

高烈度区简支梁桥新型复合减震支座及抗震性能研究

王剑明¹, 郭健¹, 伍大成²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室智能测控技术研究中心, 四川 成都 611430)

摘要:为提高传统高阻尼隔震橡胶(high-damping seismic isolation rubber, HDR)支座的减震性能及其在高烈度地震区简支梁桥中的适用性,基于减震棒与HDR支座的合理集成研发了一种新型复合减震支座,阐述了其结构构造与力学行为。该文以某具体规格产品为例,通过有限元数值模拟与试验研究对其竖向压缩性能与水平滞回性能进行了论证。然后以8度地震区某5~20 m混凝土简支梁桥为对象,采用SAP2000建立有限元模型,对其抗震性能进行了研究。结果表明:支座竖向压缩性能满足标准要求,水平滞回曲线较传统HDR支座饱满,有限元数值分析及试验结果均与理论骨架模型吻合较好。相比于HDR支座减震体系,采用复合减震支座后,桥墩内力响应有一定程度的增加,但仍在能力范围内,而桥梁梁端位移及墩-梁相对位移均显著降低,可有效避免落梁及相邻梁体碰撞等震害的发生。

关键词:高烈度区;简支梁桥;复合减震支座;抗震性能;滞回性能

中图分类号:U442.5⁺5; P315.9

文献标志码:A

Research on new composite seismic bearings and seismic performance of simply supported beam bridges in high intensity seismic zones

WANG Jianming¹, GUO Jian¹, WU Dacheng²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Deep Geotechnical Mechanics and Underground Engineering Intelligent Measurement and Control Technology Research Center, Chengdu 611430, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of traditional HDR (high-damping seismic isolation rubber bearings) bearings and their adaptability in simply supported beam bridges in high-intensity seismic zones, a new type of composite seismic bearing was developed based on the rational integration of steel bar dampers and HDR bearings, and its structural construction and mechanical behavior were described. Taking a specific specification product as an example, the vertical compression performance and horizontal hysteresis performance were demonstrated through finite element numerical simulation and experimental research. Then, a 5~20 m concrete simply supported beam bridge in an 8-degree seismic zone was taken as the object, and a finite element model was established using SAP2000 to study its seismic performance. The results showed that the vertical compression performance of the bearing met the standard requirements, and the horizontal hysteresis curve was more full than that of the HDR bearings. The finite element numerical analysis and experimental results were in good agreement with the theoretical skeleton model. Compared with the HDR bearings seismic system, the internal force response of the bridge pier increased to a certain extent after the use of the composite bearing, but it is still within the capacity range, and

收稿日期:2024-04-14; 修回日期:2024-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51178429)

作者简介:王剑明(1987—),男,博士研究生,主要从事桥梁抗震与防灾研究。E-mail:wangjm130@163.com

通信作者:郭健(1973—),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震与防灾研究。E-mail:guoj@swjtu.edu.cn

the displacement of the bridge beam end and the relative displacement of the pier-beam are significantly reduced, which can effectively avoid the occurrence of seismic damage such as beam-falling and collision of adjacent beams.

Key words: high intensity seismic zone; simply supported beam bridge; composite seismic bearing; seismic performance; hysteretic behavior

0 引言

我国西南山区公路交通网络的建设普遍面临着桥隧比高、抗震设防烈度高、地震灾害频发等问题与挑战^[1]。通过采用减隔震装置将桥梁结构与地面运动分离,实现结构抗震性能提升、损伤减小的减隔震技术已被认为是一种有效的抗震手段^[2-4]。

