

公路桥梁设计的安全性和耐久性研究

施建群

(中土集团福州勘察设计院有限公司, 福建 福州 350011)

摘要 公路桥梁的安全性和耐久性是交通运输系统的关键。本文从设计、施工、环境三个方面分析了影响桥梁安全性、耐久性的因素,提出了结构冗余设计、抗震设计优化、防护设施设计、健康监测与预警等策略来提高安全性,并探讨了高性能材料、耐久性设计、防腐蚀、预应力技术等提升耐久性的措施,通过工程案例,评估了设计措施的应用效果,旨在为公路桥梁设计提供科学依据,从而促进交通运输的可持续发展。

关键词 公路桥梁; 安全性; 耐久性; 设计策略; 工程实践

中图分类号: U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.07.038

0 引言

公路桥梁是现代交通运输的关键基础设施。然而,桥梁结构的损坏和失效时有发生,造成重大损失,引发社会广泛关注。提高公路桥梁的安全性和耐久性已成为亟待解决的重要课题。本文在分析影响桥梁安全耐久的关键因素基础上,提出相应的设计策略和技术措施,并结合工程案例进行实证研究,以期为公路桥梁设计提供科学参考。

1 影响公路桥梁安全性和耐久性的关键因素

1.1 桥梁设计因素

桥梁设计处于项目实施的最初始阶段,是决定项目投资、工期以及质量安全的关键。因此,桥梁设计的科学性与合理性在很大程度上影响着桥梁工程的安全耐久性能。通过精心设计,提高桥梁结构的安全冗余度和承载能力储备,改善构造细节,加强节点连接,可以从源头上控制安全风险,减少结构损伤,提高桥梁使用寿命。反之,设计缺陷和不合理因素则可能严重影响桥梁结构性能,埋下安全隐患。因此,高质量的桥梁设计是确保公路桥梁安全和耐久的首要前提。

1.2 施工质量控制

桥梁工程建设规模大、工序复杂、施工环境多变,施工质量控制不容懈怠。事实上,施工质量通病是诱发桥梁结构早期病害和安全事故的重要原因。混凝土质量缺陷、钢结构焊接裂纹、预应力管道堵塞等施工质量问题,都可能导致桥梁结构的承载能力降低和耐久性能衰退。因此,施工单位必须严格遵守施工操作规程,强化过程质量管控,运用先进工艺技术,确保施工质量满足设计和规范要求^[1]。同时,充分利用施工监测和检测手段,及时发现并消除质量隐患,为确

保桥梁安全耐久奠定坚实的基础。

1.3 环境与灾害因素

公路桥梁建成后将长期暴露于自然环境中,环境与灾害因素对桥梁安全耐久的影响不容忽视。极端气候条件,如高温、严寒、强风等,都会对桥梁结构造成不同程度的损伤。高温天气可加剧混凝土的徐变和干缩效应,引起裂缝扩展。严寒条件会导致混凝土冻融破坏,降低结构耐久性。强风荷载则可能引发主梁振动和疲劳损伤。除了恶劣气候,地震、洪水等极端灾害事件也可能对桥梁安全造成巨大威胁。强震动作用下,桥墩剪切破坏、支座滑移脱出等破坏模式时有发生。公路桥梁所处的腐蚀环境也会加速钢筋锈蚀和混凝土碳化,缩短结构使用寿命。

2 提高公路桥梁安全性的设计策略

2.1 结构冗余设计

在桥梁安全设计中,合理的结构冗余设计至关重要,通过在主要承重构件之外增设次级承载体系,形成多重备份,从而显著提升结构整体承载能力。这种设计理念可确保当主要构件因偶然因素被破坏时,次级承载体系能够及时启动,维持桥梁承载力,避免结构连续倒塌。对于跨度较大的桥梁,设计者可在主梁下方设置备用缆索,在桥面板下布置纵向备用梁,为主梁破坏时提供应急保障。此外,关键构件的冗余设计也不可忽视,采用双柱式桥墩、多主梁断面等设计手段,可防止单个构件破坏引发整体垮塌。除了构件冗余,加强节点构造,提高整体稳定性,也是实现冗余的有效途径。总之,通过周全合理的冗余设计,可显著提升桥梁结构的损伤承载能力,有效规避桥梁安全事故风险,确保桥梁运营安全。

2.2 抗震设计优化

抗震设计在确保桥梁安全中举足轻重,尤其是对于地震频发的西部等地区。抗震设计优化的首要任务是科学评估地震动参数。应综合考虑复杂地形地震动放大效应,全面分析近场地震与远场地震的不同频谱特性,在此基础上合理确定设计地震动参数,准确把握桥址区地震风险。其次,应着力优化桥梁结构体系,采用延性良好的构件材料,合理配筋构造,严格控制跨中挠度,全面提高结构的变形能力和耗能水平^[2]。对于重点桥梁,可设置阻尼器、耗能装置等,最大限度耗散地震输入能量。桥墩作为抗震薄弱环节,应重点加强其抗震构造,提高桥墩抗剪性能,并在支座设置防落装置,防止地震时支座滑落。对于高烈度设防区的桥梁,可采用隔震设计策略,在桥墩与基础之间设置隔震支座,降低地震作用,提高桥梁整体抗震能力。

