

冻融-硫酸盐侵蚀下水工复掺混凝土性能劣化规律研究

颜世忠¹, 施振跃²

(1. 济宁高新区王因街道办事处, 济宁 272103; 2. 山东科技大学 资源学院, 泰安 271019)

摘要: 为揭示冻融-硫酸盐侵蚀双重作用下水工复掺混凝土的性能劣化规律, 以粉煤灰、硅灰、片麻岩石粉为矿物掺合料, 通过室内试验系统研究了不同掺合料配比、硫酸盐溶液浓度 (0%、5%、10%、15%) 及冻融循环温度 (-5~25、-20~25、-35~25 °C) 下混凝土的质量损失率、抗压强度、相对动弹性模量及气体渗透性演变特征。结果表明: 混凝土质量损失率与冻融循环次数、硫酸盐浓度呈正相关, 与冻结温度呈负相关。抗压强度和相对动弹性模量随冻融循环次数增加、硫酸盐浓度升高及冻结温度降低而显著衰减, 硫酸盐溶液浓度为15%、-35~25 °C冻融环境下劣化最为严重; 气体渗透系数增长率在前40次冻融循环中占总增长率的85.1%, 密实性破坏集中于该阶段; 矿物掺合料对比混凝土抗侵蚀性能影响显著, 粉煤灰-硅灰配比1:1时协同效应最优, 而粉煤灰-硅灰-片麻岩石粉三掺体系 (1:1:1) 通过优化孔隙结构, 展现出更优的抗冻融-硫酸盐侵蚀能力, 其质量损失率仅为2.1%~3.5%。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 水工复掺混凝土; 盐冻耦合; 性能劣化试验; 复掺配合比; 劣化机理

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0001-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.001

Study on Performance Degradation Law of Hydraulic Multi-admixed Concrete under Freeze-Thaw and Sulfate Attack

YAN Shizhong¹, SHI Zhenyue²

(1. Wangyin Subdistrict Office Ji'ning High-Tech Zone, Ji'ning 272103, China;

2. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: To elucidate the degradation patterns of hydraulic concrete with multiple admixtures under dual freeze-thaw and sulphate erosion effects, a systematic laboratory investigation was conducted using fly ash, silica fume, and gneiss rock powder as mineral admixtures. The study examined the evolution of concrete mass loss rate, compressive strength, relative elastic modulus, and gas permeability under varying admixture ratios, sulphate solution concentrations (0%, 5%, 10%, 15%), and freeze-thaw cycle temperatures (-5~25, -20~25, -35~25 °C). Results indicate that concrete mass loss rate exhibits a positive correlation with freeze-thaw cycle count and sulphate concentration, while showing a negative correlation with freezing temperature. Compressive strength and relative elastic modulus significantly deteriorated with increasing freeze-thaw cycles, rising sulphate concentration, and decreasing freezing temperature. The most severe degradation occurred at a sulphate solution

项目来源: 国家自然科学基金青年基金 (52404134)。

作者简介: 颜世忠 (1968—), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 农田水利工程。

通信作者: 施振跃 (1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 安全科学与工程。

收稿日期: 2025-11-27

材料科学

concentration of 15% under a $-35 \sim 25$ °C freeze-thaw environment. The gas permeability coefficient increase accounted for 85.1% of the total increase within the first 40 freeze-thaw cycles, with density degradation concentrated in this phase. The mineral admixture ratio significantly influenced concrete's erosion resistance. The optimal synergistic effect was achieved with a fly ash-silica fume ratio of 1 : 1. The ternary admixture system (fly ash-silica fume-gneiss powder at 1 : 1 : 1) demonstrated superior freeze-thaw and sulphate erosion resistance by optimising pore structure, exhibiting a mass loss rate of merely 2.1%–3.5%. The research findings can provide reference for relevant engineering projects.

