

桥梁分级减震支座抗震性能分析与优化研究

石衡

湖南科技大学土木工程学院, 中国·湖南湘潭 411201

摘要: 桥梁作为非常关键的交通基础设施, 在遭遇地震时会承受极大的冲击。为提升桥梁的抗震性能, 分级减震支座得以广泛应用。论文着重对桥梁分级减震支座的抗震性能展开分析, 剖析其抗震机理以及影响因素, 提出优化策略, 经由论文的研究, 可为桥梁抗震设计提供理论依据与技术支持, 降低地震对桥梁造成的破坏, 保障交通安全。

关键词: 桥梁分级减震; 抗震性能; 优化研究

Research on Seismic Performance Analysis and Optimization of Graded Seismic Absorption Bearings for Bridges

Heng Shi

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201, China

Abstract: As a very critical transportation infrastructure, bridges can withstand great impacts when they encounter earthquakes. In order to improve the seismic performance of bridges, graded damping bearings have been widely used. This paper focuses on the analysis of the seismic performance of the graded seismic bearings of bridges, analyzes its seismic mechanism and influencing factors, and proposes optimization strategies, which can provide theoretical basis and technical support for the seismic design of bridges, reduce the damage caused by earthquakes to bridges, and ensure traffic safety.

Keywords: bridge grading and damping; seismic performance; optimize your research

0 前言

论文围绕桥梁分级减震支座展开, 对其抗震性能展开分析并探寻优化策略。对弹性支座、摩擦摆支座、高阻尼橡胶支座以及滑移隔震支座这四类支座进行分类, 并阐述其工作原理, 接着结合有限元分析、动力时程分析以及非线性分析等方法, 详细剖析支座的抗震性能, 从支座材料特性、几何参数、地震波特性以及桥梁结构特性这四个方面研究影响支座抗震性能的因素。最终提出材料优化、几何参数优化、结构布局优化以及控制系统集成优化等一系列策略, 以此提升桥梁分级减震支座的抗震效能。

1 桥梁减震支座的分类与工作原理

1.1 弹性支座

桥梁支座作为桥梁上下部结构间传递荷载及适应变形的关键构件, 同时作为桥梁抗震设计中重要的减隔震装置, 大量的研究表明, 其减震性能的好坏直接影响到桥梁整体结构的抗震性能^[1]。弹性支座主要是采用橡胶、钢材等弹性材料制作而成的, 依靠材料自身产生弹性变形来吸收以及耗散地震能量。它的构造一般是把多层橡胶片跟钢板交替叠合进行硫化处理, 钢板可提供竖向承载能力, 橡胶则赋予支座不错的弹性与变形能力。在地震作用发生时, 弹性支座会出现水平方向的剪切变形, 借助橡胶的粘弹性特性, 把地震能量转变为热能消耗掉, 以此减小桥梁结构的地震响应。

1.2 摩擦摆支座

摩擦摆支座是由上摆、下摆以及滑动球面共同构成的, 它的工作原理是依据钟摆运动机制以及摩擦耗能原理来实现的。当地震出现的时候, 上部结构会在球面滑动面上产生滑动现象, 借助摆的周期运动来延长桥梁结构的自振周期, 让结构避开地震动的卓越周期, 以此减少地震力的放大效果, 还会借助滑动面之间的摩擦作用来消耗地震能量。该支座的滑动摩擦系数相对较小, 并且可依靠对球面半径进行调整来改变自振周期, 具有较强的自复位能力, 在地震之后可以让桥梁结构自动恢复到初始位置, 这种支座适用于大跨径桥梁以及高地震烈度地区, 可有效地抵御强烈地震的冲击, 保障桥梁的安全与稳定。

1.3 高阻尼橡胶支座

高阻尼橡胶支座是在普通橡胶支座之上, 添加适量阻尼材料制作而成, 让橡胶拥有较高的阻尼特性。它的内部同样采用橡胶与钢板交替叠层的结构, 其中钢板可提供竖向刚度, 高阻尼橡胶能提供弹性变形能力, 还可凭借自身的内摩擦来消耗地震能量, 在地震荷载发挥作用时, 高阻尼橡胶支座可同时呈现出橡胶的弹性复位功能以及阻尼耗能作用, 切实减小桥梁的位移和加速度反应。这种支座有耐久性良好、性能稳定、适用范围广泛等特性, 可应用于不同类型以及规模的桥梁, 在需要兼顾承载能力与减震效果的桥梁工程当中有着广泛的应用^[2] (见图 1)。

