

# 高速公路桥梁抗震设计与加固技术研究

任思霖 胡越聪

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250000

**摘要:** 本研究聚焦高速公路桥梁抗震设计与加固技术,以《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2231-01-2020)为核心依据,系统分析地震动特性、桥梁震害机制及结构抗震难点,探讨关键设计与常用加固方法,结合工程实例验证设计与加固方案的可行性。研究旨在完善高速公路桥梁抗震设计体系,提供科学、可行的加固技术路径,提升桥梁抗震韧性,保障震后交通生命线畅通,为相关工程实践提供理论支撑与技术参考。

**关键词:** 高速公路桥梁; 抗震设计; 加固技术

引言: 高速公路桥梁是交通网络的核心枢纽,其抗震性能直接决定震后交通恢复效率与救援通道畅通性。地震易引发桥梁落梁、桥墩损坏、支座移位等病害,严重威胁交通安全,而既有部分桥梁抗震标准偏低、加固技术适配性不足。基于此,本研究开展高速公路桥梁抗震设计与加固技术研究,明确设计原则、优化加固方案,破解抗震设计难点,为保障桥梁结构安全、提升抗震能力提供切实可行的解决方案。

## 1 高速公路桥梁抗震相关理论基础

### 1.1 地震作用与桥梁抗震基本原理

(1) 地震动特性与传播规律: 地震动主要表现为加速度、速度等参数的随机变化,核心特性包括振幅、频率和持时,其中面波对桥梁破坏作用最强。传播规律受地质条件影响,硬质地层传播快、衰减慢,软土地层易放大震动,近场地震动振幅大、波形复杂,对桥梁威胁更大。(2) 桥梁抗震核心原理: 核心是通过合理设计,使桥梁在地震作用下耗散能量、控制变形,避免脆性破坏。遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”原则,通过增强结构延性、设置减隔震装置等,抵御地震惯性力,保障结构整体稳定。(3) 地震对高速公路桥梁的破坏机制: 主要包括落梁、桥墩开裂或压溃、支座移位损坏、桥台滑移等,其中落梁和桥墩破坏最为常见,会直接导致桥梁丧失通行能力,还可能阻碍震后救援。

### 1.2 高速公路桥梁结构特点与抗震难点

(1) 高速公路桥梁主要结构形式及特性: 以梁桥、刚构桥为主,辅以斜拉桥等,具有跨径适中、连续布置、桥墩偏高的特点,结构简单、受力明确,但整体刚度和延性需重点控制,适配高速公路通行需求。(2) 高速公路桥梁抗震核心难点: 高墩结构易发生侧向变形,连续梁桥的梁墩连接易受损,软土地基易引发基础沉降,且需兼顾抗震性能与通行平顺性,平衡抗震成本与

结构安全。(3) 不同类型桥梁的抗震差异: 梁桥抗震关键在支座和桥墩,刚构桥因梁墩刚性连接,整体抗震性较强,斜拉桥需重点保护索塔和斜拉索,悬索桥刚度小,抗震设计难度更高<sup>[1]</sup>。

### 1.3 桥梁抗震设计相关规范与标准

(1) 国内现行规范体系及核心要求: 以《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2231-01-2020)为核心,明确抗震设防分类与目标,要求通过两阶段设计,落实延性构造措施,保障桥梁抗震安全性。(2) 国外主流规范对比分析: 欧洲Eurocode8、日本道路协会规范、美国AASHTO规范较具代表性,日本规范侧重高烈度区设计,美国规范注重性能化设计,欧洲规范强调通用性与安全性。(3) 规范应用中的重点与注意事项: 需结合工程地质条件选用合适设计方法,严格落实构造措施,避免过度设计或设计不足,同时兼顾规范适用性与工程实际,确保设计方案可行。

## 2 高速公路桥梁抗震设计关键技术

### 2.1 抗震设计原则与目标

(1) 抗震设计基本原则: 核心遵循“预防为主、防治结合”原则,兼顾安全性与经济性,结合桥梁所处地震烈度、地质条件及功能定位,落实“延性设计、能量耗散”理念,确保结构在地震作用下避免脆性破坏,同时兼顾施工可行性与后期维护便利性,实现抗震性能与工程实际的统一。(2) 抗震设计分级目标: 按照“小震不坏、中震可修、大震不倒”的分级要求,分为三个等级: 小震工况下,桥梁结构无损坏,可正常通行;中震工况下,结构出现轻微损伤,经简单维修后可快速恢复通行;大震工况下,结构虽有严重损伤,但不发生整体倒塌,为震后救援预留通行条件。(3) 设计目标与桥梁功能的匹配性: 根据高速公路桥梁的重要性分级,核心枢纽桥梁、跨江跨海等特殊桥梁,需提高抗震设计目

标, 确保震后快速恢复通行; 一般路段桥梁, 可按常规抗震目标设计, 平衡抗震性能与建设成本, 避免过度设计, 确保设计目标与桥梁的通行功能、所处区域重要性精准匹配。

