滨海地区土建施工中钢筋混凝土结构抗氯离子侵蚀技术与防护措施研究

任登科

510184********0317

摘要：滨海地区因其特殊的地理环境，氯离子含量较高，对土建工程中的钢筋混凝土结构造成严重侵蚀，极大影响结构的安全性、耐久性和使用寿命。本文针对滨海地区土建施工中钢筋混凝土结构面临的氯离子侵蚀问题，深入分析氯离子侵蚀的危害与作用机理，系统研究抗氯离子侵蚀的关键技术与防护措施，包括原材料优化选择、混凝土配合比设计改进、施工过程质量控制以及后期防护技术应用等方面，旨在为滨海地区钢筋混凝土结构的设计、施工与维护提供理论参考和实践指导，保障滨海地区土建工程的长期稳定运行。

关键词：滨海地区；土建施工；钢筋混凝土结构；氯离子侵蚀；抗侵蚀技术；防护措施

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.080

引言

滨海地区作为我国经济发展的重要区域，各类土建工程如港口码头、跨海大桥、滨海道路、临海工业厂房等建设规模不断扩大。钢筋混凝土结构凭借其良好的力学性能、经济性和施工便利性，在滨海地区土建工程中得到广泛应用。然而，滨海环境中存在大量的氯离子，这些氯离子会通过各种途径侵入钢筋混凝土结构内部，引发钢筋锈蚀，导致混凝土开裂、剥落，结构承载能力下降，严重时甚至引发结构破坏，不仅造成巨大的经济损失，还可能威胁到人们的生命财产安全。

随着滨海地区土建工程建设的不断推进，钢筋混凝土结构抗氯离子侵蚀问题日益受到工程界和学术界的高度关注。如何有效提高钢筋混凝土结构抵御氯离子侵蚀的能力，延长结构使用寿命，成为滨海地区土建施工中亟待解决的关键技术难题。本文围绕这一问题，从氯离子侵蚀的危害与机理入手，全面探讨抗氯离子侵蚀的技术手段和防护策略，为滨海地区土建工程的高质量建设提供有力支撑。

1 滨海地区氯离子对钢筋混凝土结构的侵蚀危害与作用机理

1.1 氯离子侵蚀的危害

滨海地区氯离子对钢筋混凝土结构的危害具有渐进性、隐蔽性，修复难度大且成本高，具体体现在三方面：

一是导致钢筋锈蚀。钢筋作为结构主要受力构件，当氯离子侵入混凝土并达到临界浓度时，会破坏钢筋表面的钝化膜（薄而致密的氧化保护膜）。失去保护的钢筋在氧气与水分作用下发生电化学腐蚀，生成的铁锈体积为钢筋的 2-4 倍，会对周围混凝土产生巨大拉应力。

二是引发混凝土开裂与剥落。当铁锈产生的拉应力超过混凝土抗拉强度时，会出现锈蚀裂缝，且随锈蚀加剧，裂缝会扩展贯通，导致混凝土保护层与钢筋的粘结力下降。当粘结力丧失到一定程度，保护层会剥落，使钢筋直接暴露，进一步加速锈蚀，形成恶性循环。

三是降低结构承载能力与使用寿命。钢筋锈蚀会减小其有效截面积，导致抗拉强度、屈服强度等力学性能大幅下降；混凝土开裂与剥落则破坏结构整体性，降低刚度、增大变形，影响正常使用。严重时可能引发桥梁坍塌、码头失效等突发性破坏，使原本设计使用 50-100 年的结构，20-30 年内就需大规模修复或重建。

