

高烈度区铁路桥梁位移型和速度型阻尼器减震对比研究

庞 林，刘力维，董 俊，曾永平

(中铁二院工程集团有限责任公司，成都 610031)

摘要：以川藏铁路雅拉河大桥为研究对象，研究近断层高地震烈度区合理抗震措施。以墩梁连接构造位移为控制指标，比选不同吨位等级的速度型和位移型阻尼器，初步拟定阻尼器合理力学性能参数。通过对比不同减隔震方案桥墩、桩基、连接构造和主梁性能指标，得出合理减隔震方案。研究表明：同等吨位的速度型阻尼器对连接构造限位和对结构内力响应的减震效果均较好；横桥向阻尼器速度响应低于顺桥向，同时 120 t 屈服力的位移型阻尼器取得了与 100 t 阻尼力设计值的速度型阻尼器相近的减隔震效果。

关键词：近断层；高地震烈度区；速度型阻尼器；位移型阻尼器；减隔震措施

中图分类号：U442.55 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-1807(2021)04-0331-06

川藏铁路拟建的雅拉河大桥桥址区位于康定市雅拉乡，临近雅拉河断裂、鲜水河断裂带的几个段落，其中雅拉河段、色拉哈段和磨西段的离逝时间已接近重复间隔，未来存在发生特征地震的危险，工程场地地震危险性主要为近场大震。根据地震安评报告，该地区属于 9 度地震区，二类场地，场地特征周期 0.5 s，罕遇地震峰值加速度达 0.918g，安评地震记录包含显著的速度脉冲效应，其 PGV/PGA 达 2.5，应考虑近场地震影响，竖向地震动加速度峰值取水平地震动加速度峰值的 1.0 倍。

当前应用于桥梁结构的耗能减震装置主要包括两大类，以黏滞阻尼器、电涡流阻尼器^[1-6]等为代表的速度型阻尼器和以软钢金属减震卡榫、记忆合金阻尼器等^[7-12]为代表的位移型阻尼器。桥梁用各类阻尼器如图 1 所示。

1 工程概况及动力分析模型

雅拉河大桥初步设计方案采用 11×32 m+4×26 m 结合梁简支梁桥，其中 1#~9# 桥墩之间为双线桥，9#~14# 桥墩之间为双线+单线桥。采用 Engineer's Studio(ES)建立弹塑性纤维截面模型模拟桥墩潜在塑性铰区真实变形曲率关系，以及结构损伤后刚度退化、连接构造非线性对整体结构地震响应的影响。

双线 32 m 跨结合梁自重约 453 t，二期恒载双线 200 kN/m，单线 100 kN/m，车辆荷载为 ZKH 荷载，曲线段设计车速 120 km/h，曲率半径 800 m。

桥墩、桩基础混凝土采用 C35，结合梁混凝土采用 C50 混凝土，钢材 Q420，纵筋 HRB500。墩高 15 m 以上采用空心墩，15 m 及以下采用实心墩。分析模型如图 2 所示，安评地震动反应谱如图 3 所示。

2 减隔震措施方案初选

该桥址场地波罕遇地震最大加速度峰值为 0.92g，PGV/PGA 达 2.5，具有显著脉冲特性，连接构造位移难以控制。为此比选表 1 所述的两种不同类型的阻尼器方案，包括速度型阻尼器和位移型阻尼器，并与摩擦摆支座形成组合减隔震体系。摩擦摆减隔震支座采用恢复力模型，初始刚度 120 000 kN/m，屈后刚度为 2 485 kN/m，初始屈服位移为 2.61 mm。位移型阻尼器初始屈服位移取 30 mm。

