

高速公路桥梁抗震性能提升及加固技术研究

黄广川

四川川广建筑劳务有限公司，四川省成都市，610000；

摘要：面向地震多发地区的高速公路桥梁，结构受震表现由体系选型、延性储备、传力路径与基础—土相互作用共同决定。为提升跨线网络的通行可靠性与震后快速恢复能力，研究从震害机理、性能目标、减隔震配置、构件细部、既有桥加固与施工组织等方面构建成套技术路径。提出以性能指标为牵引的设计与加固方法，强调位移控制、落梁防护、延性层级与可更换构件协同，给出基于韧性目标的评估与决策思路，为工程实践提供系统化依据。方法上综合动力机理分析、指标化校核与工程化工法，构建从新建设计到既有加固的统一框架，并以网络韧性为目标耦合交通组织与施工方案，实现震前预防、震中控制与震后快速恢复的闭环。

关键词：高速公路桥梁；抗震性能；减隔震；加固技术；韧性治理

DOI: 10.69979/3029-2727.25.01.063

引言

高速公路网络具有强耦合与长链路特征，地震作用一旦导致关键桥梁失效，将引发交通中断与救援延误。近年工程实践显示，震害常集中于支座、桥台回填区、横隔带、墩柱剪切区与梁端限位部位，原因涉及不规则体系、落梁安全储备不足、基础处置与场地效应认识不足等。为实现多地震水准下的安全与功能保持，研究引入以性能为导向的指标体系，面向小震可用、中震可修、大震避免倒塌的目标，形成从设计到加固的连续策略。与传统以力为中心的设计方式不同，该路径以位移与功能为主导，把可修复性与快速恢复纳入前置约束，推动限位、支座与伸缩装置从单一构造转向耗能与复位兼具的单元。同时在评估层面引入网络视角，以关键断面与绕行代价定义优先级，使资源投入与社会效益得到统一。本文围绕震害机理解析、性能目标细化、关键技术路径与加固实施展开，并从网络层面的韧性治理给出组织与评估方法。

1 桥梁抗震设计理念与需求评估

1.1 高速公路桥梁震害机理与系统薄弱环节

桩基承台—墩柱—上部结构构成的连续传力链在地震中承担惯性力与位移协调任务。当桥跨不规则、墩高差大或刚度突变时，横向力易在薄弱层集中，出现墩柱剪切压溃与桥面错台^[1]。支座体系是易损单元，位移限值偏小、限位构造不完善、梁端能量耗散能力不足，都会导致碰撞加剧与落梁风险。桥台后填土与结构相互作用若未合理引导，震后常见回填松散、搭板翘曲与车

辆跳车，进而放大大使用功能损失。场地效应与基础变形同样关键，软弱土层的长周期放大使多跨体系产生显著位移需求，液化或侧向流动将诱发桩身弯曲集中与承载衰减。温度与收缩徐变形成的初始位移若未通过伸缩与限位协调，也会在地震叠加下触发非对称响应。综合这些机理，可见桥梁的抗震短板往往源于传力路径不清、延性层级缺失与位移容纳不足。改进方向应围绕力与形变的可控转移，构建可替换、可检修与可观测的薄弱环，使震后快速恢复具备实施基础。近断层脉冲型动输入会在短时间内施加大位移需求，若横向联系不足，邻跨间位移不协调便会显著放大梁端冲击。竖向分量对简支与连续体系的抗剪与锚栓抗拔影响不容忽视，叠加效应促使剪切键与挡块提前屈服。耗能能力在各单元分配不均时，局部构件会过早进入强非线性状态，导致体系冗余被削弱^[2]。为此应从体系层次辨识易损环节，明确位移、转角与承载的阈值区间，作为后续技术路径的约束条件。在上部结构方面，横隔与横向联结的刚度分配若失衡，会引起桥面横向扭转，形成不利的主次受力切换。墩柱的剪跨比与配筋构造决定延性边界，约束箍筋间距过大或锚固细节粗糙，都会降低塑性区的转动能力。这些细部缺陷与不规则布置相互叠加，使得实际工作机理偏离设计假定，成为震害的触发点。

1.2 基于性能的抗震目标与指标体系

以性能为导向的目标体系，不再只以承载安全作为唯一尺度，而是把结构与交通功能的保持程度作为核心^[3]。小震状态需保障通行不中断，支座与限位保持弹性，伸缩装置与搭板完整；中震状态允许局部损伤但应限定

