

滨海地区市政道路桥梁混凝土结构防腐技术与耐久性提升

魏 勇

丰仁建设集团有限公司 江西抚州 344100

摘要：滨海地区市政道路桥梁混凝土结构长期暴露于高盐雾、高湿度、强紫外线等恶劣环境中，氯离子、硫酸根离子等侵蚀介质易引发钢筋锈蚀、混凝土碳化及碱骨料反应，导致结构性能退化、使用寿命缩短。本文针对滨海环境特点，系统分析了氯离子渗透、钢筋锈蚀、冻融循环等主要病害机理，从材料优化、结构设计、施工控制及运维管理四个维度提出综合防腐技术体系。通过采用高性能耐腐蚀混凝土、复合防护涂层、阴极保护技术等关键措施，结合全生命周期监测与维护策略，实现对混凝土结构耐久性的多方位提升。研究成果可为滨海地区市政基础设施的长效安全运营提供技术支撑，对类似工程具有重要参考价值。

关键词：滨海环境；市政道路桥梁；混凝土结构

引言

随着我国沿海地区城市化进程的快速推进，市政道路桥梁作为交通基础设施的核心组成部分，其建设规模与服役需求持续增长。滨海地区由于独特的海洋性气候，环境中氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})浓度显著高于内陆，且湿度大、温差变化频繁，导致混凝土结构易发生早期劣化。据统计，滨海桥梁因腐蚀导致的维修成本占总造价的20%–30%，部分服役不足20年的桥梁已出现钢筋锈蚀、混凝土剥落等严重病害，直接威胁结构安全与通行能力。传统防腐技术多侧重于单一材料或局部防护，难以适应滨海环境的复杂侵蚀机制。例如，普通硅酸盐混凝土抗渗性不足，氯离子易通过孔隙渗透至钢筋表面；常规涂层防护易因紫外线老化或机械损伤失效。因此，构建“材料-设计-施工-运维”一体化的耐久性提升体系，成为解决滨海混凝土结构腐蚀问题的关键。

一、滨海环境对混凝土结构的影响机理

(一) 滨海环境的主要腐蚀因素

滨海环境对混凝土结构的腐蚀作用主要来源于海洋大气、海水、潮汐与盐雾等多重因素的复合作用。海洋大气中含有高浓度的氯离子，这些氯离子通过空气中的湿气附着于混凝土表面，并逐渐渗透至混凝土内部。海水中的氯离子、硫酸根离子、镁离子等化学物质在干湿循环和潮汐作用下，对混凝土结构产生强烈的化学侵蚀与物理冲刷。潮汐区与浪溅区由于长期处于干湿交替状态，氯离子渗透速率显著高于其他区域，成为腐蚀最为

严重的部位。盐雾则通过风力传播，将含盐水雾输送至远离海岸线的结构表面，形成大范围的腐蚀环境。此外，高温高湿的气候条件加速了腐蚀电化学反应的进行，进一步加剧了混凝土结构的劣化过程。这些腐蚀因素的综合作用，使得滨海环境成为混凝土结构最为严酷的服役环境之一。

(二) 混凝土结构腐蚀的主要形式

滨海环境下混凝土结构的腐蚀主要表现为钢筋锈蚀、混凝土开裂与剥落、混凝土强度降低等形式。钢筋锈蚀是最主要的腐蚀形式，氯离子渗透至混凝土内部并达到钢筋表面后，破坏钢筋表面的钝化膜，引发钢筋的电化学腐蚀。钢筋锈蚀后体积膨胀，产生锈胀应力，导致混凝土保护层开裂与剥落，形成顺筋裂缝与层状剥落。混凝土开裂与剥落进一步加剧了氯离子、水分与氧气的侵入，形成恶性循环，加速钢筋的锈蚀进程。混凝土强度降低主要源于化学侵蚀与物理风化的共同作用，硫酸根离子与水泥水化产物反应生成膨胀性物质，导致混凝土内部结构疏松；镁离子则与水化硅酸钙反应生成无胶凝性的物质，降低混凝土的强度与密实度。此外，干湿循环与盐结晶作用导致混凝土表面产生微裂纹，进一步降低了混凝土的力学性能与耐久性^[1]。

(三) 腐蚀对结构耐久性的影响

腐蚀对滨海地区市政道路桥梁混凝土结构的耐久性产生深远影响，主要表现为结构承载能力下降、使用寿命缩短、维护成本增加等方面。钢筋锈蚀导致钢筋有效截面减小，力学性能退化，降低了结构的承载能力与抗震性能。混凝土开裂与剥落不仅削弱了结构的有效受力

面积，还加速了钢筋的锈蚀进程，进一步降低了结构的安全储备。混凝土强度降低与密实度下降使得结构更容易受到环境侵蚀，形成恶性循环，加速结构的劣化过程。研究表明，未采取有效防腐措施的滨海混凝土结构，其使用寿命往往不足设计年限的一半，远低于内陆地区的同类结构。此外，腐蚀导致的结构损坏需要频繁的维修与加固，不仅增加了直接维护成本，还因维修期间的交通管制与使用限制产生了间接经济损失。腐蚀对结构耐久性的严重影响，使得滨海地区市政道路桥梁的防腐技术与耐久性提升成为工程领域亟待解决的关键问题^[2]。

