-60.
ZUO Ye, SUN Guangjun, WANG Zhipeng, et al. Pounding Effect of Curved Bridges Subjected to Near-fault Seismic Ground Motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 52-60.
- [10] 唐永久,方圣恩.桩土作用对隔震梁桥地震易损性及震后通行能力影响[J].地震工程学报,2018,40(4):721-727.
TANG Yongjiu, FANG Sheng'en. Influence of Pile-Soil Interaction on the Seismic Fragility and Post-earthquake Traffic Capacity of an Isolated Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 721-727.
- [11] 陆宣行,熊学玉,方义庆.国家会展中心大跨预应力混凝土框架水平地震行波效应影响分析[J].建筑结构,2018,48(8):60-64.
LU Xuanxing, XIONG Xueyu, FANG Yiqing. Traveling Wave Effect Analysis of Large-span Prestressed Concrete Frame Structure of National Exhibition and Convention Center under Horizontal Earthquake[J]. Building Structure, 2018, 48(8): 60-64.
- [12] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 134-141.