

# 高速公路桥梁抗震性能评估与加固措施探讨

任旋

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】**：高速公路桥梁作为交通网络的关键节点，其抗震性能直接关系到震后交通畅通与救援效率。本文聚焦高速公路桥梁抗震性能评估与加固措施，阐述评估所涉及的结构特性分析、动力响应模拟等核心内容，探讨基于评估结果的加固技术，包括结构补强、节点优化等。通过系统研究，明确不同评估方法的适用性及加固措施的实施要点，为提升高速公路桥梁抗震能力提供理论与技术参考，以保障桥梁在地震作用下的安全性与耐久性。

**【关键词】**：高速公路桥梁；抗震性能；性能评估；加固措施；结构安全

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.030

## 引言

地震灾害对交通基础设施破坏巨大，高速公路桥梁在强震中易发生坍塌、位移等病害，导致交通中断。随着我国地震多发区交通网络不断完善，提升桥梁抗震性能成为保障交通生命线安全的关键。当前，部分既有桥梁抗震标准偏低，抗震性能评估方法与加固技术的适用性有待进一步明确。开展相关研究，旨在建立科学的评估体系，提出有效的加固方案，为桥梁抗震设计与维护提供依据，确保其在地震灾害中发挥关键作用。

## 1 高速公路桥梁抗震性能评估的核心内容

### (1) 基于结构特性的基础要素剖析

抗震性能评估的首要任务，是深入剖析桥梁结构的基础特性。从材料性能维度来看，混凝土作为桥梁的主要构筑材料，其强度等级直接影响结构承载能力。不同强度的混凝土在地震反复荷载作用下，表现出的抗裂性能与变形能力截然不同。而钢筋的屈服强度与延性，则决定了结构在塑性阶段的受力状态。若钢筋延性不足，在地震拉力作用下易发生脆断，导致结构整体失效。在结构形式方面，连续梁桥凭借其超静定结构特性，能够有效分散地震荷载，但中间墩位置往往成为受力集中点；简支梁桥的抗震性能则依赖于支座的连接效果，若支座设计不合理，梁体易在地震中发生滑移甚至落梁事故。

### (2) 动力响应分析的关键路径探索

动力响应分析作为抗震评估的核心环节，需要借助先进的分析手段。建立有限元模型时，需精确模拟桥梁各构件的力学性能与连接方式，从梁体、桥墩到支座，每个部件的力学参数都需细致考量。在模拟地震荷载作用过程中，不仅要关注桥梁整体的位移、加速度变化，更要深入分析关键部位的内力分布。结合场地地震动参数进行分析时，峰值加速度决定了桥梁所受地震力的大小，反应谱特征则反映了不同周期结构的地震响应规律。通过将桥梁自振周期与场地反应谱相结合，可以判断桥梁是否会发生共振效应。在考虑结构非线性行为时，需模拟材料从弹性到塑性的转变过程，分析构件塑性铰的形成与发展，

以此评估桥梁在强震下的极限承载能力。

### (3) 多因素耦合下的评估精准化

实际的抗震性能评估需综合考虑多种因素的耦合作用。环境因素，如冻融循环、酸雨侵蚀等，会导致材料性能退化，降低桥梁的抗震储备。交通荷载的长期作用，会使结构产生疲劳损伤，在地震作用下可能加速结构破坏。施工质量缺陷，如混凝土浇筑不密实、钢筋锚固长度不足等，也会削弱桥梁的抗震能力。评估过程中，需采用多尺度分析方法，从宏观结构整体到微观材料本构，全面把握桥梁的抗震性能。结合概率地震危险性评估，考虑不同地震事件发生的可能性，为桥梁抗震性能赋予概率意义上的安全评价，使评估结果更贴合实际工程需求。

## 2 影响高速公路桥梁抗震性能的主要因素

### (1) 场地条件的基础性影响

场地条件是影响桥梁抗震性能的先天气因素。不同类型的场地土，如软土、砂土、岩石等，对地震波具有不同的放大或衰减效应。软土地基由于其低剪切模量与高压缩性，在地震作用下易产生较大的沉降与侧向变形，导致桥梁基础失稳。这种变形会引发上部结构产生附加内力，改变结构的受力状态。坚硬地基虽然能够快速传递地震能量，但也可能使桥梁结构产生剧烈振动。当场地土的卓越周期与桥梁自振周期相近时，会引发共振现象，大幅增加结构的地震响应。场地的地质构造，如断层、溶洞等，也会对地震波传播产生复杂影响，可能导致局部地震动的异常放大，威胁桥梁安全。

### (2) 结构设计参数的决定性作用

结构设计参数从根源上决定了桥梁的抗震性能。桥梁跨度是影响地震响应的关键因素，大跨度桥梁由于结构柔度大，在地震中容易产生较大的位移，对支座、桥墩等构件的承载能力提出更高要求。支座类型的选择直接关系到桥梁的水平约束能力，板式橡胶支座凭借良好的弹性变形能力，能够有效吸收地震能量；盆式支座则适用于大跨度桥梁，但其抗震性能依赖于限位装置的合理设计。桥梁的高跨比、宽跨比等几何参数，也

