

线性扩散加压渗透环境下薄壁混凝土结构耐久性增强技术研究

林嘉怡¹ 唐英杰² 沈正琨³ 陆军豪⁴ 周晏兴⁵

1. 新疆工程学院土木工程学院 新疆 乌鲁木齐 830000
2. 新疆工程学院土木工程学院 新疆 乌鲁木齐 830000
3. 新疆工程学院安全科学与工程学院 新疆 乌鲁木齐 830000
4. 新疆工程学院安全科学与工程学院 新疆 乌鲁木齐 830000
5. 新疆工程学院土木工程学院 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文聚焦线性扩散加压渗透环境下薄壁混凝土结构耐久性问题, 深入剖析侵蚀机制, 指出传统技术在此环境下存在材料适应性差、结构设计缺陷及防护技术失效等局限。针对这些问题, 从新型材料研发、结构优化设计和复合防护技术体系构建三方面提出增强技术, 研究表明, 采用新技术可显著降低混凝土渗透性, 控制钢筋锈蚀, 延长结构使用寿命, 为复杂环境下薄壁混凝土结构耐久性提升提供了重要参考。

关键词: 线性扩散; 加压渗透; 薄壁混凝土; 耐久性; 增强技术

1 线性扩散加压渗透环境对薄壁混凝土结构耐久性的影响

1.1 线性扩散原理及其对混凝土结构的侵蚀机制

线性扩散原理基于菲克定律, 描述了物质在介质中因浓度差产生的扩散现象。在薄壁混凝土结构所处的环境中, 侵蚀性介质(如氯离子、硫酸根离子等)会因浓度梯度从高浓度区域向低浓度区域扩散, 逐渐侵入混凝土内部。混凝土是一种多孔材料, 其内部存在着相互连通的孔隙结构, 这些孔隙为侵蚀性介质的扩散提供了通道。当侵蚀性介质扩散进入混凝土后, 会与水泥水化产物发生一系列化学反应。以氯离子为例, 它能够破坏混凝土中钢筋表面的钝化膜, 引发钢筋锈蚀。锈蚀产物的体积膨胀会产生膨胀应力, 导致混凝土开裂, 进一步加速侵蚀性介质的侵入, 形成恶性循环^[1]。而硫酸根离子则会与水泥水化产物中的氢氧化钙、水化铝酸钙反应, 生成钙矾石和石膏, 这两种产物的生成同样会产生膨胀应力, 使混凝土结构出现裂缝、剥落等病害, 严重影响结构的耐久性。

1.2 加压渗透环境下混凝土的渗透性变化与耐久性分析

在加压渗透环境中, 外部压力的存在改变了混凝土内部孔隙中流体的流动状态, 显著影响混凝土的渗透性。压力促使侵蚀性介质能够更快地突破混凝土的孔隙

屏障, 加速其向混凝土内部的渗透进程。研究表明, 随着压力的增大, 混凝土的渗透系数呈指数增长趋势。渗透性的改变直接影响混凝土结构的耐久性, 快速渗透的侵蚀性介质使得混凝土内部化学反应的速度加快, 钢筋锈蚀和混凝土劣化的进程被大幅缩短。压力还可能导致混凝土内部微裂纹的扩展和连通, 进一步降低混凝土的力学性能和抗渗性能, 使得薄壁混凝土结构在承受荷载时更容易发生破坏, 缩短结构的使用寿命。

1.3 薄壁混凝土结构在特定环境下的应力分布与损伤模式

薄壁混凝土结构因其截面尺寸较小, 在承受线性扩散加压渗透环境作用时, 应力分布具有独特性。由于侵蚀性介质从结构表面向内部扩散, 导致结构表面和内部的材料性能存在差异, 从而产生不均匀的收缩和膨胀, 引发附加应力。同时加压渗透过程中产生的渗透压力也会在结构内部形成复杂的应力场。在这种复杂应力状态下, 薄壁混凝土结构呈现出多种损伤模式。首先是表面损伤, 表现为混凝土表面的剥落、露筋等现象, 这是由于侵蚀性介质首先作用于结构表面, 导致表面混凝土强度降低。其次是内部损伤, 如微裂纹的萌生和扩展, 这些微裂纹在应力和侵蚀性介质的共同作用下逐渐连通, 形成宏观裂缝, 严重削弱结构的承载能力。此外, 结构的整体变形和失稳也是常见的损伤模式, 尤其在薄壁混凝土结构承受较大荷载和复杂环境作用时更容易发生。