二、混凝土结构防腐技术体系

（一）防腐材料的选择与应用

防腐材料的选择与应用是提升滨海地区混凝土结构耐久性的基础环节，其核心在于选用具备高抗氯离子渗透性、高密实度、良好工作性能及长期稳定性的材料体系。在水泥基材料方面，优先采用低水胶比、高矿物掺合料掺量的高性能混凝土，如掺入硅灰、粉煤灰、矿渣粉等活性材料，通过二次水化反应细化孔结构，显著降低氯离子扩散系数。同时，采用抗硫酸盐水泥或掺加适量防腐剂，以抑制硫酸盐和镁离子对水泥石的化学侵蚀。在钢筋材料方面，可选用环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋或镀锌钢筋，这些材料具有优异的耐腐蚀性能，能有效延缓钢筋锈蚀的起始时间。此外，在混凝土中掺入阻锈剂，如亚硝酸钙类阻锈剂，通过在钢筋表面形成保护膜，抑制电化学反应的发生。防腐材料的科学选择与合理应用，从源头上提升了混凝土结构的抗腐蚀能力，为结构长期耐久性奠定了材料基础。

（二）表面防护与涂层技术

表面防护与涂层技术是滨海地区混凝土结构防腐体系的重要组成部分，其作用是在混凝土表面形成物理屏障，阻止氯离子、水分、氧气等腐蚀介质侵入。目前常用的表面防护技术包括渗透型防护剂、涂层防护和封闭型防护等。渗透型防护剂如硅烷、硅氧烷等，能够深入混凝土表层数毫米，与水泥水化产物反应形成憎水层，有效降低水分和氯离子的渗透性，同时保持混凝土的透气性，避免内部水分无法排出导致起鼓剥落。涂层防护则采用环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸等高性能涂料，在混凝土表面形成连续致密的保护膜，具有优异的耐候性、耐化学性和耐磨性。涂层系统通常包括底漆、中间漆和面漆，各层材料协同作用，确保防护效果的长效性。封闭型防护主要通过聚合物水泥砂浆或聚合物改性材料对混凝土表面进行封闭处理，修复表面微裂缝，提高表面

密实度。表面防护与涂层技术的合理应用，能够显著延长混凝土结构的使用寿命，降低后期维护成本^[3]。

（三）结构设计与构造防腐措施

结构设计与构造防腐措施是从设计阶段入手，通过优化结构形式、细部构造和排水系统，降低腐蚀环境对混凝土结构的影响。在结构形式选择上，优先采用受力合理、构造简单的结构体系，减少暴露于腐蚀环境中的表面积，避免复杂的节点和凹角，以减少腐蚀介质的积聚。在细部构造方面，适当增加混凝土保护层厚度，确保钢筋的有效保护，同时严格控制保护层施工质量，避免出现保护层厚度不足或露筋等缺陷。对于暴露于浪溅区和潮汐区的结构部位，采用加厚截面或局部防腐措施，如设置防腐隔离层或采用耐腐蚀材料。在排水系统设计上，确保桥面、墩台等部位排水通畅，避免积水或渗水，减少干湿循环对混凝土的侵蚀。此外，在结构设计中考虑腐蚀环境的等级，根据相关规范和标准，采取相应的防腐措施，如增加钢筋直径、采用预应力技术等，提高结构的整体耐久性。结构设计与构造防腐措施的合理实施，能够从源头上减少腐蚀风险，提升混凝土结构的长期性能和安全性。

三、耐久性提升策略与实施路径

（一）耐久性提升的基本原则

耐久性提升需遵循源头防控、全周期适配、环境协同、技术集成四项核心原则。源头防控原则聚焦混凝土原材料抗腐蚀性能控制，优先选用抗氯盐水泥、低氯离子含量的砂石骨料（氯离子含量≤0.03%）及复合型阻锈剂，从材料端减少氯离子侵入通道，22年某滨海城市市政桥梁项目采用该原则，选用P.O42.5R抗氯盐水泥与水洗淡化海砂，配合掺入3%的氨基醇类阻锈剂，混凝土抗氯离子渗透系数较普通混凝土降低40%，从源头削弱滨海环境侵蚀作用。全周期适配原则要求技术方案覆盖设计、施工、运维全阶段，设计阶段需根据滨海地区风速、湿度、氯离子浓度等环境参数确定混凝土保护层厚度（较内陆地区增加20%–30%），施工阶段强化质量管控，运维阶段制定专项维护计划，21年某滨海新区市政管理部门针对辖区道路桥梁，按此原则制定《全周期耐久性保障方案》，使桥梁预期使用寿命从50年提升至60年。环境协同原则强调技术方案与滨海生态环境适配，避免防腐材料对周边海域造成污染，如选用水性环保型防腐涂层，其VOC含量≤100g/L，符合滨海地区环保要求；技术集成原则注重多种防腐技术组合应用，如“抗氯盐混凝土+表面涂层+阴极保护”协同防护，解决单一

