

适用于中小跨径梁桥的组合橡胶支座减震性能

钟海强¹, 袁万城¹, 党新志¹, 邓小伟²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 市政工程设计院, 上海 200092)

摘要: 中小跨径梁桥常用的板式橡胶支座位移能力不足, 地震中容易发生支座滑动, 导致墩梁相对位移过大。为此提出一种新型组合橡胶支座, 支座截面由叠层区和滑动区组成, 支座内部能够发生滑动从而减小水平刚度、提高位移能力并耗散地震能量。对 6 块支座试样开展了拟静力试验探究压力、胶料性能、滑动区刚度占比的影响, 并选择典型简支梁桥进行有限元分析, 对比了组合橡胶支座和板式橡胶支座的地震响应。结果表明, 组合橡胶支座等效刚度小、位移和耗能能力强, 能够避免支座滑动, 并显著减小支座位移和桥墩弯矩。

关键词: 中小跨径梁桥; 组合橡胶支座; 拟静力试验; 支座滑动; 减震性能

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

Seismic Performance of Composite Rubber Bearings for Small-and-Medium-Span Bridges

ZHONG Haiqiang¹, YUAN Wancheng¹, DANG Xinzhì¹, DENG Xiaowei²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Laminated rubber bearings are commonly used in small-and-medium-span girder bridges but they lack in displacement capacity and are likely to slide in earthquakes, which results in excessive relative displacements between piers and girders. Thus, a new type of composite rubber bearing, of which the cross section is composed of a laminated area and a sliding area, is proposed in this paper. Interior sliding is allowed to reduce the horizontal stiffness, improve the displacement capacity, and dissipate the seismic energy. Quasi-static tests were conducted for six bearing

specimens to study the effects of pressures, rubber properties, and sliding area stiffness ratios on the bearing performances. Finite element analyses were performed based on a typical simply supported girder bridge. The seismic responses of composite rubber bearings and laminated rubber bearings were compared. The results show that the composite rubber bearings possess a small equivalent stiffness, strong displacement and energy dissipation capacities. Total sliding of bearings can be effectively avoided and both bearing displacements and pier moments can be significantly reduced in earthquakes.

Key words: small-and-medium-span bridge; composite rubber bearing; quasi-static test; bearing sliding; seismic performance

板式橡胶支座构造简单、施工方便, 在我国的中、小跨径梁桥中得到广泛应用。这种支座往往直接放置在桥墩或盖梁的支座垫石上, 一般搭配横向混凝土挡块使用, 上部结构则直接搁置在支座上, 不需要额外的连接措施。由于缺少可靠的锚固, 板式橡胶支座与上、下部结构的接触面在地震作用下容易发生滑动。汶川地震的震害表明^[1-2]: 中小跨径梁桥的桥墩震害率较低, 主要破坏为支座尤其是板式橡胶支座破坏, 震害表现为支座滑动引起的支座挤出和墩梁相对位移过大。

板式橡胶支座的滑动会显著降低结构水平刚度并消耗地震输入能量, 因此能够有效减小下部结构的地震响应^[3]。然而支座滑动意味着结构处于随遇平衡的状态, 未经设计的钢筋混凝土挡块难以限制墩梁位移的发展^[4], 容易引起墩梁位移失控, 在近断层地震作用下该问题尤为突出, 汶川地震的涪江桥、

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112300); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE19-B-19); 国家自然科学基金(51778471, 51978512); 上海市青年科技启明星计划(21QB1406000); 山东省交通运输科技计划(2020B74)

第一作者: 钟海强(1997—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: 1910336@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

青海玛多地震中的野马滩大桥和2号桥等均因此发生了大面积的落梁破坏。为此, Steelman 等^[5]和 Xiang 等^[6]对不与墩梁锚固的板式橡胶支座开展了一系列研究,发现作为关键参数的摩擦系数分别与加载速率和压力呈正、负相关,当剪切变形未达到100%时支座可能就已经开始滑动。由此可见,板式橡胶支座在支座滑动前的变形较小,位移能力不足,在地震等水平作用下容易过早进入滑动状态,而且随着支座磨损的加深,支座水平承载力和刚度等力学性能显著下降^[7],进一步增大了墩梁之间相对位移失控的风险。

为了充分利用板式橡胶支座的滑动减震功能并避免墩梁相对位移失控,学者们提出了“有限滑动”的理念,即通过引入外部装置令支座滑动可控。Wilches Están 等^[8]和 Xiang 等^[9]提出外置剪力键能够减小支座滑动造成的损伤,避免墩梁相对位移过大造成的落梁破坏,减小支座残余位移,但该措施并不能防止主梁从支座上滑落;Liu 等^[10]和 Xiang 等^[11]在板式橡胶支座的基础上加入了钢阻尼器,并通过试验验证了钢阻尼器可以提供屈后刚度并增大耗能能力,由此减小支座位移;Gu 等^[12-13]将拉索限位装置应用到了板式橡胶支座上,发现当支座位移达到拉索自由行程时,拉索拉紧能够有效限制位移增长,在近断层和跨断层地震作用下都能很好地将支座位移控制在一定范围内。外部装置的限位效果明显,但是增加了成本,而且这些装置需要与上、下部结构可靠连接,相应地增加了施工难度,弱化了非固定安装的板式橡胶支座的经济优势。为此, Strauss 等^[14]从支座本体出发,将板式橡胶支座的钢板替换成纤维增强板,以提高支座耗能能力,从而减小支座位移,但新型材料与橡胶之间的黏结强度较弱,大变形下容易脱黏;Li 等^[15]认为加劲钢板的厚度较大,而且刚度过高不能随橡胶一起变形,是限制支座剪切变形的

