

# 滨海盐雾区市政道路桥梁混凝土结构的防腐设计与施工技术

李善钰

金光道环境建设集团有限公司，江西吉安，343000；

**摘要：**滨海盐雾区特殊的海洋性气候，使氯离子侵蚀成为市政道路桥梁混凝土结构失效的主要原因。高盐雾环境加速钢筋锈蚀，导致混凝土开裂剥落，严重缩短工程使用寿命并威胁通行安全。本文结合盐雾区环境特点，分析氯离子对混凝土结构的侵蚀路径与破坏机理。从设计与施工双维度入手，探讨防腐设计中原材料选型、结构构造优化的核心方法，提出混凝土搅拌、钢筋防护、养护等环节的专项施工技术。同时构建施工质量监测体系与后期维护策略，为提升滨海盐雾区桥梁混凝土结构抗腐性能提供技术支撑，对保障工程长期稳定运行具有现实意义。

**关键词：**滨海盐雾区；市政道路桥梁；混凝土结构；防腐设计；施工技术

**DOI：**10.64216/3104-9664.25.02.008

## 引言

滨海地区凭借区位优势成为交通建设的重点区域，市政道路桥梁作为交通网络的核心组成，其结构稳定性至关重要。但该区域盐雾浓度高、湿度大，氯离子通过混凝土孔隙渗透的问题突出。氯离子会破坏钢筋钝化膜，引发锈蚀膨胀，导致混凝土出现裂缝、剥落等病害。近年来，多地滨海桥梁因防腐问题出现早期损坏，不仅增加养护成本，还影响交通运行效率。传统防腐措施在盐雾环境下效果有限，难以满足长期防护需求。

## 1 滨海盐雾区混凝土结构的侵蚀环境特征

### 1.1 盐雾环境形成与分布

滨海盐雾的形成与海洋水文气象条件密切相关。海水在阳光照射和风力作用下大量蒸发，产生的含盐水汽随气流向陆地方向扩散，形成盐雾。盐雾中主要成分是氯化钠，其浓度分布呈现明显的梯度特征。距离海岸线越近，盐雾浓度越高，对桥梁结构的侵蚀作用也越强。同时，风向和风力直接影响盐雾的扩散范围，主导风向为向岸风时，盐雾可深入内陆数公里。

### 1.2 氯离子侵蚀机理

氯离子对混凝土结构的侵蚀是一个复杂的物理化学过程。混凝土本身具有一定的抗渗性能，但在盐雾环境下，氯离子会通过毛细孔渗透、扩散等方式进入混凝土内部。当氯离子浓度达到临界值时，会破坏钢筋表面形成的钝化膜。钝化膜破损后，钢筋表面形成阳极区和阴极区，引发电化学腐蚀反应。阳极区的钢筋发生氧化反应，生成铁离子并释放电子；阴极区则发生还原反应，氧气与水结合生成氢氧根离子。铁离子与氢氧根离子结

合形成氢氧化亚铁，进一步氧化后生成氢氧化铁，即铁锈。铁锈的体积远大于钢筋本身，会在混凝土内部产生巨大的膨胀应力，导致混凝土出现开裂、剥落等现象，使钢筋暴露在更恶劣的环境中，加速腐蚀循环。

### 1.3 典型病害表现

盐雾环境下，混凝土结构的病害发展具有渐进性特征。初期阶段，混凝土表面会出现返碱现象，这是由于内部的可溶性盐随水分迁移至表面结晶析出。随着侵蚀加剧，混凝土表面开始起砂，表面强度降低，用手触摸会有粉末状物质脱落。进入中期阶段，混凝土表面出现细微裂缝，这些裂缝多为不规则分布，宽度较小但数量逐渐增多。裂缝的出现会加速氯离子的渗透，导致钢筋锈蚀速度加快。当病害发展到后期，钢筋锈蚀产生的膨胀力会使混凝土保护层大面积剥落，钢筋暴露在外，呈现明显的锈蚀痕迹。此时，结构的刚度和强度会显著下降，桥梁的承载能力受到严重影响。梁体、墩柱等关键部位可能出现弯曲、变形等问题，直接威胁桥梁的通行安全。

## 2 滨海盐雾区混凝土结构的防腐设计核心要点

### 2.1 设计原则与目标

滨海盐雾区混凝土结构的防腐设计需遵循系统性原则，综合考虑环境因素、结构特点和使用要求。主动防护为主的原则强调从源头减少腐蚀风险，通过优化混凝土配比、提升结构密实度等方式，增强结构自身的抗腐能力。被动防护为辅则是在主动防护的基础上，采用涂层防护、阴极保护等附加措施，进一步阻隔腐蚀介质的侵入。设计目标应与工程的使用年限相匹配，确保在设计基准期内，结构不会因腐蚀出现影响正常使用的病