Key words: hydraulic concrete with multiple admixtures; salt-freeze coupling; performance degradation testing; multiple admixture mix design; degradation mechanism

0 引言

作为最常用的水工建筑材料,混凝土的性能劣化直接关系到建筑结构的安全性及服役期限。在实际工程中,水工建筑物常建设于复杂环境中,常受到冻融循环和化学物品侵蚀作用,影响其使用性能^[1]。

国内众多学者通过试验的手段对冻融循环、硫酸盐侵蚀作用下水工复掺混凝土性能进行研究。在冻融循环对水工复掺混凝土性能劣化作用方面,常金峰^[2]研究了不同掺量花岗岩石粉、粉煤灰下的抗冻融性能,发现花岗岩石粉、粉煤灰的掺加劣化了混凝土抗冻性能;赵丙芳^[3]基于快速冻融试验,分析了外掺料为粉煤灰和硅粉时,水工复掺混凝土的抗冻性能,并对具有最有抗冻性能粉煤灰、硅粉掺入量进行了研究;孙小杰等^[4]基于有限元多尺度数值模拟,发现在潮湿状态下混凝土试样受冻融循环损伤更为严重;姜春萌等^[5]对不同温差下的混凝土进行冻融循环试验,利用压汞法、扫描电镜和X射线断层扫描等方法测定了混凝土内部的孔隙结构与微观形貌,发现冻融循环会引起混凝土内部孔隙多尺度损伤,致使其抗冻性能降低。在硫酸盐侵蚀对水工复掺混凝土性能劣化作用方面,邵俊丰等^[6]对通过单掺、双掺及三掺等不同配合比设计,系统研究矿物掺合料对混凝土综合性能的影响规律,结果表明硅灰与矿渣微粉的掺入显著提升混凝土抗氯离子渗透性能;朱炯等^[7]、史艳忠^[8]通过干湿循环和半浸泡试验发现,粉煤灰掺量对纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能影响显著,不同试验方法得出的结论存在明显差异;徐俊鹏等^[9]对不同粉煤灰、硅灰配比

下的混凝土在高温蒸养条件下的力学性质进行研究,表明双掺硅灰和粉煤灰的混凝土强度远高于单掺粉煤灰的混凝土强度。在复合作用混凝土损伤方面,姜春萌等^[10]在冻融-溶蚀耦合作用下对混凝土性能进行试验研究,发现冻融-溶蚀耦合作用较单一因素损伤具有明显的加剧效应;宋晶颖等^[11]通过耦合作用下性能测试及微观分析,得出混凝土力学性能随耦合作用弱化,4.0 kg/m³ 纳米 SiO₂ 掺量性能最佳的结论;薛国斌等^[12]、李爽等^[13]通过碾压混凝土层面试验,发现水胶比越小抗冻抗侵蚀性越好,且冻融 75~100 次后耦合劣化速率加快;李肖^[14]通过快速冻融试验,得出粉煤灰混凝土耐酸性优于普通混凝土,盐酸 pH 越小、冻融次数越多强度衰减越明显的结论;刘亚强^[15]通过快速冻融试验,得出盐冻融循环降低混凝土力学性能,初期劣化慢、150 次后急剧衰减,模型可准确描述劣化过程的结论。

基于此,可知冻融循环、硫酸盐侵蚀作用均会对水工复掺混凝土的结构安全性能产生重要影响。因此,对冻融-硫酸盐侵蚀双重作用下水工复掺混凝土性能和劣化规律进行研究,以片麻岩石粉、硅灰掺入混凝土试样为研究对象,对其在经过硫酸盐溶液浸泡、冻融后的混凝土性能进行分析,对其劣化规律进行总结归纳,以探究水工复掺混凝土在冻融-硫酸盐侵蚀耦合作用下性能变化,以期为实际工程提供可参考资料和数据支持。

1 试验材料

主要包括水泥、细骨料、粗骨料、复掺材料和减水剂以及水,各部分材料的类型及其物理力学性能见表 1。

表 1 试验材料类型及其物理力学性能
Table 1 Types of test materials and their physical and mechanical properties