表 1 减隔震设计方案

方案名称	阻尼器参数	备注
速度型 1	双(单)线 200 t(200 t)	$C=2\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.5}$
速度型 2	双(单)线 200 t(100 t)	$C_{\text{双}}=2\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.3}$ $C_{\text{单}}=1\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.3}$
速度型 3	双(单)线 100 t(50 t)	$C_{\text{双}}=1\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.3}$ $C_{\text{单}}=500\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.3}$
位移型 1	双(单)线 62 t(31 t)	极限承载力 110 t(54 t)
位移型 2	双(单)线 80 t(40 t)	极限承载力 140 t(70 t)
位移型 3	双(单)线 120 t(60 t)	极限承载力 200 t(100 t)
位移型 4	双(单)线 120 t(60 t)	极限承载力 300 t(150 t)

注：阻尼器参数表示双(单)线梁每个支座设置的速度型阻尼器阻尼系数或位移型阻尼器屈服力。

收稿日期：2020-11-12

基金项目：四川省重点研发项目(2019YFG0460, 2019YFG0048)。

作者简介：庞林(1989—)，男，河北邯郸人，中铁二院工程集团有限责任公司，高级工程师，博士，研究方向为桥梁抗震。

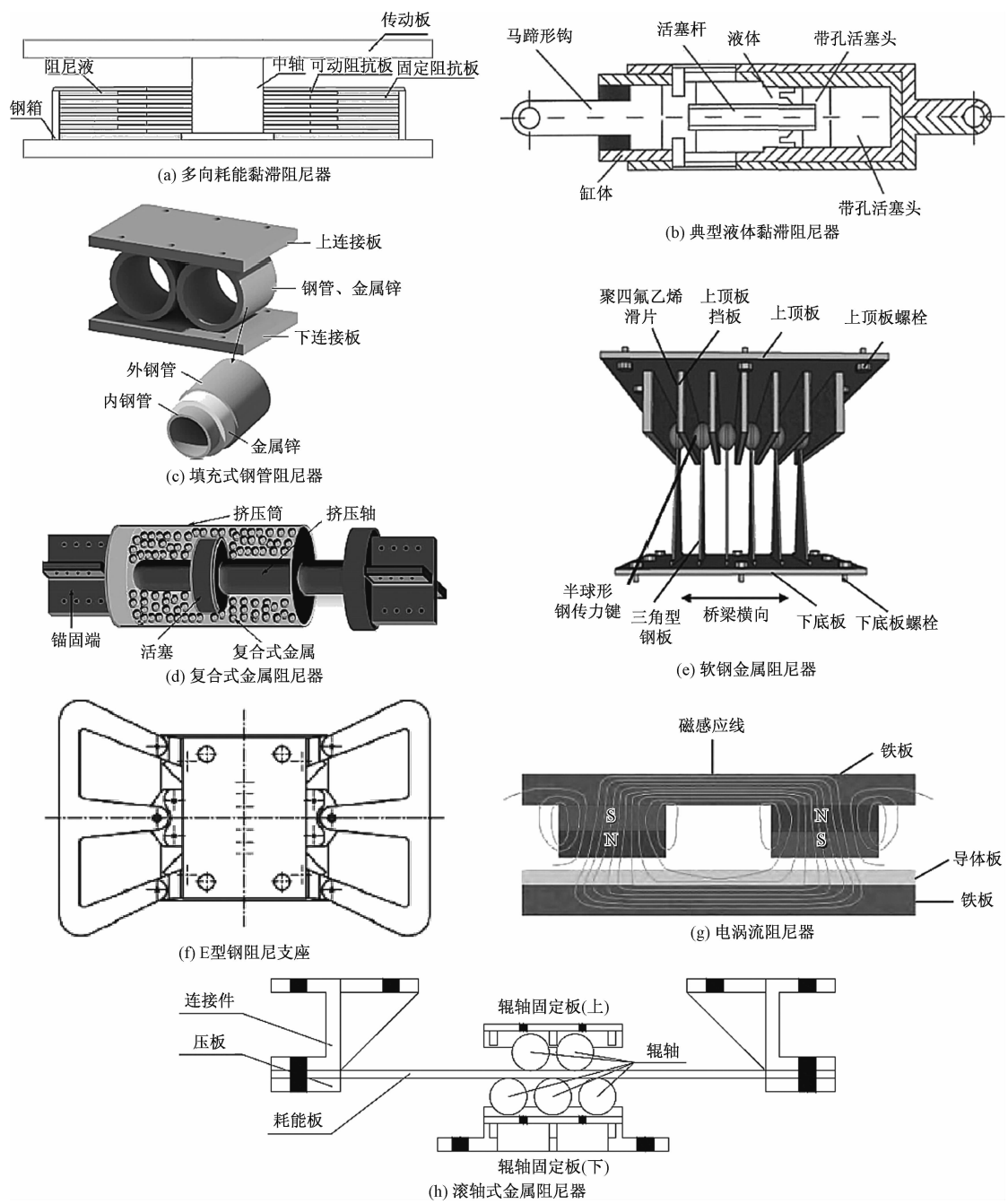


图 1 桥梁用各类阻尼器

罕遇地震不同减震限位方案连接构造位移(顺桥向)如图 4 所示,计算表明:

1)速度型 1~3 方案采用黏滞阻尼器,基准方案中每个支座布置一组长短向 200 t 阻尼器,连接构造最大位移为 260 mm。经优化设计后的设计方案,每个双线梁支座布置一组长短向 100 t 阻尼器,每个单线梁支座布置一组长短向 50 t 阻尼器,可将连接构造最大位移控制在 300 mm 以内,最大位移为 292 mm。

2)位移型 1~4 方案采用金属阻尼器方案。其初始屈服力由 62 t 增加至 80 t,再增加至 120 t 时,

连接构造最大位移由 543 mm 降低至 367 mm,再降低至 291 mm。连接构造位移逐步被控制在设计 300 mm 位移限值内。位移型 4 方案给出了将位移型阻尼器极限承载力由 200 t 增加至 300 t 时,最大位移可进一步减小至 242 mm。

为此,选用速度型阻尼器方案 3 和位移型阻尼器方案 3 的力学性能参数,并基于罕遇地震下隔震桥梁保持基本弹性的设计原则,重新调整桥墩截面和配筋后进行综合比选分析。速度型阻尼器分别按照黏滞阻尼器和电涡流阻尼器设计。位移型阻尼器按照董俊等^[13]提出耗能防落梁设计。

