

公路桥梁抗震设计及其耐久性研究

刘松

500101*****3118

摘要:本文聚焦公路桥梁抗震设计及其耐久性研究,剖析当前公路桥梁在抗震设计与区域地震特性适配不足、耐久性防护措施欠缺、两者协同设计缺失等问题。从明确抗震设计要点、探索耐久性提升路径、分析现存挑战、展望发展趋势等维度,探索科学解决方案。旨在通过优化抗震设计与强化耐久性管控,提升公路桥梁抵御地震灾害能力与使用寿命,保障交通路网安全稳定运行,为公路桥梁工程高质量建设提供实践参考。

关键词:公路桥梁; 抗震设计; 耐久性; 设计要点; 现存挑战; 发展趋势

DOI: 10.69979/3029-2727.25.10.094

引言

公路桥梁作为交通基础设施的关键组成部分,其抗震性能与耐久性直接关系到地震灾害发生时的交通通行安全,以及桥梁长期服役过程中的运维成本。随着我国地震多发区域公路建设需求增加,加之桥梁服役环境复杂,如高温、高湿、工业腐蚀等,当前部分公路桥梁存在抗震设计与区域地震特性不匹配、耐久性防护措施不足等问题。在交通强国建设背景下,深入研究公路桥梁抗震设计要点与耐久性提升策略,对保障桥梁结构安全、延长服役寿命、维护交通路网稳定具有重要现实意义。

1 公路桥梁抗震设计与耐久性的现状分析

1.1 适配性不足

抗震设计与区域地震特性适配性不足,抗震效果受限。不同地区地震烈度、地震波传播特性存在显著差异,但部分公路桥梁抗震设计未充分结合项目所在地的具体地震参数。例如,在高烈度地震区域仍采用适用于中低烈度区域的抗震设计方案,未针对性强化结构抗震能力;设计中未考虑局部地质条件对地震作用的放大效应,导致桥梁在地震发生时易出现墩柱开裂、支座损坏等问题,抗震效果未达预期。

1.2 防护针对性不强

耐久性防护措施针对性不强,易受环境因素侵蚀。公路桥梁服役环境多样,部分桥梁处于沿海高盐雾区域、内陆高污染区域或高寒冻融区域,但耐久性防护措施未根据环境特点差异化设计。例如,沿海桥梁未采用足够抗氯离子侵蚀的防护涂层,导致钢筋锈蚀加速;高寒区域桥梁未优化混凝土抗冻性设计,冬季冻融循环易使结

构出现裂缝,环境因素持续侵蚀桥梁结构,缩短其服役寿命。

1.3 协同设计欠缺

抗震设计与耐久性设计协同不足,整体性能优化欠缺。当前公路桥梁设计中,抗震设计与耐久性设计常独立开展,未考虑两者间的相互影响。例如,抗震设计中采用的耗能装置可能因耐久性不足,在长期使用中出现部件老化,影响地震时的耗能效果;耐久性防护措施可能未考虑抗震变形需求,导致防护层在地震作用下开裂脱落,无法发挥防护功能,两者协同缺失制约桥梁整体性能提升。

2 公路桥梁抗震设计的核心要点

2.1 地震荷载分析

地震荷载分析,结合区域地震烈度确定合理荷载参数。开展公路桥梁抗震设计前,需收集项目所在地的地震地质资料,明确区域地震烈度、设计基本地震加速度等核心参数。通过地震危险性分析,确定不同超越概率下的地震动参数,如加速度反应谱、地震动时程曲线等。同时,考虑桥梁所在场地类别对地震荷载的影响,如软土地基会放大地震作用,需适当提高荷载设计值,确保地震荷载分析符合实际工程需求,为后续结构设计提供可靠依据。

2.2 结构抗震优化

结构抗震优化,强化桥墩、支座等关键部位抗震性能。桥墩作为桥梁主要承重构件,需优化截面形式与配筋设计,如采用圆形截面提升抗扭性能,增加纵向钢筋与箍筋用量增强延性;对高墩结构,可设置减隔震装置减少地震力传递。支座是地震力传递的关键节点,应选

用抗震性能优良的支座类型，如铅芯橡胶支座，其兼具承载与减震功能，同时加强支座与梁体、墩台的连接强度，避免地震时支座脱落，确保关键部位抗震性能达标。

2.3 抗震构造设计

抗震构造设计，完善耗能装置与减震措施配置。在桥梁结构中合理设置耗能装置，如在梁端设置液体黏滞阻尼器，通过阻尼器变形耗散地震能量，减少主体结构受力；在桥墩底部设置塑性铰区域，通过该区域的受控屈服吸收地震能量，保护桥墩其他部位。同时，优化结构细节构造，如加强梁体与桥墩的连接锚固，避免地震时梁体移位；设置限位装置防止桥梁支座过度位移，通过完善的抗震构造设计，提升桥梁整体抗震能力。

