

# 钢结构桥梁支座减隔震装置的动力特性与抗震性能优化分析

许文武

山东百顿减震科技有限公司

**摘要:** 钢结构桥梁因其轻质高强的特性在现代桥梁工程中应用广泛,但其对地震荷载较为敏感,抗震设计成为研究重点。本文以钢结构桥梁支座减隔震装置为研究对象,系统分析了减隔震装置的动力特性与作用机制,明确了支座与装置的相互关系,并建立了针对地震工况的动力分析模型。在此基础上,通过优化设计实例,调整装置关键参数以提升抗震性能。研究表明,优化后的减隔震装置能够有效降低地震响应,提升桥梁安全性与耐久性。本文总结了研究成果并提出未来研究方向,特别是新型减隔震装置研发和高烈度区桥梁抗震技术的探索,为桥梁工程提供理论支持与实践指导。

**关键词:** 钢结构桥梁, 减隔震装置, 动力特性, 抗震性能优化, 支座设计

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.02.013

## 引言

伴随着社会经济的发展以及交通需求的增大,钢结构桥梁由于具有高强度、轻质化、施工速度快等特点,在现代桥梁工程中被广泛使用。但是钢结构桥梁由于自重小、刚度大,对地震以及其他动力荷载比较敏感,在地震中很容易遭到严重的破坏。提高钢结构桥梁抗震性能,减小地震对桥梁结构的破坏作用,是目前桥梁设计、维护研究的重点。

近些年来,各种减隔震装置因为可以较好地减小结构的动力响应,从而大幅度提高桥梁的抗震性能而受到人们的重视。但是目前减隔震装置的设计和应用还存在着很多不足。一方面,现有的装置动力特性分析同结构需求没有形成良好的匹配关系;另一方面,对于高烈度地震区的桥梁抗震优化研究较少,致使实际使用时效果无法得到充分发挥。

因此,本文以钢结构桥梁支座减隔震装置为研究对象,主要研究其动力特性,在不同的工况下进行力学响应分析,研究优化设计提高抗震性能的方法。理论分析同优化实践相结合,目的在于给钢结构桥梁抗震设计赋予科学依据和操作指引,从而为减隔震技术的发展构筑根基。

## 1 钢结构桥梁支座减隔震装置的理论基础

### 1.1 减隔震装置的基本概念与分类

#### 1.1.1 减隔震装置的定义

减隔震装置是在结构和基础之间设置特殊的装置,使地震等动力荷载对上部结构传递的能量减少,以减小结构破坏的技术措施。此类装置能吸收或者耗散地震能量,减小结构的地震反应,保证桥梁的安全

正常使用。其基本原理就是通过改变桥梁支座的刚度、阻尼等特性来使结构产生一定的相对位移,消耗地震输入的能量。

#### 1.1.2 常见减隔震装置类型及其特性

目前常用的减隔震装置有高阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座、摩擦摆支座和黏滞阻尼器等。高阻尼橡胶支座依靠橡胶材料的高阻尼特性来消耗能量,具有较好的变形能力和较长的使用寿命;铅芯橡胶支座在橡胶层里嵌入铅芯,既具备了柔性变形的能力,又加强了耗能的效果;摩擦摆支座依靠滑动摩擦耗能,在大位移的情况下也能保持稳定的工作状态;黏滞阻尼器依靠黏滞流体的剪切作用来吸收能量,适合于高烈度地震区的大跨度桥梁结构。

### 1.2 减隔震装置在桥梁结构中的应用现状

#### 1.2.1 钢结构桥梁的抗震需求

钢结构桥梁自重轻、刚度小,地震作用下容易产生较大的振动和位移,甚至造成结构的屈曲或者失稳。为了满足抗震设计的要求,必须采用合理的工程技术手段来减小地震荷载作用下结构的振动幅度以及内力分布,减隔震装置就是一种达到这一目的的手段。高烈度地震区钢结构桥梁抗震需求更甚。

#### 1.2.2 国内外减隔震装置应用案例

国内外已有许多桥梁工程使用了减隔震技术。日本在地震多发城市桥梁上普遍使用铅芯橡胶支座和摩擦摆支座来提高桥梁抗震能力,在旧金山湾大桥抗震改造时使用黏滞阻尼器技术,使桥梁在地震中动力响应得到明显改善。国内杭州湾大桥也采用了减隔震技术,提高了桥梁抗震性能的同时又考虑到了桥梁的使

