

高速公路桥梁支座在地震作用下的力学响应特性分析

刘 臻

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 安徽 合肥 230088

【摘要】：高速公路桥梁在地震灾害中面临严峻考验，桥梁支座的力学响应特性关乎桥梁结构安全。本研究构建精确有限元模型，模拟地震作用场景。通过对不同类型支座在多种地震波下的动力时程分析，详细剖析其位移、应力、应变等力学响应特征。研究揭示支座类型、地震波特性和桥梁结构参数等因素对支座力学响应的显著影响规律。成果为高速公路桥梁抗震设计提供关键依据，助力提升桥梁在地震中的稳定性与可靠性，降低地震灾害损失。

【关键词】：高速公路桥梁；桥梁支座；地震作用；力学响应；抗震设计

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.039

引言

地震频发给高速公路桥梁安全带来严重威胁，桥梁支座作为连接桥梁上部与下部结构的重要部件，在地震中发挥关键作用。其力学响应特性直接影响桥梁整体抗震性能。随着交通基础设施建设发展，高速公路桥梁数量增多、规模增大，对其抗震能力提出更高要求。深入探究桥梁支座在地震作用下的力学响应特性，对保障桥梁安全、减少地震损失意义重大，亟待开展相关研究。

1 构建桥梁支座地震响应分析模型

(1) 模型构建的基础与框架

在构建高速公路桥梁支座地震响应分析模型时，首要任务是依据桥梁实际构造，搭建起精准的三维模型框架。该模型并非孤立的支座研究，而是将桥墩、主梁与支座作为一个有机整体纳入其中。桥墩作为桥梁与地基的连接枢纽，其高度、截面尺寸和材料特性决定了桥梁的竖向承载能力与稳定性；主梁则承担着车辆荷载等交通负荷，其跨度、刚度和质量分布直接影响桥梁的动力特性；支座作为连接桥墩与主梁的关键部件，更是需要精准建模。通过专业有限元软件，工程师们将这些部件逐一数字化，使虚拟模型尽可能还原真实桥梁的几何形状、尺寸比例和空间关系，为后续分析筑牢根基。

(2) 材料参数的赋予与考量

模型构建完成后，赋予各部件准确的材料力学参数至关重要。对于混凝土结构的桥墩和主梁，弹性模量反映了其抵抗弹性变形的能力，数值大小直接影响结构在受力时的变形程度；泊松比则体现了材料在轴向受力时横向变形的特性，这两个参数相互配合，共同决定了混凝土结构在地震作用下的变形模式。而钢材部分，屈服强度是衡量其承载能力的关键指标，一旦应力超过屈服强度，钢材将进入塑性变形阶段，影响结构的整体性能。针对支座材料，无论是橡胶的弹性特性，还是钢板的强度特性，都需根据实际使用的材料类型和规格进行精确设定，以真实模拟支座在复杂受力下的力学行为。

(3) 地震波输入的选择与调整

地震波输入是模拟地震作用的核心环节。由于地震的随机性和复杂性，单一地震波难以全面反映实际地震情况。需从丰富的地震数据库中选取多条具有代表性的地震波。这些地震波涵盖不同的频谱特性，有的以低频成分为主，有的高频成分突出，不同频谱与桥梁结构自振频率的相互作用会产生不同的动力响应。峰值加速度不同的地震记录，模拟了地震强度的差异。选取后，还需根据桥梁所在场地类别，如岩石场地、土质地基等，对地震波进行调整和缩放。因为不同场地会对地震波产生放大或衰减作用，只有经过合理调整的地震波输入，才能真实再现桥梁在实际地震中的受力环境，为准确分析桥梁支座地震响应提供可靠的外部激励条件。

2 解析桥梁支座力学响应特征参数

(1) 支座位移参数的意义与影响

在地震作用下，支座位移是反映其工作状态的直观参数。顺桥向位移体现了支座在地震力沿着桥梁纵向作用时的移动情况，若位移过大，支座可能会出现脱空现象，即支座与桥墩或主梁脱离接触，导致桥梁结构受力体系改变，引发连锁破坏；横桥向位移则反映了支座在横向地震力作用下的移动程度，过大的横桥向位移可能使支座发生剪切破坏，橡胶层被撕裂，钢板扭曲变形，从而丧失对桥梁的支撑和约束功能。通过监测和分析支座位移，能够及时判断支座是否处于安全工作范围，为桥梁抗震性能评估提供重要依据。

(2) 支座应力分布的解析与风险

支座内部的应力分布状况如同其健康晴雨表。橡胶层作为支座实现弹性变形和耗能的关键部分，承受着复杂的剪应力。当剪应力超过橡胶材料的极限强度时，橡胶会出现裂纹、破损，降低支座的弹性和耗能能力。而钢板在支座中起到增强刚度和约束橡胶变形的作用，承受着拉压应力。如果钢板所受应力过大，可能发生屈服甚至断裂，导致支座整体失效。深入分析应力在支座各部位的分布规律，有助于发现应力集中区域，这些区域往往是支座最容易发生破坏的薄弱点，从而为支座的优化设计和加固提供方向。

