

Research on Seismic Design and Seismic Isolation System Optimization of Highway Bridges in High-Intensity Earthquake Zones in Mountainous Areas

Qiqi Wen

Chongqing Luwei Civil Engineering Design Co., Ltd., Chongqing, 400060, China

Abstract

In mountainous regions with high seismic intensity, the significant terrain undulation, complex geological conditions, and pronounced spatial non-uniformity of ground motion pose more severe safety challenges for highway bridges under seismic action. Traditional seismic design methods, which primarily focus on enhancing component strength and ductility, often encounter issues such as unclear stress paths, concentrated seismic energy release, and difficult-to-control structural damage in complex mountainous bridge structures. Seismic isolation technology, by introducing flexible and energy-dissipating units into the structural system, effectively isolates and dissipates seismic energy, serving as a crucial technical approach to improving bridge seismic performance. This paper proposes targeted optimization strategies from aspects such as isolation device selection, structural overall coordination, parameter configuration, and detailed construction, aiming to provide theoretical foundations and technical references for the safe design and engineering practice of highway bridges in high-intensity seismic mountainous areas.

Keywords

Mountain bridges; High intensity earthquake zone; Seismic design; Isolation system; Structural optimization

山区高烈度地震区公路桥梁抗震设计与隔震体系优化研究

文祺琦

重庆路威土木工程设计有限公司, 中国 · 重庆 400060

摘要

山区高烈度地震区由于地形起伏大、地质条件复杂、地震动空间非一致性显著,公路桥梁在地震作用下面临更为严峻的安全挑战。传统以构件强度和延性提升为核心的抗震设计方法,在复杂山区桥梁结构中往往存在受力路径不清晰、地震能量集中释放以及结构损伤难以控制等问题。隔震技术通过在结构体系中引入柔性耗能单元,实现地震能量的有效隔离与耗散,已成为提升桥梁抗震性能的重要技术途径。本文从隔震装置选型、结构整体协同、参数配置及构造细化等方面提出针对性优化策略,以期对山区高烈度地震区公路桥梁的安全设计与工程实践提供理论依据和技术参考。

关键词

山区桥梁; 高烈度地震区; 抗震设计; 隔震体系; 结构优化

1 引言

随着我国西部山区交通基础设施建设的持续推进,大量公路桥梁不可避免地分布于高烈度地震区。这类桥梁通常跨越深切河谷、陡峭山坡或活动断裂带,结构形式复杂、桥墩高度差异大、地基条件不均匀,在强震作用下极易产生不利的动力响应。历次强震灾害表明,山区桥梁一旦发生严重破坏,不仅修复难度大、恢复周期长,还可能对区域交通与应急救援体系造成长期影响。因此,针对山区高烈度地震区桥梁开展系统性的抗震设计与技术优化研究,具有显著的工

程实践意义。

2 山区高烈度地震区公路桥梁的抗震特点与设计挑战

2.1 山区桥梁地震作用特征及其对结构响应的影响

山区高烈度地震区受复杂地形地貌与地质构造条件的共同作用,其地震动特征相较于平原地区表现出显著差异^[1-2]。一方面,峡谷、陡坡及不规则地形容易引发地震波的反射、折射与能量聚集效应,使桥位处地震动峰值加速度及反应谱特性产生放大,尤其在中长周期范围内更为明显;另一方面,山区桥梁沿线路径较长,不同桥墩所处场地条件差异显著,地震动输入在幅值、频谱及相位上呈现出明显的空间非一致性特征。这种非一致地震作用易在桥梁结构中