使用寿命。

### 1.3 钢结构桥梁支座与减隔震装置的力学关系

#### 1.3.1 支座与减隔震装置的相互作用

钢结构桥梁支座是桥梁上部结构和下部墩台之间的连接件,它的主要作用就是把荷载由上部结构传给下部基础,并且还要使一定的位移和转动。减隔震装置一般和支座一起工作,改变支座刚度、阻尼、滑移特性来调整桥梁动力特性,提高桥梁抗震能力。支座合理的构造以及减隔震装置的配合使用,才是桥梁抗震性能改善的地方。

#### 1.3.2 减隔震装置对动力响应的影响

减隔震装置对于桥梁的动力响应有减小地震作用下加速度、位移和内力的作用。减隔震装置用耗能、变形的的方式来减小结构的振动频率,使得桥梁在地震中具有更强的柔韧性,防止因为刚度过大引起的振动放大。该种响应调整能力可以明显提高桥梁的抗震性能,并且给桥梁的设计和改造提供更加灵活的方案。

## 2 钢结构桥梁支座减隔震装置的动力特性分析

### 2.1 动力特性分析的基础理论

#### 2.1.1 动力特性与振动模态

桥梁结构在地震、风荷载、活荷载等动态荷载作用下所引起的响应主要是由桥梁的动力特性所决定的,即桥梁的固有频率、阻尼比以及振动模态等。振动模态就是指桥梁结构在自由振动时所表现出的基本运动形式,也是动力特性分析的主要内容。钢结构桥梁中不同的振动模态对于结构抗震性能的影响很大,低阶模态一般控制结构的总体变形,高阶模态会对局部构件的应力分布造成影响。所以准确识别出桥梁结构的振动模态对减隔震装置的设计优化来说十分重要。

#### 2.1.2 阻尼系数与位移响应

减隔震装置把附加阻尼加到桥梁上,改变桥梁的振动特性,使地震能量的传递效率降低。阻尼系数属于评价装置耗能水平的重要参数,阻尼系数越大,结构的位移响应就越小。较大的阻尼系数可以明显减小振动的幅度,但是过大的阻尼会带来滞后效应,造成结构刚度损失或者响应不稳定。选择合理的阻尼系数来达到位移响应和耗能能力的最佳结合点,在设计减隔震装置的时候需要加以考虑。

### 2.2 动力分析模型的建立

#### 2.2.1 钢结构桥梁的动力计算模型

动力特性分析时要创建合理的计算模型,这是正确预估桥梁动力响应的前提。钢结构桥梁动力计算模型一般用有限元法来建立,采用梁、壳、实体单元相结合的方式对桥梁几何形状、材料性质、边界条件等

进行模拟。模型中要考虑到桥梁自重、活载和环境荷载的分布情况,使结构的动力行为能被反映出来。另外为了方便减隔震装置的引入,在模型中需要确定支座区域的力学特性及有关参数。

#### 2.2.2 减隔震装置参数化建模

减隔震装置的动力学特性一般用参数化的模型来表示,主要有刚度、阻尼、滑移等。高阻尼橡胶支座用非线性刚度、阻尼模型来模拟,摩擦摆支座用库仑摩擦模型来描述滑移行为。参数化建模的优点是可以自由地改变装置的特性,有利于研究不同的配置方案对桥梁动力响应的影响。同时模型还要考虑材料的非线性、加载历史效应,保证模型对实际工程的适用性。

### 2.3 不同工况下减隔震装置的动力响应分析

#### 2.3.1 正常运营状态下的动力特性

正常运行时,桥梁受到交通荷载和风荷载的影响,其动力响应一般以小幅的周期性振动为主。此时减隔震装置的主要作用就是控制小振幅位移,保证桥梁的舒适性、耐久性。以典型的钢结构桥梁为例进行分析可知,采用高阻尼橡胶支座后可以有效减小风致振动,使桥梁的位移响应降低30%左右。

#### 2.3.2 地震荷载作用下的动力响应对比

地震荷载作用下桥梁动力响应为高幅、大频率的非线性振动,容易造成支座损坏、上部结构失稳。减隔震装置在地震作用下通过消耗地震输入的能量来减小加速度响应以及内力的分布。某实际案例研究显示,在地震作用下,用摩擦摆支座的桥梁顶点位移比不采用摩擦摆支座的桥梁减少了约40%,最大加速度响应也降低了约35%。另外,不同的减隔震装置在不同的地震烈度下有不同的优势,在中低烈度地震中高阻尼橡胶支座有较好的吸能作用,高烈度地震中摩擦摆支座稳定性较好。