组分	类型	物理力学性能
水泥	P·O 型普通硅酸盐水泥	比表面积 380 m ² /kg, 抗压强度 43 MPa, 抗折强度为 7.4 MPa
细骨料	天然河沙	细度模数为 2.9, 含泥量小于 3.0%
粗骨料	人工石灰岩碎石	粒径 5~20 mm, 含泥量小于 2.0%
减水剂	SBTJM-II 标准型高效减水剂	减水率 21.6%, 固含量 17.9%
水	普通自来水	氯离子含量为 193 mg/L
掺入材料	硅灰	粒径 0.1 μm, 比表面积 20 000 m ² /kg, 二氧化硅含量大于 98%, 堆积密度为 0.65 g/cm ³
	片麻岩石粉	粒径小于 0.007 5mm, 比表面积 290 m ² /kg, 表观密度 2 710 kg/m ³
	粉煤灰	堆积密度为 0.65 g/cm ³ 、比表面积一般为 3 700 m ² /kg

2 试验方案

2.1 试样制作

按照一定配合比制作成 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件用于测定抗压强度, 制作成 150 mm×150 mm×550 mm 棱柱体标准试件用于测定抗折强度; 制作成 100 mm×100 mm×100 mm 棱柱体标准试件用于测定相对动弹模量; 制作成直径约 150 mm、厚度约 50 mm 的圆柱体试件用于测定气体渗透性。

2.2 冻融-硫酸盐侵蚀耦合方案

采用冻融-硫酸盐侵蚀耦合方案即在硫酸盐溶液中对水工复掺混凝土试样进行冻融循环, 即为盐冻。把养护 28 d 的试件放入质量分数 5% 的硫酸钠溶液中持续浸泡 4 d, 浸泡期间需保证溶液液面始终比试件表面高 5 cm, 环境温度维持在 (25±1) °C; 完成浸泡后, 对试件进行冻融循环处理, 单次循环周期为 6 h, 流程为-20 °C 环境下冻结 3 h, 接着在 20 °C 环境中融化 3 h。

通过综合监测试件质量变化、弹性波波速 (初始值与终值对比) 等物理参数, 结合单轴压缩试验获得的抗压强度与抗折强度数据, 完成硫酸盐侵蚀试验和力学性能测试。

2.3 试验工况

根据 DL-T 5150—2017 《水工混凝土试验规程》规定对其性能进行检测。具体试验工况见表 2。所有试件统一设置以下冻融循环次数梯度: 不冻融、5、10、20、40、60、80 次; 温度条件则因试件类型有所区分: FGP 试件采用 (-5~25) °C 的单一温度区间, 其余类型试件均需分别在 -5~25、-20~25、-35~25 °C 三个温度区间内开展试验。

表 2 试验工况
Table 2 Test conditions

试件编号	粉煤灰掺量: 硅灰掺量: 片麻岩石粉掺量	浸泡硫酸盐溶液浓度/%
W	1: 1: 0	
F	1: 1: 0	15
G	1: 1: 0	10
FG1	1: 1: 0	5
FG2	1: 2: 0	5
FG4	1: 4: 0	5
FG6	1: 6: 0	5
FGP	1: 1: 1	5

3 试验结果分析

3.1 质量损失率

由图 1 可知, 水工复掺混凝土的质量损失率随着冻融循环的次数的增加而逐渐增大。对比分析不同掺入材料的水工复掺混凝土质量损失率, 可知未浸泡硫酸盐溶液的混凝土质量损失率最小, 浸泡 15% 硫酸盐溶液的水工复掺混凝土质量损失率最大。根据 5% 硫酸盐溶液的粉煤灰-硅灰不同配比的水工复掺混凝土质量

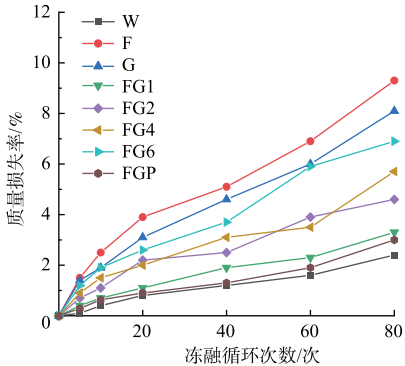


图 1 不同冻融循环次数下水工复掺混凝土质量损失率
Fig.1 Quality loss rate of water-retaining concrete with different admixtures under varied freeze-thaw cycle counts

