

桥梁设计中的安全性及桥梁耐久分析

初磊

冠程设计咨询有限公司苏州分公司，江苏省苏州市常熟市，215000；

摘要：桥梁是交通基础设施的核心构成，在其长期服役过程中，安全性与耐久性如何，直接牵动着交通网络的平稳运转，更关乎人民群众的生命财产安全。本文聚焦桥梁设计阶段的安全性与耐久性这一核心议题，详细阐释了桥梁结构安全性的核心要义、理论根基及主要影响因素，深入剖析了环境侵蚀、材料特性、施工水准等因素对桥梁耐久性的作用机理与失效形态，并从材料选用、结构构型、施工技艺三个层面，提出了安全性与耐久性协同提升的优化方案。结合理论剖析与工程实践的内在逻辑不难发现，设计阶段乃是保障桥梁全生命周期安全耐久的关键所在，这一结论可为提升桥梁工程设计品质、延长其服役年限，提供切实可行的理论参照与技术支持。

关键词：桥梁设计；安全性；耐久性

DOI：10.69979/3029-2727.26.02.002

1 绪论

现代交通体系里，桥梁不只是连接区域经济、保障物资流通的关键枢纽——它的建设质量和服役表现，直接左右着整个交通网络的通达程度与可靠程度。这些年我国基础设施建设突飞猛进，桥梁工程的数量不断增多，建设规模也一个劲扩大，涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等好几种结构类型，在公路、铁路、市政等多个领域都有广泛应用。但实际情况是，不少桥梁在长期使用中，因为设计上的短板、环境的侵蚀破坏，再加上荷载条件的变化等原因，陆续出现了结构损伤、性能衰退之类的问题，个别甚至引发了安全事故。这不仅带来了惨重的经济损失，更严重威胁到公众的出行安全。结合自身掌握的桥梁工程设计理论与一线实践经验，本文把重点放在安全性与耐久性的分析上：先讲清桥梁安全性的理论依据和影响因素，再深入剖析耐久性的侵蚀原理与失效模式，最后给出两者协同优化的设计思路，形成一套完整的分析框架，希望能给桥梁设计人员提供实用的技术借鉴。

2 桥梁耐久性的影响机制与失效形式

2.1 化学侵蚀

化学侵蚀就是环境中的化学物质和桥梁结构材料发生反应，最终导致材料性能变差的过程——其中最具代表性的，当属氯离子腐蚀、碳化作用还有硫酸盐侵蚀这三种。氯离子腐蚀多见于海洋环境、沿海区域，或是冬季会使用除冰盐的桥梁上：氯离子会顺着混凝土的孔隙渗到钢筋表面，破坏掉钢筋表面的钝化膜，进而引发

钢筋生锈。而生锈后的产物，体积会比原来膨胀2~3倍，这就会让混凝土构件开裂、剥落，严重影响桥梁结构的承载能力。碳化作用则是空气中的二氧化碳，和混凝土里的氢氧化钙发生反应生成碳酸钙的过程，这个反应会让混凝土的碱度下降。一旦碳化深度触及钢筋表面，钢筋的钝化膜就会被破坏，生锈问题也随之而来。

2.2 物理作用

物理作用是指环境因素通过温度变化、冻融循环、干湿交替等物理方式，对桥梁结构造成的破坏。温度变化会导致桥梁结构产生热胀冷缩变形，若变形受到约束，会产生温度应力，引发混凝土裂缝，尤其是大跨度桥梁，因跨度大、温差影响显著，温度裂缝问题更为突出。冻融循环主要发生在严寒地区，混凝土内部的孔隙水在低温下结冰膨胀，高温下融化收缩，反复的冻融作用会导致混凝土内部结构破坏，出现表面剥落、强度下降等问题，冻融循环的破坏程度与混凝土的孔隙率、抗冻性密切相关^[3]。

2.3 生物侵蚀

生物侵蚀是指微生物、植物根系等生物因素对桥梁结构的破坏，虽破坏范围相对较小，但长期作用会显著影响桥梁耐久性。微生物侵蚀主要表现为细菌、真菌等在混凝土表面滋生，其代谢产物会降低混凝土的碱度，加速混凝土碳化和钢筋锈蚀，同时部分微生物会分泌酸性物质，直接腐蚀混凝土。植物根系侵蚀主要发生在桥梁基础周边，植物根系在生长过程中会产生巨大的膨胀力，破坏桥梁基础的混凝土结构，导致基础裂缝，同时

