

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.04.006

不同硅微粉掺量对水工混凝土抗冻性能的影响

林乙玄

(福建林业职业技术学院建筑工程系智慧建设工程中心,福建 南平 353000)

摘要:为研究不同硅微粉掺量对水工混凝土抗冻性能的影响,以硅酸盐水泥、碎石、中砂、减水剂、硅微粉作为原材料制备水工混凝土试块,对 0.0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0% 硅微粉掺量的试块进行冻融循环试验、单轴压缩试验和动弹性模量试验。结果表明:随着冻融循环次数的增加,水工混凝土试块的抗压强度降低;掺入硅微粉可以有效提高水工混凝土的抗冻性,但硅微粉含量过高或过低都会影响其效果;当硅微粉掺量为 5% 时抗冻效果最佳,60 次冻融循环次数下,抗压强度提高 15.1%、质量损失率降低 0.17%、相对动弹性模量提高 0.014%。

关键词:硅微粉;水工混凝土;抗冻性能;相对动弹性模量

中图分类号:TV431 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)04-0045-07

Effect of Different Silica Powder Contents on the Frost Resistance Performance of Hydraulic Concrete

LIN Yixuan

(Intelligent Construction Engineering Center, Department of Architectural and Civil Engineering, Fujian Forestry Vocational Technical College, Nanping 353000, Fujian, China)

Abstract:In order to study the effect of different silica powder contents on the frost resistance performance of hydraulic concrete, hydraulic concrete test blocks were prepared with Portland cement, crushed stone, medium sand, water reducing agent and silica powder as raw materials. Freeze-thaw cycle tests, uniaxial compression tests and dynamic elastic modulus tests were carried out on the test blocks with 0.0%, 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10.0% silica powder contents. The results show that the compressive strength of the hydraulic concrete test blocks decreases with the increase in the number of freeze-thaw cycles. Adding silica powder can effectively improve the frost resistance of hydraulic concrete, but the effect will be affected if the content of silica powder is too high or too low. When the silicon powder content is 5%, the frost resistance effect is the best. Under 60 freeze-thaw cycles, the compressive strength is increased by 15.1%, the mass loss rate is decreased by 0.17%, and the relative dynamic elastic modulus is increased by 0.014%.

Keywords:silicon powder; hydraulic concrete; frost resistance performance; relative dynamic elastic modulus

0 引言

在现代水工混凝土结构的设计与施工中,抗冻

性能是衡量其耐久性的重要指标^[1-3]。水工混凝土常处于水环境中,需要具有良好的抗冻性能,以确保结构的安全性^[4-5]。然而,传统的水工混凝土在冻

收稿日期:2024-08-15

基金项目:2021 年福建省中青年教育科研项目(JAT210780)。

作者简介:林乙玄(1988—),女,福建建瓯人,讲师,硕士,研究方向:建筑工程,e-mail:lingreen3@126.com。

融循环作用下,会出现性能退化问题,包括强度降低、质量损失以及动弹模量下降,这些问题严重制约了混凝土的使用寿命和安全性^[6]。为了应对这一问题,学术界与工程界持续探索并尝试新的混凝土掺料和技术手段,以期提升水工混凝土的抗冻性能,进而延长其寿命并增强结构安全性^[7-8]。硅微粉作为一种具有独特物理和化学性质的高性能混凝土掺合料,近年来在改善普通混凝土性能方面展现出巨大的应用潜力^[9-10]。其细小的颗粒尺寸、高比表面积以及优异的火山灰活性,使得硅微粉能够有效填充混凝土中的微孔隙,优化孔结构,提高混凝土的密实度和强度。此外,硅微粉的加入还能促进水泥水化产物的生成,进一步提升混凝土的耐久性^[11-13]。杨坪等^[14]、戴辉^[15]、宋正林^[16]的研究结果表明,在混凝土中添加硅微粉能有效提高混凝土的强度。阮玉坤等^[17]、李文丽^[18]、单国强等^[19]研究冻融循环下不同硅微粉含量混凝土的强度,结果表明,硅微粉的添加能提高混凝土的抗冻性。尽管硅微粉在普通混凝土中的应用已取得了一系列积极成果,但其在水工混凝土中的应用仍相对有限,特别是关于其对水工混凝土抗冻性能影响的研究尚显不足,缺乏系统性的理论与实验支撑。因此研究硅微粉对水工混凝土抗冻性能的影响具有重要意义。