材料科学

损失率可知,损失率与硅灰掺入量成正比,且三种材料(粉煤灰-硅灰-片麻岩石粉)水工复掺混凝土质量损失率小于两种材料的复掺混凝土。

由图2可知,在三种冻融循环温度下,均为浸泡15%硫酸盐溶液的水工入掺混凝土试件质量损失率最大,为8.3%~10.5%。其次为浸泡10%硫酸盐溶液的水工复掺混凝土,为6.7%~9.6%。而未浸泡硫酸盐溶液和粉煤灰-硅灰-片麻岩石粉三种材料复掺的混凝土质量损失率相当,分别为2.1%~3.6%、2.1%~3.5%。在5%硫酸盐溶液中,随着硅灰掺入占比逐渐增加,三种冻融循环温度下的混凝土质量损失率均逐渐增加。当粉煤灰-硅灰比例由1:1增至1:6时,水工复掺混凝土质量损失率由2.2%~4.05%增至6.1%~7.8%。对比三种冻融循环温度下的质量损失率变化,可知冻结温度越低,水工复掺混凝土的质量损失率越大。

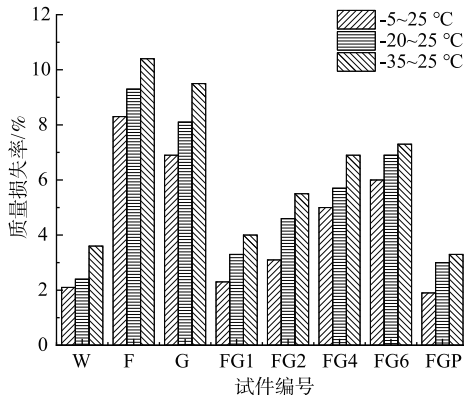


图2 盐蚀后不同冻融循环温度、配比水工复掺混凝土质量损失率
Fig.2 Mass loss rate of water-cement mixed concrete with different freeze-thaw cycle temperatures and mix proportions after salt erosion

3.2 抗压强度

由图3可知,各个配合比的水工复掺混凝土抗压强度与冻融循环次数成反比。且粉煤灰-硅灰配比为1:1时,5%、10%、15%的硫酸盐溶液冻融循环10次后的抗压强度分别为29.1、27.2、24.0MPa,而仅浸泡硫酸盐溶液的试件抗压强度分别为31.7、30.9、29.1MPa减小了8.3%、11.9%、17.5%。

由图4可知,随着冻融循环最低温度的减小,不同配比的水工复掺混凝土抗压强度均减小。以粉煤灰-硅灰配比为1:1、5%硫酸盐溶液中冻融循环后的(FG1)试件抗压强度为例,分别在-5~25 °C、

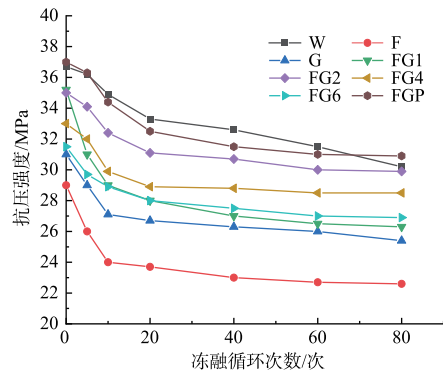


图3 不同冻融循环次数下水工复掺混凝土抗压强度
Fig.3 Compressive strength of water-retaining concrete with recycled aggregate under different freeze-thaw cycle counts

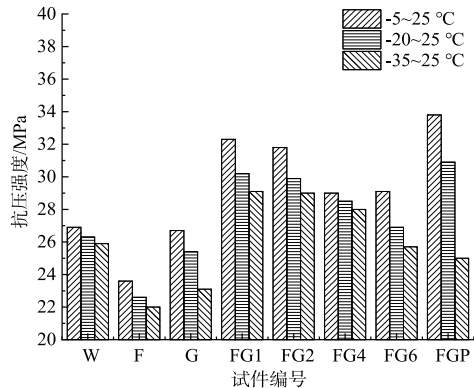


图4 盐蚀后不同冻融循环温度、配比水工复掺混凝土抗压强度
Fig.4 Compressive strength of water-based hybrid concrete with different mix ratios after salt erosion under various freeze-thaw cycles
-20~25 °C和-35~25 °C环境中冻融循环后,抗压强度分别为29.1、26.7、26 MPa,正面表明了水工复掺混凝土抗压强度与冻融循环最低温度成正比。

