

新型带缝剪切耗能阻尼器的抗震性能研究

陆建利

中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610032

摘要: 随着我国高速铁路向高烈度地震区延伸, 传统桥梁抗震设计面临强震下失效风险高、修复困难等瓶颈。本文基于剪切变形与弯剪耦合耗能机制, 提出一种模块化开缝钢板阻尼器, 通过理论推导建立其刚度与承载力解析模型, 并结合精细化有限元模拟验证滞回性能, 挑选了几条地震波采用非线性时程分析方法分析验证了其在地震能量耗散与结构响应控制中的有效性。本文研究成果可为高烈度地震区高铁桥梁的抗震设计提供理论支撑与技术参考, 具有显著工程应用价值。

关键词: 高速铁路桥梁; 带缝剪切阻尼器; 抗震性能

1 引言

21 世纪以来, 中国高速铁路网络规模持续领跑全球, 并加速向地形复杂、地震频发的西部地区延伸。截至 2023 年, 国家《中长期铁路网规划》提出的“八纵八横”主通道已完成 80% 建设目标, 高铁已成为推动区域经济均衡发展、提升居民出行效率的核心基础设施。然而, 西南地区地处欧亚板块地震活跃带, 近断层地震动特性显著, 对高铁桥梁抗震性能提出严峻挑战。据统计, 我国高铁线路中桥梁占比高达 60%-80%^[1], 其抗震安全直接关乎行车平稳性与灾后快速恢复能力。因此, 研发适用于高烈度地震区高铁轨道-桥梁系统的新型减隔震技术^[2], 成为亟待突破的工程难题。



图 1-1 西南地区的高铁桥梁系统
摩擦摆支座 (FPS) 虽具备自复位特性,

但其对上部结构的动力放大效应可能加剧桥梁响应^[1]。消能减震装置: 该类装置作为附属构件, 通过可更换设计实现“结构可恢复”目标。金属阻尼器因成本低、滞回性能稳定而备受关注, 其按力学机制可分为弯曲型、剪切型及拉压型^[2]。然而, 现有研究多聚焦于建筑结构, 针对高铁轨道-桥梁系统多场耦合效应的适配性研究仍显不足。

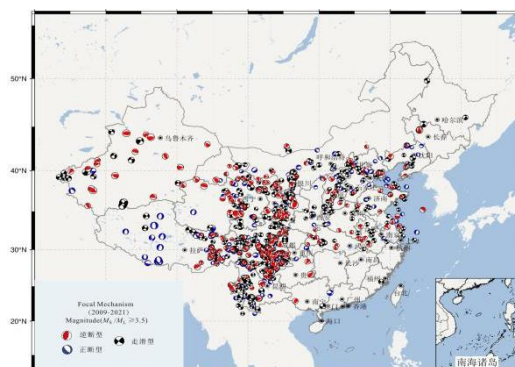


图 1-2 中国震源分布图

本文提出一种新型开缝钢板剪切阻尼器, 通过理论推导、数值模拟与系统集成方法, 研究其在高烈度地震区高铁桥梁中的抗震效能。主要贡献包括: 1) 设计兼具防屈曲与易更换特性的开缝钢板阻尼器, 采用有限元分析软件对其性能进行了模拟; 2) 挑选了地震动验证了其在地震能量耗散与结构响应控制中的有

效性^[3]。

2 新型带缝剪切阻尼器设计与力学性能研究

2.1 开缝钢板阻尼器的基本构造及力学原理

开缝钢板阻尼器是一种基于剪切变形耗能原理设计的金属阻尼器，其主体由 Q235 钢材焊接而成，核心组件包括三块带矩形开缝的耗能片、防屈曲垫板及外部角钢约束框架（图 2-1）。耗能片作为主要工作单元，通过水平剪切变形吸收地震能量；垫板布置于相邻耗能片之间，厚度略大于耗能片以预留变形间隙，防止面外屈曲并减少摩擦干扰；角钢框架焊接于耗能片组外侧，通过侧向刚度增强整体稳定性。该阻尼器的模块化设计允许通过增减耗能片数量灵活调节承载力，满足不同抗震需求。