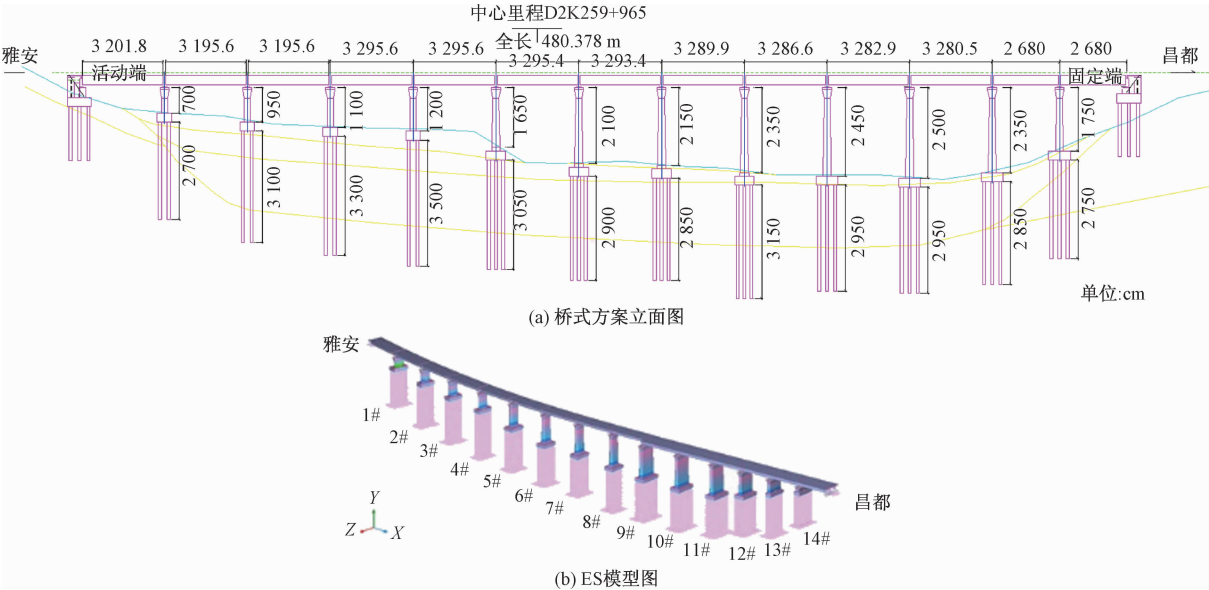


图 2 分析模型

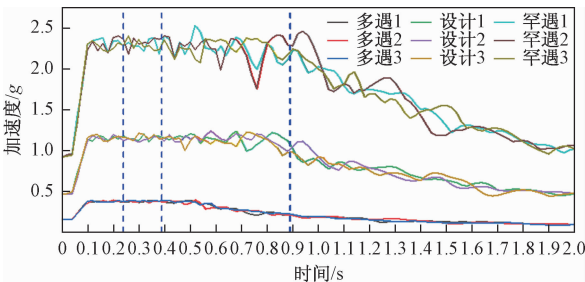


图 3 安评报告输入地震动加速度反应谱

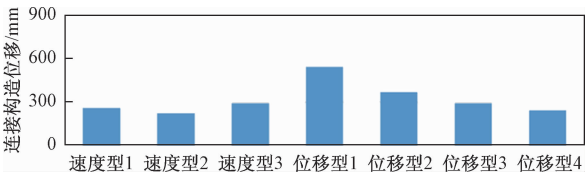


图 4 不同减震限位方案位移

3 减隔震方案综合比选

3.1 桥墩抗震性能

对比不同减隔震方案墩底弯矩最大值如图 5 所示,可以看出各方案墩底内力基本接近,偏差约 10%。为考虑桥墩动轴力的影响,将各方案共计 12 050 个轴力-弯矩桥墩内力时程点与等效屈服 $P-M$ (轴力-弯矩) 曲线绘制在图 6 上。墩柱的承载力受弱轴控制,桥墩地震内力时程点绝大多数落在等效屈服弯矩的屈服面内与面上,仅有个别点落在屈服面之外。若再考虑一定的安全系数,以响应较大的实心墩(4#墩)以及空心墩(10#墩)为例,将 4#墩纵筋配筋率自 0.9%调整至 1.3%,10#墩纵筋

配筋率自 1.8%调整至 2.2%后,所有地震响应均包络在等效屈服弯矩的屈服面内。

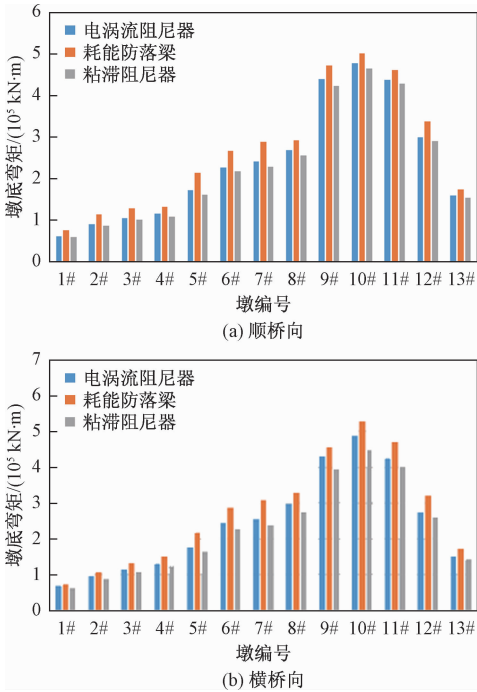


图 5 墩底内力比较

3.2 桩基抗震性能

对比不同减隔震方案桩顶最大轴拉力,如图 7 所示,可以看出各方案桩基内力基本接近,偏差约 15%左右。在 3 种减隔震方案中,个别边缘位置的桩基地震响应超过了等效屈服弯矩屈服面,损伤模式为拉弯损伤。将部分超限的桩基配筋率由 2.2%调增至 3%后,重新验算。如图 8 所示,桩基的地震