针对在交通网络中占据较高比例的中小跨径简支梁桥,目前普遍采用的是橡胶隔震技术,隔震装置主要包括板式橡胶支座、铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座^[5]。板式橡胶支座通常需结合如金属阻尼器、抗震挡块等措施才能达到理想的抗震效果^[6]。铅芯橡胶支座中的铅芯在低周疲劳作用下易发生剪切疲劳破坏,且其内部的铅芯将对环境造成比较严重的污染^[7]。相比而言,高阻尼橡胶支座因具备较高的阻尼比及良好的吸能能力,且不存在对环境的污染问题,而受到了广泛关注。QUAGLINI等^[8]与丁永刚等^[9]通过试验研究了高阻尼支座在压缩-剪切作用下的力学性能。沈朝勇等^[10]通过系列试验研究了温度、加载频率和老化等因素对高阻尼支座屈服强度、等效阻尼比和等效刚度等力学性能的影响,并提出了相应经验公式。OLIVETO等^[11]提出并验证了基于双向剪切作用下高阻尼支座的力学本构建模方法。逯宗典^[12]采用非线性时程分析方法探讨了基于高阻尼支座的PHC管桩桥梁抗震性能,获得了较好的减震效果。郑杰等^[13]、邵长江等^[14]结合实际桥梁工程研究表明,高阻尼支座具有良好的减震效果,但在高烈度区需进一步结合限位装置、阻尼器等以提升其耗能能力并有效控制位移。FANG等^[15]赞同前述观点,并提出了将形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)拉索与高阻尼支座集成的新型隔震支座,然后基于某高烈度地震区梁桥验证了其减震效果及限位能力。减震樨作为一种兼具减震耗能与限位功能的金属阻尼器,陈长征等^[16]与户东阳等^[17]以具体项目为依托,分别研究了其对高烈度地震区高速铁路简支梁桥与连续梁桥抗震性能的影响,结果表明单独使用减震支座不能满足设计要求,使用减震樨与减震支座组合后可达到预期的减震与限位效果。于伟栋等^[18]基于减震樨与摩擦摆支座的集成研发了一种新型减震装置,结合某铁路简支梁桥抗震性能分析表明其具有减震与限位双重控制作用。

为充分发挥减震樨与高阻尼支座各自的优势,本文提出了一种将减震樨与HDR支座相结合的新型复合减震支座,阐述了其结构构造与力学行为,并采用有限元数值模拟、试验研究等方法对其力学性能进行了研究论证,然后以西南8度地震区某高速公路5~20 m混凝土简支梁桥为对象,对其抗震性能进行了分析,以为类似工程项目抗震设防提供参考与借鉴。

1 新型复合减震支座及力学行为

1.1 支座结构构造

复合减震支座结构构造见图1,由减震樨与高阻尼隔震橡胶(high-damping seismic isolation rubber, HDR)支座两部分组成。其中,HDR支座由支座本体及与其相连的上、下连接板组成,支座本体为多层交错的高阻尼橡胶与薄层加劲钢板通过时间、温度和压力三要素特殊控制硫化而成,支座内部设有上下贯通的条形孔或圆形孔。

减震樨采用经特殊处理的钢材加工而成,为充分发挥材料特性,遵循尽可能长的部分共同屈服的原则进行设计,同时为避免完全遵循设计原则下悬臂端部直径过小的问题,采用球型加载段、直线过渡段和曲线等屈服强度段的组合式构造,见图2。根据平截面假定,其高度与行程之间的关系满足^[19]:

$$h = 0.56 \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{s_{\max}} \right)^{3/5} \left(\frac{Q}{\pi \sigma_y} \right)^{-1/5} \quad (1)$$

式中: h 为减震棒高度; Q 为减震棒受到的水平力; s_{max} 为减震棒的最大水平变形; ϵ_{max} 为减震棒元件表面最大应变; σ_y 为材料屈服应力。