会影响结构的整体稳定性与地震响应特性。高墩桥梁在地震中易发生弯曲破坏，需要通过合理的配筋设计与构造措施增强其延性；宽桥在地震中可能出现扭转效应，需通过横向连接构造提高结构的抗扭刚度。

### (3) 构造措施的细节化保障

构造措施是提升桥梁抗震性能的重要保障。桥墩的延性设计通过合理配置箍筋与纵向钢筋，使桥墩在地震作用下能够产生塑性变形而不发生脆性破坏。箍筋加密区的设置，能够有效约束混凝土，提高其抗压强度与变形能力。伸缩缝与抗震缝的设计需充分考虑地震时结构的位移需求，避免因缝宽不足导致梁体碰撞，或因缝宽过大影响桥梁正常使用。在连接构造方面，梁体与桥墩的连接节点需具备足够的强度与延性，确保地震力能够有效传递。预埋钢板、榫卯连接等构造方式，可以增强节点的整体性；而在支座节点处，增设阻尼器、限位挡块等装置，能够限制支座的过大位移，同时消耗地震能量，保护主体结构安全。

## 3 高速公路桥梁抗震加固的关键技术

### (1) 结构补强技术的全面强化

结构补强技术致力于提升桥梁构件的承载能力。增大截面法通过在桥墩、盖梁等关键部位外包混凝土，不仅增加了构件的截面尺寸，更通过新增钢筋与原有结构的协同工作，显著提高结构的抗剪、抗弯能力。在施工过程中，需处理好新旧混凝土的界面粘结问题，确保两者能够共同受力。粘贴纤维复合材料技术利用碳纤维、芳纶纤维等材料的高强度特性，对梁体、桥墩进行加固。这些纤维材料具有轻质、耐腐蚀的优点，能够在不增加结构自重的前提下，有效约束混凝土变形，延缓裂缝开展。施工时需严格控制粘贴工艺，保证纤维材料与混凝土表面的充分粘结，发挥其最大加固效能。

### (2) 节点优化技术的精准提升

节点优化聚焦于桥梁薄弱连接部位。对于梁体与桥墩的连接节点，通过加强配筋、增设连接钢板等方式，提高节点的整体性与延性。在地震作用下，这些构造措施能够有效避免节点处出现塑性铰或连接失效，保证结构的传力路径畅通。支座节点的优化设计是提升桥梁抗震性能的关键。通过增设限位装置，如挡块、拉索等，可以限制支座的过大位移，防止梁体滑落；引入耗能元件，如铅芯橡胶支座、粘滞阻尼器等，能够在地震中吸收能量，减少主体结构的受力。优化支座的构造形式，使其在正常使用与地震作用下都能发挥良好性能。

### (3) 基础加固技术的稳固支撑

基础加固技术是保障桥梁整体稳定性的根基。对于桩基础，注浆加固法通过向桩周土体注入水泥浆等材料，填充桩体与土体间的间隙，提高桩周摩阻力与桩端承载力。这种方法能够有效改善桩基的受力性能，增强其抵抗水平地震力的能力。

对于浅基础桥梁，可采用扩大基础底面积的方式，降低基底压力，提高基础的抗倾覆与抗滑移能力。在必要时，还可通过设置桩基托换，将上部结构的荷载转移至新的桩基上，彻底改善基础的承载性能。基础加固过程中，需密切监测桥梁的变形情况，确保施工安全与加固效果。

## 4 高速公路桥梁抗震评估与加固的实施流程

### (1) 抗震评估的系统开展

抗震评估首先需要全面收集桥梁资料。设计图纸提供了桥梁的原始结构信息，竣工资料记录了施工过程中的关键细节，而运营期间的检测数据则反映了桥梁的实际工作状态。这些资料的完整性与准确性，直接影响评估结果的可靠性。现场勘查是获取桥梁现状信息的重要手段。通过目视检查、无损检测等方法，能够发现构件表面的裂缝、剥落等损伤，以及内部的钢筋锈蚀、混凝土强度退化等问题。对于关键构件，还需进行现场取样试验，获取材料的实际力学性能参数。在建立分析模型时，需将收集到的数据进行合理简化与抽象。采用有限元分析软件，模拟桥梁的动力特性与地震响应，结合规范要求，对桥梁的抗震性能进行分级评价。评估过程中，需对模型进行反复验证与修正，确保分析结果能够真实反映桥梁的实际抗震能力。

### (2) 加固方案的科学制定

加固方案的制定需紧密围绕评估发现的问题。针对不同的薄弱环节，选择合适的加固技术。在技术选择时，需综合考虑技术的成熟度、施工难度、成本效益等因素。对于轻微损伤的构件，可采用粘贴纤维复合材料进行加固；对于承载能力严重不足的构件，则需采用增大截面法等更为彻底的加固方式。施工方案的制定需充分考虑桥梁的运营需求。合理安排施工顺序，尽量减少对交通的影响。在施工过程中，需制定严格的质量控制标准，对关键工序进行重点监控。建立应急预案，应对可能出现的突发情况，确保施工安全与质量。