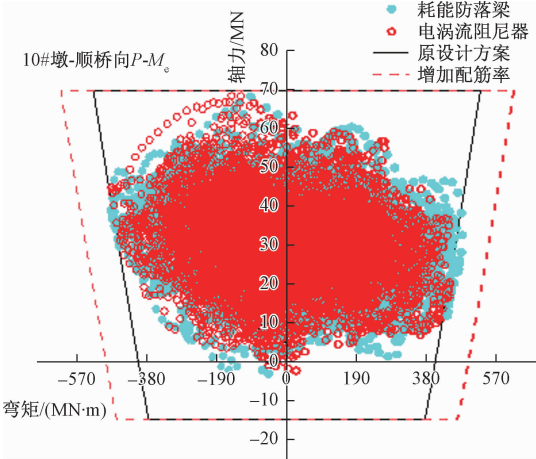


图 6 桥墩等效屈服弯矩验算

响应均在等效屈服弯矩的屈服面内,满足了罕遇地震基本弹性的性能要求。

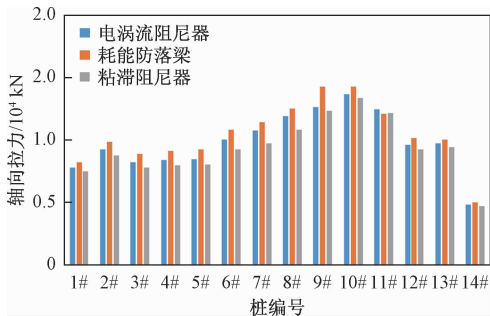


图 7 桩顶轴向拉力比较

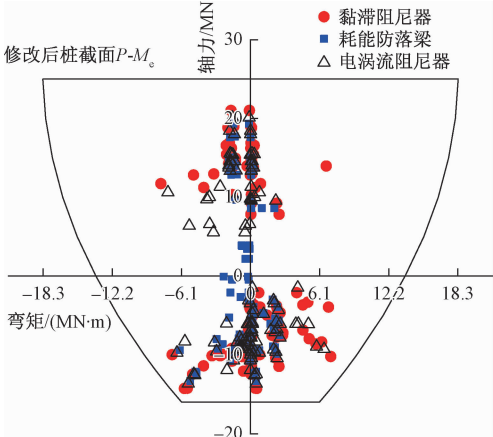


图 8 桩基等效屈服弯矩验算

3.3 连接构造位移

罕遇地震作用下黏滞阻尼器、耗能防落梁和电涡流阻尼器方案最大连接构造最大位移均发生在顺桥向,分别为 318、382、312 mm。横桥向位移较小,分别为 282、268、232 mm,如图 9 所示。

3.4 结合梁抗震性能

用罕遇地震工况下的弯矩 $1.35 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 除以主力工况下的弯矩 $0.79 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$,比值为 1.71,用 Q420 工字钢罕遇地震容许应力 420 MPa 除以主力作用容许应力 250 MPa,比值为 1.68,说明在近场地震分量较大的情况下(加速度峰值 0.92g,与水平比值为 1.0),罕遇地震工况相较于主