## 2.2 关键结构抗震设计技术

(1) 桥墩抗震设计技术: 重点采用延性桥墩设计, 通过合理选用箍筋加密区、设置纵向受力钢筋, 增强桥墩抗剪、抗弯能力; 对高墩结构, 采用双柱式、空心墩等形式, 减少自重并提高整体刚度, 同时设置塑性铰区, 引导桥墩在地震作用下发生延性变形, 耗散地震能量, 避免桥墩脆性压溃。(2) 桥台与基础抗震设计技术: 桥台采用整体性强的结构形式, 加强台身与基础的连接, 设置抗侧移装置, 防止桥台滑移; 基础设计优先选用桩基、沉井等深基础, 提高抗拔、抗倾覆能力, 对软土地基, 采用换填、加固处理, 减少地震引发的基础沉降与不均匀变形, 保障桥台结构稳定<sup>[2]</sup>。(3) 梁体与支座抗震设计技术: 梁体采用连续梁、刚构等整体性强的形式, 减少梁体间的相对位移; 支座选用抗震型盆式支座、铅芯橡胶支座, 增强支座的抗侧移、抗拔能力, 设置限位装置, 防止地震时梁体移位、落梁, 同时通过支座刚度优化, 协调梁体与桥墩的受力, 减少地震作用对结构的冲击。

## 2.3 抗震设计参数选取与优化

(1) 地震动参数的合理选取: 结合桥梁所处地震动参数区划, 选取峰值加速度、反应谱特征周期等核心参数, 参考区域地震历史数据, 考虑近场、远场地震差异, 对高烈度区、特殊桥梁, 需进行地震动参数专项分析, 确保参数选取贴合工程实际, 避免因参数偏差导致设计不合理。(2) 结构抗震参数优化方法: 采用数值模拟、试验验证相结合的方法, 优化桥墩截面尺寸、钢筋配置、支座刚度等参数, 运用遗传算法、响应面法等优化工具, 在满足抗震性能的前提下, 降低建设成本; 同时结合结构受力特点, 优化结构整体刚度分布, 提升抗震经济性与合理性<sup>[3]</sup>。(3) 设计参数对桥梁抗震性能的影响: 峰值加速度增大将显著增加结构地震惯性力, 易导致桥墩开裂; 反应谱特征周期与结构自振周期匹配时, 会产生共振效应, 加剧结构损伤; 桥墩截面尺寸、钢筋配筋率直接影响其延性与抗剪能力, 支座刚度不合理会导致梁体与桥墩受力失衡, 影响整体抗震性能。

## 2.4 抗震设计实例分析

(1) 工程概况: 某高速公路跨河桥梁, 全长860m, 主桥采用30m连续箱梁桥, 桥墩为钢筋混凝土空心墩, 最大墩高28m, 所处区域地震烈度为8度, 场地类别为II

类, 软土地基分布较广, 该桥梁为区域交通枢纽, 承担重要通行任务, 抗震设计要求较高。(2) 抗震设计方案与实施: 按照“小震不坏、中震可修、大震不倒”目标, 桥墩采用箍筋加密设计, 设置塑性铰区; 基础采用钻孔灌注桩, 对软土地基进行换填加固; 支座选用铅芯橡胶抗震支座, 设置限位挡块; 采用两阶段设计法, 通过数值模拟优化钢筋配置与支座刚度, 落实各项延性构造措施。(3) 设计效果验证: 通过地震动模拟试验与数值分析, 验证桥梁在小震工况下无损伤, 中震工况下仅支座轻微变形, 经维修可恢复通行, 大震工况下桥墩出现可控延性变形, 无整体倒塌风险; 震后结构沉降、位移均满足规范要求, 实现了抗震设计目标与桥梁通行功能的完美匹配, 验证了设计方案的可行性与合理性。

## 3 高速公路桥梁抗震加固技术

### 3.1 抗震加固原则与前期评估

(1) 抗震加固基本原则与要求: 核心遵循“安全可靠、经济合理、施工便捷”原则, 以现有桥梁结构为基础, 结合地震烈度、桥梁服役年限及结构损伤情况, 针对性采取加固措施, 确保加固后桥梁达到现行抗震规范要求; 同时兼顾加固效果与通行需求, 尽量减少施工对高速公路正常通行的影响, 做到“加固不破坏原有结构、不降低原有功能”。(2) 桥梁抗震性能评估方法: 采用现场检测与数值模拟相结合的方式, 现场检测重点排查桥墩、桥台、支座等关键部位的损伤情况, 检测结构材料强度、钢筋配置等参数; 数值模拟通过建立桥梁结构模型, 分析地震作用下结构的受力特性与变形规律, 综合评估桥梁现有抗震性能, 明确薄弱环节, 为加固设计提供依据。(3) 加固需求分析与方案选型依据: 结合性能评估结果, 分析桥梁抗震薄弱环节及加固需求, 区分轻度、中度、重度损伤对应的加固等级; 选型依据主要包括桥梁结构类型、损伤程度、所处地震环境、施工条件及经济成本, 优先选用成熟可靠、施工便捷的加固技术, 确保加固方案兼具针对性与可行性。