害。同时,需兼顾经济性,在满足防腐要求的前提下,合理控制工程成本,实现技术与经济的平衡。此外,设计方案还应具备可操作性,便于后续施工与维护工作的开展。

## 2.2 原材料优化选择

混凝土原材料的选择直接影响其抗腐性能。水泥应优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,这类水泥水化热较低,强度发展稳定,抗氯离子渗透能力较强。掺合料的合理使用的重要,矿渣粉、粉煤灰等掺合料可与水泥水化产物发生二次反应,填充混凝土内部孔隙,提升密实度。其中,矿渣粉的活性较高,能有效降低混凝土的渗透性;粉煤灰则可改善混凝土的和易性,减少泌水现象。高效减水剂的使用必不可少,它能在保证混凝土和易性的前提下,显著降低水胶比,进一步提高混凝土的强度和抗腐性能。

## 2.3 保护层与构造优化

混凝土保护层是钢筋免受腐蚀的重要屏障,在盐雾区需根据环境腐蚀等级适当加大保护层厚度。对于直接暴露在盐雾中的构件,保护层厚度应比普通环境下增加 20% 以上,确保氯离子渗透到钢筋表面的时间显著延长。在构造设计方面,梁柱节点、墩柱底部等易损部位需进行加强处理。梁柱节点处可采用附加钢筋网片,增强该区域的抗裂性能;墩柱底部则可设置防腐涂层或加大截面尺寸,提高抗腐蚀能力。同时,应避免结构出现尖角、棱角等易积盐的部位,将其设计为圆弧过渡形式,减少盐雾在表面的附着与堆积。

# 3 适配盐雾环境的混凝土防腐施工关键技术

## 3.1 混凝土搅拌与浇筑

混凝土搅拌环节需严格控制各项参数。水胶比应严格按照设计要求执行,一般控制在 0.45 以下,以保证混凝土的密实性。搅拌前需对原材料进行计量,确保水泥、掺合料、骨料、水和外加剂的用量准确无误。搅拌顺序应遵循先投骨料、水泥和掺合料,搅拌均匀后再加入水和外加剂的原则,总搅拌时间不少于 2 分钟,确保混凝土拌合物均匀一致,无离析、泌水现象。浇筑过程中采用分层浇筑的方式,每层浇筑厚度控制在 30-50 厘米。振捣时使用插入式振捣器,振捣至混凝土表面出现浮浆且不再下沉为止,避免漏振和过振。漏振会导致混凝土密实度不足,形成孔隙;过振则可能造成骨料下沉、砂浆上浮,影响混凝土强度。

## 3.2 钢筋防腐与安装

钢筋在使用前必须进行彻底的除锈、除油处理。铁锈和油污会影响钢筋与混凝土的粘结性能,还可能加速钢筋锈蚀。除锈可采用机械除锈或化学除锈的方法,确保钢筋表面洁净、无氧化皮。对于腐蚀环境较为恶劣的区域,钢筋可采用镀锌或环氧涂层进行额外防护。镀锌层能在钢筋表面形成一层保护膜,阻隔腐蚀介质的侵入;环氧涂层则具有良好的化学稳定性,抗氯离子侵蚀能力强。安装钢筋时,需准确控制钢筋的位置和间距,确保保护层厚度均匀。可采用垫块固定钢筋,垫块的强度应不低于混凝土强度,且具有良好的抗腐性能。安装完成后,需对钢筋进行检查,发现问题及时整改。

## 3.3 混凝土精细化养护

混凝土养护是提升其强度和抗腐性能的关键环节。在盐雾环境下,应采用覆盖保湿养护与喷淋养护相结合的方式。混凝土浇筑完成后,待表面初凝即可覆盖土工布或麻袋,防止水分过快蒸发。覆盖物应保持湿润,养护初期每天喷淋次数不少于 4 次,确保混凝土表面始终处于湿润状态。养护周期应适当延长,普通混凝土的养护周期不少于 14 天,掺加掺合料的混凝土养护周期不少于 21 天。养护过程中需注意环境温度变化,当温度低于 5℃ 时,应采取保温措施,避免混凝土受冻。

# 4 防腐施工过程的质量监测与控制体系

## 4.1 原材料质量检验

原材料进场时必须进行严格的质量检验,杜绝不合格材料投入使用。水泥应查验出厂合格证和检验报告,重点检测强度、安定性和氯离子含量,氯离子含量不得超过 0.06%。骨料需检测颗粒级配、含泥量和氯离子含量,碎石的含泥量不大于 1%,砂的含泥量不大于 3%,氯离子含量均不得超过 0.02%。掺合料应检测活性指数、细度和烧失量,确保其性能符合相关标准。钢筋需进行力学性能试验和化学成分分析,表面不得有裂纹、结疤等缺陷。外加剂应检测减水率、含气量和氯离子含量,其性能应与水泥具有良好的适应性。所有原材料的检验均需按照相关规范执行,检验合格后方可入库使用。