1.2 氯离子侵蚀的作用机理

氯离子对钢筋混凝土的侵蚀是复杂物理化学过程，分为两个关键阶段：

在氯离子侵入阶段，主要通过三种途径进入混凝土内部：其一为扩散作用，这是主要迁移方式，外界氯离子（如海水、海风中的氯离子）会沿混凝土孔隙与毛细管通道，在浓度梯度作用下向内扩散，扩散速度与混凝土密实度、孔隙结构、环境温湿度正相关；其二为渗透作用，当结构受海水静水压力、动水压力等外部压力时，氯离子会在压力差作用下被挤压进入，在港口码头、海底隧道等结构中尤为明显；其三为毛细吸附作用，混凝土作为多孔材料，会通过毛细力吸附含氯离子的水分，将氯离子带入内部。

在钢筋电化学腐蚀阶段，当氯离子到达钢筋表面且浓度达标时，会破坏钝化膜。氯离子穿透性与吸附性强，会优先附着于钝化膜缺陷处，与铁离子结合形成可溶性氯化物，使钝化膜局部溶解并形成腐蚀电池。此时钢筋

表面出现阳极区与阴极区：阳极区发生氧化反应，钢筋失去电子生成亚铁离子，亚铁离子与混凝土孔隙溶液中的氢氧根结合生成氢氧化亚铁，进一步氧化为氢氧化铁，脱水后形成铁锈；阴极区发生还原反应，氧气得电子与水结合生成氢氧根。整个过程中氯离子不被消耗，仅作为催化剂在两极间迁移，持续破坏钝化膜，加速钢筋锈蚀。

2 滨海地区钢筋混凝土结构抗氯离子侵蚀的关键技术

2.1 原材料优化选择技术

原材料品质是提升混凝土抗氯离子侵蚀能力的基础，需遵循以下选择原则：

水泥方面，优先选用抗硫酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥或强度等级符合工程要求的普通硅酸盐水泥，避免采用铝酸三钙含量较高的水泥——这类水泥易与氯离子反应生成易溶性物质，加速氯离子在混凝土内部的迁移。细骨料应选择洁净度高、级配合理的天然河砂，尽量避免使用海砂；若特殊工程场景下必须使用海砂，需先进行严格冲洗与检测，确保其氯离子含量和含泥量符合规范标准，防止因初始氯离子超标或含泥量过高降低混凝土抗渗性能。粗骨料需选用强度高、质地坚硬且表面洁净的碎石或卵石，严格控制针片状颗粒占比，同时对其氯离子含量进行检测，避免引入额外腐蚀隐患。外加剂应优先选用具备抗氯离子渗透功能的类型，如引气剂可在混凝土内部形成封闭气泡，阻断氯离子渗透通道；减水剂能减少用水量，提升混凝土密实度；阻锈剂可在钢筋表面形成保护屏障，延缓锈蚀进程，使用时需严格控制掺量，避免对混凝土性能产生不利影响。

2.2 混凝土配合比设计改进技术

优化混凝土配合比是改善其抗氯离子渗透性能的关键，核心优化方向包括：

合理控制水胶比，根据结构使用环境与抗侵蚀要求确定适宜比值，搭配高效减水剂确保混凝土保持良好和易性，减少内部孔隙率。科学确定胶凝材料总量，在满足强度与抗渗需求的前提下，避免用量过多导致混凝土水化热升高，引发温度裂缝——裂缝会成为氯离子侵入的通道，反而降低抗侵蚀能力。适量掺入矿物掺合料，如粉煤灰具备火山灰活性，可与水泥水化产物反应优化混凝土微观结构，同时降低水化热；矿渣粉活性较高，能提升混凝土后期强度与抗渗性；硅灰颗粒细腻，可填充混凝土内部微小孔隙，但需搭配减水剂调节和易性，避免影响施工。此外，根据骨料级配与混凝土性能要求，确定合理砂率，保证混凝土兼具良好和易性与密实度，减少氯离子渗透路径。