1 硅微粉特性及作用机理

1.1 硅微粉特性

硅微粉是一种无毒、无味、无污染的无机非金属材料,主要由天然微晶质石英(SiO_2)经过破碎、水洗、超细、分级等工艺加工而成。其具备耐高温性好、耐酸碱腐蚀、导热系数高、化学性能稳定、硬度大等优势。

硅微粉的主要化学成分为二氧化硅(SiO_2),主要包括有晶体和无定形非晶体2种形态。在 SiO_2 的晶体结构中,每个硅原子都被周围的4个氧原子环

绕,并位于4个氧原子的中心位置,通过共价键与这四个氧原子结合,从而形成以硅氧四面体为基本构成单元的立体网状结构。 SiO_2 晶体结构如图1所示。

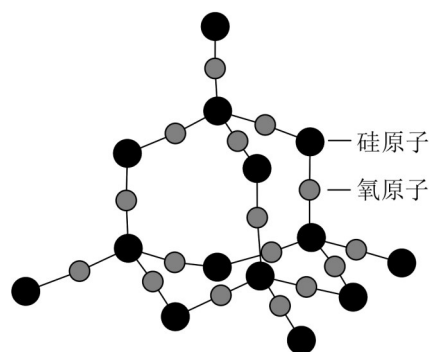
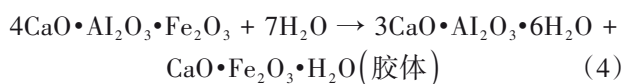
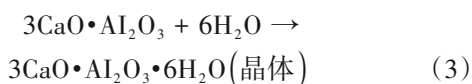
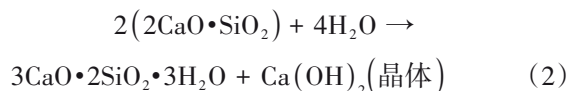
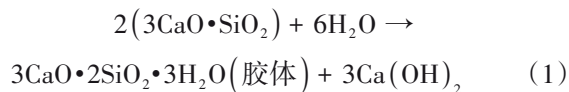


图1 SiO_2 晶体结构

1.2 硅微粉在混凝土中的作用机理

1.2.1 火山灰效应

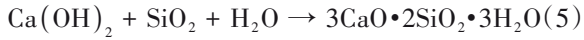
混凝土水化过程中,会产生大量水泥水化产物,其反应如式(1)~(4)所示。



式(1)~(4)中: $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 表示水化硅酸钙(以下简称C-S-H); $3\text{Ca}(\text{OH})_2$ 表示氢氧化钙(以下简称CH); $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 表示水石榴石。

混凝土中添加硅微粉能利用硅微粉的火山灰效应(式(5)),即 SiO_2 在CH的碱性刺激下与CH迅速发生反应并生成C-S-H,这样既消耗了主要水化产物CH,同时大大提高了C-S-H凝胶的含量。通过硅微粉的掺入,与 SiO_2 传统C-S-H凝胶发生相互反应,形成一种具有较低的Ca/Si的火山灰凝胶体^[20]。新C-S-H能稳定地聚合 OH^- 、 Al^{3+} 等离子,并不会在酸性溶液中分解。加入硅微粉可以显著提

高混凝土的耐酸碱性能,增强其对渗析、盐霜和碳化的抵抗能力,从而极大地提升其强度和抗冻性能。



1.2.2 填充效应

在混凝土中,内部泌水受石料颗粒物的阻拦而积聚在石料下边形成多孔结构界面^[21]。这种多孔结构界面由于存在大量定位排列的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶,使得其硬度相对较弱,成为混凝土内部的薄弱区域。然而,当在混凝土中掺加足量的硅微粉时,其微小的颗粒物能够填充于水泥砂浆体的缝隙间以及混凝土颗粒物的间隙,从微观尺度上增加混凝土的密实度,进而提升其抗渗性和抗冻性。

