

高寒地区复掺矿物掺合料水工混凝土 抗冻耐久性劣化机理研究

赖海珍¹, 陆程铭², 荆慧斌², 张帅³

(1. 崇明区农村水利管理所, 上海 202150; 2. 上海泾景水利工程设计有限公司,
上海 200940; 3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为评定高寒地区环境对掺矿物掺合料水工混凝土结构冻融循环耐久性能的影响规律,通过不同掺合料掺量及种类、不同冻融温度下水工混凝土冻融循环试验,研究分析不同配合比水工混凝土的质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度以及渗透性的时变规律,揭示了矿物掺合料与冻融温度对混凝土抗冻性的影响机理。试验结果表明:各掺合料水工混凝土的抗冻性从优到劣依次为粉煤灰+硅灰+稻壳灰>硅灰+稻壳灰>粉煤灰+稻壳灰>粉煤灰+硅灰>稻壳灰>硅灰>粉煤灰>未掺加;相同单掺条件下,掺加稻壳灰试件组抗冻性最强,硅灰居中,粉煤灰最弱;复掺矿物掺合料情况下,三掺粉煤灰、硅灰、稻壳灰混凝土抗冻性最强;复掺矿物掺合料能减少水工混凝土的孔隙率及渗透性,且粉煤灰、硅灰、稻壳灰的颗粒粒径不同会相互填充,从而产生超叠加效应;随着冻融循环过程中试件中心温度的降低,导致混凝土内部温度梯度增大,孔隙内部的膨胀压力增大导致混凝土内部结构破坏。

关键词: 水工混凝土; 耐久性; 冻融循环; 复掺矿物掺合料; 劣化机理; 高寒地区

中图分类号: TV641.4; TU528.041

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0191-07

Study on frost resistance durability deterioration mechanism of hydraulic concrete with mineral mixed admixture in alpine regions

LAI Haizhen¹, LU Chengming², JING Huibin², ZHANG Shuai³

(1. Chongming Region Rural Water Conservancy Management Institute, Shanghai 202150, China;

2. Shanghai Jingjing Water Conservancy Engineering Design Co., Ltd, Shanghai 200940, China;

3. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of alpine region environment on the freeze-thaw cycle durability of hydraulic concrete structures with mineral mixed admixtures, the freeze-thaw cycles of hydraulic concrete with different mixture amount, mixture type, and freeze-thaw temperatures were studied and analyzed. The time-varying laws of mass loss rate, relative dynamic elastic modulus, compressive strength and permeability of hydraulic concrete with different mixing ratios were studied and analyzed, and the influence mechanism of mineral admixtures and freeze-thaw temperature on the frost resistance of concrete was revealed. The test results showed that the frost resistance of concrete with different admixtures ranked: fly ash + silica fume + rice husk fume > silica fume + rice husk fume > fly ash + silica fume > fly ash + silica fume > fly ash + rice husk fume > rice husk fume > silica fume > fly ash > without addition. Under the same single mixing condition, the test group with rice husk ash had the highest frost resistance, the silica fume was in the middle, and the fly ash was the weakest. For mineral mixed admixtures with several minerals, three of fly ash, silica fume and rice husk ash have the strongest frost resistance. Mixed mineral admixtures can reduce the porosity and permeability of hydraulic concrete, and different particle sizes of fly ash, silica fume and rice husk ash will fill each other, resulting in

收稿日期:2018-08-29; 修回日期:2018-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介:赖海珍(1974-),男,江西赣州人,本科,主要从事河道管理和建设。

通讯作者:荆慧斌(1989-),男,山西阳泉人,硕士,主要从事水工结构分析及数值。

superimposition effect. The freeze – thaw damage of hydraulic concrete increases with the decrease of central temperature during freeze – thaw cycles, which is mainly due to the increase of temperature gradient in concrete and expansion pressure in pore.