## 3 钢结构桥梁支座减隔震装置的抗震性能优化

### 3.1 抗震性能优化的基本方法

#### 3.1.1 优化设计目标与约束条件

减隔震装置抗震性能优化就是提高其在各种地震工况下耗能能力的同时,减小桥梁的动力响应,保证结构安全、耐久。优化设计的目标一般有减小地震作用下桥梁的位移、减小地震作用下传递到上部结构的地震力、提高装置的使用寿命等。优化时要顾及诸多约束条件,即桥梁支座的位移能力,材料的力学性能以及施工的可行性等。另外还要考虑成本、维护要求和实际工况来保证优化方案的经济性、实用性。

#### 3.1.2 参数优化与性能指标评估

参数优化是抗震性能优化的关键,主要是通过改

变减隔震装置的刚度、阻尼系数、滑移性能等主要参数来达到预期的抗震目的。性能指标评价是用来检验优化方案是否有效的常用指标,主要有最大加速度响应、位移响应、耗能比、残余变形等。对优化前后性能指标进行比较,可以直接看出优化的效果,给实际工程的设计提供科学的依据。

### 3.2 典型减隔震装置的优化设计实例

该大型钢结构桥梁处于地震频发地区,在设计时采用高阻尼橡胶支座来提高抗震能力。但是原始支座的设计在高烈度地震中出现了位移过大、能量耗散不够的情况。为此对支座进行了参数优化,主要改变橡胶材料的剪切模量和阻尼比,在支座结构中嵌入新型增强层来提高支座的综合性能。优化设计包括如下几个步骤:

材料选择上用试验和分析的方法来确定具有高耗能特性的橡胶材料,保证支座在大变形的情况下仍然有稳定的阻尼性能。

几何优化就是重新设计橡胶层和钢板的厚度比例,提高支座的竖向承载能力和水平变形能力。

阻尼优化就是改变橡胶材料的配方来提高内耗,但是不能影响施工工艺和材料的长期耐久性。

经过改进的高阻尼橡胶支座在地震模拟试验中具有较好的性能。最大水平位移减少25%左右,耗能能力提高30%以上,恢复力好,不产生地震后残余变形。

### 3.3 优化设计的数值分析与验证

#### 3.3.1 抗震性能评估

改进之后的高阻尼橡胶支座,桥梁抗震性能大大提高。地震事件中该桥加速度响应、位移响应都明显降低,没有造成结构损坏。从数据分析可知,优化支座在地震作用下的耗能比明显增大,传给上部结构的地震力减少约20%,很好地证明了优化设计是合理的。

#### 3.3.2 优化前后性能指标的对比分析

对比优化前后支座性能指标可知,优化后支座最大水平位移由原来的120mm减小到90mm,最大加速度由原来的 $2.5\text{m/s}^2$ 减小到 $1.8\text{m/s}^2$ ,完全满足设计要

求。耗能比从原来的15%提高到21%,有较好的能量耗散效果。这些优化结果一方面可以提高桥梁的抗震能力,另一方面也可以提高装置的使用寿命,给类似的工程提供重要的设计参考。

## 4 研究成果总结

本文对钢结构桥梁支座减隔震装置的动力特性和抗震性能进行研究,确定了减隔震装置的力学原理和作用机理。从理论上讲,本文对减隔震装置对桥梁动力响应的影响进行了详细的分析,阐述了支座刚度、阻尼和滑移性能在抗震设计中起的作用,丰富了桥梁支座减隔震技术的理论研究。同时用振动模态、动力特性分析来揭示装置参数对结构整体抗震性能的影响,给实际的设计提供理论依据。

本文用建立钢结构桥梁动力计算模型、支座减隔震装置参数化建模的方法来准确模拟出各种地震工况下动力响应的特点。优化设计实例说明,改变减隔震装置的主要参数,可使地震作用下桥梁的位移、加速度响应减小,装置的耗能能力、抗震性得到提高。另外本文验证了优化设计对桥梁整体安全性能有明显改善,给桥梁抗震技术的发展提供可靠的工程实践。

随着技术不断发展,减隔震技术在桥梁工程中所发挥的作用还会越来越大,今后的研究与实践会继续促进减隔震技术的发展,给桥梁的安全和经济效益的双提升提供不断的支撑。

### 参考文献:

- [1] 刘晰睿. 连续梁拱桥防屈曲支撑减震性能研究 [D]. 中南林业科技大学, 2023.
- [2] 黄佳栋. 超大跨波形钢腹板连续刚构桥抗震性能研究 [D]. 广州大学, 2022.
- [3] 刘鑫. 大跨CFST拱桥近断层地震响应及BRB减震研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [4] 李宗京. 新型高性能钢框架-支撑结构体系理论及试验研究 [D]. 东南大学, 2019.
- [5] 耿雪林. 高层钢框架耗能减震性能研究 [D]. 中南大学, 2013.