## 4.2 施工实时监测

施工过程中的实时监测能及时发现问题,确保施工质量。混凝土密实度可采用回弹法和超声波法进行监测。回弹法通过测量混凝土表面的回弹值,推算混凝土的强度和密实度;超声波法则利用超声波在混凝土中的传播速度,判断混凝土内部是否存在孔隙、裂缝等缺陷。两种方法结合使用,可提高监测结果的准确性。钢筋位置

与保护层厚度的监测可采用钢筋保护层厚度测定仪,该仪器能快速准确地检测出钢筋的位置和保护层厚度。监测应按批次进行,每批次抽检数量不少于构件总数的30%。

### 4.3 关键工序验收

关键工序的质量验收是保障工程质量的重要关口。混凝土浇筑前,需对钢筋规格、数量、位置以及模板安装质量进行验收,确保符合设计图纸要求。验收合格后,方可签署浇筑令。混凝土浇筑过程中,需对混凝土的坍落度、和易性进行现场检测,每工作班检测次数不少于2次。浇筑完成后,需对混凝土表面平整度、尺寸偏差等进行检查。钢筋安装工序验收时,重点检查钢筋的连接质量、保护层厚度和间距,钢筋连接接头需进行力学性能试验,合格后方可验收。养护工序验收则主要检查养护措施的落实情况、养护周期和混凝土表面状态,确保养护工作到位。所有关键工序验收均需形成书面记录,验收不合格的工序不得进入下一环节。

## 5 盐雾区桥梁混凝土结构的后期防腐维护策略

### 5.1 常态化健康监测

建立常态化的结构健康监测机制是及时发现腐蚀隐患的有效手段。应在桥梁的关键部位设置长期监测点,如墩柱底部、梁体跨中、梁柱节点等。监测内容包括混凝土表面状态、钢筋锈蚀情况、混凝土保护层厚度等。可采用传感器技术进行实时监测,如钢筋锈蚀传感器、混凝土湿度传感器等,这些传感器能将监测数据实时传输至数据管理平台。同时,定期进行人工巡检,每月至少进行一次全面巡检,重点检查混凝土是否出现裂缝、剥落等病害。通过传感器监测与人工巡检相结合的方式,形成动态监测数据库,为结构腐蚀状态评估提供数据支持。

### 5.2 针对性维护措施

根据结构病害等级采取针对性的维护措施,可有效提升维护效果。对于轻微病害,如混凝土表面返碱、起砂,可采用表面修补的方法。先将表面松散物质清理干净,再涂抹水泥基渗透结晶型防水涂料,该涂料能深入混凝土内部形成结晶,堵塞孔隙。对于混凝土表面的细微裂缝,可采用压力注浆的方式进行修复,注入环氧树脂浆液,填充裂缝并起到粘结作用。当病害发展至中度,

如保护层局部剥落、钢筋轻微锈蚀,需清除锈蚀钢筋表面的铁锈,涂抹防锈漆,然后采用高性能混凝土进行修补。对于严重病害,如钢筋大面积锈蚀、结构变形,应实施结构加固处理,可采用粘贴碳纤维布或增设外部预应力等方法,恢复结构的承载能力。

### 5.3 维护管理方法

科学的维护管理方法能有效延长防腐有效期。定期清理结构表面的盐尘是基础工作,每月至少进行一次全面清理,可采用高压水枪冲洗的方式,将表面附着的盐尘冲洗干净,减少氯离子在表面的堆积。对于采用防腐涂层的构件,需定期检查涂层状态,每两年进行一次涂层老化检测。当涂层出现老化、开裂、剥落等现象时,应及时进行翻新处理。翻新前需将旧涂层彻底清除,然后重新涂刷防腐涂料。同时,建立维护档案,详细记录每次维护的时间、内容、措施和效果,为后续维护工作提供参考。

## 6 结论

滨海盐雾区市政道路桥梁混凝土结构的防腐问题具有复杂性和特殊性,氯离子侵蚀是导致结构损坏的核心因素。解决该问题需从设计、施工、监测与维护全流程入手,构建系统性的防腐体系。在设计阶段,通过原材料优化选择、保护层厚度加大和构造优化,提升结构自身的抗腐基础能力。施工过程中,严格控制搅拌、浇筑、钢筋防护和养护等关键环节,确保设计意图有效落地。建立完善的质量监测体系,能及时发现施工中的质量问题,为工程质量提供保障。

### 参考文献

- [1] 郝明. 市政道路桥梁混凝土裂缝成因分析及处理措施[J]. 中国高新科技, 2025, (09): 116-118.
- [2] 杨向峰. 市政道路混凝土桥梁施工质量通病预防[J]. 中国标准化, 2018, (10): 132-133.
- [3] 忻恺遥. 市政道路桥梁高性能混凝土应用技术与耐久性提升[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 252-253.
- [4] 林安周. 市政道路与桥梁工程混凝土施工技术分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (06): 85-87.
- [5] 叶喜成. 市政道路桥梁大体积混凝土施工裂缝产生的原因及防治措施[J]. 江西建材, 2014, (17): 162.