减震棒布设于高阻尼支座内部,一端与高阻尼支座下连接板固定,另一端为自由端。

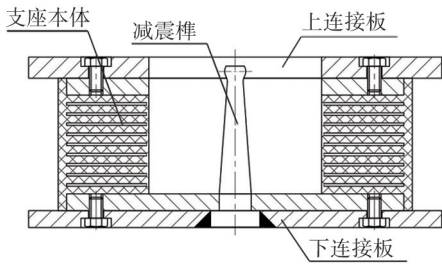


图 1 复合减震支座构造

Fig. 1 Structural diagram of composite seismic bearing

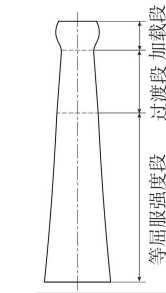


图 2 减震棒构造

Fig. 2 Structural diagram of steel bar damper

1.2 支座力学行为

复合减震支座的力学行为主要体现在 HDR 支座和减震棒两部分。为不显著增大支座初始刚度,确保结构在温度变化、收缩和徐变等作用下的变形顺利释放,减震棒与支座上连接板间设置一初始间隙 X_0 ,初始间隙 X_0 的大小原则上不小于结构在温度、收缩和徐变等因素作用下对支座变形释放的需求量。当支座剪切变形小于初始间隙 X_0 时,减震棒不发挥作用,支座力学行为与 HDR 支座一致;当支座剪切变形达到初始间隙 X_0 后,支座上连接板与减震棒端部相抵触,并促使减震棒开始发挥作用,此时支座力学行为表现为 HDR 支座与减震棒二者复合而成。初始间隙 X_0 也可根据实际需求沿水平各向特殊设定。

1)HDR 支座

HDR 支座的力学特性可采用等效双线性恢复力模型表示^[20],见图 3。图中, K_{1H} 为屈服前刚度; K_{2H} 为屈服后刚度; X_y 为屈服位移; Q_{yH} 为屈服力; K_{HH} 为等效刚度。

2)减震棒

减震棒的力学模型可等效为悬臂柱。其力学特性可采用双线性恢复力模型表示^[21],见图 4。图中, K_{1S} 为屈服前刚度; K_{2S} 为屈服后刚度; Q_{yS} 为屈服力; K_{HS} 为等效刚度; X_0 为支座上连接件与减震棒加载段的初始间隙。

因此,复合减震支座的力学特性由 HDR 支座和减震棒复合而成,见图 5。图中 K_H 为等效刚度。

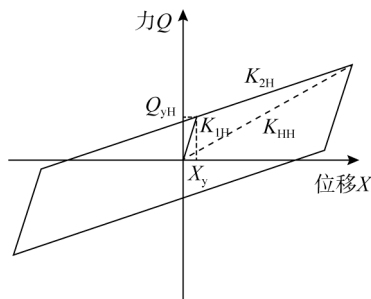


图 3 HDR 支座恢复力模型

Fig. 3 Restoring force model of HDR bearings

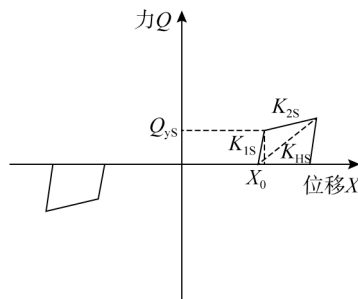


图 4 减震棒恢复力模型

Fig. 4 Restoring force model of steel bar damper

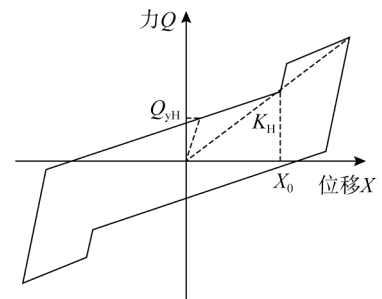


图 5 复合减震支座恢复力模型

Fig. 5 Restoring force model of composite seismic bearing

2 数值模拟与试验研究

以某简支梁桥实际采用的 d320×167G1.0 复合减震支座为原型进行设计,支座构造参数及力学参数分别见表 1、表 2,分别采用有限元数值分析及试验研究论证其力学行为。

表1 复合减震支座构造参数

Table 1 Construction parameters of composite seismic bearing

单元	名称	参数值
HDR 支座	支座总高度/mm	167.0
	支座本体高度/mm	127.0
	中间加劲钢板厚度/mm	3.0
	中间加劲钢板层数	9
	中间橡胶板厚度/mm	6.0
	中间橡胶板层数	10
	第一形状系数	17.9
	第二形状系数	4.9
	减震樺	加载段最大直径/mm
直线段最小直径/mm		18.0
等强段最小直径/mm		21.0
受载总长度/mm		117.0
直线段长度/mm		18.0
等强段长度/mm		83.0