能力的主要因素,因此用较薄的高强钢丝网取代加劲钢板,发现改进后的支座在滑动前先发生滚动,提高了支座位移能力,但同样存在屈后刚度接近于零引发位移失控的风险。

本文从支座本体出发,提出了一种适用于中小跨径梁桥的新型组合橡胶支座用以增大非固定安装支座的位移能力,通过支座循环加载拟静力试验分析了其力学性能及影响因素,并推导了其恢复力模型;在此基础上进行了近、远场地震动下的实桥有限元分析,验证了新型支座的减震性能,对比分析了组合橡胶支座体系与传统板式橡胶支座体系的动力响应,尤其是支座位移响应的特点。

1 组合橡胶支座

1.1 支座构造与工作原理

以不固定安装的板式天然橡胶支座(laminated natural rubber bearing, LNB)为例,支座的减震性能源于滑动带来的刚度减小和耗能增大,但支座本身水平刚度较大而且近似线性,支座发生整体滑动前的允许位移(以下简称“支座允许位移”)较小。为了保证上述减震优势的同时增大支座的位移能力,并且不显著增加造价和施工难度,本文在中小跨径梁桥中常用的板式橡胶支座和滑动橡胶支座的基础上,提出一种如图1a、1b所示的组合橡胶支座(composite rubber bearing, CRB)。支座截面分为叠层区和滑动区,其中叠层区结构与板式橡胶支座类似,由加劲钢板和橡胶层叠合而成,而滑动区在此基础上还含有若干个由四氟滑板、厚不锈钢板组成的滑动层。厚钢板和四氟滑板之间可以添加硅油进一步降低界面摩擦系数,厚钢板、四氟滑板与相邻的加劲钢板之间分别采用焊接和黏结橡胶实现可靠连接。

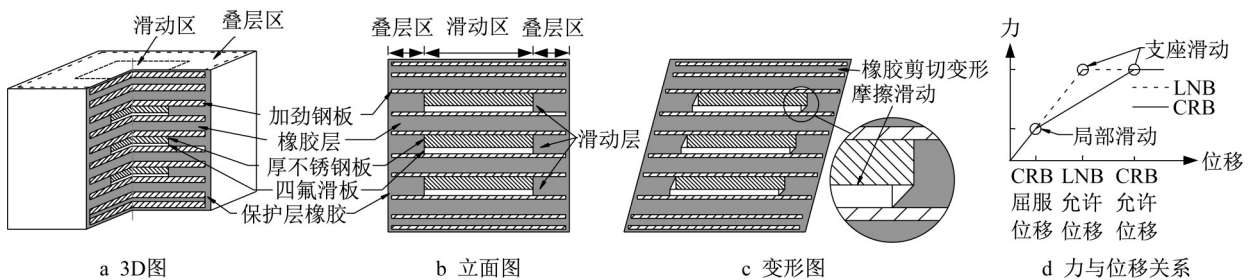


图1 组合橡胶支座构造及力学性能

Fig.1 Configuration and mechanical properties of CRB

组合橡胶支座的变形如图1c所示,与板式橡胶支座的力与位移关系对比如图1d所示,工作原理如下:

(1)在正常使用阶段,组合橡胶支座的滑动区未发生滑动,与叠层区共同参与受力,水平刚度与同规格的板式橡胶支座相当,可以满足结构正常的刚度需求。

(2)在地震作用下,滑动区发生局部滑动摩擦削弱支座的水平刚度,相当于支座发生屈服。由于水平刚度降低,组合橡胶支座在整体滑动前的允许位移比板式橡胶支座的更大,即位移能力能够得到显著提高。另一方面,滑动区局部滑动摩擦带来的刚度折减和耗能增大能够有效减小下部结构的地震动响应。

组合橡胶支座的结构和材料都与常规板式橡胶支座相似,竖向变形机制相同,均为橡胶层压缩变形、加劲钢板约束橡胶横向变形,即组合截面并不会影响支座的竖向承载能力,因此组合橡胶支座的竖向和水平力学性能可以分开设计,即根据竖向承载

能力确定支座整体尺寸,再由水平力学性能的要求确定滑动区尺寸,如在过渡墩和矮墩上可以采用滑动区更大、刚度更小的支座,使得桥墩内力尽可能均匀;由于安装方便,组合橡胶支座还可以用于对现有板式橡胶支座桥梁的加固。

1.2 水平循环加载拟静力试验

为验证组合橡胶支座的水平力学性能,本文对3组共6个组合橡胶支座试样开展了水平循环加载拟静力试验,试样尺寸、加载工况等如表1所示。加载频率为0.1 Hz,共有11个循环。以B组支座为例,支座试样的加劲钢板与厚钢板焊接,成品样式如图2a、2b所示。为观察支座内部变形情况,在表1中预定的加载工况全部结束后,将试样从中间切开并再次施加水平位移,观察到的滑动层变形和加载结束后的剖面变形如图2c、2d所示。滑动层中厚钢板与四氟滑板间的划线存在错位,证明了该界面确实发生了摩擦滑动。除了加劲钢板存在压弯现象以外,支座在加载过程中表面完整、平滑,无明显缺陷,均未发生破坏或整体滑动。