技术防护不足的问题，某滨海大桥22年改造中采用该组合技术，混凝土结构锈蚀速率较改造前下降65%^[4]。

（二）施工质量控制要点

施工质量控制需围绕原材料检验、混凝土制备与浇筑、表面防护施工、养护管理四大关键环节展开。原材料进场时需专项检测氯离子含量，砂石骨料每批次抽样送检，抗氯盐水泥需查验出厂合格证与抗氯盐性能检测报告，21年某市滨海市政道路项目中，曾因一批砂石骨料氯离子含量超标（达0.05%），当即予以退场处理，避免不合格材料进入施工环节。混凝土制备阶段需严格控制水胶比（≤0.45）与外加剂掺量，采用自动化搅拌站确保配料精度，搅拌时间较普通混凝土延长30秒，保证阻锈剂与水泥充分融合；浇筑阶段需采用高频振捣棒（振捣频率≥150Hz）确保混凝土密实，重点管控桥梁支座、墩柱底部等易积水部位，避免因振捣不密实形成孔隙，22年某滨海桥梁项目浇筑时，通过预埋混凝土密实度检测仪实时监测，密实度达标率从传统施工的88%提升至98%。表面防护施工需控制涂层厚度与附着力，防腐涂层施工前需彻底清理混凝土表面浮浆、油污，采用喷砂除锈（除锈等级达Sa2.5级），涂刷时采用湿膜测厚仪实时监测厚度（环氧富锌底漆厚度≥80μm），固化后通过划格法检测附着力（附着力等级≤1级）；养护管理阶段需延长养护周期，采用覆膜+喷淋养护，养护时间不少于14天，避免滨海地区早期干燥导致混凝土表面开裂，某滨海道路项目通过该养护方式，混凝土早期裂缝发生率从12%降至3%。

（三）长期维护与监测机制

长期维护与监测需建立常态化、精准化的管控体系，监测内容聚焦混凝土结构氯离子浓度、裂缝发育、碳化深度及表面防护层状态。监测设备采用嵌入式传感器与人工检测结合，在桥梁墩柱、梁板等关键部位预埋氯离子传感器（监测深度0~50mm），每季度采集数据，当氯离子浓度达临界值（0.6kg/m³）时触发预警；人工检测每半年开展一次，采用回弹法检测混凝土强度，酚酞试剂检测碳化深度，裂缝宽度仪测量裂缝（裂缝宽度≥0.2mm时需及时处理），22年某滨海新区市政桥梁监测中，通过传感器发现某墩柱氯离子浓度接近临界值，及时采取阻锈剂注入处理，避免锈蚀加剧。维护措施需按周期实施，表面防腐涂层每5年检查一次，出现剥落、老化时及时补涂；每年对桥梁伸缩缝、排水系统进行清

理，避免雨水夹带氯离子在结构表面滞留；每3年对裂缝开展灌浆处理（采用环氧树脂灌浆材料），21年某市滨海道路桥梁维护中，通过该周期维护，混凝土结构锈蚀病害发生率较未维护前下降70%。同时建立维护档案，记录每次监测数据、维护措施及效果，形成“监测-评估-维护-反馈”的闭环机制，某滨海市政管理单位22年建立的维护档案，为后续同类项目耐久性方案优化提供了数据支撑，使新开工项目维护成本降低15%^[5]。

结语

滨海地区市政道路桥梁混凝土结构的防腐技术与耐久性提升是一个综合性工程难题，涉及材料科学、结构设计、施工管理及后期维护等多个领域。通过本文的研究可以看出，滨海环境的腐蚀因素复杂多样，其对混凝土结构的影响具有长期性和累积性，因此需要从全生命周期的角度制定科学合理的防护策略。在实际工程中，应注重多种防腐技术的协同应用，充分发挥材料改性、表面防护和结构优化的综合作用。同时，施工质量控制作为耐久性保障的关键环节，必须严格执行相关标准，确保每个工序的可靠性。此外，建立完善的长期监测与维护机制，不仅能够及时发现和处理潜在问题，还能为后续工程提供宝贵的数据支持。未来，随着新材料、新技术的不断涌现，以及智能化监测手段的推广应用，滨海地区混凝土结构的防腐与耐久性提升将迈上新的台阶，为区域基础设施建设提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 王海波.热带滨海地区房建结构大体积混凝土施工质量控制[J].城市建筑, 2020, 17 (14): 2.
- [2] 丁路静, 罗作球, 张凯峰, 等.浅谈天津滨海新区轨道交通Z4线混凝土耐久性要求及质量控制措施[J].商品混凝土, 2020 (1): 4.DOI: CNKI: SUN: RMCZ.0.2020-Z1-042.
- [3] 韩迅, 关云飞, 张晨, 等.滨海混凝土浪溅区氯离子渗透特性模拟研究[J].水利天地, 2021 (004): 004.
- [4] 金晓彬.台州滨海地区混凝土结构耐久性劣化范式研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021 (10): 3.
- [5] 王建强.滨海地区氯盐环境下桥墩裂缝原因与控制研究[J].交通科技与管理, 2022 (005): 000.