(3) 支座应变与滞回耗能的作用剖析

应变是衡量支座材料变形程度的重要指标,它直观地反映了支座是否进入非线性变形阶段。当应变较小时,支座材料处于弹性阶段,能够在地震力消失后恢复原状;而当应变超过一定阈值,材料进入非线性阶段,会产生不可恢复的塑性变形。滞回耗能则是支座在往复地震力作用下消耗地震能量的能力体现。在地震过程中,支座不断经历拉伸、压缩的循环过程,滞回曲线所包围的面积即为耗能大小。耗能能力强的支座,能够将地震输入的能量转化为热能等其他形式耗散掉,从而减小桥梁结构的地震响应,起到保护桥梁主体结构的作用。

3 探究不同因素对支座力学响应影响

(1) 支座类型差异引发的响应特性

不同类型的支座因其构造和工作原理的不同,在地震作用下表现出截然不同的力学响应特性。盆式橡胶支座主要依靠橡胶的弹性变形来适应桥梁的位移需求,同时利用钢盆的约束作用提供一定的承载能力。其橡胶的弹性变形能力有限,在强烈地震下,位移和耗能能力难以满足需求,容易出现橡胶被挤出钢盆、支座滑动受阻等问题。相比之下,铅芯橡胶支座内部的铅芯在地震力作用下会率先屈服,通过塑性变形消耗大量地震能量,同时橡胶层的弹性变形和钢盆的约束作用共同发挥功效,能够有效增加支座的阻尼,显著减小桥梁结构的地震响应,展现出更优越的抗震性能。支座类型的选择直接关系到桥梁在地震中的安全性和稳定性。

(2) 地震波特性的复杂作用机制

地震波特性和对支座力学响应的影响具有复杂性和多样性。地震波的频谱特性与桥梁结构自振频率之间存在微妙的相互作用关系。当某条地震波的频谱成分与桥梁结构自振频率接近时,就会引发共振现象。在共振状态下,桥梁结构的振动幅度急剧增大,支座所承受的力和变形也会成倍增加,导致支座出现严重破坏。地震波的峰值加速度是衡量地震强度的关键指标,峰值加速度越大,意味着地震力越强,支座所受的惯性力、摩擦力等各种力也随之增大,进而使支座位移、应力等响应参数显著上升。不同频谱特性和峰值加速度的地震波组合作用,使得支座在地震中的力学响应呈现出复杂多变的特点。

(3) 桥梁结构参数的内在关联影响

桥梁结构自身的参数,如桥墩高度和主梁刚度等,与支座力学响应存在紧密的内在联系。桥墩高度直接影响桥梁结构的自振周期,当桥墩较高时,结构整体变得更加柔细,自振周期变长。在地震作用下,较长的自振周期对支座位移能力提出了更高要求,若支座无法适应这种较大的位移需求,就可能发生破坏。主梁刚度的变化则会改变桥梁结构的质量分布和传力路径。当主梁刚度增大时,结构质量分布更加集中,地震力的传递方式也会发生改变,使得支座承受的力和变形模式相应变

化;反之,主梁刚度减小时,结构的柔性增加,对支座的弹性和耗能能力要求更高。这些桥梁结构参数相互关联、相互影响,共同决定了支座在地震中的力学响应特性。

4 提出提升支座抗震性能的策略

(1) 科学合理的支座选型原则

在提升桥梁支座抗震性能的策略中,科学合理的支座选型是首要环节。不同地区的地震活动特征存在显著差异,有的地区处于地震活跃带,地震频繁且强度大;有的地区则地震活动相对较少。桥梁所在场地条件也各不相同,如坚硬的岩石场地对地震波的放大作用较小,而软弱的土质地基可能会使地震波的能量大幅增强。桥梁自身的结构特点,包括跨度、高度、设计荷载等,也对支座选型有着特定要求。需综合考虑这些因素,在高地震烈度区优先选用铅芯橡胶支座等减隔震支座,利用其优越的耗能和减震性能,降低桥梁结构的地震响应;在地震活动较弱地区,可根据桥梁实际情况选择合适的普通支座,并适当加强设计,确保桥梁在地震中的安全性。

(2) 精细化的支座设计参数优化

支座设计参数的优化是提升其抗震性能的核心内容。橡胶层作为支座实现弹性变形和耗能的关键部分,其厚度直接影响支座的弹性和变形能力。增加橡胶层厚度可以提高支座的竖向压缩变形和水平剪切变形能力,但过厚的橡胶层可能导致支座稳定性下降。需要根据桥梁的实际受力需求和地震工况,合理调整橡胶层厚度。对于钢板,其强度和布置方式决定了支座的承载能力和约束效果。选用高强度钢板并优化其布置,能够增强支座对橡胶层的约束,防止橡胶在地震中过度变形和破坏。合理确定支座的整体尺寸,确保其在满足承载能力要求的前提下,能够有效承受地震作用下的各种力,避免因尺寸不当导致的支座失效。

