

# 大跨度斜拉桥抗震性能优化设计研究

王璐

西安华通交通科技有限公司 陕西 西安 710075

**摘要:** 大跨度斜拉桥在交通网络中地位关键,其抗震性能影响重大。本研究聚焦大跨度斜拉桥抗震性能优化设计,通过理论分析、数值模拟与实例研究,剖析地震作用下结构响应规律。探讨地震动参数选取、结构体系优化、减隔震技术应用等对其抗震性能的影响。研究表明,合理选取地震动参数可精准反映场地特性;优化结构体系,调整刚度与质量分布能提升抗侧力能力;减隔震技术有效降低地震响应。经优化设计,大跨度斜拉桥抗震性能显著增强,为保障其在地震中的安全运营提供有力支撑,对桥梁工程抗震设计具有重要参考价值。

**关键词:** 大跨度斜拉桥;抗震性能;地震动参数;减隔震技术

## 引言

大跨度斜拉桥作为重要交通基础设施,在跨江、跨海等工程中广泛应用。然而,地震频发对其安全构成严重威胁。地震作用下,大跨度斜拉桥结构复杂,响应特性复杂,易遭受不同程度破坏。研究大跨度斜拉桥抗震性能优化设计,对保障桥梁安全、减少地震灾害损失意义重大。如何提升其抗震性能,确保地震时结构稳定,成为亟待解决的关键问题。

### 1 大跨度斜拉桥地震作用分析

#### 1.1 地震波特性与桥梁振动响应关联

地震波的复杂性和不确定性是大跨度斜拉桥抗震设计面临的首要挑战。纵波作为地震波的先锋,以弹性介质的压缩和拉伸形式传播,会在桥梁结构中引发纵向振动,使主梁产生沿桥轴线方向的位移;横波紧随其后,其振动方向与传播方向垂直,会造成桥梁横向摆动;面波则在地表传播,以水平和垂直方向的复合振动对桥梁施加破坏作用。不同类型地震波的组合效应,会导致桥梁结构在多个自由度上同时产生复杂振动,这些振动相互耦合,加剧了结构的受力状态。在实际地震中,桥梁可能因横波和面波的横向振动,致使斜拉索与主梁、桥塔的连接部位出现应力集中,进而引发连接失效。

#### 1.2 地震波传播特性模拟方法

为准确预测地震波对桥梁结构的动态响应,需建立地震波传播模型。该模型要充分考虑到地震波在不同场地条件下的变化,包括土壤类型、地质构造等因素。在土壤介质中,地震波传播时会发生速度变化和能量衰减。软土场地会使地震波速度降低,同时放大地震波的低频成分,导致桥梁结构产生较大的位移响应;而坚硬场地则会使地震波传播速度加快,高频成分增多,对桥梁结构的局部构件造成冲击。通过研究地震

波在土壤中的传播行为,如波的反射、折射和散射现象,能够更精确地模拟地震波到达桥梁结构时的波形和能量分布,为后续结构响应分析提供可靠的地震波输入。

#### 1.3 基于结构动力学的响应分析

结合结构动力学理论求解桥梁地震振动方程,是获取结构响应的关键。大跨度斜拉桥作为复杂空间体系,其振动方程含多自由度,需考虑主梁、桥塔、斜拉索等构件耦合作用。求解时,先建立精确力学模型并确定构件力学参数,再以地震波为激励,通过数值计算求解方程。由此可得到桥梁各部位在地震过程中的位移、速度和加速度响应曲线,为抗震设计提供数据支撑。这些曲线能明确主梁跨中位移峰值及桥塔底部加速度最大值,助力关键部位抗震加强设计。

## 2 抗震性能评估指标确定

#### 2.1 结构位移指标的关键作用

结构位移是评估大跨度斜拉桥抗震性能的重要指标之一。在地震作用下,过大的位移可能导致桥梁构件损坏、连接失效,严重威胁桥梁的安全。主梁的纵向和横向位移直接影响桥梁的行车安全和结构完整性。当主梁纵向位移过大时,会使伸缩缝变形超限,甚至造成伸缩缝破坏,影响车辆通行;横向位移过大则可能导致主梁与桥墩发生碰撞,引发局部构件破坏。桥塔的顶部位移同样不容忽视,它反映了桥塔在地震作用下的整体稳定性。若桥塔顶部位移过大,会使桥塔底部承受过大的弯矩和剪力,增加桥塔发生破坏的风险。

#### 2.2 应力水平指标的评估意义

应力水平是衡量大跨度斜拉桥结构安全性的关键指标。结构应力一旦超过材料屈服强度,将引发塑性变形,削弱承载能力甚至导致结构倒塌。地震作用下,桥塔、主梁和斜拉索等关键构件应力状态复杂:桥塔

横向地震时底部和顶部弯矩、轴力集中;主梁受弯扭作用,正应力与剪应力分布复杂;斜拉索以受拉为主,地震动反复作用下索力波动易致疲劳损伤。可采用有限元分析绘制应力云图,直观呈现应力分布,定位超限区域,通过增大截面、优化构造等措施保障结构安全。