2.3 防护设施设计

在桥梁安全防护设计中,完善的防护设施可有效降低桥梁意外荷载风险,是确保行车安全的关键屏障。防撞护栏设计是其中的重中之重,通过合理布置桥梁护栏,可防止失控车辆冲出桥外,将撞击风险控制在可接受水平。护栏布置应充分考虑桥梁线形、交通流量、车速等因素,并严格按照规范要求设计护栏高度、强度、刚度等参数。针对事故多发路段,应适当加密护栏布置,并选用性能更高的防撞护栏产品。同时,应加强桥墩防撞设计,在桥墩迎车面设置缓冲装置,可进一步吸收撞击能量,降低桥墩损伤。在人员易聚集路段,应重视人行道防护设计,设置高度合理的安全护栏,并严格控制栏杆间距,防止儿童攀爬或坠落。必要时可在人行道两侧设置安全通道,便于人员紧急疏散。

2.4 健康监测与预警系统

构建完善的桥梁健康监测与预警系统,对于保障桥梁运营安全具有重要意义。实时监测是健康监测的核心,应根据监测对象和目标,科学选择监测传感器的类型、数量和布设方案。常用的监测传感器包括应变计、位移计、加速度计等,布设时应重点关注应力应变、振动位移、裂缝开度等控制参数^[3]。数据采集设备的抗干扰性、环境适应性、续航能力等也应作为选型的重要考量指标。数据分析与评估是监测系统的关键环节,应积极引入大数据分析、机器学习等先进算法,从海量监测数据中挖掘结构性能退化规律,识别病害发展趋势。定期开展全桥静动力响应分析,校准结构分析模型,可提高性能评估的准确性。预警模

型是及时发现安全隐患的利器,应根据评估指标设定合理的预警阈值,建立从结构控制参数到安全状态的映射关系,形成多级预警机制。

3 提升公路桥梁耐久性的措施

3.1 高性能材料的应用

高性能材料在提升桥梁耐久性方面优势明显,如高性能混凝土具有高强度、高韧性、低渗透性等特点,在抗裂、抗冻融等方面表现出色,可显著延缓混凝土老化进程。桥梁工程中采用高强钢筋、预应力精轧螺纹钢等,可减小构件截面,降低自重,减轻下部结构压力,提高整桥耐久性。桥面铺装可利用高性能沥青混凝土,提高路面平整度,延长使用寿命。易损部位宜采用新型橡胶或合成材料,改善耐磨性和抗老化性能。钢结构防腐涂装可选用高性能环氧富锌底漆、厚浆型氯磺化聚乙烯面漆等,延缓钢材锈蚀。新型复合材料如碳纤维、玄武岩纤维等,以其高比强度、高耐久性、可设计性强等特点,在桥梁加固领域应用前景广阔。

3.2 耐久性设计方法

耐久性设计理念的确立和落实,是确保桥梁结构长期安全可靠的关键。在进行施工设计前需开展桥址区环境条件调查,准确评估环境类别、腐蚀等级等。初步设计阶段根据桥梁使用年限和耐久性等级要求,合理选择构件材料品种和性能等级。混凝土应严格控制水胶比,优化胶凝材料掺量,提高密实性。钢筋保护层厚度应满足耐久性要求,并采取防锈蚀措施。重要构件宜提高耐久性等级,并采用高性能材料^[4]。施工图设计阶段应编制耐久性设计专篇,明确材料选用、构造做法、裂缝控制等关键要求。钢结构桥梁应严控焊接质量,提高接头抗疲劳性能,合理布置泄水系统,优化桥墩防撞构造等。此外,应重视全寿命周期设计理念,统筹考虑设计、施工、运营、维修等阶段耐久性需求,优化全寿命周期成本。

3.3 腐蚀防护技术

腐蚀是威胁桥梁耐久性的主要因素,科学运用防腐技术可显著延长使用寿命。对于混凝土结构,表面保护是抑制腐蚀劣化的重要手段,如渗透结晶类防水剂可堵塞毛细孔,阻止水和氯离子渗入;硅烷浸渍剂可提高表面疏水性,减缓氯盐侵蚀;表面涂装防腐涂层或贴附不锈钢片,可阻断腐蚀介质与混凝土接触。对于钢结构,合理选用高性能防腐涂料是主要途径,如环氧富锌底漆、厚浆型环氧云铁中间漆、聚氨酯面漆组成的三涂层体系,已成为钢结构防腐主流做法。

热喷涂、金属溅射等表面处理技术,可显著提高钢材表面抗腐蚀性能。腐蚀环境严酷区段,钢构件宜采用热浸镀锌,以获得更持久防腐效果。对于已锈蚀钢筋混凝土构件,可采用阴极保护、电化学氯盐去除等修复技术,延缓钢筋锈蚀,恢复混凝土碱性。