### (3) 加固效果的严格验证

为确保桥梁加固效果的可靠性，需通过荷载试验与数值模拟进行严格验证。荷载试验通过施加实际荷载，测量桥梁结构的变形和应变，直观评估加固后的承载能力提升情况。数值模拟则从理论层面分析结构动力特性变化，验证加固措施是否达到预期目标。验证内容涵盖动力特性、关键部位受力状态及整体稳定性等，对比加固前后的评估结果，分析加固效果的显著性，为后续工程提供参考。

以下是部分桥梁加固工程的参数对比表，用于展示不同加固措施对桥梁性能的影响。

表1 桥梁加固前后参数对比表

参数名称	单位	加固前数值	加固后数值
------	----	-------	-------

最大压应力	MPa	11.17	13.67
跨中底板压应力储备	MPa	0.60	1.10
新增压应力	MPa	-	2.40
实测新增压应力(平均值)	MPa	-	2.567
应变校验系数	-	0.85	0.65
挠度校验系数	-	0.80	0.55
基频(Hz)	Hz	4.5	5.2

## 5 提升高速公路桥梁抗震性能的综合策略

### (1) 抗震设计标准的持续完善

完善抗震设计标准是提升桥梁抗震性能的源头保障。结合区域地震活动特征,深入研究地震危险性,修订桥梁抗震设计规范。对于高烈度区的桥梁,需适当提高抗震设防等级,增加结构的安全储备。引入性能化设计理念,根据桥梁的功能重要性、修复难易程度等因素,确定不同地震水准下的性能目标。在设计标准中,需明确不同类型桥梁的抗震设计要点,细化构造措施要求。鼓励采用先进的设计方法与技术,如基于位移的设计方法、减隔震设计方法等,提高设计方案的科学性与合理性,确保桥梁设计能够满足不断发展的抗震需求。

### (2) 检测评估机制的常态化构建

建立常态化检测评估机制是保障桥梁安全的关键。定期采用超声波、雷达等无损检测技术,结合交通流量、超载情况等运营数据,评估桥梁抗震性能退化趋势。构建抗震性能数据库,通过数据分析挖掘潜在问题,为养护提供依据。动态调整评估方法,确保时效性和准确性。公式如下:

$$S = f(D, T, L)$$

## 参考文献:

- [1] 李建中,王东升,陈艾荣.公路桥梁抗震性能评估方法研究[J].土木工程学报,2021,54(3):87-96.
- [2] 周建庭,李悦,王智丰.既有桥梁抗震加固关键技术与应用[J].中国公路学报,2020,33(5):68-78.
- [3] 程乾.基于灰色模糊理论的高速公路桥梁结构抗震性能评估方法[J].运输经理世界,2025,(02):82-84.
- [4] 刘镇.江苏省高烈度区高速公路在役桥梁抗震性能评估研究[J].江苏建筑,2022,(02):49-51+76.
- [5] 毛宇欣,谢皓宇,牛松山.基于 AHP 的公路在役桥梁抗震性能量化评价方法[J].四川建筑,2025,45(02):181-185.
- [6] 马正.高速公路非规则高墩桥梁抗震性能设计研究[J].交通科技与管理,2025,6(03):78-80.

其中, S 表示桥梁结构性能, D 为检测数据, T 为运营数据, L 为评估标准, 函数 f 表示综合评估过程。

### (3) 抗震技术研发与应用创新推动

加强抗震技术研发是提升桥梁抗震性能的核心动力。从材料革新层面来看,应推动新型抗震材料的研发与应用。以高延性纤维增强混凝土为例,这种材料通过在普通混凝土中均匀掺入高强度纤维,显著提升了材料的抗裂性能与延性,使桥梁构件在地震作用下能够承受更大的变形而不发生脆性破坏;能够自复位的智能材料,如形状记忆合金、压电材料等,利用材料的特殊物理性能,在地震后可自动恢复结构初始状态,极大降低震后修复成本。在构造措施创新方面,需持续研发新型抗震构造,通过优化桥墩与梁体的连接方式,采用可更换耗能构件等技术,实现地震能量的合理耗散与结构损伤控制。在墩梁连接处设置可更换的钢阻尼器,地震时阻尼器率先屈服耗能,保护主体结构安全,震后仅需更换阻尼器即可恢复桥梁使用功能。借助有限元分析、振动台试验等手段,对新型构造措施进行多尺度力学性能研究,确保其在复杂地震工况下的可靠性。

## 6 结语

高速公路桥梁抗震性能评估与加固是保障交通生命线安全的重要举措。通过明确评估核心内容、掌握关键加固技术、规范实施流程及落实综合策略,可有效提升桥梁抗震能力。未来,随着新材料、新技术的发展,抗震评估方法将更加精准,加固技术将趋向高效、经济与环保。结合智能化监测系统的应用,可实现桥梁抗震性能的实时预警与动态维护,为构建更具韧性的交通网络奠定基础。