表2 复合减震支座位学参数

Table 2 Mechanical parameters of composite seismic bearing

单元	名称	参数值
HDR 支座	剪切模量/MPa	1.00
	屈服力/kN	36.00
	屈服前刚度/(kN/mm)	5.70
	屈服后刚度/(kN/mm)	0.88
	水平等效刚度/(kN/mm)	1.17
减震樺	竖向压缩刚度/(kN/mm)	443.00
	初始间隙/mm	60.00
	屈服力/kN	12.70
	屈服前刚度/(kN/mm)	15.77
	屈服后刚度/(kN/mm)	0.65

2.1 数值模拟

采用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立支座的有限元模型。支座各部件采用实体单元建模,其中支座橡胶为高阻尼橡胶,采用 Mooney-Rivlin 模型并基于实测试验数据模拟其复杂的非线性应力-应变关系^[22];减震樺在基于原材料实测应力-应变关系后考虑弹塑性特性模拟;有限元模型见图 6。模型单元总计 13485 个,节点总计 37857 个,边界条件是:内部橡胶层与钢板间采用绑定约束,支座下连接板底部施加全自由度固结约束,支座竖向荷载与水平位移均施加于支座上连接板上,得到支座滞回曲线见图 7。

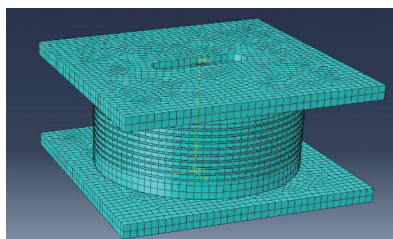


图6 支座有限元模型

Fig. 6 Finite element model of composite seismic bearing

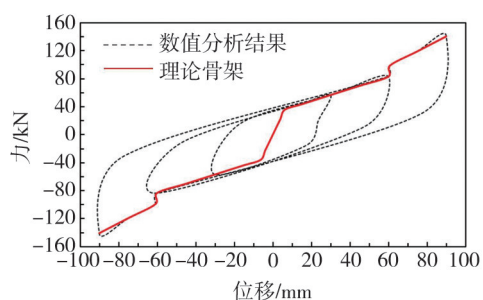


图7 支座滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of composite seismic bearing

由图 7 可知,有限元数值模拟分析结果与理论骨架高度吻合,数值分析计算可准确模拟新型复合减震支座的力学行为。

2.2 试验研究

限于篇幅,本文主要研究与支座承载及减震性能直接相关的竖向压缩性能及水平滞回性能,试验在四川交大工程检测咨询有限公司的 20000 kN 支座动静压剪试验机上进行。

2.2.1 竖向压缩性能试验

支座竖向压缩性能试验依据 JT/T 842^[20] 的规定进行,加载制度按 0- P_{\max} -0 的方式往复循环 3 次(P_{\max} 为最大设计压力),试验曲线见图 8,取第 3 次循环时的竖向压力与变形并按式(2)计算竖向压缩刚度,得

$$K_v = \frac{P_2 - P_1}{Y_2 - Y_1} \quad (2)$$

式中: K_v 为竖向压缩刚度; P_1 、 P_2 分别为第 3 次循环加载时 1.5 MPa 与 6 MPa 应力下对应的压力值; Y_1 、 Y_2 分别为 P_1 、 P_2 压力下对应的支座竖向压缩变形量。

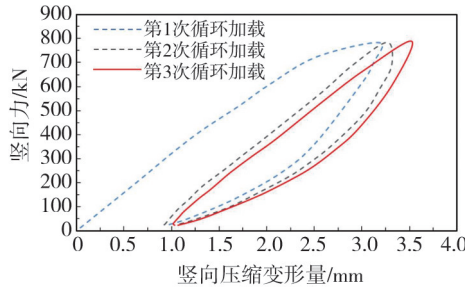


图 8 支座竖向压缩曲线

Fig.8 Vertical compression curves of composite seismic bearing

试验结果见表 3。由试验结果并经式(2)简单计算可知,增加了减震樨的复合减震支座竖向压缩刚度试验值为 392.75 kN/mm,与理论设计值(HDR 高阻尼支座标准值) 443.00 kN/mm 的偏差较小,为 -11.34%,满足标准竖向压缩刚度容许偏差±30%的要求。