表1 支座试样方案与加载工况

Tab.1 Schemes and loading protocols of bearing specimens

编号	叠层区尺寸/mm	滑动区尺寸/mm	胶料硬度	压力/MPa	剪应变幅值/%	备注
A1	410×410×90	290×290×66	60	6	175	探究压力的影响
A2	410×410×90	290×290×66	60	6, 10	175	
B1	410×410×90	290×290×66	50	6	175	探究滑动区位置、胶料、剪应变幅值的影响
B2	214×214×114	410×410×78	50	6	150, 175, 200	
C1	360×360×88	200×200×54	60	10	100, 150	探究支座平面尺寸和剪应变幅值的影响
C2	510×510×120	300×300×88	60	10	100, 150	

注:尺寸项为外围尺寸,代表长×宽×橡胶层总厚度;胶料硬度为邵氏硬度A;除B2以外的试样均将叠层区设置在外围,将滑动区设置在中心;试样B2的外围为滑动区,但为提高支座稳定性,将四氟滑板往内缩进20 mm,即真正的滑动边界长×宽为390 mm×390 mm。

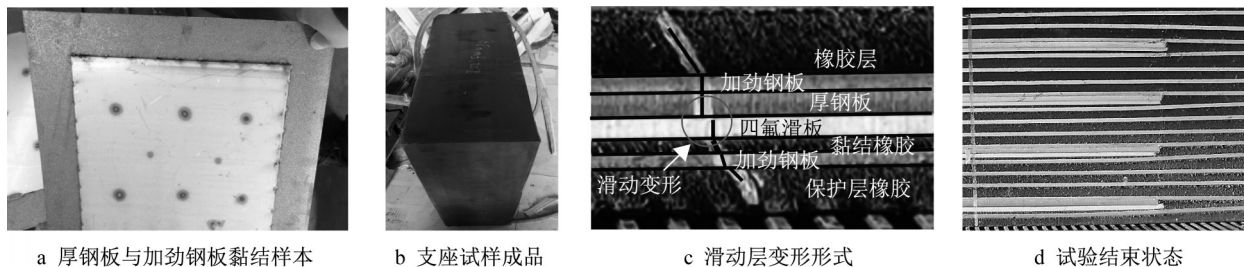


图2 组合橡胶支座试样循环加载试验

Fig.2 Cyclic tests of CRB specimens

A1 支座完整的循环加载滞回曲线如图3所示, A2、B1、B2 支座在 175% 剪应变幅值下以及 C1、C2 支座在 150% 剪应变幅值下的滞回曲线(第6次循环加载)如图4所示。组合橡胶支座的滞回曲线饱满,呈明显的双线性特征。由于橡胶材料在剪切变形较大时会发生硬化,曲线存在一定的翘起现象。随着

循环次数增大,支座的刚度逐渐下降并趋于稳定。

取支座试样第2到第11次循环加载的水平等效刚度和等效阻尼比的平均值列于表2,并与规格接近的橡胶支座进行对比。结合图4可以发现:竖向压力提高会增大支座的屈服力和耗能能力,剪应变幅值和滑动区刚度占比的增加都会减小支座等效刚

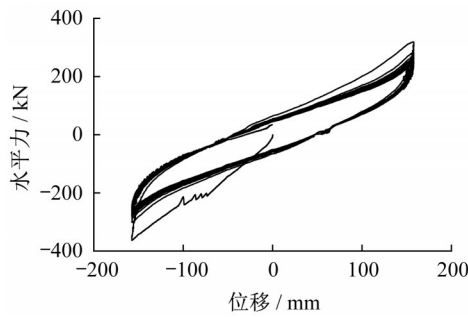


图3 A1 滞回曲线

Fig.3 Hysteresis curve of A1

度,提高等效阻尼比。此外,组合橡胶支座的水平等效刚度均显著小于同规格板式橡胶支座。

1.3 支座恢复力模型

为组合橡胶支座桥梁设计提供参考,本文基于支座的工作原理,对如图 5 所示的支座双线性恢复力模型中 3 个关键参数即屈服前刚度 K_{by} 、屈服力 Q_y 、屈服后刚度 K_{py} 进行理论推导。

局部滑动前,组合橡胶支座变形模式与普通板式橡胶支座相同,从而得到屈服前刚度;将屈服点定义为滑动区发生局部滑动的临界状态,首先要根据竖向刚度占比计算滑动区的压力从而得到局部滑动摩擦力,屈服位移为局部滑动前滑动区的弹性变形,根据屈服位移和屈服前刚度可以得到屈服力;屈服后刚度等于叠层区水平刚度。胶料配比、硫化温度等生产工艺以及不同剪切变形等加载工况对橡胶材料的力学性能影响较大,最后通过修正系数 ρ_1 、 ρ_2 来考虑胶料性能差异对屈服前刚度和屈服后刚度的影响,可以通过对相同加工条件下的橡胶试块进行水平剪切试验,得到初始剪切模量和大变形时的剪切模量,并分别将这两个模量除以等效剪切模量初步得到修正系数,但考虑到可能还有其他影响因素,实际取值还应当根据支座的试验结果进行调整。完整推导公式如下:

$$N_s = NK_{vS} / (K_{vL} + K_{vS})$$

$$f_s = \mu_s N_s$$

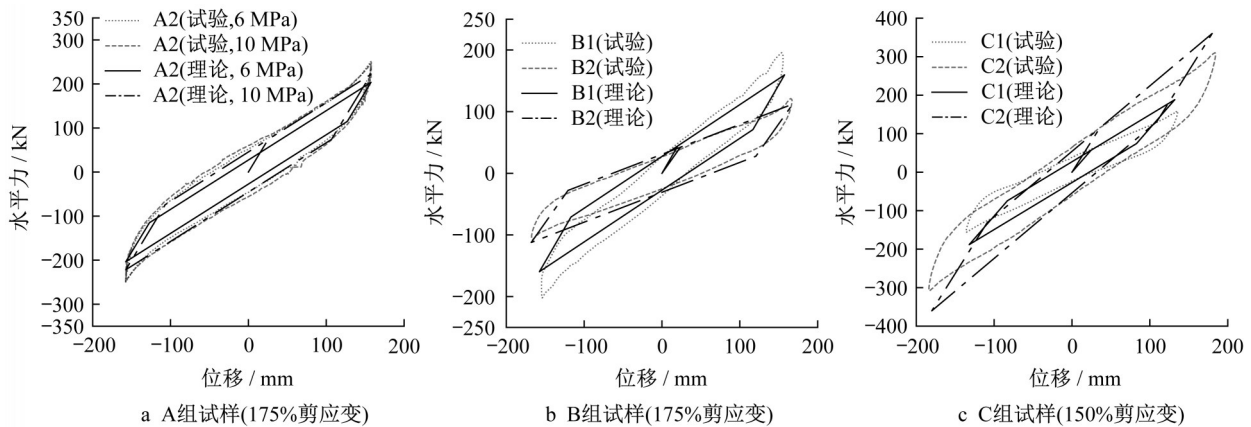


图4 组合橡胶支座滞回曲线拟合

Fig.4 Hysteresis curve fitting of CRB specimens

表2 支座试样水平等效刚度及阻尼比

Tab.2 Lateral equivalent stiffness and damping ratios of bearing specimens

支座类别	平面尺寸/mm	滑动区刚度占比/%	硬度	剪应变幅值/%	竖向压力/MPa	水平等效刚度/(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比/%
A1	410×410	57.7	60	175	6	1.67	10.3
A2	410×410	57.7	60	175	6	1.59	10.7
					10	1.53	12.5
B1	410×410	57.7	50	175	6	1.14	9.4
					6	0.75	12.5
					150	0.69	13.1
B2	410×410	71.7	50	175	6	0.64	14.3
					200	0.64	14.3
C1	360×360	42.1	60	100	10	1.50	10.3
					10	1.16	12
C2	510×510	41.9	60	100	10	2.17	8.5
					10	1.68	11.8
板式橡胶支座	400×400		60			2.70	
	350×350		60			2.13	不考虑
	500×500		60			3.16	

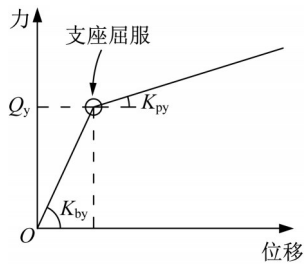


图5 双线性恢复力模型

Fig.5 Bilinear restoring force model

$$d_y = f_s / K_s$$

$$K_{by} = \rho_1 (K_L + K_s)$$

$$K_{py} = \rho_2 K_L$$

$$Q_y = K_{by} d_y$$

其中, N_s 、 N 分别为滑动区和支座承担的压力; K_{vL} 、 K_L 、 K_{vS} 、 K_S 分别为叠层区的竖向刚度、水平刚度和滑动区的竖向刚度、水平刚度, 计算方法与板式橡胶支座相同, 此处不再赘述; μ_s 、 f_s 分别为滑动区摩擦系数和摩擦力; d_y 为屈服位移。

根据公路桥梁抗震规范^[16]和现有橡胶胶料试验, 邵氏硬度为60度和50度胶的剪切模量分别取为1.2 MPa和0.9 MPa; 试验过程中支座压力为6 MPa或10 MPa, 此时四氟滑板与钢板之间的摩擦系数在0.02~0.06之间^[17], 为具代表性可取中间值0.04。3组支座试样的屈前刚度和屈后刚度修正系数分别取为1.1和1.0, 最终与试验结果的拟合曲线如图4所示。由图4可知, A组支座的拟合效果最优, B组和C组的拟合效果也较好。修正系数取值根据出厂前的胶料试验决定, 可以通过调整修正系数进一步提高拟合精度, 但应当有足够的试验数据支撑。

2 实桥有限元模型

为探究组合橡胶支座应用在中小跨径梁桥时的减震效果, 本文依托实际工程建立了实桥有限元模型, 并开展了纵桥向的非线性地震动时程分析。

2.1 模型概况

以一座3×30 m的三跨预应力混凝土梁桥为工程背景建立有限元模型, 该桥桥面连续, 结构简支。取中间联进行分析, 左右联作为边界条件, 不考虑桥台约束。横桥向布置如图6所示。图6中A为主梁截面面积, I_z 、 I_y 分别为绕z轴和y轴惯性矩。主梁由5片小箱梁组成, 宽19.0 m, 建模时简化为单主梁; 桥墩为双柱墩, 截面尺寸1.6 m × 1.6 m, 中心距4.0 m, 墩高7.2~8.2 m, 计算时均取8.0 m; 盖梁

长18.0 m, 高2.0 m, 宽1.0 m; 基础采用承台桩基础形式。其中, 主梁材料为C50混凝土, 桥墩及盖梁材料为C40混凝土, 钢筋均采用HRB400。恒载作用下单个支座支反力接近1 000 kN, 据此选择尺寸为400 mm × 400 mm × 99 mm的板式橡胶支座, 组合橡胶支座则采用A1试样, 此时支座压力为6 MPa。

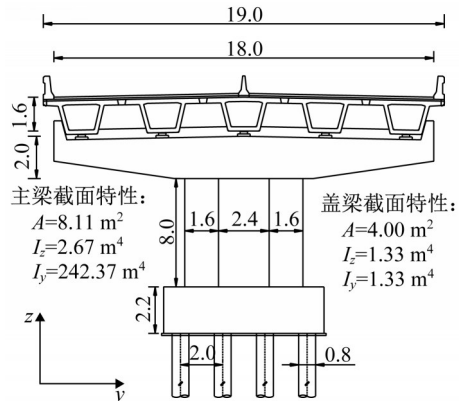


图6 实例桥梁横断面(单位: m)