3.3 相对动弹性模量

由图5可知,随冻融循环次数的增加,各个配合比的水工复掺混凝土相对动弹性模量逐渐减小。以粉煤灰-硅灰配比为1:1、浸泡酸盐溶液浓度为5%FG1试件为例,经5、10、20、40、60、80次冻融循环后的相对动弹性模量分别为96.4%、95.3%、92.5%、83.5%、82.3%、80.1%,分别减小了3.6%、4.7%、7.5%、16.5%、17.7%、19.9%,即水工复掺混凝土相对动弹性模量与冻融循环次数成反比。

在粉煤灰-硅灰配比为1:1时,硫酸盐溶液浓度分别为5%、10%、15%,经10次冻融循环后的相对动弹性模量分别为95.3%、92.2%、86.1%,分别减小了4.7%、7.8%、13.9%。表明随着冻融循环次

数、酸盐溶液浓度的增加,不利于水工复掺混凝土相对动弹性模量性能的逐渐增强。

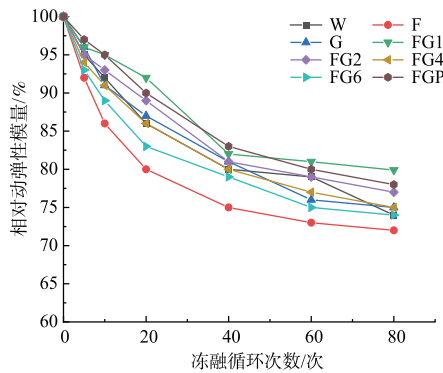


图5 不同冻融循环次数下水工复掺混凝土相对动弹性模量
Fig. 5 Relative dynamic modulus of elasticity for water-retaining concrete with re-admixture under varying freeze-thaw cycle counts

由图6可知,随着冻融循环中冻结温度由 -5°C 减小至 -35°C ,相对动弹性模量逐级减小。以粉煤灰-硅灰配比为1:1、浸泡酸盐溶液浓度为5%FG1试件为例,冻融循环温度分别为 $-5\sim 25^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 和 $-35\sim 25^{\circ}\text{C}$ 时,冻融循环80次后的相对动弹性模量分别为82.5%、80.0%、77.6%,分别减小了17.5%、20.0%、22.4%,表明了,水工复掺混凝土试件的相对动弹性模量与冻融循环中冻结温度呈正比。

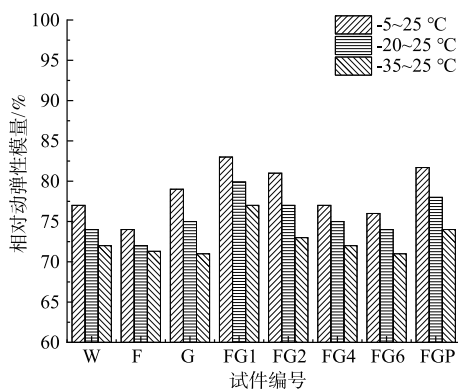


图6 盐蚀后不同冻融循环温度、配比水工复掺混凝土相对动弹性模量
Fig. 6 Relative dynamic elastic modulus of concrete with different freeze-thaw cycle temperatures and mix proportions after salt erosion

3.4 气体渗透性

由图7可知,各个配合比的水工复掺混凝土气体渗透系数增长率与冻融循环次数成正比。以粉煤灰-硅灰配比为1:1、浸泡酸盐溶液浓度为5%FG1试件为例,经5、10、20、40、60、80次冻融循环后的气体渗透系数增长率分别为5.3%、10.1%、21.3%、33.8%、36.9%和39.7%,则表明气体渗透系数增长