2.3 施工过程质量控制技术

施工环节的质量管控直接决定钢筋混凝土结构的抗氯离子侵蚀性能，需重点关注以下环节：

混凝土搅拌阶段，严格按照设计配合比进行原材料计量配料，确保各类材料用量精准，同时控制搅拌时间，保证原材料充分混合均匀，根据实际情况调节混凝土和易性，不得随意更改配合比。运输阶段需缩短运输时长，选择合适的运输设备与路线，避免混凝土在运输过程中出现离析、泌水或坍落度损失过大等问题，必要时采取温控或缓凝措施。浇筑前需清理模板内杂物与积水，检查模板、钢筋及预埋件的位置与尺寸；浇筑时控制浇筑速度与高度，超过规定高度时采用辅助设备避免混凝土离析，同时通过振捣排除内部气泡，振捣操作需遵循规范方法，防止过振导致骨料分层或漏振留下孔隙。养护阶段需及时采取洒水、覆盖或喷涂养护剂等方式，保持混凝土表面湿润，为水化反应提供充足水分，延长养护时间，尤其对于掺有矿物掺合料的混凝土，需确保养护充分，促进强度发展与微观结构优化。钢筋施工时，需保证钢筋表面洁净无锈蚀、油污，通过垫块或支架准确定位钢筋，适当增加保护层厚度以延缓氯离子到达钢筋表面的时间，同时严格控制钢筋连接质量，确保绑扎、焊接或机械连接符合规范要求，避免因连接缺陷影响结构整体性与抗侵蚀能力。

3 滨海地区钢筋混凝土结构抗氯离子侵蚀的后期防护技术

后期防护技术是在钢筋混凝土结构施工完成后，为进一步提高结构的抗氯离子侵蚀能力，延长结构使用寿命而采取的防护措施，主要包括表面涂层防护技术、外包层防护技术、电化学防护技术等。

3.1 表面涂层防护技术

表面涂层防护技术通过在钢筋混凝土结构表面涂刷涂层，形成连续致密的保护膜，阻断氯离子、水分等腐蚀介质侵入，进而保护钢筋。该技术施工便捷、成本较低、适用性广，是滨海地区结构后期防护的常用手段，按涂层材质可分为有机与无机两类。

有机涂层中，环氧树脂涂层耐腐蚀性强、附着力与硬度高，能有效抵抗氯离子与化学介质侵蚀，适配港口码头、跨海大桥等直接接触海水或强腐蚀环境的结构；聚氨酯涂层弹性优异、耐候耐水，可适应结构变形避免开裂，适用于滨海道路护栏、临海厂房外墙等露天结构；丙烯酸酯涂层施工简单、保色性好且价格亲民，适合防护要求较低的一般滨海结构。

无机涂层主要包括水泥基渗透结晶型防水涂料与硅烷浸渍剂。前者以水泥、石英砂为原料，掺活性化学物质，能渗透混凝土孔隙并与内部成分反应生成不溶晶

体，堵塞孔隙提升抗渗性，可用于地下室底板、水池池壁等迎水面与背水面防护；后者为有机硅化合物，渗透性与防水性好，能深入混凝土内部形成疏水膜，适用于跨海大桥桥面、滨海建筑外墙等海洋大气环境结构，施工以喷涂、刷涂、滚涂为主，需保证基面清洁干燥，环境温度控制在合理区间以确保效果。

3.2 外包层防护技术

外包层防护技术通过在结构外部包裹抗腐材料，隔绝腐蚀环境与结构，防护效果可靠、耐久性强，适用于港口码头沉箱、桥墩基础、海底隧道等对防护要求高的重要滨海结构，常用材料有玻璃钢、不锈钢板、碳纤维复合材料。

玻璃钢以玻璃纤维为增强体、树脂为基体，质轻高强、耐腐易成型，能抵御海水海风侵蚀，适配码头桩基础、护舷等部位，施工采用手糊或缠绕成型，需确保与混凝土表面紧密结合，避免空鼓分层。不锈钢板耐腐性与强度优异、寿命长，适合海底隧道衬砌、海水处理厂构筑物等强腐蚀环境，施工以焊接或螺栓连接为主，拼接处需密封严实防海水渗入，且需在板与混凝土间设隔离层，避免电化学腐蚀。