Fig.6 Cross section of bridge example (unit: m)

采用结构分析程序OpenSees进行有限元分析^[18], 建立的有限元模型如图7a所示。主梁和盖梁采用线弹性单元模拟, 根据图6中的截面特性计算刚度; 承台采用质点模拟, 质量为324 t; 刚臂采用大刚度的弹性单元模拟; 桥墩采用纤维单元模拟, 混凝土采用Concrete01模拟, 对应不考虑抗拉强度的Kent-Scott-Park混凝土模型, 将标准强度和实际配箍代入Mander模型^[19]中得到相应参数, 钢筋采用Reinforcing Steel模拟, 采用各向同性硬化假设, 如图7b所示, 其中加粗黑线为骨架曲线, 灰线为卸载再加载时的滞回曲线, 计算得到的墩底等效屈服弯矩为16 922 kN·m; 对于支座而言, 橡胶支座与预埋钢板之间的摩擦系数在0.10~0.25之间^[4], 本文取值为0.20, 并分别采用具有双线性特征的Steel01和具有多段线性特征的MultiLinear材料来模拟考虑支座滑动的板式橡胶支座和组合橡胶支座, 由于两个支座尺寸接近, 为简化计算和便于分析, 将初始刚度统一设置为组合橡胶支座的初始刚度, 可以发现组合橡胶支座和板式橡胶支座的允许位移分别为154.2 mm和68.6 mm, 前者是后者的2.25倍, 为避免计算不收敛, 两个支座滑动后的刚度均取为1.0 kN·m⁻¹; 桩基础采用弹性土弹簧模拟, 沿x、y、z轴的平动刚度 k_{ux} 、 k_{uy} 、 k_{uz} 和转动刚度 k_{rx} 、 k_{ry} 、 k_{rz} 取值如图7c所示。