从力学响应分区来看，耗能片可划分为开缝区与非开缝区。非开缝区高宽比（ h/b ）较低（通常小于 2），在外部荷载作用下以纯剪切变形为主，应力分布均匀；开缝区高宽比显著增大（通常大于 3），端部因弯矩集中形成塑性铰，呈现弯剪耦合变形机制，成为耗能核心区域。

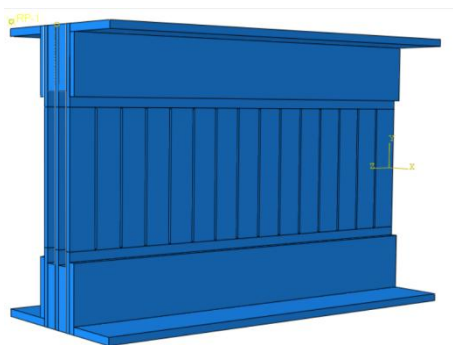


图 2-1 阻尼器结构模型

2.2 开缝钢板阻尼器的滞回性能研究

为验证理论模型的可靠性，采用 Abaqus 软件建立精细化三维有限元模型。首先依据几何尺寸建立耗能片、垫板与角钢的实体模型，通过平移装配形成完整阻尼器；材料本构采用 Q235 钢的双线性随动强化模型（弹性模量

$E=210\text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，屈服强度 $f_y=235\text{ MPa}$ ，硬化比 2%）；接触设置中，耗能片间定义法向硬接触与切向无摩擦行为以模拟垫板隔离作用，角钢与耗能片采用绑定约束等效焊接连接，通过区分主平面（角钢内侧）与次平面（耗能片边缘）避免约束冗余；网格划分经收敛性验证后选定全局尺寸为 1.5 倍板厚（误差 $<3\%$ ）^[3]。

在边界条件设置中，固定阻尼器底面所有自由度，顶面耦合至参考点施加 Z 向往复位移荷载（图 2-2）。加载制度采用渐变位移循环模式，峰值位移从 1mm 逐步增至 60mm，每级循环两次以覆盖弹性、屈服及强化阶段。数值模拟结果显示，阻尼器的力-位移滞回曲线呈规则菱形，无捏缩现象，等效阻尼比 ξ_{eq} 达 25%~30%，累积耗能 E_d 随位移幅值呈二次增长，60mm 时达 $1.2 \times 10^5\text{ J}$ 。塑性应变主要集中在开缝端部，最大等效塑性应变（PEEQ）为 0.15，低于 Q235 钢的断裂阈值（0.2），表明其具备稳定的低周疲劳性能。