率与冻融循环次数成正比。主要原因在于随着冻融循环次数的增加,试样体内的水分不断冻结、融化,而由于水分的冻胀效应,进而致使孔隙体积、数量不断增加,使其气体渗透系数增长率不断增加。

对比各个冻融循环次数的气体渗透系数增长率,在前40次冻融循环增长率为33.5%,占总体气体渗透系数增长率的85.1%,即冻融循环引起的气体渗透增长基本在前40次冻融循环完成。针对粉煤灰-硅灰配比为1:1时,5%、10%和15%的硫酸盐溶液冻融循环80次后的气体渗透系数增长率分别为39.7%、50.1%、56.5%,表明硫酸盐溶液浓度越高,气体渗透系数增长率越大。即硫酸盐溶液浓度的增加,会致使水工复掺混凝土内部损伤增加。

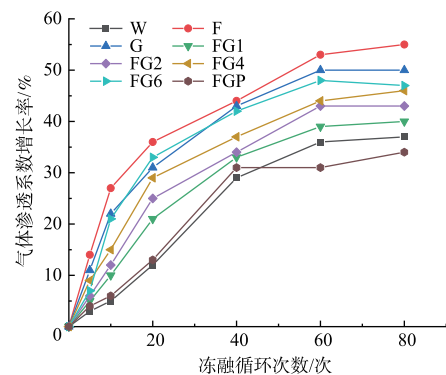


图7 不同冻融循环次数下水工复掺混凝土气体渗透系数增长率
Fig. 7 Increase rate of gas permeability coefficient in water-retaining concrete with re-admixture under varying freeze-thaw cycle counts

由图8可知,随着冻融循环中冻结温度由 -5°C 降低至 -35°C ,水工复掺混凝土试件的气体渗透系数增

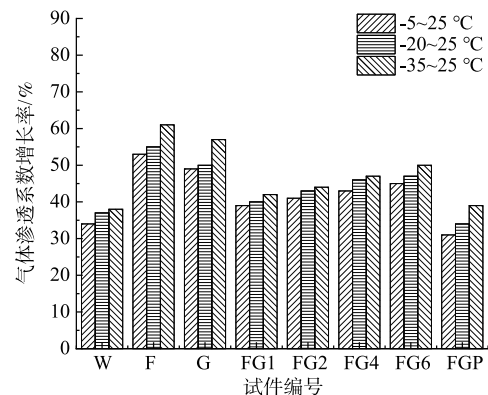


图8 盐蚀后不同冻融循环温度、配比水工复掺混凝土气体渗透系数增长率

Fig. 8 Rise in gas permeability coefficient of concrete with different freezing-thawing cycle temperatures and mix ratios after salt erosion

材料科学

长率逐级增加。以粉煤灰-硅灰配比为 1:1、浸泡酸盐溶液浓度为 5%FG1 试件为例,冻融循环温度分别为-5~25、-20~25 和-35~25 ℃时,冻融循环 80 次后的渗透系数增长率分别为 39.7%、40.3% 和 42.4%,表明了水工复掺混凝土试件的相对动弹性模量与冻融循环中冻结温度呈正比。

4 结论

基于不同冻融循环次数和硫酸盐浓度试验环境下,利用室内称量、抗压、震动和渗透试验对不同配合比下的水工复掺混凝土质量损失、抗压强度、抗折强度和相对动弹性模量及气体渗透性进行分析,进而对冻融-硫酸盐侵蚀双重作用下的水工复掺混凝土的性能劣化规律进行研究。得出以下结论:

(1) 冻融-硫酸盐侵蚀双重作用下,水工复掺混凝土的质量损失率随冻融循环次数增加、硫酸盐溶液浓度升高及冻结温度降低而显著增大;其中前 20 次冻融循环是质量损失的主要阶段,占总损失的 30.1%~47.4%。硫酸盐溶液浓度为 15%、-35~-25 ℃冻融环境下质量损失率达到最大,为 8.3%~10.5%。

(2) 混凝土抗压强度与冻融循环次数、硫酸盐浓度呈负相关,与冻结温度呈正相关;粉煤灰-硅灰复掺体系中,硅灰占比增加可提升抗压强度,但过高硅灰配比(1:6)会因浆体黏度增大、内部微裂缝萌生导致抗劣化能力下降,而粉煤灰-硅灰-片麻岩石粉三掺体系(1:1:1)的抗压强度稳定性更优。

