

地震区桥梁板式橡胶支座剪切变形限值与安全评价

陈柚君

武汉科铁人才发展有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】：地震区桥梁板式橡胶支座的剪切变形超标问题频发，现行规范限值未充分考虑地震动特性、支座老化及加载条件等因素，导致安全评价与工程实际脱节。本文系统分析了剪切变形超标的成因，指出现行规范在分级限值、老化适配及病害耦合等方面的不足。基于压剪试验确定剪切变形限值，构建了包含刚度退化率、累计变形量及老化程度等指标的安全评价体系，并提出现场实测与分级校验相结合的实操路径。进一步从设计选型、分级预警、修复决策及全生命周期管理四个维度提出了精细化管控策略。研究成果可为地震区桥梁支座的设计、检测与抗震安全评估提供系统性的技术支撑。

【关键词】：地震区桥梁；板式橡胶支座；剪切变形限值；安全评价；性能退化

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.060

引言

板式橡胶支座作为桥梁上下部结构的核心传力耗能构件，其剪切变形控制对地震区桥梁抗震安全至关重要。在地震往复荷载作用下，支座易出现剪切变形超限、力学性能加速退化等问题，且现有规范限值适用性有限，单一评价指标无法准确判定支座真实安全工况。当前研究大多仅针对支座自身力学特性分析，缺少结合地震动参数、材料老化效应及结构协同作用的系统限值标准与综合安全评估方法。本文结合工程实际，剖析支座剪切变形超限的多源诱因，基于压剪试验构建限值计算方法，建立兼顾性能退化的综合评价体系，提出全流程精细化管控方案，为地震区桥梁支座抗震性能提升与长期服役安全提供理论支撑与工程参考。

1 地震区桥梁板式橡胶支座剪切变形现存问题及成因分析

1.1 地震作用下板式橡胶支座剪切变形超标问题

地震动往复荷载作用下板式橡胶支座需持续承受水平剪切，内部橡胶层与加劲钢板常呈现不均匀受力。水平位移超出设计阈值后剪切变形超标问题屡有出现，桥梁场地地震动峰值加速度、持时及频谱特性直接关联支座变形程度，软土地地震响应的放大作用会进一步加大支座剪切位移。部分工程支座选型与桥梁跨度、墩柱刚度适配性欠佳，罕遇地震场景中难以有效耗散地震能量，进而引发橡胶层剪切偏移过量，支座安装偏差及初始剪切位移控制不严，叠加长期运营后橡胶材料老化硬化、粘结性能衰减，自身变形适应能力随之下降。地震往复剪切作用下易快速突破变形限值，支座横向约束构造的缺失会进一步助长变形失控，最终导致剪切变形持续叠加且超出规范限定要求。

1.2 剪切变形限值现行规范缺陷及适配性不足

现行规范对板式橡胶支座剪切变形限值多按常温与寒冷地区划分固定剪切角阈值，未结合地震动强度、场地类别与桥梁跨径建立分级限值体系，高烈度区限值偏于保守或不足。规

范未考虑支座老化、材料劣化与长期荷载作用下的剪切性能衰减，限值仍按全新构件设定，与在役支座实际状态脱节^[1]。不同规范间剪切变形控制指标不统一，容许剪切角与剪切位移换算存在偏差，工程应用中判定标准混乱。限值未纳入支座脱空、偏压等病害耦合影响，单一变形指标无法全面反映地震作用下支座真实安全状态，对近场脉冲型地震动的大变形冲击缺乏针对性修正条款，难以适配复杂地震环境下的支座安全评价需求。

1.3 支座老化与加载条件对剪切变形的影响机制

长期紫外照射、高低温循环与大气侵蚀会使板式橡胶支座内部分子链交联结构劣化，橡胶硬度与剪切模量同步上升，延性与变形协调能力持续衰减，粘结界面易出现微裂纹并在循环荷载下扩展，导致支座有效剪切变形储备缩减。地震动往复加载会加剧内部损伤累积，偏压与不均匀面压会改变剪切应力分布，局部应力集中进一步限制变形发展^[2]。加载速率提升会缩短变形响应时间，支座来不及充分发挥剪切耗能作用，滑移分量占比上升，有效剪切变形被压缩。长期运营荷载与地震瞬时强震耦合作用下，老化支座的剪切刚度离散性增大，变形均匀性变差，易出现局部超限变形，难以满足地震区位移适配与耗能需求，直接影响支座剪切变形限值控制与结构抗震安全（见图1）。