2.2.2 水平滞回性能试验

支座水平滞回性能试验加载制度依据 JT/T 842^[20] 的规定进行,采用 3 次循环加载方式。试验位移是:±90 mm(对应剪应变 $\gamma = \pm 150\%$),并以未加减震樨的传统 HDR 支座的滞回曲线作对比研究,试验结果见图 9。

由水平滞回性能试验结果可知,复合减震支座滞回曲线饱满,与理论骨架模型拟合度较高,验证了理论模型的可靠性。同时,与未加减震樨的传统 HDR 支座相比,复合减震支座滞回曲线更加饱满,表现出了较高的耗能能力。

表 3 复合减震支座竖向压缩试验结果

Table 3 Vertical compression test results of composite seismic bearing

指标	P_1 /kN	P_2 /kN	Y_1 /mm	Y_2 /mm
试验值	106.43	424.56	1.41	2.22

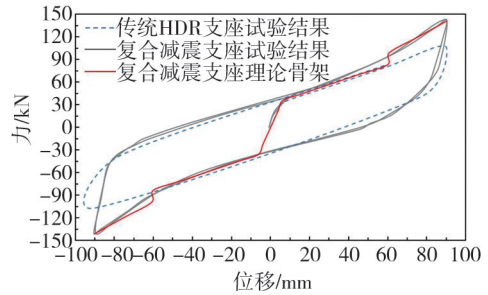


图 9 支座水平滞回试验曲线

Fig.9 Horizontal hysteresis test curves of composite seismic bearing

3 抗震性能研究

3.1 桥梁工程概况

选取我国西部某高速公路工程的一联简支梁桥为研究对象,其跨径布置为 5×20 m 预应力(后张)混凝土简支小箱梁,桥面连续。其抗震设防烈为 8 度,Ⅲ类场地,基本地震动峰值加速度为 0.3 g。桥梁构造见图 10,桥面总宽 12.6 m,由 4 片标准跨度小箱梁构成,单片小箱梁高 1.3 m,采用 C40 混凝土;下部采用钢筋混凝土双柱式墩,墩身直径 1.6 m,墩柱下分别接钻孔灌注桩基础,桩身直径 1.8 m,桩基长度: 15 m(桥台处),20 m(桥墩处)。两墩柱顶部设有盖梁,盖梁断面尺寸为 1.1 m(宽)×1.7 m(高),盖梁长 11.8 m;墩柱底部通过横向系梁连接,系梁尺寸为 1.3 m(宽)×1.5 m(高),墩柱及桩基均采用 C35 混凝土,HRB335 钢筋(图 10 未示出)。主梁与桥台及墩柱均通过支座连接,桥台与主梁之间设置 80 型伸缩装置。

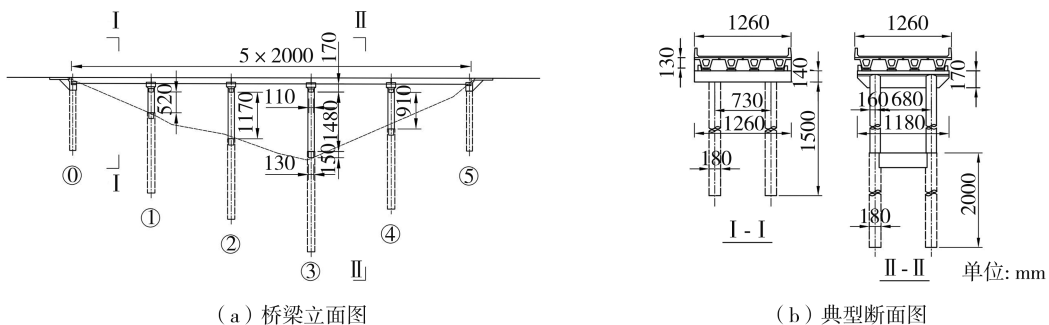


图 10 桥梁总体布置图

Fig.10 Overall layout of bridge

3.2 有限元模型

采用通用分析软件 SAP2000 建立有限元模型, 见图 11。其中主梁及盖梁均采用空间线弹性梁柱单元进行模拟, 考虑强地震作用下墩柱因承受较大弯矩而屈服的可能, 采用基于柔度法的非线性纤维单元来模拟墩柱, 采用 Mander 模型定义墩柱混凝土的应力-应变本构关系, 采用双折线模型定义钢筋纤维的应力-应变本构关系。模拟时暂不考虑桩土效应, 墩底全部按固结处理。为论证复合减震支座的抗震性能, 采用如下 2 种体系进行分析:

1) 体系 1(传统 HDR 支座减震体系): 两端桥台处布置四氟滑板活动支座, 中间各墩顶均布置传统 HDR 支座, 支座位学性能参数同表 2 中 HDR 支座参数。

2) 体系 2(新型复合减震支座减震体系): 两端桥台处布置四氟滑板活动支座, 中间各墩顶均布置新型复合减震支座, 复合减震支座位学性能参数见表 2。

有限元模型中, HDR 支座及减震樯均采用双折线单元模拟其非线性行为。桥台处四氟滑板活动支座采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟。

分析所选用地震波来自本项目地震安评报告中实测的 3 组数据, 地震波反应谱与规范反应谱拟合曲线见图 12, 结果取 3 组地震波数据下计算结果的最大值。

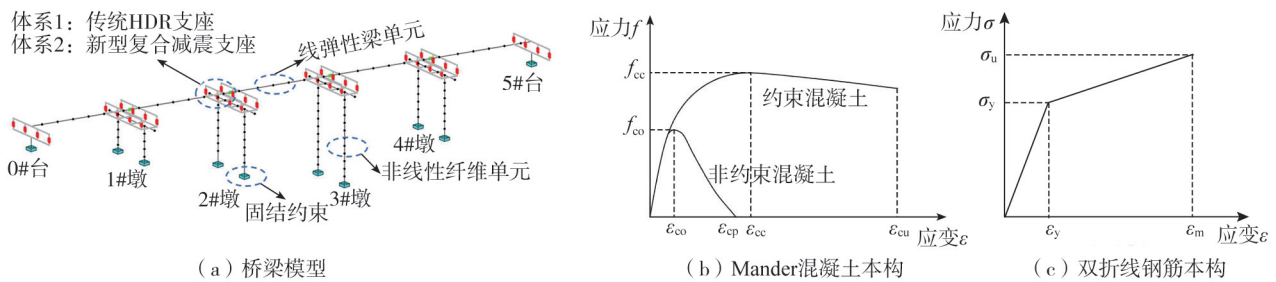


图 11 有限元分析模型

Fig. 11 Finite element analysis model

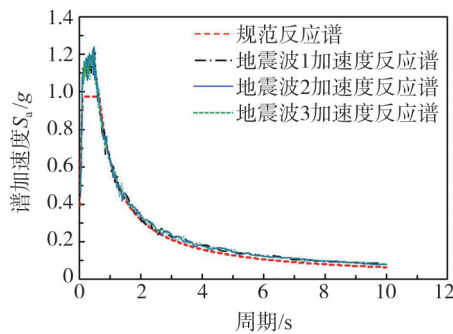


图 12 地震波反应谱与规范反应谱拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves between seismic wave response spectrum and standard response spectrum

3.3 非线性时程响应分析

在 2 种体系下时程分析结果分别见表 4~表 6。由表 4 可知, 在体系 2 情况下梁端最大位移较体系 1 小, 降幅 30% 以上; 但墩顶位移较体系 1 大, 增幅约 182%, 这是由于在体系 2 下, 当支座变形达到减震樯初始间隙后, 减震樯开始发挥作用, 并贡献了一定刚度。此时, 支座整体刚度增大, 为高阻尼支座与减震樯复合而成, 使得结构体系纵向约束增大, 因此梁端位移显著减小。但由于支座整体刚度较大, 传递到下部墩顶的水平地震力也增大, 因此, 墩顶位移随之增大, 但墩-梁相对位移仍得到显著降低。

表 4 顺桥向最大位移

Table 4 The maximum displacement of bridge longitudinal direction

体系	位置	位移/mm	体系	位置	位移/mm
体系 1	梁端	175.5	体系 2	梁端	120.8
	墩顶	15.8		墩顶	44.5

表5 墩底弯矩值

Table 5 Moment force at the bottom of piers kN·m

体系	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
体系1	4660.9	6568.3	5895.6	6109.3
体系2	16428.8	7189.6	5985.0	9889.4