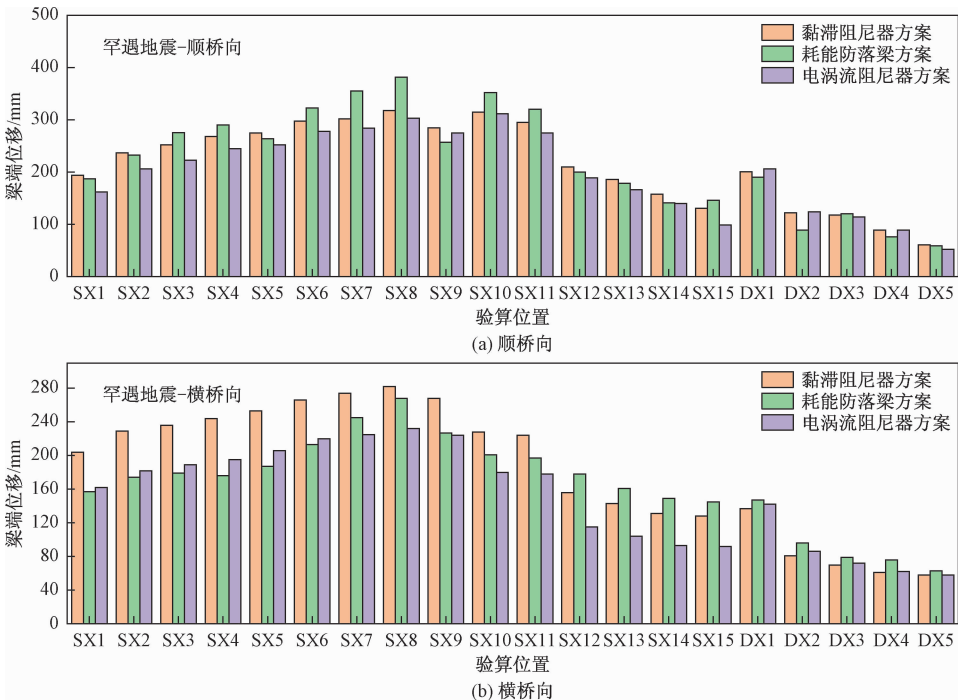


图 9 墩梁连接构造位移

力工况可能更控制设计,但相差不大可按照主力进行初步设计。

结合梁按基本弹性设计,分析表明跨中弯矩由一阶竖弯控制。主梁一阶竖弯周期为 0.32 s,处于加速度反应谱平台段,查询安评人工波反应谱谱值,对应的动力放大系数为 2.5 左右。按反应谱法计算主梁自重与地震响应线性叠加的竖向加速度为 3.3g(自重 1g+动力 $2.5 \times 0.92g$),不考虑水平地震对主梁弯矩的耦合,仅考虑竖向地震作用下,按照均布力计算的跨中弯矩为 $1.44 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与有限元时程分析结果 $1.35 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$,仅偏大 6.73%。将扣除自重的动力时程结果与自重工况计算的罕遇跨中弯矩相比,绘制获得的动力系数时程,如图 10 所示,罕遇地震动的动力放大系数最大为 2.20,与理论分析相接近。

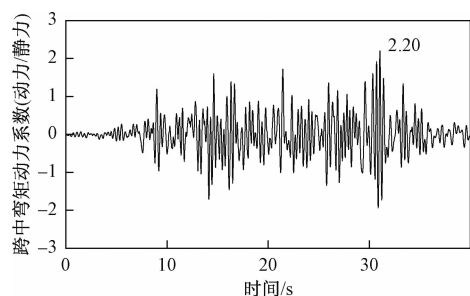


图 10 跨中弯矩动力系数时程

4 结论

以川藏铁路雅拉河大桥为研究对象,比选采用不同类型阻尼器(速度型和位移型)的在近断层高地震烈度区铁路桥梁抗震设计中的适用性,研究表明:

1)雅拉河大桥双(单)线采用 100 t 的速度型阻尼器或 120 t 的位移型阻尼器方案均能满足川藏铁路桥梁抗震设计关于“罕遇地震结构保持基本弹性的设计要求”,连接构造相对位移能够控制在 400 mm 以内。其中 15 m 以上桥墩采用空心墩,最大配筋率 2.2%,15 m 以下桥墩为实心墩,最大配筋率 1.3%。桩基直径 1.5 m,最大配筋率 3%。按照正常使用进行结合梁的初步设计基本可满足罕遇地震工况的抗震需求,结合梁工字钢最大应力 402.4 MPa,混凝土最大应力 17.7 MPa。