根系会加快地下水、土壤中有害物质的渗透，加剧基础的腐蚀。

2.4 材料性能与施工质量对耐久性的影响

桥梁结构材料的性能与施工质量是保障桥梁耐久性的内部基础，材料性能不足或施工质量缺陷，会为环境侵蚀提供便利，加速桥梁耐久性退化。

2.4.1 混凝土材料

混凝土是桥梁工程中应用最广泛的材料，其强度、抗渗性、抗冻性、抗腐蚀性等性能直接决定桥梁的耐久性。混凝土强度不足会导致其抵抗环境侵蚀的能力下降，易出现裂缝、剥落等问题；抗渗性差会使氯离子、二氧化碳等有害物质快速渗透到混凝土内部，加速钢筋锈蚀和碳化进程；抗冻性不足会导致混凝土在冻融循环作用下快速破坏，尤其在严寒地区，抗冻性是混凝土耐久性设计的核心指标；抗腐蚀性不足会使混凝土在硫酸盐、酸性环境中快速劣化，缩短服役寿命。混凝土的配合比设计不合理，如水泥用量不足、水灰比过大等，会直接影响混凝土的各项性能，降低其耐久性。

2.4.2 钢材

钢材在桥梁工程中主要用于钢筋、钢结构构件等，其耐腐蚀性、疲劳强度等性能对桥梁耐久性至关重要。普通钢材在潮湿环境中极易发生锈蚀，尤其是在氯离子、二氧化碳等因素的作用下，锈蚀速度会显著加快，钢材锈蚀后截面面积减小，承载能力下降，同时锈蚀产物的膨胀会破坏周边混凝土。钢结构桥梁的钢材构件，若防腐措施不足，会出现大面积锈蚀，影响结构的美观和安全性。钢材的疲劳强度不足会导致其在反复荷载作用下出现疲劳裂纹，如桥梁的吊索、钢箱梁等构件，长期承受车辆荷载、风荷载的反复作用，易发生疲劳损伤，进而影响桥梁耐久性。

2.4.3 施工缺陷

施工质量缺陷是导致桥梁耐久性下降的重要人为因素，常见的施工缺陷包括混凝土裂缝、蜂窝、麻面、振捣不密实、钢筋保护层厚度不足等。混凝土裂缝是最常见的施工缺陷，无论是施工过程中的温度裂缝、收缩裂缝，还是因振捣不密实产生的结构性裂缝，都会为有害物质的渗透提供通道，加速混凝土碳化和钢筋锈蚀。蜂窝、麻面会降低混凝土表面的密实度，增大有害物质的渗透面积，同时削弱混凝土的强度。振捣不密实会导致混凝土内部存在孔隙、空洞，降低混凝土的抗渗性、

强度和耐久性。钢筋保护层厚度不足会使钢筋更容易受到环境侵蚀，缩短钢筋的锈蚀启动时间，进而影响桥梁的服役寿命。钢结构桥梁的焊接缺陷、防腐涂层施工质量不佳等，也会加速钢材的锈蚀，降低桥梁耐久性。

2.5 桥梁耐久性的失效形式

2.5.1 混凝土构件开裂、剥落、钢筋锈蚀

混凝土构件开裂是耐久性失效的早期表现，初期裂缝宽度较小，对结构承载能力影响不大，但随着时间推移，裂缝会在环境侵蚀和荷载作用下不断扩展，最终导致混凝土剥落。钢筋锈蚀是混凝土构件耐久性失效的核心原因，锈蚀产物的膨胀力会使混凝土产生纵向裂缝，裂缝扩展到一定程度后，混凝土表面会出现剥落现象，露出锈蚀的钢筋，此时钢筋的截面面积减小，承载能力下降，严重时会导致混凝土构件失效。例如，我国部分沿海地区的桥梁，因长期受氯离子侵蚀，混凝土构件出现大面积开裂、剥落，钢筋锈蚀严重，不得不进行大规模加固维修。

2.5.2 钢结构构件的锈蚀、疲劳损伤

锈蚀可以说是钢结构桥梁最主要的耐久性失效问题——不管是普通钢材，还是低合金钢材，在潮湿环境里都会生锈。尤其是处于海洋环境、工业污染区域的桥梁，锈蚀的速度会更快。钢结构构件一旦生锈，截面厚度就会变小，应力集中的问题也会跟着加重，很容易导致构件出现强度破坏，或是直接失稳。除了锈蚀，疲劳损伤也是钢结构构件失效的一个关键原因。桥梁在使用过程中，要一直承受车辆荷载、风荷载这类反复作用的力，钢结构的焊缝、节点这些部位，慢慢就会出现疲劳裂纹。这些裂纹不断扩大，最终会造成构件断裂，进而威胁到桥梁的整体安全。

2.5.3 支座、伸缩缝等附属设施的老化失效

桥梁的附属设施，虽说不直接承担主体荷载，但对桥梁能否正常使用、耐久性如何，影响其实极大——它们一旦老化失效，会间接拖累桥梁的安全性和耐久性能。就说支座吧，它是连接桥梁主梁和桥墩的关键部件，核心作用就是传递荷载、适配结构变形。可长期用下来，支座难免出现橡胶老化、钢板生锈、位移受限制这类问题，结果就是主梁受力不均，进而产生裂缝，同时还会加重桥墩的受力负担。再看伸缩缝，它是帮桥梁应对温度变形、沉降变形的关键部分。