表6 墩底剪力值

Table 6 Shear force at the bottom of piers kN

体系	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
体系1	684.7	500.6	381.1	576.2
体系2	2413.2	581.5	406.4	952.7

由表5、表6的墩底弯矩、剪力值分析结果可知,在体系2下,墩底弯矩及剪力值均大于体系1,但仍在能力范围之内。这是由于在体系2下,桥梁纵向约束体系刚度整体增大,致使传递到下部结构的地震力增大,因而墩底弯矩、剪力值均有一定幅度增大。在实际抗震设计中,需综合考虑墩-梁相对位移的减小与墩底弯矩、剪力的增大对结构的影响,而进行优化设计。

4 结论

本文在充分发挥减震樨与HDR支座各自优势的基础上设计了一种新型复合减震支座,通过理论分析、数值模拟与试验研究对新型复合减震支座的力学行为与性能进行了验证,并结合某高烈度区简支梁桥对其抗震性能进行了研究,得到如下结论:

1) 新型复合减震支座由减震樨与HDR支座组合而成,其竖向压缩性能由HDR支座决定,水平力学行为由减震樨与HDR支座共同决定。

2) 建立的复合减震支座有限元模型可准确模拟支座的力学行为,与理论骨架高度吻合。

3) 试验研究表明,支座竖向压缩刚度较传统高阻尼支座略低,但仍符合规范要求;水平滞回曲线较传统HD支座更饱满,试验结果与理论骨架符合较好。

4) 通过对高烈度区简支梁桥抗震性能研究表明,采用新型复合减震支座体系后,墩底弯矩、剪力值会有一定程度的增大,但均在能力范围内。同时,墩-梁相对位移得到了显著降低,可有效避免地震下落梁等事故的发生。实际抗震设计中,还需综合权衡墩-梁相对位移减小与墩底弯矩、剪力增加这两方面的因素。

文中所选支座参数仅在中小跨径简支梁桥抗震性能提升上具有参考意义。而对不同支座参数,以及不同桥型下的地震响应与优化设计有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 刘万春,何畅. 减隔震技术在四川高烈度地区桥梁上的应用研究[J]. 公路, 2023, 68(9): 229-231.
LIU Wanchun, HE Chang. Application research of seismic isolation technology on bridges in high-intensity areas of Sichuan Province [J]. Highway, 2023, 68(9): 229-231. (in Chinese)
- [2] 石岩,王东升,韩建平,等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 118-128.
SHI Yan, WANG Dongsheng, HAN Jianping, et al. Application status of seismic isolation for bridges and its development tendency [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 118-128. (in Chinese)
- [3] 高健峰,李建中,方志伟. 不同减隔震支座对跨断层桥梁地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 48-59.
GAO Jianfeng, LI Jianzhong, FANG Zhiwei. Effects of different seismic mitigation or isolation bearings on seismic responses of bridges crossing fault-rupture zones [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(4): 48-59. (in Chinese)
- [4] SHARABASHA M, ANDRAWES B O. Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 607-616.
- [5] 薛素铎,高佳玉,姜春环,等. 高阻尼隔震橡胶支座力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(21): 71-75.
XUE Suduo, GAO Jiayu, JIANG Chunhuan, et al. Experimental research on mechanical performance of high damping isolation rubber bearings [J]. Building Structure, 2020, 50(21): 71-75. (in Chinese)
- [6] 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): 35-43.
LI Jianzhong, TANG Hu, GUAN Zhongguo. A new isolation system for small and medium span bridges on elastomeric pad bearings [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 35-43. (in Chinese)
- [7] 袁涌,朱宏平,资道铭. 高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及隔震效果研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(3): 16-20.
YUAN Yong, ZHU Hongping, ZI Daoming. Experimental study on characteristics and isolator effect of high-damping rubber bearing [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(3): 16-20. (in Chinese)
- [8] QUAGLINI V, DUBINI P, VAZZANA G. Experimental assessment of high damping rubber under combined compression and shear [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2016, 138(1): 011002.