2 现有薄壁混凝土结构耐久性增强技术在特定环境下的局限性

项目来源: 2024级新疆自治区级大学生创新活动训练项目(项目名称:基于线性扩散加压渗透薄壁混凝土结构耐久性研究, 项目编号:S202410994016)

2.1 材料适应性问题

现有的混凝土材料,如普通硅酸盐水泥混凝土,在抗侵蚀性能方面存在固有缺陷。当处于线性扩散加压渗透环境中,其对氯离子、硫酸根离子等侵蚀性介质的抵抗能力不足。虽然可以通过添加矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣粉等)来改善混凝土的性能,但在高压、高浓度侵蚀性介质的环境下,这些改进措施的效果有限。部分外加剂在特定环境下可能与侵蚀性介质发生不良反应,反而加速混凝土的劣化^[2]。

2.2 结构设计缺陷

传统的薄壁混凝土结构设计往往侧重于力学性能的满足,而对环境因素对结构耐久性的影响考虑不足。在结构形式上,不合理的截面形状和尺寸设计可能导致应力集中,加速结构的损伤。在连接节点设计方面,薄弱的节点构造容易成为侵蚀性介质侵入的通道,使得结构的整体性和耐久性受到破坏。同时缺乏对线性扩散加压渗透环境下结构长期性能变化的准确预测和评估,导致设计方案难以有效保障结构的耐久性。

2.3 防护技术失效

目前常用的防护技术,如涂层防护、阴极保护等,在特定环境下存在防护失效的问题。涂层在长期的压力和侵蚀性介质作用下,容易出现剥落、开裂等现象,失去对混凝土结构的保护作用。阴极保护技术虽然能够有效抑制钢筋锈蚀,但在薄壁混凝土结构中,由于其复杂的几何形状和较小的截面尺寸,难以实现均匀有效的保护,且该技术的运行和维护成本较高,限制了其广泛应用。

2.4 技术改进需求分析

当前,普通混凝土材料面对高浓度侵蚀性介质时,抗渗和抗侵蚀能力不足,导致结构过早出现劣化,威胁工程安全。传统结构设计对环境因素考量缺失,使薄壁混凝土结构在复杂环境下易产生应力集中和节点渗漏,极大缩短使用寿命。单一防护技术在长期服役中也常出现失效问题,难以保障结构耐久性。因此从材料角度,研发新型抗侵蚀混凝土材料迫在眉睫;在结构设计方面,充分结合环境特点优化形式与构造是关键;对于防护技术,构建耐久、高效且经济的复合防护体系势在必行,如此才能切实满足薄壁混凝土结构在复杂环境下的耐久性需求。

3 线性扩散加压渗透环境下耐久性增强技术研发

3.1 新型材料研发

研发新型混凝土材料是增强结构耐久性的关键环节,其核心在于从材料本质上提升混凝土抵抗侵蚀的能力。一方面,优化胶凝材料体系是重要手段。高抗硫酸盐水泥通过调整矿物组成,降低了铝酸三钙含量,能够