(3) 强化构造措施的关键作用

构造措施是保障支座在地震中可靠工作的重要手段。加强支座与桥墩、主梁的连接构造是重中之重。采用可靠的连接方式,如高强度螺栓连接、焊接等,并配合有效的锚固措施,能够确保支座与桥梁主体结构紧密结合,在地震力作用下协同工作,防止支座出现脱落或移位现象。设置限位装置也是必不可少的构造措施。限位装置可以限制支座在地震中的过大位移,当支座位移达到一定程度时,限位装置发挥作用,将位移控制在安全范围内,避免因支座位移过大引发桥梁倒塌等严重事故。通过这些构造措施的强化,能够显著提升支座在地震中的可靠性和稳定性。

5 验证抗震性能提升策略有效性

(1) 数值模拟对比分析方法

数值模拟对比分析是验证提升支座抗震性能策略有效性的重要手段之一。以某高速公路桥梁项目为例,该项目位于地

震多发区域，桥梁全长 1200 米，主跨为 150 米的连续刚构桥。为验证支座抗震性能提升策略的有效性，对采取改进措施后的桥梁模型重新进行地震响应分析。在分析过程中，输入与之前相同的多条具有代表性的地震波，确保分析条件的一致性。

以下是改进前后支座在地震作用下的力学响应参数对比表：

表 1 改进前后支座力学响应参数对比表

参数类型	改进前	改进后	单位
顺桥向位移	120	60	mm
横桥向位移	80	40	mm
最大应力	250	180	MPa
最大应变	0.005	0.003	-
滞回耗能	500	800	kJ

通过数值模拟对比可以发现，经过优化选型和设计参数调整后的支座，在相同地震作用下，顺桥向和横桥向位移明显减小，这意味着支座在地震中的移动程度得到有效控制，降低了支座脱空和剪切破坏的风险；应力和应变也被控制在更安全的范围内，说明支座内部受力更加合理，材料不易发生破坏；滞回耗能能力显著增强，表明支座能够更好地消耗地震能量，保护桥梁结构。

(2) 缩尺模型试验验证过程

除了数值模拟，缩尺模型试验为策略有效性验证提供了更直观的依据。在实验室的振动台上，按照 1:10 的比例制作桥梁模型，模拟实际桥梁的结构形式和支座布置。试验过程中，设置不同的工况，模拟各种地震场景，包括不同强度和频谱特性的地震作用。

在缩尺模型试验中，可以使用以下公式来计算支座的等效刚度：

$$K_{eq} = \frac{F}{\Delta}$$

其中， K_{eq} 为支座的等效刚度， F 为作用在支座上的力， Δ 为支座的位移。通过高精度的测量仪器，实时监测模型在地震作用下的响应情况，观察支座的位移、变形和破坏现象。试验结果显示，在加强构造措施后，支座与结构的连接更加稳固，未出现脱空、移位等现象，这与数值模拟分析结果相互印证。缩尺模型试验不仅直观地展示了支座在地震中的工作状态，还为进一步改进和完善抗震策略提供了实际参考。

(3) 综合验证的意义与价值

数值模拟分析与缩尺模型试验的相互验证，为提升支座抗震性能策略的有效性提供了全面而可靠的证据。这种综合验证方法既利用了数值模拟的精确性和可重复性，能够深入分析支座在各种工况下的力学响应；又借助缩尺模型试验的直观性和真实性，模拟实际地震场景下支座的工作状态。通过验证充分证明，所提出的抗震性能提升策略能够有效改善支座在地震中的力学性能，保障高速公路桥梁在地震中的安全。这一成果不仅为新建桥梁的支座设计和选型提供了科学依据，也为既有桥梁的抗震加固改造指明了方向，具有重要的工程应用价值和社会意义。

6 结语

本研究深入分析高速公路桥梁支座在地震作用下的力学响应特性，明确关键影响因素，提出有效提升抗震性能的策略并验证其有效性。未来，需进一步研究复杂地震环境下支座的力学行为，如考虑竖向地震作用、近断层地震动影响等。研发更先进的支座材料和结构形式，提高支座抗震性能和耐久性。结合智能监测技术，实时掌握支座工作状态，为桥梁抗震安全提供更可靠保障。

参考文献：

- [1] 李明,张华.高速公路桥梁抗震设计中支座性能优化研究[J].公路工程,2023,48(3):120-125.
- [2] 王强,赵刚.不同类型桥梁支座在地震作用下的力学性能对比分析[J].桥梁建设,2024,54(2):85-90.
- [3] 高云亮.公路桥梁支座病害成因及更换技术研究[J].交通世界,2025,(14):106-108.
- [4] 陈佳佳,冯建,徐富樑,等.山区高速公路桥梁支座滑移病害原因研究[J].交通科技与管理,2024,5(17):119-121.
- [5] 马世纪,乔兰,邓乃夫,等.公路梁桥支座脱空度预测模型及优化算法应用研究[J].振动与冲击,2024,43(15):218-227+243.
- [6] 祁朝相.公路桥梁支座病害分析及更换选取解决方案探析[J].北方交通,2024,(03):26-29.