1.2.3 表面吸附作用

硅微粉微小颗粒所具备的巨大比表面积,使其具有极强的吸附能力。在混凝土拌和过程中,硅微粉的颗粒表面能够吸附大量的自由水,有效降低混凝土的水灰比,进而减少混凝土中的孔隙和缺陷,提高混凝土的密实度和强度。同时,吸附混凝土中的其他有害物质,如一些对混凝土性能产生负面影响的离子或分子,从而进一步净化混凝土的内部环境,提升其整体性能。此外,硅微粉的微小尺寸和良好分散性能够在混凝土中起到润滑作用,改善混凝土的流动性。

2 试验方法

2.1 原材料及配合比设计

本次试验采用技术标准符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的P.O 42.5硅酸盐水泥、5~25 mm连续级配的碎石、细度模数为2.78的中砂、减水剂、6 000目H125硅微粉。砂料筛分曲线如图2所示,碎石筛分曲线如图3所示。其中,硅酸盐水泥采用华新水泥有限公司普通硅酸盐水泥,碎石和中砂均产自福建南平的石料厂,减水剂采用东方矽人公司生产的聚羧酸减水剂,硅微粉产自河南米尚环保材料科技有限公司。

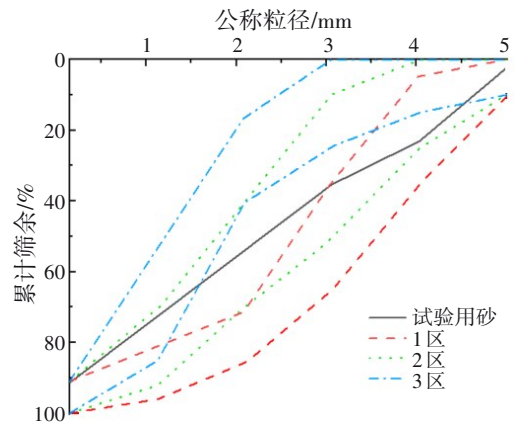


图2 砂料筛分曲线图

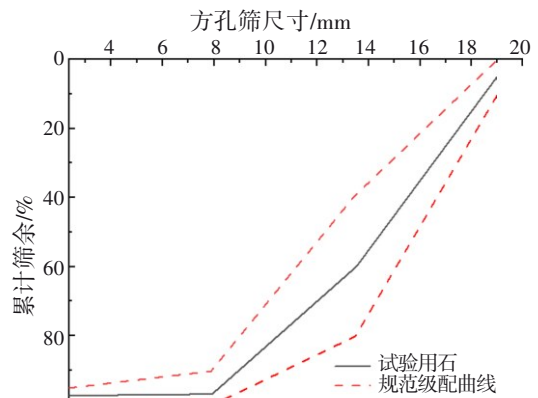


图3 碎石筛分曲线图

试验参照SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》、GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》()进行试件制作及养护、混凝土试件采用150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体试块。水工混凝土试块的设计配合比如表1所示,试验仪器如表2所示。

2.2 冻融循环试验

将混凝土试件在HBV-Ⅲ型混凝土标准养护室,温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$ 的标准情况下养护28 d后取出,在冻融循环试验开始之前,采用真空饱和仪进行试样的真空饱和。饱和完成后进行冻融循环试验。本试验将冻融循环温度设定在 $-20 \sim 20^\circ\text{C}$,试样从 $+20^\circ\text{C}$ 以 $0.667^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度冷却至 -20°C ,降温随后冻结12 h,再以 $0.667^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温度梯度从 -20°C 升温到 $+20^\circ\text{C}$,随后融化12 h,故26 h为一个冻融循环时长,温度示意图如图4所示。在