2.2 地震动输入

该工程实例属于B类桥梁, 抗震设防烈度为Ⅷ

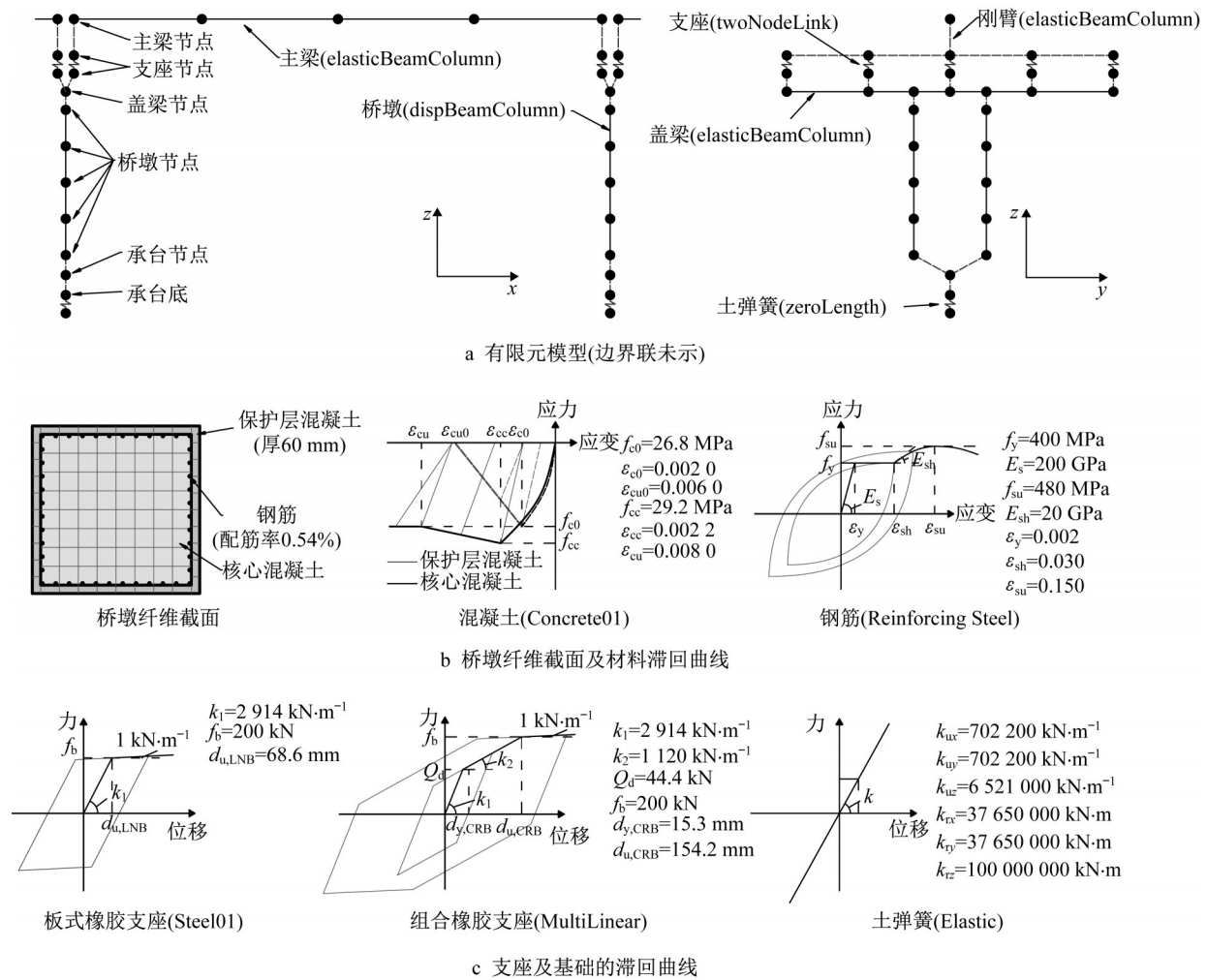


图 7 基于 OpenSees 的有限元模型

Fig.7 Finite element model based on OpenSees

度,地面峰值加速度为0.1g,场地类型为IV类,场地特征周期为0.75s。为分析组合橡胶支座在远场、近场地震动下的表现,本文设置了两组地震工况,其中远场地震动基于规范的E2加速度反应谱进行人工合成得到,与规范谱的比较如图8所示。

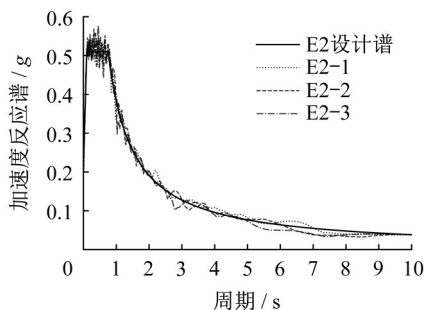


图 8 远场地震动加速度反应谱

Fig.8 Acceleration response spectrums of ground motions far away from fault

近场地震动需要考虑速度脉冲,从Baker等^[20]整理的PEER地震波数据库中选取Landers、Kobe和

Chichi地震共3条时程记录(台站:116000、KJM000、TCU054),并将峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)放缩至与人工合成地震波同一水平(0.2042g)。速度时程如图9a~9c所示,长周期速度脉冲明显;加速度反应谱如图9d所示,可见除了Kobe地震动以外,其余两条近场地震动频谱更丰富,反应谱的长周期段明显大于规范谱。

最后分别给上述6条地震动时程增加20s的零加速度段用于计算震后残余位移。阻尼均采用瑞利阻尼,选取首阶和质量参与率达90%对应的两阶振型(周期分别为1.407s和0.130s),并假设振型阻尼为0.05计算相应参数。

3 结果分析

由于模型具有对称性,以下仅对中间联的其中一墩及该墩上的中支座进行结果分析,分析指标包

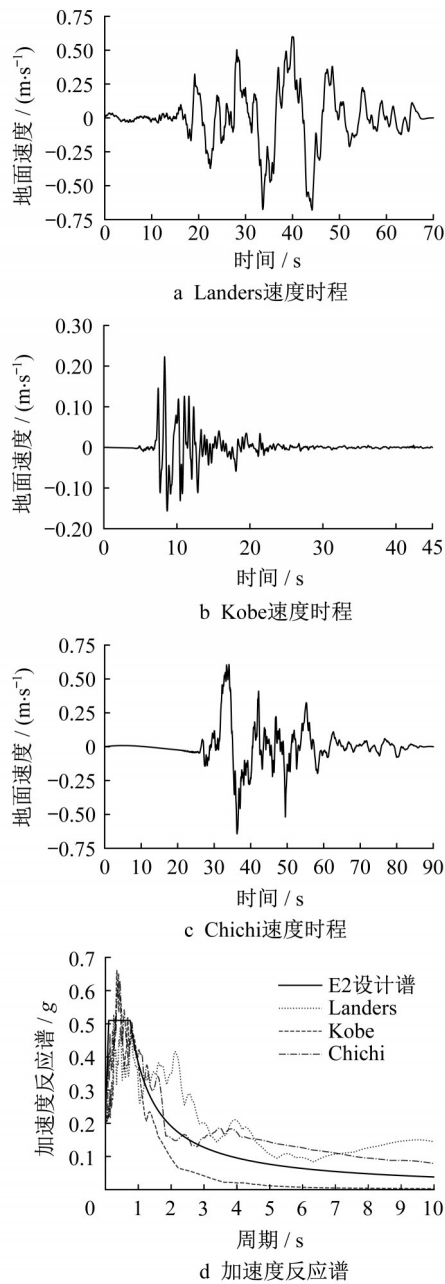


图9 近场地震动

Fig.9 Ground motions near faults

括支座最大位移(即墩梁相对位移)、支座残余位移、桥墩墩底弯矩。表3列出了两种支座桥梁的地震动

应最大值,除了比值以外,正负号均代表方向。两种支座均能有效防止墩底屈服,发挥了减隔震作用,其中组合橡胶支座桥梁的支座最大位移、支座残余位移和墩底最大弯矩都显著小于板式橡胶支座桥梁。更重要的是,板式橡胶支座均发生了支座滑动,而组合橡胶支座只有在Landers地震下才发生了轻微的支座滑动(不超过允许位移的3%),其余工况下支座位移的冗余度较高。可见组合橡胶支座的位移能力强、残余位移小、减震效果更好。

为进一步分析两种支座动力响应的区别,以E2-1地震波为例,将相应的支座位移时程和滞回曲线分别绘制于图10、11中。由图10、11可知,板式橡胶支座和组合橡胶支座的位移变化幅度(即相邻波峰与波谷之间的位移差)接近,最大位移变幅分别为183.2 mm和159.9 mm。然而板式橡胶支座在达到允许位移开始滑动后,平衡位置发生了显著偏移,并在新的平衡位置发生往复运动,如果缺少反向地震动激励则无法自行恢复,因此支座最大位移和残余位移都较大,与文献[4]的结论一致。相比之下组合橡胶支座没有发生支座滑动,平衡位置的偏移量较小,因此避免了上述问题。此外,结合表3的远场支座位移响应可知,支座滑动带来的平衡位置偏移并不稳定,具体表现在:远场地震的加速度反应谱基本一致,但是板式橡胶支座的最大位移相差达63%,而组合橡胶支座相差仅24%,因此组合橡胶支座的位移响应更稳定。