2)黏滞阻尼器耐久性问题较为突出,应用在环

境复杂艰险、维护检修困难的川藏线上存在一定问题;同参数的电涡流阻尼器的耗能限位效果整体与黏滞阻尼器相当,在功能上能够代替黏滞阻尼器;耗能防落梁方案与电涡流阻尼器方案相比,经济性突出,参数设计灵活。除顺桥向外电涡流阻尼器方案对连接构造位移控制的效果更为优异,横桥向连接构造位移的控制水平相当,桩基、墩和梁内力控制基本一致。

综合考虑减隔震性能与经济性,横桥向采用耗能防落梁方案,顺桥向采用电涡流阻尼器效果更佳。

参考文献

- [1] 周友权. 液体黏滞阻尼器与双曲面球形减隔震支座联合应用研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(6): 82—88.
- [2] 周良成, 徐秀丽, 周绪旭, 等. 兼具抗冲击与多向耗能功能的阻尼器力学性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 312—317, 384.
- [3] 宋子威, 蔡小培. 粘滞性阻尼器在高速铁路长联大跨连续梁中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1102—1105.
- [4] 聂健行, 孙伟帅. 粘滞阻尼器与摩擦摆减隔震支座耦合抗震分析[J]. 工程建设, 2017, 49(1): 9—13.
- [5] 陈政清, 田静莹, 黄智文, 等. 板式电涡流阻尼系数的计算与试验修正方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 46—53.
- [6] 陈政清, 黄智文, 王建辉, 等. 桥梁用 TMD 的基本要求与电涡流 TMD[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(8): 6—10.
- [7] 赵玉坤, 韩强, 王雪剑, 等. 填充式钢管阻尼器性能及在桥梁横向减震中的应用[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 90—100.
- [8] 闫维明, 李勇, 陈彦江, 等. 新型复合式金属阻尼器在桥梁减震控制中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1167—1173.
- [9] 唐显鹏, 孟庆利, 冯浩. SMA 金属橡胶阻尼器的减振性能及其在防高墩桥梁地震碰撞中的应用[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31(3): 59—62, 101.
- [10] 沈星, 倪晓博, 叶爱君. 桥梁新型横向金属阻尼器研究[J]. 振动与冲击, 2014(21): 96—101.
- [11] 刘军, 宁响亮, 李文斌, 等. 弹塑性钢阻尼元件在桥梁减震中的应用[J]. 铁道建筑, 2012(2): 22—24.
- [12] 邓开来, 潘鹏, 陈浩文, 等. 滚轴式金属屈服耗能阻尼器数值模拟研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 110—116.
- [13] 董俊, 曾永平, 陈克坚, 等. 一种耗能防落梁装置的连接结构: CN210104545U[P]. 2019-05-31.

Studies on Seismic Behavior Comparison of Displacement-based and Velocity-based Dampers for Railway Bridge in High Intensity Zone

PANG Lin, LIU Li-wei, DONG Jun, ZENG Yong-ping

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking the Yarra River Bridge of Sichuan-Tibet Railway as the research object, reasonable seismic fortification measures for high-seismic near faults zone is studied. Using the relative displacement of the pier-beam as the control index, the velocity-based and displacement-based damper measures of different tonnage levels are compared, and appropriate mechanical parameters of the damper are preliminarily formulated. Furthermore, through comparing the performance indexes of bridge piers, pile foundations, bearings and main beams in the case of different seismic isolation schemes, a reasonable seismic isolation scheme is obtained. The research shows that: The velocity-based dampers with the same tonnage have better performance both in displacement limiting and internal force isolation. The velocity response of the damper in transverse bridge directions is lower than that of longitudinal direction. And, the 120 t yield force displacement-based damper has achieved the same seismic isolation effect as the velocity-based damper with the 100 t damping force.

Key words: near-fault; high seismic intensity zone; velocity-based dampers; displacement-based damper; seismic isolation measure