

中小跨径梁桥中组合橡胶支座的减隔震性能分析*

Seismic Isolation Performance Analysis of Composite Rubber Bearings in Middle and Small Span Beam Bridges

杨巍¹, 赵永伟², 闫永亮², 李福林¹, 杨林豪¹

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 河南省鹤新高速公路有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 地震作用下, 中小跨径梁桥所用板式橡胶支座易出现滑动, 使墩梁的位移偏大, 而组合橡胶支座的耗能能力及位移能力相对高。采用拟静力试验及有限元分析探讨了组合橡胶支座、板式橡胶支座各工况下的地震响应, 结果表明: 中小跨径梁桥采用组合橡胶支座能够有效防止支座滑动, 显著降低了桥墩弯矩与支座位移。

关键词: 组合橡胶支座; 减隔震性能; 中小跨径梁桥

中图分类号: U443.361

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0150-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.026

YANG Wei¹, ZHAO Yongwei², YAN Yongliang², LI Fulin¹, YANG Linhao¹

(1. CCCC-SHB Fourth Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

2. Henan Hexin Expressway Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The plate type rubber bearing used in middle and small span beam bridge is easy to slide under earthquake, which makes the displacement of pier and beam larger. The energy dissipation capacity and displacement capacity of composite rubber bearing are relatively high. The seismic responses of composite rubber bearing and plate rubber bearing under different working conditions are studied by pseudo-static test and finite element analysis. The results show that composite rubber bearing can effectively prevent the bearing from sliding in middle and small span beam bridges, the bending moment of the pier and the displacement of the bearing are significantly reduced.

Keywords: composite rubber bearings; shock absorption and isolation performance; small and medium-sized span beam bridge

0 引言

在我国交通路网建设中, 中小跨径梁桥占比较大, 是交通路网的重要组成部分。在中小跨径梁桥建设中, 抗震性能极为重要。李悦等^[1]探讨了板式橡胶支座滑移能耗的下降, 可以满足桥墩抗震能力

要求, 降低地震作用下桥墩的破坏风险。滑移也可降低支座带给上部结构的约束力, 增强其同桥台间的累积位移及碰撞效应; 连续桥梁的支座滑移亦可消耗地震能力, 降低桥梁下部结构的内力。但梁端桥台对滑移距离产生约束作用, 致使滑移减震效果无简支梁桥明显。学者李建中等^[2]选择板式橡胶支座梁桥进行研究, 认为控制梁体惯性力, 降低墩柱及基础等下部结构损害程度, 可有效控制墩梁的损害程度, 能有效控制墩梁的相对位移, 从而防止因梁体位移过大造成交通阻断, 或者落梁; 而项长生等^[3]以黏滞阻尼器去提高中小跨径梁桥的抗震性能,

* 基金项目: 2021 河南省科技攻关项目 (212102310289)。

作者简介: 杨巍: (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 道路桥梁。

收稿日期: 2023-01-10

结果显示,黏滞阻尼器可有效增强中小跨径梁桥横向的抗震性能,黏滞阻尼器参数不同,其影响作用也不同,认为阻尼指数 0.8、系数为 $3000 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 时较佳;林杰^[4]研究了小跨径公路梁桥中板式橡胶支座滑移对连续梁桥、简支梁桥的地震响应的影响,认为支座滑移可能会造成梁桥结构间出现碰撞和落梁。从上述研究可知,板式橡胶支座滑移是梁桥结构水平及刚度下降的主因,也能消耗地震能量,所以可有效降低下部结构间的地震响应。但是,支座滑移表示结构平衡状态比较随遇,如果不设计钢筋混凝土挡块,无法对墩梁位移发展进行限制,进而导致墩梁位移的失控。特别是面对近断层的地震,此问题更加突出。为此,对墩梁锚固板式橡胶支座进行了研究^[5],结果显示支座摩擦系数同压力及加载速率成负相关性和正相关性,若剪切变形不到 100%,支座会开始滑移。这表明,支座滑移前板式橡胶支座的变形不大,位移能力弱,在地震作用下极易进入滑移状态,随着支座磨损程度的加大,支座的水平承载力及刚度等性能会显著降低,从而加大了墩梁间相对位移的失控风险。