Key words: hydraulic concrete; durability; freeze – thaw cycles; composite addition of mineral admixture; deterioration mechanism; alpine regions

1 研究背景

60 余年来,我国兴建了大量的水利水电工程,中东部地区建设已接近尾声,重心已经转向了自然条件严酷的西部高寒地区。影响西部高寒高海拔地区建筑材料使用寿命的因素主要有海拔高、日温差大、冻融循环剧烈、太阳辐射强等。其中,较大温差引起的冻融循环破坏是影响高寒区水工混凝土耐久性的主要原因。因此,广大学者对于水工混凝土的抗冻性进行了大量的研究^[1]。

影响水工混凝土抗冻性的因素较多,水泥品种、掺合料类型、水灰比、搅拌方式、拌合物流变参数等均可以对水工混凝土的抗冻性产生影响^[2-6]。Yazici^[7]研究表明,应用大掺量粉煤灰(FA)、硅灰(SF)、稻壳灰(RH)及磨细矿渣等矿物掺合料,可以有效地提高混凝土的抗渗、抗氯离子及抗腐蚀性能,掺加矿物掺合料是提高混凝土耐久性最有效、也是最经济的途径。李阳等^[8]通过试验表明,粉煤灰混凝土的抗冻能力随着粉煤灰掺量的增加而降低,和相同等级的普通混凝土相比,28 d 龄期的粉煤灰混凝土试件抗冻耐久性试验结果偏低。随着粉煤灰混凝土技术的深入与发展,掺加矿物材料混凝土的抗冻性研究已经越来越引起学者们的关注。姚军等^[9]研究表明,引气硅粉混凝土无论水灰比多少,硅粉掺量 15% 以下时混凝土均具有较高的抗冻性能。何智海等^[10]通过试验得出结论:随着矿渣掺量的增加,其混凝土的抗冻性能越差,但掺和比例合适时,抗冻性与普通混凝土相比具有较大的改善。

目前混凝土水工混凝土冻融循环的研究大多根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082 – 2009)中快冻法的试验规程进行操作。然而,规范对于混凝土冻融循环的试件中心温度规定为(–18 ± 2) ~ (5 ± 2)℃。规范中试件最低温度为 –20℃,而高寒地区极端最低气温平均值可以达到 –30℃^[1],这种试验环境与高寒地区实际服役环境存在明显差异,将普通混凝土冻融试验方法用于研究极端环境下水工混凝土冻融损伤规律的误差较大^[13-14]。笔者以试件中心温度为(–20、–25、–30)℃ ~ 8℃,对试件进行 300 次冻融试验,模

拟水工混凝土材料的高寒地区极端环境,通过测试复掺矿物掺合料混凝土的服役性能(包括质量损失、抗压强度、动弹性模量、渗透性),探索大温差冻融循环作用对矿物掺合料水工混凝土耐久性能的劣化机理。

2 试验材料与方法

2.1 原材料

(1)胶凝材料:水泥为冀东水泥有限公司生产的盾石牌普通硅酸盐水泥(P · O),强度等级 42.5R;粉煤灰选用渭河电厂正元牌粉煤灰物,等级为Ⅱ级;稻壳灰采用西安中粮集团加工的稻壳,经过锅炉燃烧后得到的稻壳灰;硅灰采用呼和浩特市闽澳新能源材料有限公司生产的高强硅灰。各胶凝材料的化学组成成分见表 1。

表 1 胶凝材料的化学组成成分				%
化学组分	水泥	粉煤灰(FA)	硅灰(SF)	稻壳灰(RH)
SiO ₂	26.00	45.0	85.2	84.0
Al ₂ O ₃	6.45	26.8	3.8	1.35
CaO	53.00	7.35	1.2	3.17
Fe ₂ O ₃	3.09	8.53	1.6	1.45
MgO	1.21	2.84	2.2	
K ₂ O	1.38	2.38		
Na ₂ O	0.25	0.43		
SO ₃	2.01	2.86	1.9	0.923
P ₂ O ₅				2.46
烧失量	4.05	3.48	3.9	3.2

(2)细骨料(砂):河砂,颗粒级配为中砂,细度模数为 2.68。

(3)粗骨料:天然卵石,石料粒径 5 ~ 30 mm,小石子粒径为 5 ~ 20 mm,大石子粒径为 20 ~ 30 mm。

2.2 配合比

试验中矿物掺合料种类共 3 种:粉煤灰、硅灰、稻壳灰。本试验水工混凝土按照某面板混凝土坝面板混凝土配合比进行设计,按照单掺、双掺及三掺形式来替换水泥用量,掺量均为 20%。水工混凝土配合比见表 2。