3 公路桥梁耐久性提升的关键路径

3.1 材料性能优化

材料性能优化，选用抗腐蚀、高强度的桥梁建设材料。在混凝土材料选用上，采用高性能混凝土，通过调整配合比加入矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣粉），并掺入适量抗裂纤维，进一步提升混凝土抗渗性、抗腐蚀性与抗裂性，同时对混凝土拌制过程进行严格质量管控，确保配合比精准执行。对钢筋材料，优先选用耐腐蚀钢筋（如环氧树脂涂层钢筋、不锈钢钢筋），在钢筋加工安装前进行表面除锈处理，减少环境因素对钢筋的初始侵蚀。对于桥梁支座、伸缩缝等易损部件，选用耐磨、抗老化的高分子材料或合金材料，如采用改性橡胶支座、不锈钢伸缩缝，同时在部件安装前进行性能检测，确保符合设计要求，从源头减少结构损坏风险。

3.2 结构防护设计

结构防护设计，加强桥面、墩台等部位的防水防腐处理。桥面防护需完善防水体系，采用高弹性防水涂料与防水卷材复合设防，防水涂料涂刷前需对桥面基层进行打磨、清理，确保基层平整干燥，防水卷材铺贴时采用热熔法，保证卷材与基层紧密贴合，防止雨水渗入桥面铺装层侵蚀钢筋；设置完善的桥面排水系统，加密排水孔间距，在桥面纵坡较低处增设集水井，避免雨水在桥面淤积。墩台防护方面，对处于腐蚀环境的墩台，采用外包碳纤维布或防腐涂层进行防护，碳纤维布粘贴时需保证张力均匀，防腐涂层涂刷需达到设计厚度，隔绝腐蚀介质接触；对水下墩台，设置防撞护舷，选用高强度复合材料护舷，同时采用抗冲刷材料（如浆砌片石）保护基础，在基础周围抛填块石减缓水流冲刷，通过多维度防护设计，延长结构使用寿命。

3.3 运维监测强化

运维监测强化，建立全生命周期耐久性监测与评估机制。在桥梁建设阶段植入传感器，如钢筋锈蚀传感器、混凝土裂缝传感器，传感器布置需覆盖关键受力部位（如桥墩底部、梁体支座处），实时监测结构损伤状态；利用物联网技术构建远程监测平台，平台具备数据存储、分析、预警功能，将监测数据实时传输至管理终端，管理人员可通过手机、电脑随时掌握桥梁耐久性变化情况，当数据超出预警值时，平台自动发送预警信息。定期开展桥梁耐久性评估，结合监测数据与现场检测结果（如混凝土碳化深度检测、钢筋锈蚀程度检测），判断结构损伤程度，制定针对性维护方案，如对轻微锈蚀的钢筋进行防腐处理（涂刷防锈漆），对开裂部位进行修补（采用环氧树脂灌浆），通过全生命周期管控保障桥梁耐久性。

4 公路桥梁抗震设计与耐久性保障的现存挑战

4.1 技术层面挑战

技术层面：复杂地质条件下抗震设计难度大，新型耐久性材料推广受限。在岩溶、断层破碎带等复杂地质区域建设公路桥梁，地震荷载传递路径复杂，存在局部应力集中现象，传统抗震设计方法依赖经验公式，难以精准计算结构受力，导致设计方案安全性与经济性难以平衡，可能出现过度设计增加成本或设计不足存在安全隐患的情况。新型耐久性材料如超高性能混凝土、新型防腐涂料，虽性能优异，但存在生产成本高（超高性能混凝土单价是普通混凝土的3-5倍）、施工工艺复杂（需专用搅拌设备与浇筑工艺）等问题，且缺乏长期工程应用验证数据，施工单位担心材料性能不稳定影响工程质量，对其接受度低，推广应用面临较大技术与市场阻力，需投入更多资源开展技术研发与工程试点。

4.2 设计层面挑战

设计层面：抗震与耐久性设计指标衔接不紧密，缺乏统一设计标准。当前抗震设计标准与耐久性设计标准分属不同体系，抗震设计侧重地震作用下的结构安全，以承载力、延性为核心指标，耐久性设计关注长期环境作用下的性能保持，以材料抗腐蚀、结构抗老化为核心指标，两者设计指标未有效衔接。例如，抗震设计中采用的截面尺寸与配筋量可能未考虑耐久性需求，如为满足抗震延性增加的钢筋间距过大，易导致混凝土保护层厚度不足，结构在长期使用中易因腐蚀出现性能衰减；缺乏统一的协同设计标准，设计人员需分别查阅多本规范开展设计，难以系统开展抗震与耐久性一体化设计，