表 1 水工混凝土配合比单方用量

水泥/(kg·m ⁻³)	碎石/(kg·m ⁻³)	中砂/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	硅微粉/%
350	900	750	1.0	173	0.0
350	900	750	1.0	173	2.5
350	900	750	1.0	173	5.0
350	900	750	1.0	173	7.5
350	900	750	1.0	173	10.0

表 2 试验仪器及型号表

仪器名称	型号	厂家
冻融循环试验仪	H12352	沧州坎信仪器设备有限公司
混凝土养护室	HBV-III	无锡建仪仪器机械有限公司
压力试验机	2 000 kN 微机控制型	上海华龙测试仪器股份有限公司
动弹性模量试验	DT-W18	北京数智意隆仪器有限公司

冻融循环过程中,为了防止水分流失,使用保鲜膜进行包裹,同时每完成 5 次冻融循环进行一次试样饱和。为体现硅微粉对水工混凝土抗冻性能的影响,

本文分别进行 0 次、30 次、60 次冻融循环,每完成 30 次冻融循环称取水工混凝土试件的重量。

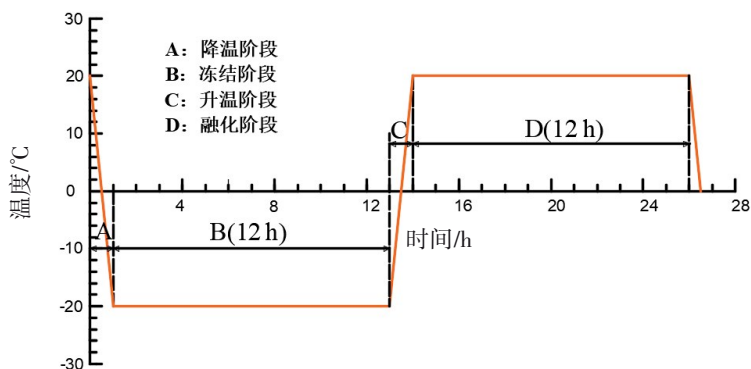


图 4 冻融循环温度示意图

2.3 单轴压缩试验

在试验开始之前,首先对试样表面进行彻底清洁,并对其尺寸及外观进行详细检查。随后,确保试样正确置于试验机的下压板中央,保证试样与下压板中心的精准对齐,设定加载速率为 0.5 MPa/s。整个试验过程中,荷载需连续且均匀地施加至试样发生破坏,并在破坏后立即记录下相应的破坏荷载值。为确保试验结果的准确性,每种配合比下选取 3 个立方体试样进行测试,其抗压强度以 3 次试验结果的算术平均值表示。立方体抗压强度按式(6)计算。

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \tag{6}$$

式中: f_{cc} 为水工混凝土的抗压强度,MPa; F 为试件的破坏荷载,N; A 为试件的承压面积,mm²。

2.4 动弹性模量试验

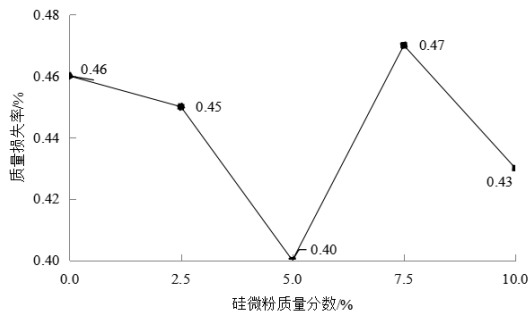
试验步骤如下:(1)对试验设备进行校准与预热处理;(2)将混凝土试件置于海绵垫之上,本次试验对象为混凝土试件,因此实施的是横向自振频率测试;(3)将激振器与拾振器紧贴于混凝土试件表面,确保测杆与试件接触部位均匀涂抹凡士林以提升耦合效果;(4)通过评估试件的共振频率,应精确