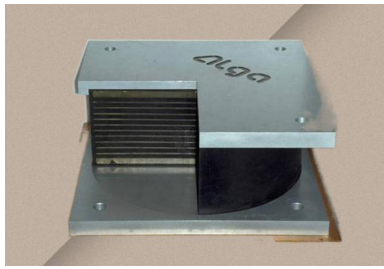


图 1 高阻尼橡胶支座

1.4 滑移隔震支座

滑移隔震支座主要是由滑移面、限位装置以及复位装置等几个部分组合而成的。它的核心工作原理在于借助滑移面所有的低摩擦特性，促使桥梁上部结构在遭遇地震作用时，可相对于下部结构产生滑动现象，延长结构的振动周期，减少地震力的传递，滑移面一般采用聚四氟乙烯板与不锈钢板相结合的方式，其摩擦系数非常小。限位装置可防止桥梁在滑动过程中出现过位移，以此保障结构安全，复位装置则是在地震发生之后，协助上部结构恢复至初始位置，这种支座拥有隔震效果良好、成本相对较低的优势，适用于对隔震有着较高要求的桥梁，可切实减轻地震对桥梁结构及其附属设施所造成的破坏。

2 桥梁分级减震支座的抗震性能分析方法

2.1 有限元分析方法

有限元分析技术借助将桥梁结构离散化为多个单元体，结合静力学平衡原理与材料本构特性，对分级减震支座的抗震响应进行数值仿真。具体实施时，首先需要构建精确的三维桥梁模型，基于支座实际工程参数（橡胶弹性模量、钢板屈服强度）和几何特征建立参数化模型，经网格剖分后利用数值计算软件求解各节点位移场和应力应变场。该方法可有效处理多物理场耦合效应，如橡胶材料的超弹性变形、滑移界面的摩擦耗能等非线性特征，凭借时程分析可动态展示支座在各类地震波输入下的能量耗散机制与变形模式，为改进支座的耗能构造提供可视化依据，但需注意，计算结果的可靠性取决于模型精细化程度及参数合理性，精细化建模往往随着计算资源消耗剧增，且难以全面反映施工误差、材料老化等实际工程变量影响^[3]。

2.2 动力时程分析方法

动态时程分析法依靠将地震激励信号输入结构动力学模型，采用分步求解策略揭示桥梁分级减震装置的全周期抗震性能。工程实践中，研究人员需基于场址地震危险性研究，筛选有区域代表性的基准地震动记录（包含实测波与合成波），并依据目标峰值加速度实施波形调幅处理，在构建桥梁多自由度动力学模型后，结合 Newmark-β 等数值积分算法进行分步迭代求解，精确追踪各时间节点上支座系统的位移场演变、速度分布特征及加速度响应谱。这种全时域解析手段能完整呈现地震能量传递过程中减震装置的非线性耗

散机制，还可以有效反映地震波频域特性与结构固有振动模式的耦合作用效果，相较于传统抗震评估手段，该方法在支座滞回特性量化评估、塑性铰形成机理解析以及结构渐进破坏路径预测等方面呈现出较大优势，但需注意其对基础输入数据敏感度较高且计算成本较大的局限性，一般需联合规范反应谱法开展对比验证以提升结论可靠性。

2.3 非线性分析方法

桥梁分级减震支座的抗震性能研究需重点突破材料与几何双重非线性难题——橡胶的超弹性特征与钢材塑性变形属于典型材料非线性，而大位移转动现象则构成几何非线性挑战。研究过程中需构建精准的非线性本构模型与接触算法体系：采用 Mooney-Rivlin 模型解析橡胶在复杂应力状态下的超弹性演变规律，运用双线性强化模型刻画钢材屈服后的力学行为。针对滑动型支座特有的摩擦耗能特性，还需建立动态摩擦系数与接触压力的耦合方程，依靠非线性方程组迭代运算，可有效捕捉地震激励下结构的真实力学响应，揭示强震作用下支座的渐进损伤机制与刚度退化路径，这种精细化分析方法虽能定量评估桥梁的抗震冗余度与剩余承载性能，但其应用实效受制于参数敏感度高、计算收敛困难等瓶颈，实际工程中需结合物理试验数据对模型开展参数标定与结果验证。