设计过程中易出现参数冲突，影响设计效率与质量，需行业主管部门牵头制定统一的协同设计规范。

4.3 环境层面挑战

环境层面：极端气候与腐蚀环境加剧桥梁结构损伤，防护难度增加。近年来极端气候事件频发，如强台风、特大暴雨、极端高温等，强台风会对桥梁梁体产生横向推力，导致桥梁支座移位、梁体变形；特大暴雨会引发洪水，冲刷桥梁基础，导致基础淘空；极端高温会使桥梁桥面铺装层受热膨胀，出现鼓包、开裂，对桥梁结构造成突发性损伤。同时，工业污染（如二氧化硫、氮氧化物）、海洋盐雾等腐蚀环境持续侵蚀桥梁结构，工业污染物与雨水结合形成酸性溶液，加速混凝土碳化，海洋盐雾中的氯离子渗透至混凝土内部，加速钢筋锈蚀，且腐蚀作用具有隐蔽性与累积性，早期仅表现为混凝土表面轻微变色，难以发现，后期结构出现明显损坏时，修复难度大、成本高，极端气候与腐蚀环境叠加，进一步增加了桥梁防护难度。

5 公路桥梁抗震设计与耐久性研究的发展趋势

5.1 一体化设计

推动抗震与耐久性一体化设计，实现结构性能协同优化。未来设计中，将抗震设计与耐久性设计纳入统一设计框架，建立两者协同的设计指标体系，明确抗震性能与耐久性性能的权重分配，如在地震高发且腐蚀严重区域，适当提高抗震与耐久性设计指标。例如，在结构截面与配筋设计时，同时考虑地震作用下的延性需求（增加箍筋加密区长度）与长期使用中的抗腐蚀需求（增加混凝土保护层厚度）；选用兼具抗震与耐久性能的材料与构造形式，如在耗能装置设计中融入防腐措施，对铅芯橡胶支座外包裹防腐套，确保其在长期使用中保持抗震功能；利用有限元软件开展一体化性能分析，模拟结构在地震作用与环境侵蚀共同作用下的受力状态，优化设计方案，通过一体化设计提升桥梁整体性能与服役可靠性。

5.2 智能化技术引入

引入智能化技术，提升抗震设计精准度与耐久性监测效率。在抗震设计中，利用 BIM 技术构建桥梁三维模型，模型包含结构尺寸、材料性能、荷载参数等信息，结合有限元分析软件开展精细化抗震模拟，模拟不同地震烈度、不同地震波作用下的结构响应，精准计算结构

在不同地震工况下的受力状态（如应力分布、位移变形），优化设计方案，减少设计误差。在耐久性监测方面，应用人工智能算法（如深度学习算法）对监测数据进行分析，通过训练模型实现结构损伤自动识别与预警，如识别混凝土裂缝宽度、钢筋锈蚀程度；利用无人机巡检（搭载高清摄像头、红外热像仪）、红外检测等技术，快速排查桥梁隐蔽部位损伤，巡检效率相比人工提升 3-5 倍，提升监测效率与准确性，为桥梁运维提供科学依据。

5.3 绿色环保技术探索

探索绿色环保技术，研发低能耗、易维护的抗震与耐久性解决方案。在材料研发上，开发可循环利用的绿色建材，如再生骨料混凝土、生物基防腐材料，减少资源消耗与环境污染；在抗震减震技术方面，研发低能耗的被动减震装置，降低装置运行与维护成本。同时，优化桥梁结构设计，采用模块化施工工艺，减少现场施工能耗与污染；建立桥梁全生命周期绿色管理体系，实现从设计、建设到运维的全过程环保管控，推动公路桥梁工程绿色可持续发展。

6 结论

公路桥梁抗震设计与耐久性保障是确保桥梁结构安全、延长服役寿命的核心环节，对维护交通路网稳定运行意义重大。当前，该领域面临技术适配不足、设计协同缺失、环境挑战加剧等问题，制约了桥梁整体性能提升。通过优化抗震设计要点、强化耐久性提升路径、破解现存技术与设计难题，可有效提升桥梁抵御地震灾害能力与抗环境侵蚀能力。未来，随着一体化设计、智能化技术与绿色环保技术的深入应用，公路桥梁工程将实现抗震性能与耐久性的协同优化，为交通强国建设提供更坚实的基础设施支撑，助力实现工程建设的安全、高效与可持续发展目标。

参考文献

- [1] 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.
- [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(电子版), 2024, (35): 160-162.
- [3] 覃瑞宏. 人工智能在公路桥梁抗震设计中的应用 [J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(06): 197.
- [4] 鞠炳照. 山区公路桥梁抗震设计分析 [J]. 运输经理世界, 2024, (27): 58-60.