图12展示了不同地震工况下的支座滞回耗能对比,结合图11可以发现,组合橡胶支座在地震作用下处于弹塑性阶段的时间更长,因此滞回环包围面积比板式橡胶支座更大,耗能能力更强。

为进一步探究组合橡胶支座在近场作用下的减震性能,以Landers地震波为例,将支座位移时程绘制于图13中。结合图9a、图10和图13可知,近场作用下两种支座的位移时程曲线与地面运动速度时程曲线形状接近,位移响应明显高于远场响应,支座最

表3 桥梁地震动响应最大值

Tab.3 Maximum seismic responses of bridges

工况	支座最大位移/mm		支座残余位移/mm		墩底最大弯矩/(kN·m)		支座最大位移/允许位移		墩底最大弯矩/屈服弯矩	
	LNB	CRB	LNB	CRB	LNB	CRB	LNB	CRB	LNB	CRB
E2-1	-150.3	85.2	79.4	10.5	12 025.2	6 919.6	2.19	0.55	0.71	0.41
E2-2	125.1	95.9	56.0	3.5	13 500.5	7 341.3	1.82	0.62	0.80	0.43
E2-3	-92.2	77.6	12.2	0.3	13 010.6	7 807.5	1.34	0.50	0.77	0.46
Landers	-195.7	158.1	-48.4	0	-13 899.9	10 757.8	2.85	1.03	0.82	0.64
Kobe	-76.7	-66.3	-5.8	2.2	-11 716.5	-6 659.9	1.12	0.43	0.69	0.39
Chichi	-157.6	-103.4	-25.1	5.2	-14 249.7	7 791.9	2.30	0.67	0.84	0.46

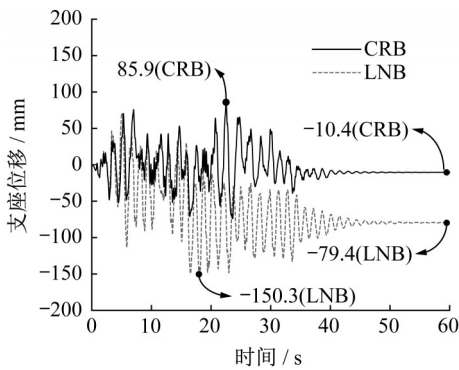


图 10 支座位移时程 (E2-1)

Fig.10 Displacement time-history curves of bearings (E2-1)

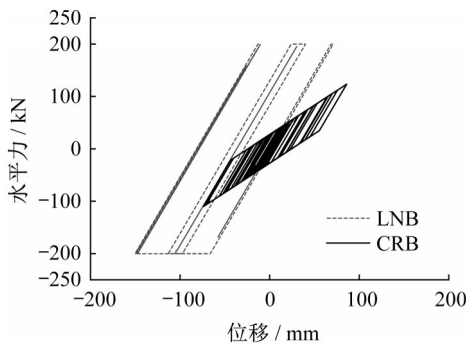


图 11 支座滞回曲线 (E2-1)

Fig.11 Hysteresis curves of bearings (E2-1)

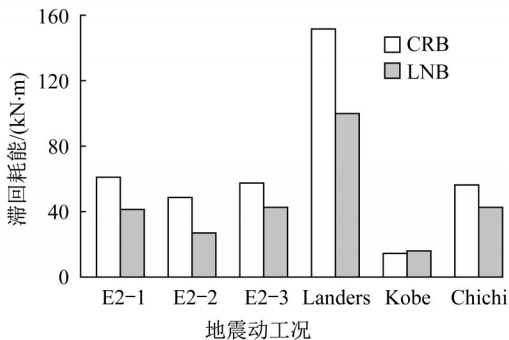


图 12 支座能量耗散对比

Fig.12 Comparison of energy dissipation of two bearings

大位移均发生在最大速度脉冲所在的区间(40 s附近),因此近场地震的长周期速度脉冲会显著增大支座响应,但组合橡胶支座的平衡位置偏移和残余位移依旧比板式橡胶支座更小。另一方面,由图 9d 可知,除 Kobe 地震波外的其他近场地震频率成分更丰富,尤其是 Landers 地震波具有相当长的反应谱平台段,对通过延长周期从而降低结构响应的减隔震体系十分不利。因此,表 3 中除了 Kobe 地震波外的其

他近场地震响应都比远场响应更大。板式橡胶支座在近远场作用下都会发生支座整体滑动,因此动力响应区别较小;组合橡胶支座受近断层地震特性的影响更明显,但是减震效果依旧更好。

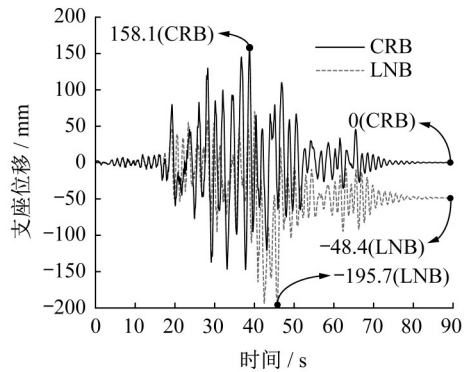


图 13 支座位移时程 (Landers)