挑选对应的频率测量区间进行测试;(5)连续重复测试2次,确保测试结果的波动范围为 $\pm 0.5\%$,超过波动范围再次测试。

混凝土动弹性模量计算公式如式(7)所示。

$$E_d = 9.65 \times 10^{-4} \frac{Gf^2 L^3 R}{bh^3} \quad (7)$$

式中: E_d 为动弹性模量,MPa; G 为试件质量,kg; f 为试件的自振频率,Hz; L 、 b 、 h 分别为试件的长、宽、



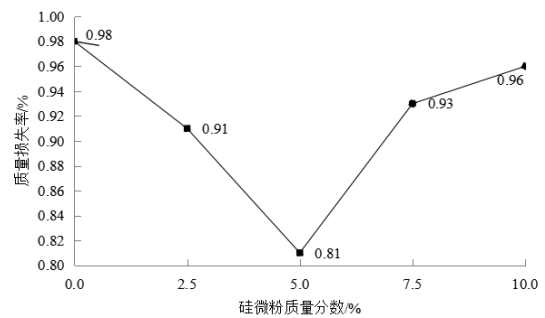
(a) 30次冻融循环下混凝土试样的质量损失率

高,mm; R 为试件边长比和泊松比的修正系数。

3 试验结果与分析

3.1 冻融循环后的质量损失率分析

不同硅微粉质量分数(0.0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0%)下,30次和60次冻融循环后试件的质量损失率如图5所示。



(a) 60次冻融循环下混凝土试样的质量损失率

图5 不同硅微粉质量分数下混凝土试块的质量损失率

从图5可以看出:(1)以30次冻融循环为例,当硅微粉质量分数为0.0%时,混凝土试块的质量损失率为0.46%;随着硅微粉质量分数的增加,为2.5%和5.0%时,试件的质量损失率分别下降到0.45%和0.40%;硅微粉质量分数继续增加为7.5%时,质量损失率又增长到0.47%。说明适量增加硅微粉质量分数能够提升混凝土的抗冻融性能,但过高的硅微粉质量分数则可能导致性能下降。(2)与30次冻融循环相比,60次循环下的质量损失率普遍较高,这反映了冻融循环次数对混凝土性能的影响;然而,硅微粉质量分数对质量损失率的影响趋势与30次循环相似,进一步验证了硅微粉质量分数对混凝土抗冻融性能的影响。(3)适量增加硅微粉质量分数可以有效提高混凝土试块的抗冻融性能,降低质量损失率;然而,过高的硅微粉质量分数会导致质量损失率上升。