3 桥梁分级减震支座的抗震性能影响因素分析

3.1 支座材料特性

材料性能参数是决定支座抗震效能的关键性因素。以常见的橡胶支座为例，其力学性能中弹性模量、阻尼系数与疲劳特性构成影响减震效果的三要素（见表 1）。研究说明，弹性模量较高的橡胶材料在竖向承载方面表现优异，但会相应削弱水平位移调节能力，而有优异阻尼特性的橡胶复合材料，则能凭借粘弹性效应将地震动能转化为热能，较大降低建筑结构的动力响应。在钢制构件方面，材料的屈服强度与延展性共同决定了支座的极限承载性能和塑性变形能力，采用高强度低合金钢材能有效提升支座的抗震能力，避免地震作用下的脆性破坏现象，值得注意的是，材料的环境耐受性指标同样不可忽视，长期暴露于复杂环境条件下的支座若出现明显性能劣化，其初始设计的抗震性能将产生较大折减。

表 1 支座抗震效能关键性因素表

材料类型	力学性能参数	性能影响
橡胶支座	弹性模量	竖向承载优异，水平位移调节能力削弱
橡胶支座	阻尼系数	粘弹性效应转化地震动能为热能，降低动力响应
钢制构件	屈服强度与延展性	决定极限承载性能和塑性变形能力
钢制构件	环境耐受性	长期暴露环境性能劣化影响抗震性能

3.2 支座几何参数

支座的几何参数包含尺寸、形状以及构造形式等, 对其抗震性能有着关键影响。支座的高度与直径可决定竖向刚度以及水平变形能力, 较大的高度可增添水平柔度, 延长结构自振周期, 避开地震卓越周期, 而直径会对竖向承载能力以及稳定性产生影响。在形状方面, 球形支座相较于板式支座, 可更出色地适应多向变形, 在地震中受力更为均匀。在构造形式上, 多层橡胶与钢板的叠层设计, 凭借合理调节层数和厚度比例, 可以优化支座的刚度与耗能特性, 支座的限位装置以及滑动面的几何尺寸, 也会对其在地震中的位移控制以及耗能效率产生作用, 合理的几何参数设计是保障支座抗震性能的关键所在。

3.3 地震波特性

地震波有多种特性, 像是幅值、频谱特性以及持时等方面, 这些特性直接对桥梁分级减震支座的受力情况以及变形状态起到决定性作用。地震波的幅值要是越大, 支座所承受的地震力也就会越强, 这样一来就越容易出现破坏或者性能退化的情况, 频谱特性可体现地震波里不同频率成分的分佈状况, 当桥梁结构自身的自振周期跟地震波的卓越周期接近的时候, 会引发共振效应, 使得支座的受力急剧增大。地震波的持时会对支座的疲劳损伤产生影响, 持时越长, 支座反复受力变形的次数就越多, 累积损伤也就越严重, 导致抗震性能降低, 在进行抗震设计时, 要依据桥梁所在地区的地震危险性评估结果, 合理挑选有代表性的地震波, 以此来准确评估支座的抗震性能。

3.4 桥梁结构特性

桥梁有多种结构特性, 像是跨径、桥墩高度以及结构体系等, 这些特性和分级减震支座的抗震性能之间存在紧密联系。大跨径桥梁由于自身结构质量以及刚度分布较为复杂, 对于支座的减震以及耗能能力有着更高要求。随着桥墩高度的增加, 结构的自振周期会变长, 这种情况下需要对支座参数进行调整, 以此来匹配结构动力特性。不同的结构体系, 像连续梁桥、斜拉桥等, 在地震作用下会呈现出不一样的响应模式, 对支座的功能需求也各不相同, 比如斜拉桥要求支座拥有良好的水平约束和转动能力, 可协调拉索与主梁的受力, 而连续梁桥则更加看重支座的竖向承载以及位移适应能力, 桥梁结构的整体刚度以及质量分布, 同样会对地震力在支座间的分配产生影响, 影响支座的抗震性能。