为进一步探讨板式橡胶支座滑移的减震作用,有效控制墩梁位移,学者们开展了一系列研究,并提出了“限位”理论。崔侠侠等^[6]的研究表明,弹塑性挡块较其他挡块的力学行为更加明确清晰,耗能特性也较好,能够更好地控制位移效果。项长生等^[7]针对梁桥在地震作用下出现的横向震害,选用黏滞阻尼器和楔形挡块两种限位方法,以增强中小跨径梁桥横向抗震性能。认为选取楔形挡块和合理的黏滞阻尼器系数及阻尼指数能提高梁桥结构的抗震性能。但会增加成本,同时黏滞阻尼器及楔形挡块装置的应用,施工难度也相应加大,使非固定安装板式橡胶支座的经济优势被弱化。针对此问题,一些学者基于支座本体进行研究,将板式橡胶支座的钢板换为纤维增强板,以增强支座的耗能能力,降低支座位移。然而,新材料和橡胶件的黏结强度不太高,一旦发生大变形,极易出现脱黏。也有学者指出加劲钢板厚度大,刚度过高无法随橡胶同时变形,进而限制了支座的剪切变形能力。所以,要采用薄型高强钢丝网替代加劲钢板,但改进的支座于滑移前先发生滚动,增强了支座的位移能力,这同样存在位移失控风险。

为此,本文选用组合橡胶强化中小跨径梁桥支座的位移能力,并分析其力学性能,以及其影响因素,探讨其减震性能。

1 组合橡胶支座的构造

以板式天然橡胶支座(非固定安装)为研究对象,分析中小跨径梁桥橡胶支座的减震性能。支座减震性能主要是因其滑动降低了刚度,增加了能耗。而支座自身的水平刚度且比较大,近似于线性,其整体滑移前允许的位移比较小。为确保支座的减震性能和加大支座位移能力,且不显著加大施工难度及造价的条件下,在中小跨径梁桥中采用了组合橡胶支座。该橡胶支座的截面分为滑动区、叠层区,叠层区结构类似板式橡胶支座,由橡胶层与加劲钢板叠合而成,滑动区包括叠层结构和厚不锈钢板、四氟滑板等构成。四氟滑板与厚钢板间可加硅油以减少截面的摩擦系数,四氟滑板、厚钢板及其相邻加劲钢板间通过黏结橡胶与焊接进行可靠连接。

组合橡胶支座在正常使用期不会发生滑动,且与叠层区一起参与受力,其刚度近似板式橡胶支座,能够满足梁桥结构的刚度需求。但在地震环境下,滑动区局部会发生滑动摩擦,支座水平刚度被削弱。水平刚度下降后,组合橡胶支座滑动前的位移大于板式橡胶支座,其位移能力显著增强。同时,滑动区的局部互动也会导致其刚度减弱耗能增加,从而降低下部结构的地震响应。

组合橡胶支座的材料及结构都类似板式橡胶支座,具有相同的竖向变形机制,组合截面对支座竖向承载能力不发生影响。所以,组合橡胶支座水平及竖向的力学性能能够分别设计,按照竖向承载力明确支座的整体尺寸,依据水平力学的性能要求明确滑动区的尺寸。比如矮墩和过渡墩可选刚度小滑动区大的支座,尽量确保桥墩内力的均匀。

2 水平循环加载拟静力试验

采用水平循环加载试验去评估组合橡胶支座的力学性能,选取组合橡胶支座 6 个(A1、A2、B1、B2、C1、C2)进行试验,加载工况及试验尺寸见表 1,循环 11 个,加载频率 0.1 Hz。在全部结束预定加载工况后,由中间切开试件再次进行水平位移,观察其剖面变形情况。滑动层的厚钢板同四氟滑板