(3) 相对动弹性模量随冻融循环次数增加呈持续衰减趋势,硫酸盐浓度升高和冻结温度降低会加速衰减;经 80 次冻融循环后,-35~25 ℃环境下、5%浓度的硫酸盐溶液浸泡试件的相对动弹性模量较-5~25 ℃环境下降约 4.8%,反映冻结温度对混凝土内部微裂缝扩展的主导作用。

(4) 气体渗透系数增长率与冻融循环次数、硫酸盐浓度呈正相关,与冻结温度呈负相关;冻融循环前 40 次是气体渗透性劣化的关键阶段,占总增长率的 85.1%。酸盐溶液浓度为 15%、-35~25 ℃冻融条件下渗透系数增长率达 56.5%,表明双重作用下混凝土密实性破坏显著。

(5) 矿物掺合料配比显著影响混凝土抗双重侵

蚀性能:粉煤灰-硅灰配比为 1:1 时协同效应最优,即微集料填充与火山灰反应互补。而三掺片麻岩石粉为 1:1:1 时,可进一步优化孔隙结构,其质量损失率为 2.1%~3.5%,相对动弹性模量衰减幅度及气体渗透性劣化程度均低于双掺体系,展现更优的抗冻融-硫酸盐侵蚀能力。

参考文献

- [1] 万旭升,冯江,路建国,等.盐蚀-冻融作用下生物炭混凝土物理力学性能研究[J/OL].冰川冻土,2025,47(5):1211-1221.
- [2] 常金峰.提高多元复合胶凝材料混凝土性能的物理技术措施[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2025,24(2):22-26.
- [3] 赵丙芳.掺加粉煤灰和硅粉混凝土抗冻性能试验研究[D].长春:长春工程学院,2015.
- [4] 孙小杰,胡皓,曹素功,等.冻融循环与疲劳耦合作用下混凝土桥面板的损伤劣化与寿命预测[J].建筑结构,2025,55(20):89-96.
- [5] 姜春萌,胡西康,姜海波,等.大温差冻融下混凝土孔隙协同损伤与退化机制[J/OL].建筑材料学报,1-11[2025-11-06].<https://link.cnki.net/urlid/31.1764.tu.20250902.1454.006>
- [6] 邵俊丰,张世义,范颖芳.复掺矿物掺合料混凝土抗氯盐侵蚀与抗冻性试验研究[J].混凝土,2017,(4):38-42.
- [7] 朱炯,张连英,刘瑞雪,等.氯盐侵蚀后不同掺合料混凝土力学性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(5):863-869.
- [8] 史艳忠.煤矸石粗骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能影响分析[J].粉煤灰综合利用,2025,39(4):29-34.
- [9] 徐俊鹏,赵天奇,赵睿,等.蒸养条件下超掺粉煤灰混凝土强度与机理研究[J].粉煤灰综合利用,2025,39(1):49-54.
- [10] 姜春萌,夏立,姜海波,等.混凝土冻融-溶蚀耦合损伤机制与性能演化[J/OL].建筑材料学报,2026,29(5):530-536.
- [11] 宋晶颖,许玲玲,买哲.冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下纳米 SiO₂ 对混凝土性能影响研究[J].中国测试,2022,48(11):174-179.
- [12] 薛国斌,卢晓春,熊勃勃,等.冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下碾压混凝土性能研究[J].水电能源科学,2021,39(2):123-126.
- [13] 李爽,田斌,卢晓春,等.硫酸盐侵蚀与冻融循环耦合作用下碾压混凝土层面抗剪强度研究[J].人民珠江,2018,39(12):92-96.
- [14] 李肖.盐碱环境下粉煤灰混凝土的冻融循环衰减特性研究[J].四川建筑科学研究,2019,45(2):6-8.
- [15] 刘亚强.ECC 与盐冻融损伤混凝土界面粘结性能试验研究[D].西安:长安大学,2024.