4 桥梁分级减震支座抗震性能的优化策略

4.1 材料优化

材料性能的优化是提高桥梁分级减震支座抗震效能的核心环节。在橡胶材料研发领域, 可运用纳米复合改性技术, 依靠调控填料分布与分子交联密度, 在维持材料弹性模量的同时将阻尼系数提升至 0.25 以上, 改善能量耗散特性, 采用高阻尼橡胶与低模量橡胶的叠层复合结构, 可实现竖向承

载力达 8000kN 时仍保持水平位移能力 $\pm 300\text{mm}$ 的协同优化。针对金属构件, 优选 Q345GJC 这类有优异应变硬化特性的低合金钢, 其屈服强度达到 345MPa 以上, 配合淬火 + 回火工艺可形成细晶粒贝氏体组织, 使疲劳寿命较常规钢材提升 40%, 将有相变伪弹性效应的镍钛形状记忆合金集成于支座系统, 凭借奥氏体 - 马氏体相变可吸收地震能量, 震后依靠温度响应自动复位, 使残余位移量可控制在设计允许范围内。

4.2 几何参数优化

几何参数优化需要全面综合地考量桥梁结构特性以及地震作用特点。在尺寸设计环节, 借助有限元分析或者动力时程分析的方式, 来确定最为合适的支座高度与直径的比例, 在可契合竖向承载能力这一条件的基础上, 尽可能地扩大水平柔度以及自振周期的调整范围, 对于多层叠层橡胶支座而言, 要对橡胶层与钢板层的厚度分布加以优化, 可以采用变刚度设计, 让支座在不同的地震强度之下呈现出不同的耗能特性。在形状方面, 针对复杂的地震作用场景, 采用球面与平面相结合这种复合形状的支座, 以此提升多向变形的适应能力, 合理地设计限位装置以及滑动面的尺寸与构造, 这样可有效地控制地震位移, 减少滑动摩擦所带来的能量损耗, 达成支座性能的整体优化。

4.3 结构布局优化

结构布局优化围绕桥梁整体抗震性能展开, 对分级减震支座的布置方式给予调整。针对多跨连续梁桥, 依据桥墩高度以及跨径的不同, 合理分配各个支座的刚度与耗能能力, 在高墩部位布置柔性支座以此延长结构周期, 在低墩部位布置刚性支座来提高稳定性。在斜拉桥里, 结合拉索的力学特性, 优化支座的水平约束与转动约束配置, 防止结构局部受力过大。采用非对称布局或者分级减震体系, 把不同性能的支座组合运用, 让桥梁在地震中达成分级耗能, 先是低刚度支座消耗一部分能量, 接着高刚度支座提供限位保护, 提升结构整体抗震韧性。

4.4 控制系统集成优化

控制系统集成优化借助智能控制技术引入, 实现对支座抗震性能的主动调节。在支座内集成如加速度计、位移传感器之类的传感器, 实时监测地震响应, 联合预先设定好的控制算法, 驱使智能执行器像液压阻尼器、磁流变阻尼器等改变支座的阻尼参数或者刚度特性, 举例来说, 在小震作用之时, 维持支座低阻尼状态, 减少对桥梁正常使用的影响, 在大震来临之际, 瞬间增大阻尼, 有效耗散地震能量。还可与桥梁健康监测系统集成, 经由大数据分析以及机器学习, 预测支座性能变化趋向, 提前展开维护与优化, 保证桥梁分级减震支座始终处在最佳抗震工作状态。

5 结语

综上所述, 经对桥梁分级减震支座开展抗震性能分析

以及优化研究, 论文获取了一系列结论。对支座的材料、几何参数、结构布局以及控制系统给予优化, 可提升支座的抗震性能, 后续研究应当留意新材料、新工艺的运用, 以及智能化、自适应控制技术的进展, 为桥梁抗震设计提供更多创新思路与技术手段。

参考文献:

- [1] 刘海亮,王昭儒,徐源庆,等.分级减震球形支座设计及其减隔震性能研究[J].公路,2025,70(2):191-198.
- [2] 万永涛,王冰,贾维君,等.桥梁分级减震支座的性能研究及应用[J].公路,2023,68(9):162-167.
- [3] 王剑明,伍大成,赵鹏贤,等.桥梁分级减震支座抗震性能分析[J].交通科技,2019(6):68-71.

作者简介: 石衡 (2004-), 男, 中国湖南邵阳人, 在读本科生, 从事道路与桥梁工程研究。