道桥技术

间存在划线错位,表明此截面发生过摩擦滑动。除加劲钢板发生压弯现象之外,在加载过程中支座表

面平滑而完整,不存在明显缺陷,均未发生整体滑动或破坏。

表 1 组合橡胶支座式样

Table 1 Combination of rubber bearing style

式样	A1	A2	B1	B2	C1	C2
滑动区/mm	280×280×63	280×280×63	280×280×63	400×400×75	190×190×52	285×285×86
叠层区/mm	400×400×85	400×400×85	400×400×85	212×212×110	350×350×85	500×500×110

说明: A 类试件用以分析压力作用; B 类试件用以分析滑动区位置、剪应变幅度值及胶料的影响作用; C 类试件用以分析支座平面尺寸及剪应变幅度值的影响作用。

由循环加载滞后曲线可知, B1、A1、B2 支座的剪应变幅值在 172% 以下, C1 和 C2 支座的剪应变幅值在 145% 以下。组合橡胶支座滞回曲线较为饱满, 双线性特征较为明显。由于剪切变形变大时橡胶材料会产生硬化, 所以组合橡胶支座滞回曲线出现了翘起现象。但在增加循环次数后, 支座刚度渐渐降低, 并逐渐稳定。

支座试件第 2~11 次循环加载水平的等效刚度及等效阻尼比均值见表 2, 且对比接近规格的橡胶支座。结果显示, 增大竖向压力支座的耗能能力及屈服力也增大, 滑动区的刚度占比及剪应变幅值等的增加均能降低支座的等效刚度、等效阻尼比增加, 同时, 组合橡胶支座及水平等效刚度均显著低于同规格的板式橡胶支座。

3 组合橡胶支座的恢复力模型

为分析组合橡胶支座的减震性能, 本文采用双线性支座恢复模型屈服力、屈前及屈后刚度等参数给予理论推导。

局部滑动之前, 组合橡胶支座和普通板式的橡胶支座的变形模式相同, 进而得到屈前刚度。滑动区的局部滑动临界状态为屈服点, 滑动区压力的计

算需要按照竖向刚度的占比进行计算, 以获得局部的滑动摩擦力, 而其互动前的滑动区弹性变形为屈服位移, 按照屈前刚度及屈服位移获得屈服力, 屈服后的刚度与叠层区的水平刚度相等。硫化温度及胶料配比等工艺, 以及同剪切变形的加载工况等会给橡胶材料力学性能带来较大影响。塑料性能的差异对屈后、屈前刚度产生的影响利用修正系数 ρ_1 、 ρ_2 进行评估, 也可利用加工条件的橡胶试块测试其水平剪切力, 活动初始及大变形时的剪切模量, 这两个模量分别除以剪切模量 (等效) 后获得修正系数。在考虑其他影响因素的情况下, 调整支座试验结果。模型的推导过程见以下公式:

$$N_s = NK_{VS} / (K_{VL} + K_{VS}) \quad (1)$$

$$f_s = \mu_s N_s \quad (2)$$

$$d_y = f_s / K_s \quad (3)$$

$$K_{by} = \rho_1 (K_L + K_s) \quad (4)$$

$$K_{py} = \rho_2 K_L \quad (5)$$

$$Q_y = K_{by} d_y \quad (6)$$

式中: N_s 为滑动区压力; N 为支座承担压力; K_L 为叠层区水平刚度; K_{VL} 为竖向刚度; K_s 为滑动区水平刚度; K_{VS} 为竖向刚度, 计算方法同板式橡胶支座; f_s 为滑动区摩擦力; μ_s 为摩擦系数, d_y 为屈服位移。

表 2 支座式样的阻尼比及水平等效刚度

Table 2 The damping ratio and the horizontal equivalent stiffness of the bearing style