### 2.3 耗能能力指标的重要价值

耗能能力是评估大跨度斜拉桥抗震性能的核心指标。桥梁主要通过结构塑性变形与阻尼器实现耗能:结构局部塑性变形虽能吸收地震能量,但需控制在合理范围以避免破坏;粘滞阻尼器依靠流体黏性、金属阻尼器利用材料塑性,二者通过科学布置可有效提升结构阻尼比。结构延性同样关键,良好的延性使桥梁能以大变形耗能,规避脆性破坏。综合考量上述因素构建评估指标,可更精准衡量桥梁抗震性能。

## 3 优化结构体系提升抗震性能

### 3.1 调整主梁刚度的设计策略

主梁作为大跨度斜拉桥的主要承重构件,其刚度对结构抗震性能有着重要影响。调整主梁的刚度可以改变结构的自振周期,使其避开地震波的卓越周期,从而减少共振效应。在设计过程中,可以通过改变主梁的截面形式、尺寸以及材料特性来调整刚度。采用变截面主梁,在跨中部位适当增大截面高度,提高主梁的抗弯刚度,同时在靠近桥墩部位减小截面高度,减轻结构自重,优化结构的动力特性。还可以在主梁中设置加劲肋,增强主梁的局部刚度,提高其抵抗地震作用下变形的能力。但在调整主梁刚度时,需综合考虑结构的整体受力平衡和经济性,避免因刚度调整过大导致结构内力分布不合理,增加其他构件的设计难度和成本。

### 3.2 优化桥塔刚度的技术要点

桥塔是大跨度斜拉桥的关键支撑结构,其刚度直接影响结构的整体抗侧力能力。增加桥塔的刚度能有效提高结构在地震作用下的稳定性,但需注意避免刚度突变导致应力集中。在设计桥塔时,可以通过改变桥塔的截面形状、尺寸以及配筋率来调整刚度。采用箱形截面桥塔,相比实心截面,箱形截面具有更好的抗扭和抗弯性能,能够在增加刚度的同时减轻结构自重。合理设置桥塔的横撑,可增强桥塔的横向刚度和整体稳定性。但在设置横撑时,要注意横撑的位置和数量,避免因横撑设置不当导致桥塔在地震作用下产生过大的应力集中。

### 3.3 斜拉索及辅助墩的优化布置

斜拉索的布置和索力优化是改善大跨度斜拉桥结构受力状态、增强结构稳定性的重要手段。采用对称

布置的斜拉索体系,能使结构在地震作用下受力更均匀,减少结构的扭转效应。合理调整斜拉索的索力,可优化主梁和桥塔的内力分布,降低结构的最大应力值。在实际工程中,可以通过索力调整来改善结构的初始受力状态,使结构在地震作用前处于更有利的受力条件。合理设置辅助墩和过渡墩,可减小主梁的跨度,降低结构的内力和位移。辅助墩能够分担主梁的部分荷载,减小主梁跨中的弯矩和挠度;过渡墩则在不同结构单元之间起到连接和过渡作用,协调结构的变形。在设置辅助墩和过渡墩时,要综合考虑桥梁的整体布局、地质条件以及施工难度等因素,确保其位置和数量的合理性,以达到最佳的抗震效果。

## 4 减隔震技术在斜拉桥中的应用

### 4.1 隔震支座的工作原理与选型

在桥梁支座处设置隔震装置是大跨度斜拉桥减隔震设计的重要措施之一。橡胶隔震支座和铅芯橡胶隔震支座是常用的隔震装置。橡胶隔震支座主要由橡胶和钢板交替叠合而成,利用橡胶的弹性变形实现隔震功能。在地震作用下,橡胶隔震支座通过自身的变形延长结构的自振周期,减小地震力的传递,同时通过橡胶材料的内摩擦消耗部分地震能量。铅芯橡胶隔震支座则在橡胶隔震支座的基础上增加了铅芯,铅芯在地震中会发生塑性变形,进一步提高支座的耗能能力。在选择隔震支座时,需根据桥梁所在地区的地震烈度、桥梁结构特点以及使用要求等因素综合考虑。

### 4.2 阻尼器的类型与布置方法

阻尼器是大跨度斜拉桥中另一种重要的减隔震装置,常见的阻尼器有粘滞阻尼器和金属阻尼器。粘滞阻尼器通过内部流体的黏性流动产生阻尼力,其阻尼力与结构的振动速度成正比,能够有效地抑制结构的振动幅值。在地震作用下,粘滞阻尼器随着结构的振动不断消耗能量,降低结构的地震响应。金属阻尼器则利用金属材料的塑性变形来耗能,如软钢阻尼器,在地震中通过钢材的屈服和塑性变形吸收地震能量。在大跨度斜拉桥中,阻尼器的合理布置是发挥其减隔震效果的关键。一般来说,在主塔和主梁连接处、过渡墩和主梁连接处等关键部位设置阻尼器,能够有效地控制结构的相对位移,减小地震力的传递。阻尼器的布置数量和参数需根据结构的动力特性和地震响应需求进行优化设计。