硅微粉比表面积大,过量的硅微粉会吸附大量水分导致水泥水化不充分,致使混凝土结构不密实,在外部环境下极易受到侵蚀。同时硅微粉的自

收缩会使混凝土产生裂缝,这些裂缝为水分的迁移提供了通道,从而大大增加冻融循环下混凝土的质量损失率。

3.2 单轴抗压强度分析

对0次、30次、60次冻融循环下,不同硅微粉质量分数水工混凝土试块的单轴抗压强度进行检测,所测抗压强度变化曲线如图6所示。

由图6可以看出:(1)随着冻融循环次数的增

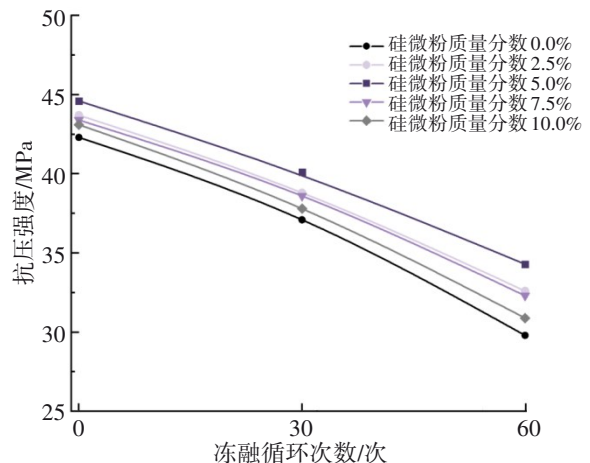


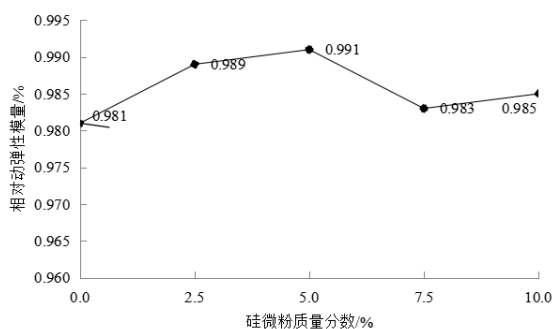
图6 不同硅微粉质量分数下混凝土试块的抗压强度

加,混凝土试块的抗压强度普遍降低,这是由于冻融循环导致混凝土内部结构的损失,从而抗压强度降低。(2)随着硅微粉质量分数的增加,混凝土试块的抗压强度在0次冻融循环时呈现上升趋势。当硅微粉质量分数达到5%时,抗压强度达到最高值44.6 MPa。说明掺入5%硅微粉可以有效提高混凝土试块的抗压强度。可能是由于硅微粉的添加产生了火山灰效应和微填充效应,使水泥浆与集料的界面过渡区得到改善,混凝土的强度得到提升。(3)随着冻融循环次数的增加,不同硅微粉掺量下的混凝土试块抗压强度均有所下降。经过30次冻融循环后,硅微粉质量分数为5%的试块抗压强度降至40.1 MPa,而硅微粉质量分数为10%的试块抗压强度则下降至37.8 MPa。经过60次冻融循环后,硅微

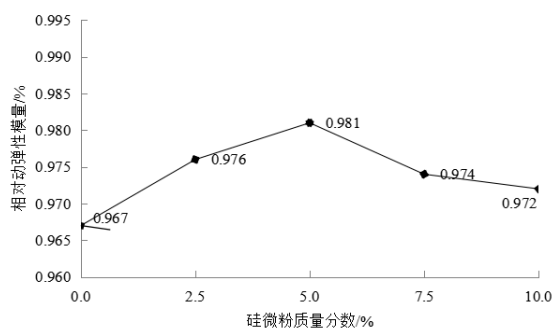
粉质量分数为0%的试块抗压强度降至29.8 MPa,硅微粉质量分数为10%的试块抗压强度则降至30.9 MPa。表明硅微粉的添加可以提高混凝土试块的抗压强度,但过高的硅微粉质量分数会导致试块在冻融循环后的抗压强度大幅下降。可能是由于硅微粉颗粒小同时比表面积大,添加了过多硅微粉后会吸附大量的水分,影响水泥水化,降低混凝土的强度。同时硅微粉的高活性加速水泥水化,增强自干燥和自收缩,易产生裂隙,降低耐久性和抗渗性。

3.3 相对动弹性模量分析

不同硅微粉质量分数(0.0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0%)下,30次和60次冻融循环后试件的相对动弹性模量如图7所示。



(a)30次冻融循环下混凝土试样的相对动弹性模量



(a)60次冻融循环下混凝土试样的相对动弹性模量

图7 不同硅微粉质量分数下混凝土试块的相对动弹性模量

由图7可以看出:(1)在30次冻融循环后,试件的相对动弹性模量随着硅微粉质量分数的增加出现先增后降再增的趋势。当硅微粉质量分数达到5%时,试件的相对动弹性模量最大,达到了0.991。硅微粉质量分数继续递增,试块的相对动弹性模量逐渐下滑,说明混凝土的耐久性在这些质量分数下大幅降低。当硅微粉质量分数达到10%时,相对动弹性模量出现了增长,耐久性又得到了提升。(2)硅微粉对于混凝土冻融循环下的相对动弹性模量有很大影响。其中硅微粉掺量为5%时,相对动弹性模量表现最好。出现这一现象的原因是硅微粉的火山灰效应、填充效应和表面吸附作用,但是硅微

粉质量分数过高会导致吸附过多的自由水,水泥水化不充分,混凝土微观结构不密实,而混凝土的相对动弹性取决于密实度,结构不密实会使混凝土受力时的弹性响应减弱,从而导致混凝土的相对弹性模量下降。