【作者简介】文祺琦(1982—),男,中国江苏常熟人,本科,副高级工程师,从事桥梁设计研究。

诱发附加内力和扭转效应，显著放大结构动力响应的不确定性。

从结构特征看，山区公路桥梁多采用高墩、大跨或连续体系形式，桥墩高度差大、结构柔性显著，上部结构质量分布不均，在强震作用下易产生较大的位移需求与惯性力放大效应。当结构自振周期与场地地震动主导周期接近时，易发生动力放大现象，导致桥墩底部弯矩需求急剧增加，塑性损伤集中出现。此外，山区桥梁基础条件复杂，部分桥墩位于坡积层、断裂破碎带或软弱夹层之上，地震作用下地基—结构相互作用效应明显，进一步加剧结构受力与变形的不均匀性。这些因素共同决定了山区高烈度地震区桥梁抗震问题具有多源耦合、响应复杂和破坏模式不确定等突出特点。

2.2 传统抗震设计思路在山区桥梁中的适用性不足

现行桥梁抗震设计多以构件延性耗能和承载力储备为核心，通过“强柱弱梁”“延性设计”等理念，允许结构在强震作用下进入受控的塑性工作状态。然而在山区高烈度地震区，这种以构件承担主要地震能量的设计思路面临明显局限。一方面，高墩桥梁在地震作用下塑性需求大，若塑性变形集中于桥墩底部或支座区域，极易导致关键构件发生严重损伤甚至失效，结构整体安全性难以保障；另一方面，山区桥梁施工与运维条件受限，震后修复周期长、成本高，传统“允许破坏”的抗震目标难以满足现代公路交通对功能保持和快速恢复的要求。传统抗震设计往往假定地震输入一致，难以有效应对山区桥梁普遍存在的地震动空间非一致性问题，容易低估结构实际受力水平^[3-4]。在高烈度地震条件下，这种设计偏差可能导致抗震安全储备不足，增加落梁、支座失效等灾害性破坏风险。因此，单纯依赖提高构件强度和延性的抗震设计方法，已难以适应山区高烈度地震区公路桥梁对整体安全性、韧性与可恢复性的综合要求，有必要从体系层面引入隔震、减震等新型抗震技术，对传统设计思路进行补充与优化。

3 隔震技术在山区公路桥梁中的作用机理与体系构成

3.1 隔震体系对山区桥梁动力响应特性的调控机理

隔震技术的核心在于通过在桥梁上、下部结构之间设置具有柔性及耗能能力的隔震层，从体系层面重构结构对地震作用的响应方式。相较于传统抗震设计依赖构件进入塑性阶段耗散地震能量，隔震体系通过延长结构自振周期、降低等效刚度，使结构远离地震动能量集中的频段，从而显著削弱地震输入效应。这种“周期迁移”效应在高烈度地震区尤为关键，可有效降低桥梁结构的加速度响应和内力需求。对于山区公路桥梁而言，高墩、大跨和不均匀质量分布使结构动力特性复杂，传统设计中地震能量往往集中作用于桥墩底部和支座部位，导致局部损伤快速累积。隔震体系引入后，地震作用主要在隔震层中以位移形式释放，上部结构与桥墩