3.4 预应力技术的应用

近年来,外置预应力技术在公路桥梁中得到广泛应用,相比传统内置预应力,其在耐久性方面具有显著优势。外置预应力筋检查维护更为便捷,损伤时更易于更换,且可多次张拉,灵活调整预应力大小。在支架现浇梁、连续刚构梁等桥型中,合理采用外置预应力,可减小主梁截面,降低自重,减轻下部结构压力。在既有桥梁加固时,利用外置预应力补强,可显著提高承载力和刚度,延长桥梁服役寿命^[5]。外置预应力锚固区应重点设防,严防锚具锈蚀和应力集中。预应力筋材料宜采用精轧螺纹钢、环氧涂层钢绞线等耐腐蚀性能优良的新型材料。智能张拉与监测是确保预应力体系性能的关键,采用全自动智能张拉设备,建立预应力智能监测系统,可精确控制张拉力,及时评估预应力损失,排查破坏隐患。

4 工程实践与案例分析

4.1 典型工程案例介绍

我国在公路桥梁安全耐久设计领域不断探索,涌现出众多优秀工程案例。某特大桥采用双塔单索面斜拉桥结构,跨径达400余米。设计中通过主梁下设纵向备用梁、多点式索塔支承等冗余措施,有效防止结构连续倒塌。主塔区采用C60高性能混凝土,提高抗震和耐久性能。针对海洋腐蚀环境,采取涂层、阴极保护、耐海水混凝土等多重防护,并配备完善的健康监测系统,使设计寿命超过百年。另一高速公路连续刚构桥,跨径组合(65+125+65)m,采用C50高性能混凝土、抗裂防水剂、高模量沥青混凝土铺装等,通过精细化耐久性设计,达到耐久等级一级标准,充分保证使用年限。这些案例有力印证了科学合理的安全耐久设计对工程质量的决定性作用。

4.2 安全性和耐久性设计措施应用

通过对典型工程案例的系统调研,可以看出安全耐久设计措施在工程中的广泛应用和良好效果。工程普遍采用多索塔、双主梁、纵向联系梁等冗余设计措施,大幅提高了结构抵御局部损伤的能力。高性能材料、合理配筋、隔震支座等抗震设计优化手段,则有效增强了桥梁的抗震韧性。而桥梁防撞护栏、缓冲装置、人行道防护等防护设施的科学布置,最大限度地降低

了意外荷载的风险。智能传感、大数据分析、多级预警等先进健康监测手段,为及时诊断桥梁病害提供了可靠依据。此外,高性能材料、耐久性设计、防腐措施、预应力技术等提升耐久性的措施,在工程实践中也得到充分运用和验证,显著延长了桥梁使用寿命。综合利用各项安全耐久设计措施,必将全面改善桥梁工程品质。

4.3 工程实践效果评估

对采用安全耐久设计的众多桥梁工程的跟踪评估结果表明,相关设计措施均取得了积极成效,有力推动了桥梁工程品质的提升。某跨海大桥采用预应力混凝土连续梁、大直径扩底桩基、高性能混凝土、气候耐久性设计等,建成10年来安全耐久性能完全达标,未出现任何质量问题。某山区高速公路特大桥合理利用隔震支座、阻尼器等提高抗震性能,并配备完善健康监测系统,在地震模拟分析和实测中均体现出良好的结构完整性,充分印证了抗震设计的可靠性。诸多类似案例无不证明,安全耐久设计在保障桥梁工程质量中发挥着不可替代的重要作用。当然,工程实践中也暴露出设计认识偏差、落实不到位等问题,这为今后理论和实践的完善指明了努力的方向。

5 结束语

公路桥梁的安全性和耐久性问题事关交通运输效率和公众生命财产安全,提高桥梁安全耐久性能刻不容缓。本文从桥梁设计、施工控制、灾害防护、材料应用、新技术集成等方面入手,系统阐述了提升公路桥梁安全性和耐久性的设计理念和关键技术。工程实践表明,科学合理的设计是确保桥梁安全耐久的前提,先进实用的技术是提高桥梁性能的保障。未来,仍需持续开展理论创新和工程实践,优化桥梁安全耐久性设计,推进新材料、新技术的工程化应用,为建设安全耐久、经济高效的公路桥梁提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 罗江.公路桥梁设计中的安全性及耐久性分析[J].运输经理世界,2024(31):109-112.
- [2] 孙卓河.公路桥梁设计中的安全性和耐久性问题分析[J].运输经理世界,2024(26):131-133.
- [3] 李杰.公路桥梁安全性和耐久性设计研究[J].城市建设理论研究:电子版,2023(29):149-151.
- [4] 胡志刚.公路桥梁设计中的安全性及耐久性研究[J].运输经理世界,2023(26):83-85.
- [5] 张浩,张坤.公路桥梁设计的安全性和耐久性分析[J].运输经理世界,2022(27):131-133.