表 2 试验水工混凝土配合比 kg/m³, %

编号	矿物掺合料 掺量及种类	水	水泥	粉煤灰	硅灰	稻壳灰	砂子	石头	减水剂	引气剂
OP	未掺加	140	350	0	0	0	734	1250	0.8	0.003
DC1	FA	140	280	70	0	0	734	1250	0.8	0.003
DC2	SF	140	280	0	70	0	734	1250	0.8	0.003
DC3	RH	140	280	0	0	70	734	1250	0.8	0.003
SC1	FA + SF	140	280	35	35	0	734	1250	0.8	0.003
SC2	FA + RH	140	280	35	0	35	734	1250	0.8	0.003
SC3	SF + RH	140	280	0	35	35	734	1250	0.8	0.003
SC4	FA + SF + RH	140	280	23.3	23.3	23.4	734	1250	0.8	0.003

2.3 试验方法与评价指标

混凝土冻融循环试验,依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082 - 2009 的技术操作流程,设置冻融循环试验机各种参数(试件中心温度(-20、-25、-30)℃ ~ 8℃;冻融液温度 -35 ~ 20℃;冻融循环 1 次历时不超过 4 h),即开始试验。冻融循环评价指标包括阿:质量损失率、相对动弹星模量、抗压强度、气体渗透性。本次试验采用量程为 50kg 的电子秤测试不同循环次数下混凝土质量变化;采用超声波检测仪分别测试并计算混凝土的动弹性模量;采用上海劳瑞仪器设备有限公司生产的 AU-TOCLAM 渗水渗气性测定仪来测量混凝土的气体渗透性;采用混凝土万能试验机测试水工混凝土 28 d 抗压强度及冻融后抗压强度。

3 试验结果与分析

3.1 质量损失率

各配合比下水工混凝土在 -20℃ ~ 8℃ 的试件中心温度下冻融 300 次过程中质量损失率变化见图 1。根据图 1 中混凝土质量损失率变化曲线可以看出,质量损失率随冻融循环次数的增加逐渐增大,在 0 ~ 100 次冻融循环过程中,混凝土的质量损失率增长速率较小,呈现一个缓慢上升的趋势。然而在 150 ~ 300 次冻融循环过程中,混凝土的质量损失率呈指数式上升,质量损失率增加较为明显。分析其原因是由于混凝土内部存在大量的孔隙,在冻融循环初期大量水分会进入到混凝土孔隙内部,表面砂浆脱落率较小。冻融循环后期,混凝土表面冻胀破坏严重,表面裂缝扩展增加,混凝土试件表面的砂浆剥落较为严重,质量损失率增加较快。

从图 1 中可以看出,质量损失程度为:DC1 > DC2

> DC3 > SC1 > SC2 > SC3 > SC4 > OP,经 300 次冻融循环后,相应的水工混凝土质量损失率约为 8.1%、6.7%、5.9%、5.6%、4.6%、4.4%、3.9%、3.8%。由此可以看出,水工混凝土经过冻融循环以后,单掺、双掺以及三掺矿物掺合料的试件组质量损失率均大于参照组(OP)。单掺 FA 水工混凝土 DC1 组质量损失率最大,SC4 试件组与 OP 组的质量损失率相差较小,分析原因可知混凝土质量损失率的变化是由于表面砂浆剥落等所引起的,其主要因素取决于混凝土的表面强度,由于 FA 等矿物掺合料的掺加导致水泥的水化反应减慢,因此会导致 28 d 的抗压强度小于未掺加矿物掺合料的普通混凝土(见 3.3 节),从而导致质量损失率增大。