Fig.13 Displacement time-history curves of bearings (Landers)

4 结论

针对中小跨径梁桥常用的板式橡胶支座容易滑动引发位移失控的问题,提出了一种不固定安装的新型组合橡胶支座,并开展了支座拟静力试验和实桥有限元分析,得出结论如下:

(1)组合橡胶支座的滞回曲线呈较饱满的梭型,双线性特征明显,水平等效刚度明显小于同规格的板式橡胶支座,等效阻尼比较大,剪应变达到 200% 也不发生支座破坏或滑动。

(2)压力提高可以增大支座的屈服力和耗能能力;胶料硬度提高能够增大支座刚度;剪应变幅值和滑动区刚度占比的增加都会减小支座等效刚度,提高等效阻尼比,基于支座工作原理推导的恢复力模型能够有效反映上述因素的影响。

(3)地震作用下组合橡胶支座位移能力和耗能能力强,支座最大位移、残余位移、墩底弯矩均小于板式橡胶支座,在近远场下的减震效果都更好。

(4)近断层地震作用的长周期脉冲效应和丰富的频谱特性会显著增大结构响应,组合橡胶支座受近断层的地震特性影响更强,但减震效果依旧优于板式橡胶支座。

组合橡胶支座的力学特性与压力有关,在横桥向或竖向地震作用等存在压力显著变化的情形时,力学性能会发生改变;此外在不同墩高、场地类别、抗震设防烈度、是否考虑桥台约束及山区不等墩高等工程条件下,支座的减震性能也存在较大差异,这

些问题仍需要进一步的研究。

作者贡献声明:

钟海强:试验分析,有限元建模分析,论文撰写。

袁万城:提出概念,指导论文撰写。

党新志:支座试验分析,指导论文撰写。

邓小伟:提供实桥数据,指导论文撰写。

参考文献:

- [1] LI J, PENG T, XU Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008,7(4): 337.
- [2] 庄卫林, 陈乐生. 汶川地震公路震害分析—桥梁与隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
ZHUANG Weilin, CHEN Lesheng. Analysis of highways' damage in the Wenchuan earthquake—bridge and tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [3] 李冲, 王克海, 惠迎新, 等. 考虑摩擦滑移的板式橡胶支座连续梁桥地震反应分析[J]. *中国公路学报*, 2016,29(3): 73.
LI Chong, WANG Kehai, HUI Yingxin, *et al.* Seismic response of continuous girder bridge with laminated rubber bearing considering friction sliding [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016,29(3): 73.
- [4] 李建中, 汤虎, 管仲国. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. *中国公路学报*, 2015,28(3): 35.
LI Jianzhong, TANG Hu, GUAN Zhongguo. A new isolation system for small and medium span bridges on laminated rubber bearings[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015,28(3): 35.
- [5] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, *et al.* Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013,18(7): 612.
- [6] XIANG N, LI J. Experimental and numerical study on seismic sliding mechanism of laminated-rubber bearings [J]. *Engineering Structures*, 2017,141: 159.
- [7] 王克海, 吴刚, 张盼盼. 板式橡胶支座摩擦滑移性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020,39(19): 1.
WANG Kehai, WU Gang, ZHANG Panpan. Tests for friction sliding performance of plate rubber bearing [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020,39(19): 1.
- [8] WILCHES ESTÁN J D J, SANTA MARÍA H, RIDDELL R, *et al.* Influence of the use of external shear keys on the seismic behavior of Chilean highway bridges [J]. *Engineering Structures*, 2017,147: 613.
- [9] XIANG N, LI J. Effect of exterior concrete shear keys on the seismic performance of laminated rubber bearing-supported highway bridges in China [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018,112: 185.
- [10] LIU C, GAO R, GUO B. Seismic design method analyses of an innovative steel damping bearing for railway bridges [J]. *Engineering Structures*, 2018,167: 518.
- [11] XIANG N, ALAM M S, LI J. Yielding steel dampers as restraining devices to control seismic sliding of laminated rubber bearings for highway bridges: analytical and experimental study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019,24(11): 4019103.
- [12] GU Y, YUAN W, DANG X. Test and numerical study on the seismic performance of a cable restrainer for girder bridges [C]// 20th Congress of IABSE. New York: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2019: 1697-1706.
- [13] 谷屹童, 袁万城, 党新志. 拉索限位装置对跨断层桥梁地震响应的影 响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020,48(9): 1256.
GU Yitong, YUAN Wancheng, DANG Xinshi. Effect of cable restrainers on seismic response analysis of cross-fault bridges [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020,48(9): 1256.
- [14] STRAUSS A, APOSTOLIDI E, ZIMMERMANN T, *et al.* Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: shear modulus and damping coefficient [J]. *Engineering Structures*, 2014,75: 402.
- [15] LI H, TIAN S, DANG X, *et al.* Performance of steel mesh reinforced elastomeric isolation bearing: experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2016,121: 60.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG T 2231 - 01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Ministry of Transport of China. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG T 2231 - 01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [17] 范立础, 袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究[J]. *同济大学学报*, 1989(4): 447.
FAN Lichu, YUAN Wancheng. Research on seismic isolation performance of bridge rubber bearing [J]. *Journal of Tongji University*, 1989(4): 447.
- [18] MCKENNA F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation [J]. *Computing in Science and Engineering*, 2011,13(4): 58.
- [19] CHANG G A, MANDER J B. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: part 1—evaluation of seismic capacity [R]. Buffalo, New York: State University of New York, 1994.
- [20] BAKER J W, LIN T, SHAHI S K, *et al.* New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2011.