式样	尺寸/mm	刚度占比/%	剪应变幅值/%	硬度	竖向压力/MPa	等效阻尼比/%	水平等效刚度
A1	400×400	56.9	172	59	5.9	10.1	1.65
A2	400×400	56.9	172	59	6.9	10.5、12	1.57、1.52
B1	400×400	56.9	172	48	5.9	9.2	1.12
B2	400×400	72.1	145、172、195	59	5.9、5.9、5.9	12.2、12.9、14.2	0.72、0.67、0.62
C1	350×350	41.7	95、146	59	10.2、10.2	10.2、11.7	1.45、1.10
C2	500×500	41.2	95、146	59	10.2、10.2	8.2、11.2	2.15、1.65
板式橡胶 支座	390×390	—	—	59	—	—	2.65
	340×340	—	—	59	—	—	2.10
	490×490	—	—	59	—	—	3.15

按照桥梁抗震标准及规范，以及橡胶料的试验，将邵氏硬度 50 度及 60 度的橡胶料剪切模量取值为 0.9 MPa、1.2 MPa，试验中支座压力取值为 10 MPa 或 6 MPa，钢板和四氟滑板间的摩擦系数为 0.03 至 0.06。三组试样屈后及屈前刚度的修正系数取值为 1.0、1.1，试验结果拟合中，A 组试件拟合效果最佳，C、B 两组的拟合效果也良好。按照橡胶料出厂前试验选取其修正系数，可利用修正系数的调整增强拟合的精度，且需要足够的数据支撑。

4 有限元分析

4.1 有限元模型

选取某三跨预应力混凝土桥梁构建有限元模型，此桥为连续桥面，简支结构。分析其中间联，左右联均为边界条件，不计桥台约束。主梁箱梁有 5 片，18 m 宽，建模过程中简化成单主梁。双柱墩，1.5 m×1.5 m 的截面尺寸，中心距 4 m，墩高 7.4~8.1 m。盖梁 17 m、宽 0.9 m、高 1.8 m，承台桩基形式。主梁为混凝土（C50），盖梁及桥墩 C40 混凝土。恒载作用中单支座的支反力近似 1000 kN，以此尺寸选择板式橡胶支座，而组合支座为 A1 试件，支座压力 6 MPa。

选用 OpenSees 软件构建有限元模型。盖梁及主梁以线弹性单元进行模拟，墩底的等效屈服弯矩 16915 kN·m，预埋钢板与橡胶支座间摩擦系数取值 0.2，组合橡胶支座允许位移为 152.6 mm，板式橡胶支座的允许位移是 67.5 mm，二者滑动后刚度值均取为 1.0 kN·m⁻¹。

4.2 输入地震动

该桥梁工程的抗震设防烈度为 7 度，场地类型属四类，地面峰值加速度 0.1g，场地的特征周期 0.73 s。对组合橡胶支座的近场、远场地震动力的表现进行分析。本研究采用两组地震工况，即远场地震动和近场地震动，远场工况的地震动是按照 E2 加速度的反应谱人工合成而成。

5 结果分析

本文针对梁桥中间联的一个桥墩及其支座的墩梁的相对位移、支座残余位移和墩底弯矩等指标展开分析，其支座地震响应的最大值见表 3。两种支座均具有减隔震作用，墩底屈服得到阻止，但组合橡

胶支座的墩底最大弯矩、残余位移和最大位移均低于板式橡胶支座。板式橡胶支座出现支座滑动，组合橡胶支座在 Landers 地震下出现轻微滑动，其他工况下的支座位移冗余度比较高。此结果显示，组合橡胶支座具有减震效果好、残余位移小和位移能力高等优势。

在动力响应方面，E2-1 地震波条件下，组合橡胶支座与板式橡胶支座的位移变化幅度相近，最大位移的变化幅度为 158.7 mm、182.9 mm。板式橡胶到达允许位移时开始滑动，此时平衡位置偏移显著，并于平衡位置反复运动，若无反向地震动的激励就不能自行恢复。所以，其参与位移和最大位移都非常大。与之相反，组合橡胶支座未出现支座滑动，且平衡位置偏移量非常小，所以无上述现象的出现。