### 4.3 减隔震装置的协同工作机制

在大跨度斜拉桥中,隔震支座和阻尼器通常配合使用,形成协同工作机制,以提高结构的抗震性能。隔震支座主要通过延长结构自振周期来减小地震力的

传递,而阻尼器则侧重于消耗地震能量,抑制结构的振动。在地震作用初期,隔震支座首先发挥作用,使结构与地面的振动相对隔离,降低结构的地震响应;随着结构振动的加剧,阻尼器开始工作,通过产生阻尼力消耗地震能量,进一步减小结构的振动幅值。两者相互配合,能够更有效地保护桥梁结构。在某大跨度斜拉桥的减隔震设计中,通过合理选择隔震支座和阻尼器的参数,并优化其布置方案,使结构在地震作用下的位移和内力响应明显降低,满足了抗震设计要求。

## 5 基于实际案例的抗震设计验证

### 5.1 案例工程地震动参数确定

选取实际的大跨度斜拉桥工程案例进行抗震设计验证时,首先要根据桥梁所在地区的地震地质条件确定设计地震动参数。这包括收集该地区的地震历史资料,分析地震活动的频率和强度特性;进行场地地震安全性评价,评估场地的地震危险性;通过地质勘察,了解场地的土壤类型、地质构造等情况,确定场地类别。根据这些资料和分析结果,按照相关规范和标准,确定设计地震动的峰值加速度、频谱特性和持时等参数。对于位于地震活动频繁地区的桥梁,设计地震动参数需考虑较高的峰值加速度和较长的持时,以确保桥梁在强震作用下的安全性;而对于地震活动相对较少的地区,设计地震动参数则可适当降低,但仍需满足规范要求。

### 5.2 桥梁结构有限元模型建立与分析

建立准确的桥梁结构有限元模型是进行抗震设计验证的关键步骤。根据桥梁的设计图纸和施工资料,确定桥梁各构件的几何尺寸、材料特性和连接方式等参数,利用有限元分析软件建立桥梁结构的三维模型。在模型建立过程中,要合理简化结构细节,确保模型既能准确反映结构的力学性能,又具有可计算性。将确定的设计地震动参数转化为地震波输入模型,进行时程分析,模拟桥梁在地震作用下的响应。通过时程分析,可以得到桥梁结构在整个地震过程中的位移、速度、加速度以及应力等响应随时间的变化情况。分析主梁在地震作用下的纵向和横向位移变化曲线,了解主梁的振动特性;观察桥塔底部的应力变化,判断

桥塔是否处于安全状态。通过对有限元模型的细致分析,能够全面了解桥梁结构在地震作用下的动态行为,为抗震设计验证提供可靠的依据。

### 5.3 设计方案优化与经验总结

将有限元分析的计算结果与抗震性能评估指标进行对比,判断设计方案是否满足抗震要求。若计算结果显示结构的位移、应力等响应超过了允许限值,则需分析原因并对设计方案进行优化。尽可能的优化措施包括调整结构体系、增加构件刚度、优化减隔震装置的布置和参数等。通过多次迭代计算和优化,使设计方案满足抗震要求。在某大跨度斜拉桥的抗震设计验证中,发现原设计方案中主梁跨中位移过大,通过增加辅助墩和优化斜拉索布置,有效地减小了主梁的位移,满足了抗震性能要求。通过实际案例的验证,不仅可以检验抗震设计方法的有效性和可行性,还能从实际工程中总结经验教训。在设计过程中要充分考虑场地条件对地震响应的影响,合理选择减隔震装置并优化其布置,加强关键部位的构造措施等。

## 6 结语

大跨度斜拉桥抗震性能优化设计研究对保障桥梁安全意义重大。通过准确分析地震作用、合理确定评估指标、优化结构体系及应用减隔震技术,可显著提升其抗震性能。实际案例验证了设计方法的有效性。未来,应持续深入研究,考虑多灾种耦合作用,开发更先进的减隔震技术和结构体系,提高大跨度斜拉桥抗震性能,适应复杂地震环境,为交通基础设施建设提供更坚实保障。

### 参考文献:

- [1] 李明,王强.大跨度斜拉桥地震响应特性研究[J].桥梁建设,2023,53(3):85-90.
- [2] 张伟,刘辉.大跨度斜拉桥抗震性能评估方法探讨[J].公路交通科技,2022,39(8):88-94.
- [3] 赵刚,孙悦.基于结构体系优化的大跨度斜拉桥抗震设计[J].土木工程学报,2024,57(5):112-120.
- [4] 陈红,周宇.减隔震技术在大跨度斜拉桥中的应用效果分析[J].振动与冲击,2021,40(16):178-184.
- [5] 王峰,吴迪.某大跨度斜拉桥抗震设计案例研究[J].世界桥梁,2025,53(2):65-70.