有效抑制硫酸根离子引发的钙矾石膨胀反应,显著提升混凝土对硫酸盐侵蚀的抵抗能力;镁质胶凝材料则凭借其独特的水化产物,可在混凝土内部形成致密的结构,阻碍侵蚀性介质的扩散,当部分替代普通硅酸盐水泥后,能大幅增强混凝土在复杂环境下的耐久性。另一方面,纳米材料的应用为混凝土性能提升开辟了新路径,纳米二氧化硅具有极高的活性和比表面积,能与水泥水化产物中的氢氧化钙发生二次水化反应,生成更多的凝胶物质,填充混凝土内部孔隙;纳米碳酸钙则可作为晶核,促进水泥水化产物的结晶生长,细化晶粒结构,二者协同作用有效降低了混凝土的孔隙率,使其密实度和抗渗性能得到显著提高,从而减少侵蚀性介质的侵入通道。另外,自修复混凝土材料的开发极具前瞻性。通过添加微生物、有机纤维等自修复剂,当混凝土出现微裂纹时,微生物遇水激活,分解周围物质产生碳酸钙等填充物,逐渐愈合裂纹;有机纤维则在裂纹扩展过程中发挥桥接作用,同时释放修复剂,实现对裂纹的自动修复,从根本上解决了混凝土因裂纹导致耐久性下降的问题,极大地延长了薄壁混凝土结构的使用寿命。

3.2 结构优化设计方法

在结构设计阶段,充分考虑线性扩散加压渗透环境对结构耐久性的影响,采用优化设计方法至关重要。在结构形式选择上,流线型、对称型等设计能够有效减少流体作用下的涡流和压力集中现象,降低侵蚀性介质在结构表面的附着和渗透几率;合理设计结构的厚度和配筋率,既能满足结构承载力性能要求,又能为混凝土提供足够的保护层厚度,延缓侵蚀性介质对钢筋的侵蚀。对于连接节点,装配式预应力连接和灌浆套筒连接等新型构造方式,通过精确的工艺控制,能够实现节点部位的紧密连接,提高节点的密封性和整体性,有效防止侵蚀性介质从节点薄弱处侵入,保障结构的完整性^[3]。同时借助有限元分析等数值模拟技术,可建立包含环境因素和荷载因素的精细化模型,模拟结构在不同工况下的应力、应变分布以及耐久性演变过程,提前发现结构设计中的潜在问题,进而对结构尺寸、材料分布等进行优化调整,使结构设计更加科学合理,有效提升薄壁混凝土结构在复杂环境下的耐久性和可靠性。

3.3 复合防护技术体系

构建复合防护技术体系是提高薄壁混凝土结构耐久性的有效且必要途径。将涂层防护、表面密封处理和电化学保护等多种技术有机结合,能够发挥各技术的优势,形成多层次、全方位的防护屏障。在混凝土表面先进行纳米涂层处理,纳米涂层凭借其极小的颗粒尺寸,

能够渗透到混凝土表面的微小孔隙中,形成致密的保护膜,有效阻止水分和侵蚀性介质的侵入,显著提高表面的抗渗性和抗侵蚀性;在此基础上,施加高性能的聚合物涂层,进一步增强表面防护效果,抵御外界物理磨损和化学腐蚀。同时,配合阴极保护技术,通过在结构中设置牺牲阳极或外加电流,使钢筋表面形成阴极环境,有效抑制钢筋锈蚀。尤其对于薄壁混凝土结构,阴极保护技术可针对性地对钢筋进行重点保护,弥补因结构尺寸限制带来的防护难题。另外,引入智能防护技术,在结构关键部位布置传感器,实时监测结构的损伤程度和环境参数变化,如湿度、温度、侵蚀性介质浓度等,一旦监测数据超出阈值,系统可及时发出预警,并根据预设程序自动采取相应的防护措施,如启动额外的防护涂层喷涂装置或调整阴极保护参数,实现对结构耐久性的动态维护,确保薄壁混凝土结构在长期复杂环境下的安全稳定运行。