的惯性力水平显著降低，结构受力由“强震内力控制”转变为“位移控制”。这种转变不仅有助于降低关键构件的损伤程度，也使结构整体响应更加可控^[5]。

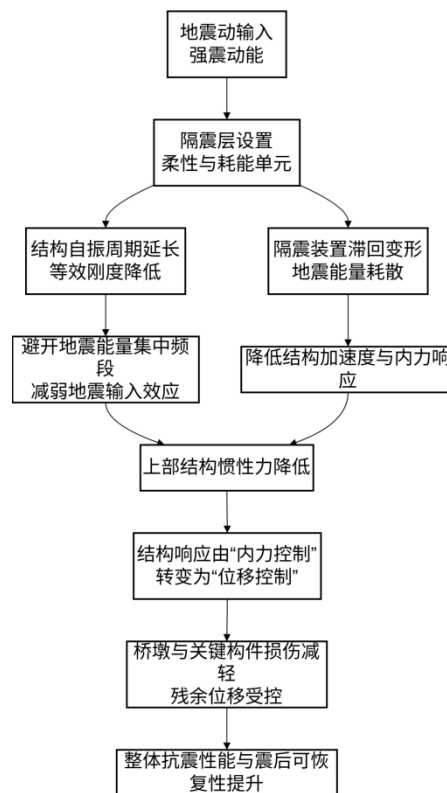


图1 山区公路桥梁隔震体系构成形式示意图

同时，隔震体系通常具有一定的耗能能力，能够通过滞回变形将地震能量转化为热能消耗掉，从而进一步削弱地震反应。在山区桥梁中，这种耗能机制对抑制高墩结构的往复振动尤为有效，可减少残余位移的产生，提高桥梁在强震后的可恢复性。因此，从动力学角度看，隔震技术通过“周期调节—能量耗散—响应重分配”的综合作用机制，为山区高烈度地震区桥梁提供了一种更为安全、合理的抗震响应控制路径。综上所述，隔震技术通过周期调节、能量耗散与结构响应重分配等多重机制，对山区公路桥梁的地震响应特性产生系统性调控，其作用路径如图1所示。

3.2 山区桥梁隔震体系的构成形式及适用特征

在公路桥梁工程中，隔震体系通常由隔震装置、限位与防落梁构造以及必要的附属连接构件共同构成，其中隔震装置是体系发挥作用的关键功能单元。常见桥梁隔震装置包括铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座和摩擦摆支座等，其在满足竖向承载与正常使用性能要求的同时，能够在水平向提供较大的柔度和耗能能力。不同类型隔震装置在力学性能和工作机理上存在差异，其适用性需结合山区桥梁的结构特征与地震环境进行综合分析。

对于高墩连续梁桥或大跨结构，桥梁自振周期较长，地震位移需求显著，宜选用位移适应能力强、耗能稳定性好

的隔震装置,以避免在强震作用下发生隔震失效。同时,由于山区桥梁桥墩高度差异较大,隔震体系在不同桥墩处的受力和变形水平往往不均衡,设计中需重点关注隔震装置在不均匀位移条件下的协同工作性能,防止因局部超限导致体系整体功能削弱。隔震体系的有效运行离不开限位与防落梁构造的合理配置。在山区高烈度地震区,应在充分发挥隔震装置减震作用的前提下,通过设置多级限位措施控制极端地震下的结构位移,防止上部结构脱落或发生不可恢复的结构破坏。这种“隔震—限位”协同构成的抗震体系,有助于在保证正常地震作用下隔震效果的同时,提高桥梁在超设计地震条件下的安全冗余。

总体来看,山区公路桥梁隔震体系并非单一技术措施的简单叠加,而是需要结合桥梁结构形式、地震动特征及运行环境进行系统构建。只有在充分理解隔震机理和体系构成特征的基础上,才能为后续隔震参数优化与工程应用奠定可靠基础。

4 山区高烈度地震区公路桥梁隔震体系的优化设计方法

4.1 隔震参数配置与结构响应控制的协同优化

在山区高烈度地震区公路桥梁中,隔震体系的设计目标不仅在于降低结构地震响应水平,更在于实现地震作用下结构受力与变形的整体可控。因此,隔震参数的合理配置是隔震体系优化设计的核心内容。隔震参数主要包括隔震装置的等效刚度、阻尼比及允许位移能力,其取值直接影响桥梁在地震作用下的加速度响应、内力分布及隔震层位移需求。