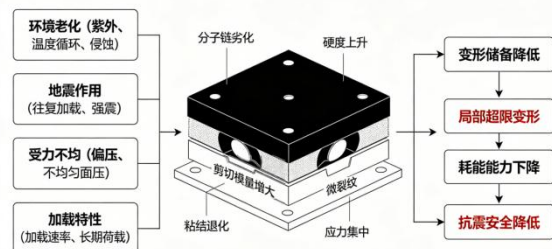


图1 支座老化与加载条件对剪切变形的影响机制

2 地震区桥梁板式橡胶支座剪切变形限值确定及安全评价方法

2.1 基于压剪试验的剪切变形限值计算方法

基于压剪试验的剪切变形限值计算方法主要依据现行《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4-2019)的相关规定,通过模拟地震时支座承受竖向荷载与水平往复荷载的耦合作用来确定其极限剪切能力。试验过程中,首先对支座试样施加恒定的竖向压应力(通常为10MPa),以模拟桥梁恒载及活载效应;随后,在保持该压应力恒定的条件下,以0.002MPa/s至0.003MPa/s的速率缓慢施加水平剪力,使支座产生纯剪切变形。当水平剪应力达到1.0MPa时,需持荷5分钟以观测其变形稳定性,并绘制应力-应变滞回曲线。根据试验数据,支座的容许剪切角正切值($\tan \alpha$)被严格限定为不大于0.7,换算为剪切变形量即不得超过支座橡胶层总厚度的0.7倍。对于地震区的特殊要求,还需进行抗剪老化试验,即将支座置于70℃环境中老化72小时后,再次测试其抗剪弹性模量,确保老化后的模量与标准值偏差在允许范围内,以此模拟支座在全寿命周期内抵抗地震作用的能力。

2.2 考虑支座性能退化的安全评价指标体系

地震区服役环境特征需融入支座性能退化安全评价指标体系,核心涵盖支座位学特性、老化状况及变形反馈等维度^[3]。指标选取贴合板式橡胶支座地震作用下的退化规律以保障评价的针对性与精准度,体系需纳入剪切刚度退化率指标,表征长期服役中橡胶材料老化、内部结构破损引发的刚度衰减,借助实测刚度与初始刚度的比值量化退化水准。支座累计剪切变形量指标结合地震作用频次、荷载量级,反映反复剪切下的变形累积效应,规避累积变形超限引发的支座损坏,橡胶层老化程度指标通过检测橡胶硬度、拉伸强度的衰减状况,体现环境侵蚀、疲劳作用对支座材料特性的影响。辅以支座脱空率、钢板与橡胶粘结剥离情况等指标,构建全方位多层次安全评价指标体系,精准呈现性能退化后支座的安全态势。

2.3 地震区支座剪切变形安全评价实操路径

地震区支座剪切变形安全评价实操需以现场实测数据为核心支撑,先对桥梁板式橡胶支座进行全面外观检测,排查支座老化、破损、脱空等缺陷,同步采用位移计、应变仪等设备,精准采集地震作用下支座的实时剪切变形数据,确保数据覆盖地震动峰值、持续时间等关键工况。结合支座型号、橡胶层厚度、设计承载力等参数,对照已确定的剪切变形限值标准,对实测数据进行分层校验,重点分析变形数据与限值的偏差幅度,判断支座在不同地震烈度下的变形响应规律。同时联动桥梁上部结构位移、下部结构受力数据,排查支座变形与结构整体受力的关联性,排除非支座自身因素导致的变形异常,通过数据校准、工况模拟、偏差分析等环节,完成支座剪切变形安

全性的实时判定,为后续支座维护、加固或更换提供精准的实操依据。现场实测与限值比对需结合地震动输入方向及支座布置方位进行定向校核。此外,评价过程中应建立数据追溯档案,记录每次实测的变形特征值与对应地震工况,为长期性能演变规律分析积累基础资料。

3 地震区板式橡胶支座剪切变形精细化管控与安全提升策略

3.1 基于变形机制的支座参数优化与选型原则

针对地震区桥梁板式橡胶支座剪切变形控制需求,需从设计源头建立基于变形机制的参数优化体系。支座选型不应仅依据常规竖向承载力与水平位移总量,而应将地震动特性作为核心约束条件^[4]。对于高烈度区桥梁,应优先选用橡胶层总厚度较大、形状系数合理的中高阻尼橡胶支座,以提升地震能量耗散能力与变形适应裕度。支座平面尺寸与橡胶层厚度的匹配关系需进行地震工况下的专项验算,确保罕遇地震作用下剪切角正切值控制在限值以内,并预留充足安全余量以应对材料性能离散性。此外,支座与墩梁连接构造的协同设计至关重要,应避免因锚固刚度不足导致支座在强震下发生滑移或翘起,进而加剧剪切变形集中。对于处于近断层区域或软土地场的桥梁,尚需考虑速度脉冲效应及长周期地震动对支座剪切变形的放大作用,适当放宽支座剪切变形限值或增设抗剪键等辅助限位装置,形成“支座耗能+限位装置兜底”的双重防护机制。