可修复度,位移与转角处于可恢复区间;大震状态控制为不发生失稳与落梁,关键传力路径保持连续。指标的选取应覆盖位移、延性、能量耗散与功能恢复四个维度,并与施工与运维可达性相协调。可量化指标包括墩顶位移比、曲率延性需求系数、支座滑移或剪切变形利用率、限位缝宽度利用率、梁端碰撞能量指标,以及基于工期的恢复时间目标与基于车流的容量恢复比例。参数边界由场地地震动、结构自振特性与土-结构相互作用共同决定,需在多地震水准、不同方向与考虑竖向分量的组合下进行校核。为避免设计与加固脱节,目标与指标应贯穿新建与既有工程,将可替换构件、可视化检查通道与传感器布设纳入前期方案,使震后诊断与调度具备数据基础。在评估方法上,可采用需求-能力对比、基于位移的验算与基于损伤的分级评定相结合,形成结构与网络双层次的判定框架。当指标之间存在冲突时,以保障通行与抢险通道为优先,通过权重分配与场景推演确定最优折中,并固化为工程化的验算表与现场检核清单。目标的落实还依赖分层分解,将体系目标下推到墩柱、盖梁、支座、剪力键与伸缩装置等具体单元,分别设定屈服控制值与替换触发值,确保薄弱环节能先行耗能且可快速更换。验收环节应以指标对齐为依据,图纸、计算书与现场计量数据一一对应,数字化交付文档明确传感器阈值与巡检周期,实现从设计到运维的闭环管理。

2 抗震性能提升的关键技术

2.1 体系减震与隔震设计优化

体系层面的减隔震通过改变力与形变的路径来降低构件受力峰值并释放位移需求。隔震策略在支承界面引入柔性复位能力,常用装置包括铅芯橡胶支承、摩擦摆类装置与复位型滑移系统,目标是延长结构自振周期并把能量耗散集中到可更换单元^[4]。减震策略在关键位置设置耗能构件,常见形式有粘滞阻尼器、金属屈服耗能器、调谐质量阻尼器与剪切型限位器,通过速度相关或屈服滞回降低响应。跨径组合复杂的桥梁需要在纵向与横向分别选取策略,纵向重在位移容纳与复位,横向重在跨间协调与防止扭转。装置布置应与落梁防护一体化考虑,限位缝宽度、挡块刚度与耗能器屈服顺序形成清晰层级,避免同级竞争导致的失效。对于近断层场地,需校核脉冲型动输入引起的大位移并适当加大位移容量,同时设置可变刚度或双阶段响应的装置以兼顾行车舒适与强震安全。隔震与减震并非简单叠加,协同优化应通过参数化建模与地震动样本分析确定装置刚度、

阻尼、摩擦系数与复位力的取值区间,并将温度位移、徐变与收缩引起的长期偏位纳入约束。施工与养护同样影响成效,安装偏心、螺栓预紧力不足、橡胶老化与滑移面污染都会削弱减隔震效果,应建立专项检测与更换制度,保证装置在全寿命期内保持设计性能。为兼顾行车品质,装置的低速刚度与摩擦特性需控制在合理区间,避免微震与车辆激励下产生异常位移与噪声;伸缩装置与排水系统要与位移容量相适配,确保长期水密与耐久,降低维护频度。

2.2 构件延性与连接细部提升技术

构件与细部的延性与可靠性决定了体系在超越常遇地震下的安全边界。墩柱宜通过约束箍筋加密、弯钩锚固优化与核心区混凝土韧性提升来增强塑性转动能力,必要时采用外包钢或纤维复合材料包裹形成外部约束,以控制斜压剪切与剥落^[5]。盖梁与横隔带应保证足够的抗剪与锚固强度,避免支座区域穿孔与劈裂,并通过合理的受力回路把梁端冲击引导至可耗能部位。支座锚固与连接件的抗拔和抗剪能力需与位移容量匹配,采用带复位功能的限位器与可替换剪力键,使损伤集中在易修复构件。落梁防护宜采用宽座加高挡块与约束带组合,缝宽与限位间隙按大位移需求校核,同时保持行车舒适与排水要求。伸缩装置与搭板区域应重视抗震韧性,通过可滑移支承与顺桥向柔性过渡减少震后错台与渗水,降低功能性损失。基础层面,桩土相互作用的非线性会显著影响墩顶位移与弯矩分配,可通过加大桩径、增加嵌固深度、加强桩帽与承台整体性来提升延性储备;在液化或侧向流动风险较高的场地,宜辅以地基改良与防护措施。连接细部的构造做法需要标准化与可检核化,关键尺寸、钢筋锚固长度与混凝土保护层厚度以现场量测为准入条件,确保图纸与实体一致。多跨桥可设置横向联系与横向限位耗能构件,使相邻梁体协同工作并限制扭转振型,减少碰撞能量。上部附属构件如护栏、声屏障与管线托架也需纳入抗震细部,采用防脱落卡件与延性连接,避免因局部坠落阻碍交通或损伤行车。为保证可施工与可维护,细部改进应在构造节点上预留检修口与观察窗,配合标识化构件编号,便于巡检与快速更换。