从动力响应角度看,适当降低隔震层等效刚度可有效延长结构自振周期,使桥梁动力特性避开地震动能量集中的频段,从而显著削弱地震输入效应。然而,在山区桥梁中,桥墩高度差异较大、结构柔性分布不均,若隔震刚度配置不合理,容易导致部分桥墩隔震位移过大,甚至出现隔震装置超限工作的问题。因此,隔震参数配置应在满足整体周期调节效果的同时,兼顾不同桥墩处的位移协调性,避免隔震层受力与变形的明显不均。阻尼参数的设置同样对隔震效果具有重要影响。通过提高隔震体系的等效阻尼比,可在一定程度上抑制隔震位移峰值,降低结构残余变形,对提高桥梁震后可恢复性具有积极作用。但过高的阻尼水平可能削弱隔震体系的周期延长效果,使部分地震能量重新传递至上部结构,导致加速度响应回升。因此,在山区高烈度地震区,应通过多工况动力分析,对隔震刚度与阻尼参数进行协同优化,在结构内力控制与位移需求之间取得合理平衡。

允许位移能力作为隔震装置的关键性能指标,需与山区桥梁的地震位移需求精准匹配。山区高烈度地震区的地震动往往具有峰值加速度高、持时较长且包含丰富高频成分的特点,这会导致隔震层在地震作用下产生较大的累积位移。若隔震装置的允许位移能力不足,可能引发装置的塑性破坏

甚至失效,丧失隔震功能;但若允许位移能力过大,不仅会增加装置的制造成本,还可能因隔震层空间需求增大而与山区桥梁的下部结构布置(如桥墩间距、基础形式)产生冲突。

4.2 面向山区桥梁特征的隔震体系整体优化策略

隔震体系在山区公路桥梁中的有效应用,离不开与桥梁整体结构体系的协同优化设计。不同于平原地区桥梁,山区桥梁往往存在高墩、长联及复杂基础条件等特征,隔震设计若仅关注隔震装置本身,容易忽视结构整体受力路径的变化,影响隔震效果的充分发挥。因此,在隔震体系优化过程中,应从结构整体角度出发,对上部结构、下部结构及隔震层进行统筹考虑。在上部结构设计方面,应通过合理控制结构刚度与质量分布,降低不必要的动力放大效应,使隔震体系能够在地震作用下充分发挥作用。对于下部结构,特别是高墩桥梁,应在满足隔震体系需求的前提下,适当保留一定延性能力,以应对超设计地震或隔震装置性能退化等不利工况。这种“隔震为主、延性兜底”的设计思路,有助于提高桥梁抗震体系的安全冗余。

隔震体系的优化设计还应充分考虑山区桥梁的施工与运维条件。山区桥梁往往交通不便、养护条件受限,隔震装置的可检测性与可更换性尤为重要。在构造设计中,应通过预留合理操作空间、优化连接细节,提高隔震装置的耐久性与可维护性,避免因后期维护困难而影响隔震体系的长期服役性能。通过上述多层次的优化设计,隔震体系不仅能够降低强震作用下有效降低桥梁结构响应,还能够在全寿命周期内保持稳定可靠的抗震性能。

5 结语

山区高烈度地震区公路桥梁在地震作用下面临着更为复杂和严峻的安全挑战,传统以构件延性耗能为主的抗震设计方法已难以满足现代桥梁对安全性与韧性的双重要求。通过引入隔震技术,从体系层面改变桥梁结构的抗震受力机制,是提升山区桥梁抗震性能的有效途径。本文在系统分析山区桥梁地震作用特征与抗震设计难点的基础上,阐明了隔震体系在降低地震输入、优化结构响应方面的作用机理,并提出了面向山区高烈度地震区的隔震体系优化设计思路。

参考文献

- [1] 罗绍任. 公路桥梁地震土压力中地震角分析[J]. 工程建设与设计, 2025, (17): 84-87. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.09.025.
- [2] 陈壮壮. 基于反应谱设计的公路桥梁抗震性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025, (08): 154-158. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.240487.
- [3] 胡维. 人工智能在公路桥梁抗震设计中的运用[J]. 汽车周刊, 2025, (09): 20-21+41.
- [4] 周钱山. 公路桥梁抗震设计关键技术研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(11): 73-76. DOI: 10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.11.019.
- [5] 刘善晴. 公路桥梁设计及其抗震优化分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (35): 154-156. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202435050.