3.2 在役支座剪切变形性能的分级评估与预警机制

建立面向在役桥梁板式橡胶支座的分级评估体系是弥补现行规范静态限值缺陷的有效手段。该体系将支座剪切变形状态依据实测值与限值的接近程度划分为四个等级:安全区、关注区、预警区及危险区。不同等级对应差异化的检测频率与管理措施。对于处于关注区的支座,应缩短检测周期,重点监测变形发展趋势;处于预警区的支座,需立即开展原因排查,包括墩梁相对位移复核、支座老化程度检测及安装偏位校核,并评估其在设防地震作用下的剩余变形能力;处于危险区的支座,应列为优先更换对象,并在更换前采取临时限位或交通管制措施。该分级评估机制需嵌入桥梁健康监测系统,借助位移传感器与倾角仪实现支座剪切变形的实时采集与动态预警,克服定期检测的时间盲区,提升地震区桥梁支座安全管控的主动性与时效性。

3.3 剪切变形超限后的支座修复与置换决策方法

当板式橡胶支座剪切变形判定为超限后,需建立科学的修复与置换决策方法,避免盲目更换或不当修复造成的资源浪费与安全隐患。决策过程应综合考量支座剩余使用寿命、超限程度可逆性及桥梁整体抗震性能需求。对于因临时超载或非地震偶发因素导致的轻微超限,且支座外观无明显老化开裂、橡胶与钢板粘结完好时,可采用应力释放与位置调整的方法,通过

顶升梁体使支座恢复初始状态，并增设限位装置防止再次超限。对于因长期老化导致剪切模量上升、变形能力显著下降的超限支座，置换是唯一可靠方案。置换决策时需注意：同一桥墩或同一联内多个支座若同时进入预警区或危险区，应整联统一更换，避免新旧支座刚度差异引发附加内力；对于地震高烈度区重要桥梁，即使单支座超限，也应考虑全联置换以维持抗震体系的一致性。置换施工应采用同步顶升技术，严格控制顶升位移与速率，防止因支座拆除顺序不当导致梁体附加应力或相邻支座二次损伤。

3.4 基于全生命周期的支座剪切变形安全管理体系

从全生命周期视角构建板式橡胶支座剪切变形安全管理体系，是提升地震区桥梁抗震韧性的长效解决路径。该体系涵盖设计、施工、运营与报废四个阶段。设计阶段需建立地震区支座剪切变形限值数据库，根据桥梁抗震设防类别、场地条件及预期地震风险等级，差异化设定剪切变形控制目标，并明确支座更换周期与检测要求^[5]。施工阶段应严格控制支座安装精度，确保支座顶面与梁底、底面与垫石完全水平接触，初始剪切变形为零，同时记录支座初始刚度与外观状态作为后续对比的基准。运营阶段需实施“定期检测+动态监测+专项评估”三

位一体的管控模式，定期检测按规范执行，动态监测依托传感器实时捕捉地震及异常荷载下的变形峰值，专项评估针对强震后或发现明显变形异常时开展，评估内容包括残余变形量、刚度退化率及耗能能力变化。报废阶段需建立支座剪切变形历史档案，分析其全生命周期变形演变规律，为后续同类桥梁支座设计优化与限值修订提供实测依据。通过该体系的闭环管理，可有效降低地震区桥梁因支座剪切失效导致的结构破坏风险。

4 结语

地震区桥梁板式橡胶支座的剪切变形控制与安全评价是一项涉及地震动特性、材料老化、结构响应及工程检测等多因素的复杂问题。本文从变形超标成因、规范适配性不足及老化影响机制入手，构建了基于压剪试验的剪切变形限值计算方法，建立了涵盖刚度退化、累计变形及老化程度的安全评价指标体系，并提出了现场实测与分级校验相结合的评价实操路径。在此基础上，进一步从支座选型优化、分级预警机制、超限修复决策及全生命周期管理四个层面提出了精细化管控策略。研究可为地震区桥梁支座的设计、检测与安全运维提供系统性技术支撑，未来需在复杂地震动场耦合作用及智能监测预警方面开展深入研究。

参考文献：

- [1] 张军.地震高烈度地区高墩预制桥梁抗震性能分析[J].四川建筑,2022,42(01):125-127.
- [2] 钟学文.循环荷载下桥梁板式橡胶支座剪切滑移特征及处理方法研究[J].西部交通科技,2021,(10):106-108.
- [3] 许汉铮,刘注,展艳凯,等.板式橡胶支座的水平位移特性[J].科学技术与工程,2023,23(07):3038-3044.
- [4] 任炫知.圆形板式橡胶支座高度对连续桥梁抗震能力的影响[J].科学技术创新,2025,(18):125-128.
- [5] 高小妮,任红伟,朱蔚涛,等.桥梁板式橡胶支座开裂力学性能[J].公路交通科技,2024,41(08):146-153.