各地震工况下支座的滞回耗能情况如图 1 所示。在地震作用下，组合橡胶支座处在弹塑阶段的时间远长于板式橡胶支座，所以，其滞回环包络面积也更大，且耗能能力也更强。

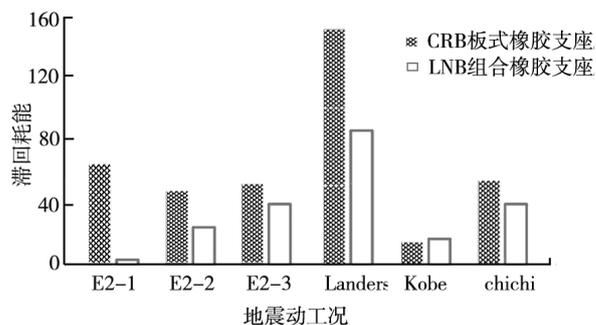


图 1 两类支座的能量耗散情况
Fig. 1 Energy dissipation of two kinds of supports

梁桥地震响应最大值见表 3。从表 3 看，远场支座的位移响应中，支座滑动导致的位置偏移不太稳定，其在远场的地震加速度反应谱较为一致。而板式橡胶支座的位移响应中，最大位移差距较大，相差 62%，组合橡胶支座最大位移的差值则为 22%。由此可见，组合橡胶支座位移响应相对稳定。同时，Kobe 地震波之外的近场地震响应均大于远场响应。在近场作用下，板式橡胶支座都发生了整体滑动，所以其动力响应的区别不大，但在近断层地震对组合橡胶支座的影响更显著，不过组合橡胶的减震效果仍然非常好。

道桥技术

表 3 梁桥地震响应的最大值
Table 3 The maximum value of seismic response of beam bridge

指标	支座类型	E2-1	E2-2	E2-3	Landers	kobe	chichi
最大位移/mm	LNB	-149.80	124.80	-91.60	-194.60	-75.90	-156.80
	CRB	84.70	96.20	78.20	156.90	-64.50	-102.50
残余位移/mm	LNB	79.10	55.70	11.90	-47.60	-6.00	-24.60
	CRB	11.00	3.40	0.26	0	2.00	5.10
墩底最大弯矩	LNB	12023.70	13497.60	13009.40	-13910.30	-11709.70	-14251.20
	CRB	6920.10	7339.80	7808.10	10760.40	-6660.40	7789.50
墩底最大屈服弯矩	LNB	0.69	0.78	0.75	0.80	0.67	0.82
	CRB	0.40	0.41	0.43	0.62	0.41	0.43
支座最大允许位移	LNB	2.20	1.79	1.32	2.82	1.11	2.27
	CRB	0.53	0.59	0.48	1.01	0.42	0.65

说明：表中正负号均表示方向。

6 结论

通过拟静力试验及有限元分析得出如下结论：

(1) 组合橡胶支座滞回曲线比较饱满且呈梭型，明显具有双线性，且水平等效刚度低于板式橡胶支座，但等效阻尼大，不易出现支座滑动和破坏。

(2) 橡胶料硬度对支座刚度影响较大，能够增强支座刚度，而增加剪应变幅值、滑动区刚度占比会降低支座的等效刚度，同时提高其等效阻尼比。

(3) 地震工况下，组合橡胶支座残余位移、最大位移及墩底弯矩均低于板式橡胶支座，且其耗能能力和位移能力均较强，具有良好减隔震效果。近断层中组合橡胶支座的减隔震性能仍高于板式橡胶支座。

可见，在中小跨径梁桥中，组合橡胶支座的减隔震性能良好，但其应用要考虑墩高、场地类别及桥台约束等工程条件。

参 考 文 献

- [1] 李悦, 李治, 李冲. 支座摩擦滑移和挡块力学性能退化影响下桥梁易损性研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53 (S2): 280-287.
- [2] 李建中, 汤虎. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震设计研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (11): 69-78.
- [3] 项长生, 赵竞. 不同阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (1): 102-110.
- [4] 林杰. 板式橡胶支座滑移对中小跨径公路梁桥地震响应的影响 [D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [5] 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.
- [6] 崔侠侠, 项乃亮, 李建中. X形钢挡块与混凝土挡块抗震性能对比分析 [C] // 第25届全国结构工程学术会议论文集 (第II册), 2016: 299-305.