3 桥梁设计中安全性与耐久性的协同优化策略

3.1 材料选型与优化

材料是桥梁结构的根本，选对材料、做好优化，是实现安全与耐久性协同保障的基础。这一步必须结合桥梁的服役环境、结构类型还有受力特点，挑那些性能优、耐久性强的材料来用。

拿混凝土材料来说，高性能混凝土应该作为首选。通过优化配合比设计，把混凝土的强度、抗渗性、抗冻性还有抗腐蚀能力提上去。比如说在海洋环境、沿海地区建桥，就选海工高性能混凝土，往里面加些矿物掺合料——像粉煤灰、矿渣粉都可以，再配上个高效减水剂，把水灰比降下来，这样混凝土密实度上去了，氯离子渗透的问题就能减轻；要是在严寒地区，就用引气高性能混凝土，引入适量气泡，专门提升它的抗冻性能。

钢材的选择也有讲究。海洋环境或者工业污染严重的地方，耐候钢是首选，它表面能形成一层致密的氧化膜，防腐效果好，还能减少防腐涂层的使用，降低后期维护成本。至于钢结构桥梁的关键构件，比如吊索、钢箱梁这些，就得用高强度、高疲劳强度的钢材，再配上一套完善的防腐措施——像热镀锌、氟碳漆涂层都不错，能大大提高钢材的耐腐蚀能力。除此之外，也该多推广新型复合材料的应用，比如纤维增强聚合物（FRP），它又轻又结实，防腐性还强，能用来替代一部分钢筋或者钢结构构件，在恶劣环境下的桥梁工程里用着特别合适。

3.2 结构设计的协同优化方法

结构体系选型这一步得结合桥梁的跨度大小、服役环境好坏，还有抗灾方面的需求，选那种既安全又耐用的结构体系才行。比如说在强震地区，梁桥、斜拉桥这类抗震性能好的就该优先考虑，再合理装些抗震支座、阻尼器之类的装置，就能进一步提升桥梁的抗灾能力；要是在海洋环境里，就别选结构复杂、节点又多的钢结构体系了，这样能减少腐蚀的风险^[4]。

构件的尺寸、配筋率这些参数得定得合理，既要满足承载能力的要求，也不能忽视耐久性。举个例子，混凝土构件的钢筋保护层厚度，就得根据服役环境来调整——在海洋环境、严寒地区，适当加厚保护层，能减少有害物质渗进去；桥墩、桥台这些下部结构，把截面尺寸做大些，抗冲刷、抗腐蚀的能力也会跟着提高。对于钢结构构件，要优化截面形式，减少应力集中的问题，同时多留些腐蚀余量，提升耐腐蚀性能。

3.3 施工工艺的质量控制措施

混凝土施工环节容不得半点马虎：原材料质量和配合比要严格把控，确保混凝土性能达标，符合设计初衷；浇筑、振捣、养护这三个关键步骤更要盯紧，避免出现裂缝、蜂窝、麻面这类施工缺陷。浇筑时得采用分层浇筑的方式，振捣要到位、密实，保证混凝土内部结构均匀；养护则要根据现场的温度、湿度情况灵活调整，比如采取覆盖保湿、定时洒水养护等办法，既保证混凝土强度能正常增长，也能减少收缩裂缝的出现。至于钢结构施工，钢材的加工、焊接、涂装等工艺都要严格把关，确保焊接质量符合规范，涂层厚度均匀、附着力强^[5]。焊接前，得先把钢材表面的锈迹处理干净；焊接过程中，要精准控制各项焊接参数，防止焊缝出现裂纹、气孔这类问题；涂装环节则要严格按工艺要求来，一步都不能省，这样才能保证涂层的防腐效果。

4 结论

本文围绕桥梁设计阶段的安全性与耐久性展开研究，桥梁安全性与耐久性是保障其全生命周期稳定运行的关键，二者紧密关联——安全性是服役基础，耐久性是长期安全的核心保障。安全性核心体现为承载能力、稳定性与抗灾能力的统一，受荷载验算精度、结构设计参数优化等多重因素影响，精准把控荷载与设计细节是安全保障的关键。耐久性退化则是环境侵蚀、材料性能及施工缺陷等因素叠加的结果，化学侵蚀等是主要侵蚀形式，混凝土开裂锈蚀、钢结构损伤等为典型失效表现。实现二者协同优化，需从材料、设计、施工三维度发力：选用高性能耐久材料，融入全生命周期理念优化结构设计，强化施工质量管控与缺陷修复。

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] 葛楠. 桥梁设计中的安全性及桥梁耐久性问题分析[J]. 科学技术创新, 2025(12): 133-136.
- [3] 赵强. 桥梁设计中的安全性及耐久性分析[J]. 建材与装饰, 2021, 17(20): 263-264.
- [4] 王敬云. 桥梁设计中安全耐久性问题及解决措施分析[J]. 运输经理世界, 2023(12): 114-116.
- [5] 丁飞龙, 陈侃. 桥梁设计中的安全性及耐久性分析探讨[J]. 数码精品世界, 2023(12): 106-108.