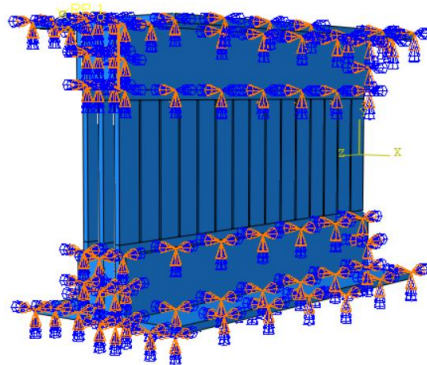


图 2-2 自由度约束与加载方式

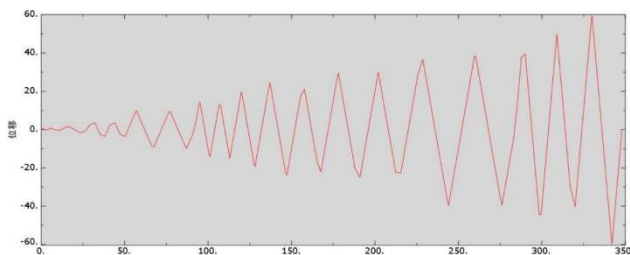


图 2-3 渐变位移循环加载曲线图

3 高铁轨道-桥梁系统地震响应分析

3.1 高铁轨道-桥梁-阻尼器系统模型构建与地震动输入

高速铁路轨道-桥梁系统的抗震性能评估需综合考虑轨道与桥梁的复杂耦合效应。该系统由 CRTS II 型无砟轨道与 5 跨 32.6 m 简支梁桥组成，涵盖钢轨、扣件、轨道板、支座等关键部件，其分层结构与力学传递机制通过精细化有限元建模实现。为研究阻尼器的减震效能，本文将开缝钢板阻尼器简化为非线性弹簧，形成轨道-桥梁-阻尼器耦合系统^[4]。

地震动输入从 PEER 数据库选取 40 条 FEMA P-695 推荐记录，涵盖近断层脉冲与远场地震动。采用平均谱比调幅法将反应谱匹配中国规范目标谱（8 度设防，II 类场地），调幅后 PGA 均值 0.47g，确保输入地震动的代表性与分析可靠性。

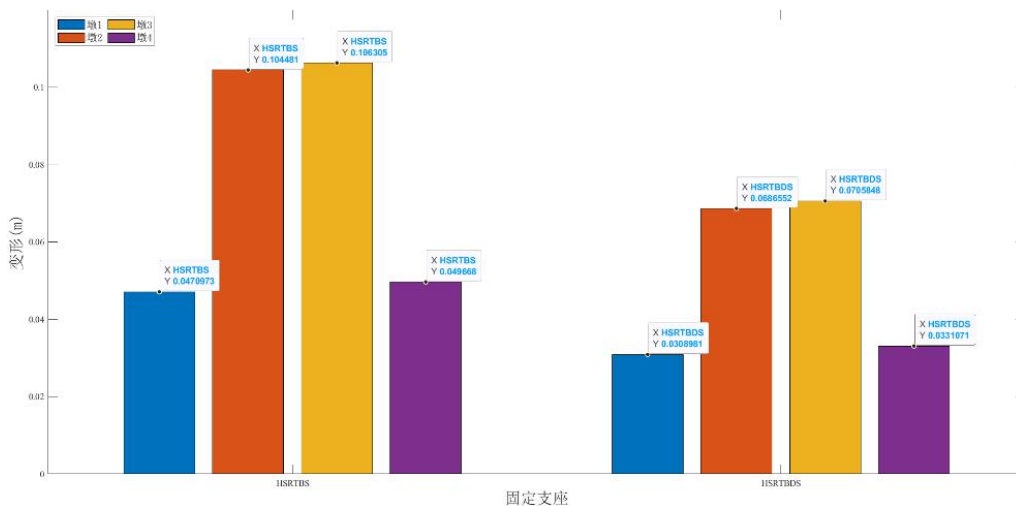
3.2 关键构件地震响应分析

地震作用下高铁轨道-桥梁系统的动力响

应是评估其抗震性能的核心依据。本章基于第三章所建立模型，结合 40 条调幅地震动的非线性时程分析结果，提取关键构件（支座、主梁、桥墩、轨道等）的峰值响应数据。通过 Matlab 软件对数据进行可视化处理，对比分析阻尼器对系统动力响应的调控效果。研究重点包括支座变形抑制、主梁振动衰减、桥墩能量重分布及轨道约束优化，旨在为高烈度地震区高铁桥梁的减震设计提供量化依据^[5-7]。

支座作为桥梁传力的关键节点，其变形量直接反映地震能量的输入与耗散效率。对于固定支座，阻尼器的引入使其峰值变形量平均降低 29.13%，其中某支座从 104.48 mm 降至 68.66 mm，降幅达 34.29%。滑动支座的响应降幅更为显著（平均 34.12%），其平均变形量（50.56 mm）低于固定支座（52.81 mm）。这一差异源于滑动支座的摩擦耗能与阻尼器的协同作用，进一步分散了地震能量，验证了滑动支座在减震系统中的适配优势。