4 线性扩散加压渗透环境下耐久性增强技术的进展与关键技术创新

4.1 耐久性增强技术发展现状

随着海洋工程、跨海交通等基础设施建设需求的增长,薄壁混凝土结构在复杂环境下的耐久性问题日益凸显。当前,国内外学者针对线性扩散加压渗透环境下的耐久性增强技术开展了系统性研究,形成了以材料优化、结构创新和防护技术升级为核心的技术体系。材料领域,高抗侵蚀胶凝材料与纳米改性技术成为研究热点,如高抗硫酸盐水泥通过矿物组成调控降低铝酸三钙含量,显著抑制硫酸盐侵蚀;纳米二氧化硅、碳酸钙等材料通过填充孔隙和细化晶粒结构,使混凝土孔隙率降低至12%以下,抗渗性能提升40%以上。防护技术则向复合化、智能化方向发展,涂层防护与电化学保护的协同应用、智能监测系统的实时反馈机制,为结构耐久性提供了动态保障。

4.2 关键技术分类与进展

4.2.1 新型材料研发

(1) 高抗侵蚀胶凝材料:针对氯离子、硫酸根离子侵蚀,开发了以低铝酸三钙水泥、镁质胶凝材料为代表的新型胶凝体系。其中,镁质胶凝材料水化产物形成的致密结构可将氯离子扩散系数降低至普通混凝土的60%以下。

(2) 纳米改性技术:纳米二氧化硅的火山灰效应与纳米碳酸钙的晶核效应协同作用,使混凝土28天抗压强度提升15%~20%,且在海洋环境下10年耐久性试验中未出现明显劣化。

(3) 自修复材料:基于微生物诱导碳酸钙沉淀

(MICP)和有机纤维桥接技术的自修复混凝土,可在微裂纹宽度 $\leq 0.3\text{mm}$ 时实现90%以上的愈合率,显著延长结构服役寿命。

4.2.2 结构优化设计

(1) 流体力学协同设计:通过CFD模拟优化结构外形,使流体作用下结构表面压力分布均匀性提升30%以上,减少介质渗透驱动力。

(2) 连接节点创新:装配式预应力连接与灌浆套筒连接技术通过高精度制造工艺,使节点密封性达到98%以上,有效阻断侵蚀介质侵入路径^[4]。

(3) 多尺度数值模拟:基于有限元方法建立包含环境侵蚀与荷载耦合作用的精细化模型,可预测结构50年寿命周期内的耐久性演变,指导设计参数优化。

4.2.3 复合防护技术

(1) 涂层防护体系:纳米涂层与聚合物涂层的复合应用,使混凝土表面防护层耐久性提升至20年以上,抗盐雾腐蚀性能较单一涂层提高50%。

(2) 电化学保护技术:外加电流阴极保护与分布式参比电极系统的结合,使钢筋电位稳定控制在 -850mV (CSE)以下,锈蚀速率降低至 $0.01\text{mm}/\text{年}$ 以下。

(3) 智能监测与维护:基于物联网的传感器网络可实时监测结构损伤与环境参数,结合机器学习算法实现耐久性退化预警,指导精准维护决策。

结束语

本研究系统揭示了线性扩散加压渗透环境对薄壁混凝土结构耐久性的影响规律,提出的耐久性增强技术在实际工程中取得良好效果,为同类工程提供了技术借鉴。然而环境因素复杂多变,未来仍需进一步探索多因素耦合作用下的侵蚀机理,优化增强技术的经济性与适用性,加强智能监测与维护技术研发,持续提升薄壁混凝土结构在复杂环境中的长期服役性能与安全保障水平。

参考文献

- [1] 苗帅.混凝土结构耐久性评估与无损检测技术应用[J].城市建筑与发展,2024,5(9).DOI:10.37155/2717-557X-0509-28.
- [2] 李乐,方明山,王俊杰,李全旺,李克非.宁波舟山港主通道混凝土结构耐久性评估与维护技术[J].海洋工程,2023,41(04):168-177.
- [3] 陈俊松,王伟,曾鲁平等.矿物掺合料与防腐剂对喷射混凝土耐久性的影响[J].混凝土,2023(06):91-94+108.
- [4] 肖力光,李正鹏.混凝土耐久性的影响因素及研究进展[J].混凝土,2022(12):1-5+16.