各配合比下水工混凝土在(-25、-30)℃ ~ 8℃ 的试件中心温度下冻融 300 次以后质量损失率变化趋势与 -20℃ 相似,不同冻融温度下经过 300 次冻融循环以后的质量损失率见图 2。由图 2 可以看出,在 -25、-30℃ 下质量损失率仍然为:DC1 > DC2 > DC3 > SC1 > SC2 > SC3 > SC4 > OP。但是可以明显地看出,随着试件中心冻融温度的降低,混凝土的质量损失率增大,-30℃ 温度下,水工混凝土经过冻融循环以后质量损失率最大值达到 10.3%。

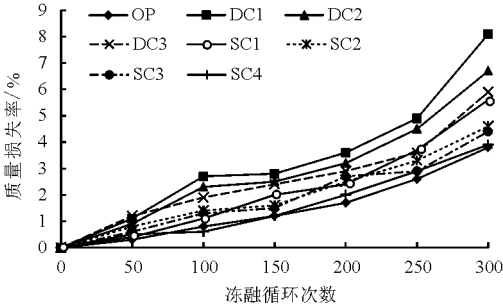


图 1 混凝土在 -20℃ ~ 8℃ 的试件中心温度下冻融 300 次过程中质量损失率变化

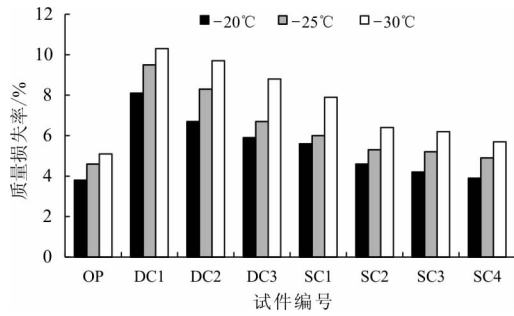


图2 不同冻融温度下经过300次冻融循环以后混凝土质量损失率

3.2 相对动弹性模量分析

各配合比下水工混凝土在 $-20\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的试件中心温度下冻融300次以后相对动弹性模量变化见图3。由图3可以看出,混凝土相对动弹性模量随着循环次数的增加而减小。经50次冻融循环后,各组混凝土试件的相对动弹性模量下降速率较小。50~300次冻融循环过程中,混凝土相对动弹性模量下降较为明显,OP试件组相对动弹性模量下降速率较快。混凝土试件的相对动弹性模量随冻融循环次数的整体变化趋势表明:冻融循环刚开始时降低速率较慢,原因是冻融初期原有的混凝土缺陷在冻融循环作用下没有大的扩展,也没有导致新的缺陷产生,所以相对动弹性模量下降较慢;随着冻融循环次数的增加,混凝土孔隙的冻胀作用增强,损伤加剧^[11]。

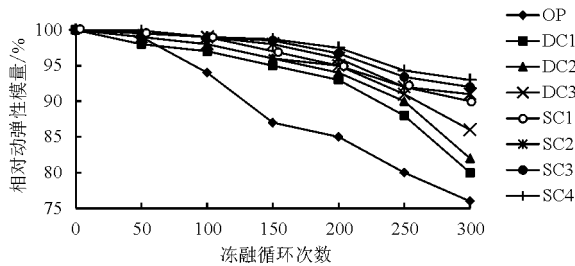


图3 混凝土在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的试件中心温度下冻融300次过程中相对动弹性模量变化