- [9] 丁永刚, 李政, 王建强. 高阻尼橡胶支座压缩-水平双向剪切作用下力学性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(4): 128-132, 159.
DING Yonggang, LI Zheng, WANG Jianqiang. Experimental study on mechanical properties of high damping rubber bearing under compression-bilateral shear loading[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(4): 128-132, 159. (in Chinese)
- [10] 沈朝勇, 周福霖, 崔杰, 等. 高阻尼隔震橡胶支座的相关性试验研究及其参数取值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 95-103.
SHEN Chaoyong, ZHOU Fulin, CUI Jie, et al. Dependency test research of mechanical performance of HDR and its parametric value analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(6): 95-103. (in Chinese)
- [11] OLIVETO N D, MARKOU A A, ATHANASIOU A. Modeling of high damping rubber bearings under bidirectional shear loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 118: 179-190.
- [12] 逯宗典. 采用高阻尼支座的PHC管桩桥梁抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2021, 37(3): 58-62.
LU Zongdian. Seismic performance analysis of PHC pipe pile bridge with high damping bearing[J]. Structural Engineers, 2021, 37(3): 58-62. (in Chinese)
- [13] 郑杰, 顾冉星, 贾俊峰, 等. 高阻尼橡胶隔震支座力学性能研究及其桥梁工程应用进展[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(2): 1-15.
ZHENG Jie, GU Ranxing, JIA Junfeng, et al. Mechanical properties of high damping rubber isolation bearings and its application in bridge engineering[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, 24(2): 1-15. (in Chinese)
- [14] 邵长江, 房麟, 钱永久. 基于高阻尼橡胶支座的混凝土连续梁桥减隔震性能[J]. 公路交通科技, 2015, 32(10): 57-61.
SHAO Changjiang, FANG Lin, QIAN Yongjiu. Seismic isolation performance of concrete continuous girder bridge based on high damping rubber bearings[J]. Highway Transportation Technology, 2015, 32(10): 57-61. (in Chinese)
- [15] FANG C, LIANG D, ZHENG Y, et al. Seismic performance of bridges with novel SMA cable-restrained high damping rubber bearings against near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(1): 44-65.
- [16] 陈长征, 户东阳, 李聪林, 等. 九度地震区近断层高速铁路简支梁桥新型减震榫结构设计及减震性能研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(12): 47-52.
CHEN Changzheng, HU Dongyang, LI Conglin, et al. Structure design and seismic mitigation performance study of shock absorber for near-fault high-speed railway simply-supported beam bridge in nine degree seismic zone[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(12): 47-52. (in Chinese)
- [17] 户东阳, 李聪林, 陈克坚, 等. 减震榫在高烈度地震区高速铁路连续梁桥中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2255-2263.
HU Dongyang, LI Conglin, CHEN Kejian, et al. Research on application of damping tenon in high-speed railway continuous beam bridges in high-intensity seismic area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2255-2263. (in Chinese)
- [18] 于伟栋, 张永亮, 吴延伟, 等. 考虑同球向双球面支座阻尼间隙的简支梁桥减隔震性能分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2240-2247.
YU Weidong, ZHANG Yongliang, WU Yanwei, et al. Analysis of the influence of damping gap of the same spherical direction double spherical surface seismic mitigation and isolation bearing on seismic isolation performance[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2240-2247. (in Chinese)
- [19] 高昊, 王君杰, 王剑明. 柱形和E形钢阻尼装置比较及试验分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(3): 122-133.
GAO Hao, WANG Junjie, WANG Jianming. Experiment research on cylindrical and E-shaped steeldamping device[J]. Structural Engineers, 2020, 36(3): 122-133. (in Chinese)
- [20] JT/T 842—2012 公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
JT/T 842—2012 High damping seismic isolation rubber bearings for highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [21] T/CECS 1015—2022 桥梁组合型减隔震装置应用技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
T/CECS 1015—2022 Technical specification for application of combined seismic isolation devices of bridges[S]. Beijing: China Planning Press, 2022. (in Chinese)
- [22] 韩斌慧. 基于Mooney-Rivlin模型的橡胶材料常数实测及应用研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65(5): 499-503.
HAN Binhui. Measurement and application of rubber material constant based on mooney-rivlin model[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(5): 499-503. (in Chinese)