图 3-1 固定支座桥台变形量图



主梁跨中作为桥梁的力学薄弱点，其峰值变形量从 120.89 mm 降至 102.71 mm（降幅 15%）。阻尼器通过耗散地震能量，显著抑制了主梁的弯曲振动模态，表明其对上部结构的保护效能。轨道系统的横向变形分析显示，阻尼器使轨道中部峰值变形量从 120.86 mm 降至 102.86 mm（降幅 14.9%），且变形分布趋于均匀。这一

现象与阻尼器对桥梁整体刚度的提升密切相关，轨道纵向约束力的优化有效降低了局部应力集中风险。

桥墩变形量在桥轨系统中平均增加 62.97%，从 12.34 mm 增至 22.38 mm（增幅 81.34%）。尽管绝对变形量仍远低于规范限值（<30 mm），但其增幅揭示了阻尼器的能量转

移机制——通过将部分地震能量引导至桥墩，减轻了上部结构的动力响应。剪力齿槽的响应呈现空间非均匀性，变形量有降低有增加，可能与阻尼器布置引起的局部应力重分布有关，需进一步优化参数以平衡约束效应。

扣件作为轨道与桥梁的连接枢纽，其变形量变化反映了梁轨相互作用的调整。桥轨系统中桥梁区段的扣件峰值变形量显著降低（从 58.2 mm 降至 42.7 mm），而路基连接处降幅较小。桥梁区段的变形量差异显著，峰值降低约 26.7%，而路基区段降幅不足 5%。这一空间分布特征表明，阻尼器主要通过抑制桥梁整体振动降低扣件动态剪切需求，但对路基-桥梁过渡区的局部约束效应有限，需结合端刺或挡块加固以提升全系统性能。

轨道变形量沿桥长呈抛物线分布，峰值位于跨中区域。阻尼器使曲线整体下移，且峰部斜率减小，说明其对桥梁弯曲振动的抑制作用降低了轨道纵向应变梯度，有利于延长轨道部件疲劳寿命。变形集中发生在 100-400m 之间，

阻尼器使轨道中部变形量减少 18.007 mm（降幅 14.90%），而桥梁两端降幅较小，表明阻尼器对跨中区域的调控效果更为显著。

4 结论

本文聚焦于高铁轨道桥梁系统抗震问题，提出了一种开缝钢板阻尼器，通过有限元软件进行建模，分析其力学性能，探究了不含阻尼器与含有阻尼器的高铁轨道桥梁系统的地震相应。主要结论如下：

(1)提出了一种带缝钢板阻尼器，在有限元软件中对其进行建模，展开了有限元分析，得出其滞回性能。滞回曲线收敛且图形呈现明显的菱形形状，说明该阻尼器的滞回性能优良，可以用于高铁轨道桥梁抗震。

(2)筛选原始地震动记录，将地震动记录导入有限元模型之中，得出含有阻尼器与不含有阻尼器的桥梁轨道系统动力响应，选取关键部件对其变形量进行分析。结果表明，带缝钢板阻尼器能有效降低主梁、固定支座、轨道板等构件的地震响应。

参考文献

- [1].SU M, DAI G, MARXS, A Brief Review of Developments and Challenges for High-speed Rail Bridges in China and Germany[J/OL]. Structural Engineering International, 2019, 29(1): 160-166.
- [2]魏周博. 桥梁抗震设计要点和减隔震技术的应用[J]. 砖瓦, 2021, (08): 111-112.
- [3]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(05): 118-128.
- [4]孙文涛,李轲. 铅芯橡胶支座在桥梁减隔震中的应用[J]. 科技资讯, 2020, 18(35): 66-68.
- [5]黄宇辰. FPS在高速铁路简支梁桥中的适用性研究[D]. 石家庄铁道大学, 2016.
- [6]王宝夫,韩强,杜修力. 滑动摩擦支座隔震桥梁地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(S2): 85-90.
- [7]尹新生,段泓峥. 浅谈阻尼器的发展与分类[J]. 河南建材, 2019, (04): 314-315.

作者简介：陆建利（1980—），男，汉族，高级工程师职称，研究方向：桥梁专业