### 3.2 常用抗震加固技术及应用

(1) 结构补强类加固技术: 主要用于桥墩、梁体等主体结构的强度提升, 常用方法包括外包钢板加固、碳纤维布加固、增大截面加固等。外包钢板可增强桥墩抗剪、抗弯能力, 适用于桥墩开裂、强度不足的情况; 碳纤维布加固具有轻质、高强、施工便捷的特点, 可用于梁体、桥墩的补强, 有效提升结构延性; 增大截面加固适用于混凝土强度严重不足的构件, 通过增加截面尺寸、增设钢筋, 增强结构承载能力。(2) 节点优化类加固技术: 针对梁墩连接、桥台与梁体连接等薄弱节

点,采用增设抗剪键、加固节点钢筋、设置限位装置等措施,增强节点整体性与抗侧移能力,避免地震时节点开裂、脱开,防止梁体移位、落梁,确保结构传力顺畅,提升整体抗震性能<sup>[4]</sup>。(3)基础加固技术:针对软土地基、桩基承载力不足等问题,采用桩基加固、地基换填、注浆加固等技术。桩基加固通过增设桩基、加大桩径等方式,提高基础抗拔、抗倾覆能力;注浆加固可改善地基承载力,减少地震引发的基础沉降与不均匀变形,保障桥梁基础稳定。(4)新型抗震加固技术应用:主要包括消能减震加固技术、隔震支座替换技术等。消能器通过耗散地震能量,减少结构震动响应,适用于高墩、大跨径桥梁;更换新型抗震隔震支座,可有效隔离地震能量传递,降低梁体与桥墩的地震受力,提升桥梁抗震安全性,且施工便捷、对通行影响较小。

### 3.3 加固施工关键工艺与质量控制

(1)主要加固施工工艺要点:粘贴碳纤维布需先清理构件表面、涂刷底胶,确保粘贴牢固,控制粘贴层数与张力;外包钢板需除锈、焊接固定,灌注环氧砂浆填充缝隙;基础加固需严格控制钻孔、注浆工艺,确保桩基与地基结合紧密,施工过程中做好工序衔接,避免施工扰动原有结构。(2)施工过程质量控制措施:建立全过程质量管控体系,严格检验加固材料质量,确保材料符合规范要求;对关键工序进行旁站监理,重点检查粘贴质量、焊接质量、注浆密实度等;施工完成后,对加固部位进行检测,不合格部位及时整改,确保加固质量达标。(3)施工安全保障措施:施工前进行安全技术交底,规范施工人员操作流程;高速公路旁施工需设置安全警示标志,划分施工区域,疏导交通,避免车辆干扰施工;高空作业需做好防护措施,施工机械定期检修,严防安全事故发生,确保施工安全与通行安全<sup>[5]</sup>。

### 3.4 抗震加固工程实例

(1)工程背景与加固原因:某既有高速公路桥梁,建成运营15年,全长620m,为25m连续梁桥,桥墩为钢筋混凝土实心墩,最大墩高22m,所处区域地震烈度提升至8度,经评估发现,桥墩延性不足、支座老化损坏,

基础存在轻微沉降,无法满足现行抗震规范要求,需进行抗震加固。(2)加固方案设计与实施过程:结合评估结果,采用“节点优化+结构补强+基础加固”的综合方案,桥墩粘贴碳纤维布补强,更换老化支座为铅芯橡胶抗震支座并增设限位挡块,对基础采用注浆加固处理;施工中采用半幅封闭施工,减少对交通的影响,严格按照施工工艺要求落实每道工序,全程做好质量管控,工期共计45天。(3)加固效果检测与评价:加固完成后,通过现场检测与数值模拟验证,桥梁构件强度、刚度显著提升,桥墩延性满足规范要求,支座受力均匀,基础沉降控制在允许范围内;模拟8度地震作用下,桥梁结构无严重损伤,位移、应变均符合要求,加固后桥梁抗震性能达到现行规范标准,实现了加固目标,保障了桥梁长期安全通行。

### 结束语

本研究系统梳理了高速公路桥梁抗震设计的核心理论、关键技术及加固方法,结合工程实例验证了设计与加固方案的有效性,实现了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标。研究成果可有效指导工程实践,提升桥梁抗震性能与震后恢复能力。未来需结合新型材料与智能技术,深化全生命周期抗震管理研究,完善规范体系,为高速公路桥梁抗震工程提供更高效、可靠的技术支撑。

### 参考文献

- [1]李奕波.水泥混凝土在公路桥梁加固工程中的应用分析[J].中国水泥.2024,(11):93-96.
- [2]高春伟.区域性高速公路桥梁抗震设计研究[J].城市建设理论研究.2024,(35):160-162.
- [3]封海浪.高速公路桥梁抗震设计中的工程实践与安全策略探讨[J].城市建设理论研究.2024,(28):151-153.
- [4]颜长青,简佳峰.关于桥梁抗震设计与加固技术的探讨[J].工程建设与设计.2022,(12):95-96.
- [5]郭小土.桥梁抗震设计与加固技术探讨[J].黑龙江交通科技.2023,41(12):158-159.