碳纤维复合材料是新型高性能材料，兼具防护与加固功能，能提升结构承载能力与刚度，适用于旧码头改造、大桥加固等既有结构修复，施工采用粘贴法，需先清理混凝土表面浮浆、油污等杂物，涂刷粘结剂后粘贴碳纤维布并压实，保证贴合紧密。

3.3 电化学防护技术

电化学防护技术利用电化学原理改变钢筋电化学状态，属于主动防护技术，防护效果显著，适用于已锈蚀或处于严重腐蚀环境的结构，如老码头、大桥关键部位，主要分为外加电流与牺牲阳极两种类型。

外加电流阴极保护技术通过设置辅助阳极（如钛基涂层阳极，耐腐寿命长、电流分布均匀）并外接直流电源，使钢筋成为阴极，抑制阳极氧化反应阻锈蚀，保护范围广、电流可调，适配大型复杂结构，但需长期供电，运行成本高且有电磁干扰。

牺牲阳极阴极保护技术通过设置电极电位低于钢筋的金属（如锌合金，电位低、腐蚀产物稳定无污染）形成原电池，牺牲阳极被消耗以保护钢筋，无需外接电源、成本低、无电磁干扰、施工便捷，适合小型分散结构或局部腐蚀部位，但保护电流小、范围有限，阳极需定期更换。

4 结论与展望

4.1 结论

针对滨海地区钢筋混凝土结构的氯离子侵蚀问题，研究得出以下结论：

其一，氯离子侵蚀危害显著，会致钢筋锈蚀、混凝土开裂剥落，降低结构承载能力与寿命，且具有渐进性、隐蔽性，修复难度大；侵蚀过程分氯离子侵入（扩散、渗透、毛细吸附）与钢筋电化学腐蚀（氯离子起催化作用）两阶段。

其二，施工中通过原材料优化（选抗硫酸盐水泥、河砂、适配外加剂）、配合比改进（控水胶比、掺矿物掺合料）、施工质量控制（严管搅拌、浇筑、养护及钢筋施工），可提升混凝土密实度与抗渗性，从源头减氯离子侵蚀。

其三，后期防护技术是重要补充，表面涂层（阻介质侵入）、外包层（隔离腐蚀环境）、电化学防护（改钢筋电化学状态）各有适用场景，需结合环境、成本等选单一或组合技术。

4.2 展望

未来抗氯离子侵蚀技术可从四方面突破：

一是研发新型材料，如高性能掺合料、环保阻锈剂，改善现有材料不足；二是发展智能化防护，如自监测自修复材料、物联网监测系统，实现精细化防护；三是推广绿色技术，开发可降解材料、无污染工艺，兼顾防护与环保；四是构建多技术协同体系，整合施工与防护技术，提升结构整体抗侵蚀能力。

参考文献

[1]苏卿,姜福香,赵铁军.滨海环境中海砂混凝土受氯盐侵蚀的试验研究[C]//全国土木工程博士生学术会议.国务院学位委员会,2009.

[2]刘晓南.服役荷载对滨海混凝土桥梁碳化与氯离子侵蚀影响规律研究[D].青岛理工大学,2010.DOI:10.7666/d.y2000764.

[3]金汉阳.潮差区氯盐环境下钢筋混凝土受弯构件的侵蚀试验研究[D].浙江工业大学,2014.

[4]刘军,邢锋,丁铸种,等.沿海大气氯离子在混凝土结构的累计沉积量研究[J].建筑科学,2009,25(3):32-34.DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2009.03.008.

[5]刘刚,张奎志,韩冰.滨海电厂钢筋混凝土腐蚀防护应用[J].海洋科学,2005,29(7):3.DOI:10.3969/j.issn.1000-3096.2005.07.023.

[6]胡彩侠.大气环境中海砂混凝土结构钢筋锈蚀行为及防护方法研究[D].深圳大学,2020.