3 加固更新与韧性运维

3.1 既有桥梁加固策略与工法

既有桥梁的抗震加固应以快速恢复与最小交通影

响为前提,先做系统评估,识别控制性薄弱环并建立分级处置清单。加固路径通常从防落梁与限位完善入手,随后增设耗能与隔震装置,进而提升墩柱与基础延性。常用工法包括外包钢与套箍增强、纤维复合材料加固、加宽承座与加高挡块、增设复位型限位器与可替换剪力键、梁端加固与盖梁抗剪增强、外部预应力调控受力与裂缝。在基础层面,可通过增设补桩、扩大承台与桩帽加固改善承载与延性;对液化敏感场地实施地基改良与排水固结,降低位移与侧向流动。为兼顾通行,宜采用分幅施工与夜间窗口期作业,配合临时支承与限行方案,保证安全下的交通组织。加固设计需要明确可更换部位与可视化检查路径,并给出装置更换时的顶升、复位与校准步骤,形成可操作的现场手册。施工质量控制的关键是实体与设计的一致性,钢构件预制精度、锚栓预紧力、粘贴界面处理与树脂固化条件均应量化验收;对隐蔽部位建立影像与参数档案,以备震后追溯。完成加固后应进行动力识别与加载验收,获取自振特性与关键点刚度,作为后续健康监测的基线;同时制定分阶段的维护计划和演练流程,确保装置在多年服役中保持预期性能。在网络层面,可结合交通量、绕行代价与救援重要性确定优先顺序,把关键通道与应急路线纳入首批实施。材料与工法的选择应考虑耐久性 with 全寿命费用,抗腐蚀钢、耐候涂层与耐久树脂有助于降低后续维护工作量;对外部预应力与金属耗能构件设定定期复检周期与更换年限,使韧性能力长期可用。加固实施的每一道工序都应形成可追溯记录,含测量数据与影像资料,交付时生成数字化档案,明确阈值与巡检路径,便于按图索骥维护。并与地震预警联动,接收预警后自动推送限行与检查指令,缩短响应时间。

3.2 网络韧性导向的评估决策与施工组织

以韧性为导向的评估不只关注单座桥梁的安全,还要衡量网络层面的服务保持与恢复速度。核心指标包括通行能力恢复时间、关键节点的重要度、可替代路径的冗余度与受灾区域的通达性,配合不同地震情景与次生灾害开展推演,找出对出行与救援影响最大的约束点。决策层面可采用多准则方法,把结构损伤风险、施工难度、交通影响与费用收益纳入综合评分,形成排序清单;结合交通仿真评估分阶段实施对流量与延误的影响,确定窗口期与绕行策略。在施工组织上,提倡装配化与模块化,加固构件工厂化预制,现场以拼装与替换为主,配合标准化临时支承与限位装置,缩短封闭时间。抢通

阶段强调先恢复安全通行能力,再逐步完成耐久与美观层面的修复;对减隔震装置与限位系统建立备件库与应急更换队伍,形成常备方案。信息支撑同样重要,可建立映射结构、交通与资源的综合平台,集成传感数据、巡检记录与施工进度,支持跨部门会商与现场指挥;通过演练固化流程,使地震发生后能按既定脚本快速联动。评估与实施要闭环运行,监测数据与震后表现反向修正参数与权重,更新清单与库容,使网络韧性逐步提升并长期受控。在保障措施方面,可采用带绩效约束的合同模式,把封闭时长、恢复速度与质量缺陷率等指标写入条款,建立激励与约束并重的机制。公众沟通同样不可缺,提前发布施工计划与绕行信息,设置可视化工期进度与关键节点里程碑,减少不确定带来的社会成本。通过这些组织与管理手段,结构技术与交通运行目标得以一致,抗震加固从单点工程转化为网络治理。

4 结语

高速公路桥梁的抗震提升是体系、构件与组织的协同工程。以性能为核心的目标与指标把安全与功能量化为可检核边界,减隔震、落梁防护与延性细部共同形成可替换的耗能路径,既有桥加固依托标准化与装配化实现快速恢复。面向网络韧性,通过评估排序、备件储备与应急演练,把结构技术与交通目标纳入同一框架,使服务能力在可预期时间内恢复。持续监测与闭环修正推动参数与做法迭代,促使桥梁在全寿命期内保持稳定与可靠。

参考文献

- [1]徐云飞.山区高速公路桥梁设计要点及优化措施分析[J].科技资讯,2025,23(04):173-175. DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2408-5042-6121.
- [2]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.
- [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]吕中维,张雅林,李伟亭.高速公路桥梁设计中的振动与减振控制技术研究[J].运输经理世界,2025,(03):94-96.
- [5]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(电子版),2024,(28):151-153. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202428051.