4 结论

本文通过研究不同硅微粉掺量对水工混凝土抗冻性能的影响,得出以下主要结论。

- 1)硅微粉在混凝土中的作用机理可能体现在3个方面:火山灰效应、填充效应和表面吸附作用。
- 2)适量掺入硅微粉可以有效提高混凝土试块

的抗压强度和相对动弹性模量,降低质量损失率。当硅微粉质量分数达到5%时,抗压强度达到最高值,且质量损失率也相对较低,表明此时混凝土的抗冻性能最佳。适量掺入硅微粉可以优化混凝土的孔结构,提高混凝土的密实度和强度,从而增强

其抗冻性能。

3)过高的硅微粉质量分数会导致试块在冻融循环后的抗压强度大幅下降,同时质量损失率上升,相对动弹性模量也呈现下降趋势,这与硅微粉自身的比表面积和自收缩有关。

参考文献:

- [1] 韩成.冻融条件下含气量对水工混凝土抗冻性的影响研究[J].水利科学与寒区工程,2024,7(4):1-5.
- [2] 张爱勤,贾坚,刘芝敏,等.环氧树脂对混凝土抗盐冻能力的影响研究[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1278-1283.
- [3] 靳昊,潘龙江,易忠来,等.严寒地区无砟轨道底座板混凝土粉化整治技术[J].铁道建筑,2020,60(2):116-119.
- [4] 黄俊龙,王乾峰,张帅康.不同饱和度混凝土静动态力学性能数值模拟研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2):79-84+97.
- [5] 张航.不同条件下水工混凝土抗冻指标演化规律研究[J].江西建材,2024(1):75-76+97.
- [6] 丁廉营.盐冻环境下水工混凝土材料耐久性衰减规律研究[D].郑州:华北水利水电大学,2017.
- [7] 罗强.早期受冻对再生骨料水工混凝土力学性能的影响研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(6):4-6.
- [8] 杨建.凝灰岩粉作为水工混凝土掺和料的可行性研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [9] 张怀成.混凝土大型水工构筑物抗渗性能测试与改进方案[C]//河海大学.2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集.南京:河海大学,2024:5.
- [10] 孙文昊,陈俊松,穆松,等.高岩温环境下矿物掺合料对喷射混凝土强度和抗渗性的影响[J].新型建筑材料,2024,51(6):47-51.
- [11] 王象庚,陈佩圆,李进,等.硅灰热焊接改性塑料颗粒对砂浆抗压强度与微结构的影响[J].硅酸盐通报,2024,43(6):1975-1982.
- [12] 徐铜鑫,胡鹏辉,郑超,等.一种新型早强高强灌浆料的制备及性能研究[J].材料导报,2024,38(S1):182-185.
- [13] 朱建良,俞啸飞.矿物掺合料对活性粉末混凝土海工应用分析研究[J].建筑技术开发,2024,51(5):6-9.
- [14] 杨坪,彭振斌.硅粉在混凝土中的应用探讨[J].混凝土,2002(1):11-14.
- [15] 戴辉.硅微粉在混凝土修补料中的增强作用[J].四川建材,2009,35(1):5-7.
- [16] 宋正林.天然硅质掺合料活性粉末混凝土研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [17] 阮玉坤,龚爱民,李丽生.硅粉掺量对低水灰比混凝土力学性能的影响[J].粉煤灰综合利用,2019(2):31-33+38.
- [18] 李文丽.掺超细活性硅微粉混凝土的抗冻、抗碳化及抗氯离子渗透性能研究[J].结构工程师,2014,30(5):187-191.
- [19] 单国强,刘阳,刘彬.硅粉对混凝土抗冻性影响的研究[J].科技咨询导报,2007(14):33.
- [20] 刘慧,徐海南,任建喜,等.寒区隧道围岩-喷层界面增黏与抗冻试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(6):1383-1396.
- [21] 徐定丰.蒸压无石棉纤维水泥板鼓泡分层现象原因及解决措施[J].混凝土与水泥制品,2019(12):38-42.