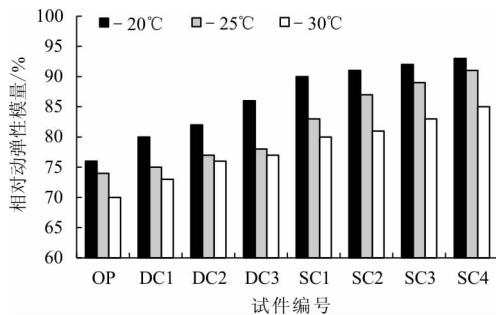


图4 不同冻融温度下经过300次冻融循环后混凝土相对动弹性模量

从图3中可以看出,混凝土剩余相对动弹性模量为: $\text{SC4} > \text{SC3} > \text{SC1} > \text{DC3} > \text{SC2} > \text{DC2} > \text{DC1} > \text{OP}$,当冻融温度为 -20°C 时,相应的混凝土剩余相对动弹性模量为93%、92%、91.5%、90%、86%、82%、80%、77%。由此可以看出,水工混凝土经过冻融循环以后,单掺、双掺以及三掺矿物掺合料的试件组剩余相对动弹性模量均大于参照组(OP),且SC4试件组中剩余相对动弹性模量最大。混凝土的相对动弹性模量的变化是由于内部密实度变化等所引起的,其主要因素取决于混凝土内部结构经过冻融循环破坏以后微裂纹的数量,由于FA、SL、RH等矿物掺合料会增加混凝土的密实性,因此会减少混凝土的孔径并阻碍孔隙的连通,从而提高了混凝土的密实性,减少冻融过程中水分的入侵量,从而减小了由于冰冻引气的冻胀破坏。

不同冻融温度下经过300次冻融循环以后的相对动弹性模量见图4。由图4可看出,各配合比下水工混凝土在 $(-25、-30)^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的试件中心温度下冻融300次以后相对动弹性模量变化趋势与 -20°C 相似。在 -25°C 、 -30°C 下混凝土相对动弹性模量仍然为: $\text{SC4} > \text{SC3} > \text{SC1} > \text{DC3} > \text{SC2} > \text{DC2} > \text{DC1} > \text{OP}$ 。分析表明混凝土的冻融温度与其相对动弹性模量呈现正相关,且 -30°C 温度下水工混凝土经过冻融循环以后相对动弹性模量最小值达到70.1%。

3.3 力学性能分析

在不同冻融温度下水工混凝土经过300次冻融循环前后抗压强度见表3。

表3 不同冻融温度下冻融前后混凝土抗压强度

编号	抗压强度/MPa			
	初始	-20°C	-25°C	-30°C
OP	35.5	28.0	26.3	23.1
DC1	28.2	22.9	22.0	19.5
DC2	31.4	25.7	26.1	22.9
DC3	30.8	26.2	24.3	23.4
SC1	31.6	27.5	26.9	25.3
SC2	32.5	29.0	28.0	26.7
SC3	33.7	30.3	30.0	28.0
SC4	34.1	31.4	30.7	29.0

根据表3可得,初始混凝土抗压强度为: $\text{OP} > \text{SC4} > \text{SC3} > \text{SC2} > \text{SC1} > \text{DC3} > \text{DC2} > \text{DC1}$ 。可以看出单掺、双掺以及三掺矿物掺合料的试件组抗压强度均小于参照组(OP),主要是由于不同矿物掺合料的

水化时间不同所导致的。经过 300 次冻融循环后,在不同冻融温度下混凝土试件剩余抗压强度见图 5。从图 5 中可以看出,在冻融温度为 20℃ 下混凝土剩余抗压强度为:SC4 > SC3 > SC1 > DC3 > SC2 > DC2 > DC1 > OP,相应的水工混凝土剩余抗压强度为 92.5%、90%、89.2%、87%、85.1%、82%、81.3%、78.9%,各配合比下水工混凝土在 -25、-30℃ 的试件中心温度下冻融 300 次以后抗压强度变化趋势与 -20℃ 相似,由此可以说明,单掺、双掺以及三掺矿物掺合料均可以提高混凝土的抗冻耐久性。

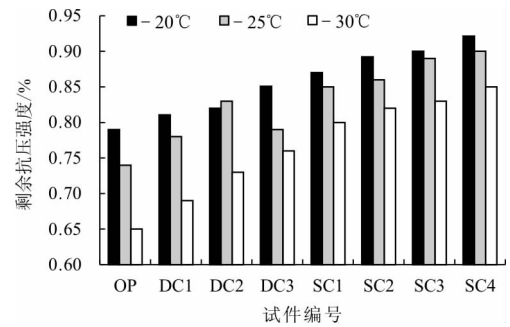


图 5 不同冻融温度下经过 300 次冻融循环以后剩余抗压强度

3.4 气体渗透性分析

混凝土的气体渗透性一定程度上影响混凝土结构的耐久性,表 4 给出了混凝土在不同冻融温度下气体渗透性系数测试结果。

从表 4 可以看出,在冻融循环之前,与对照组 OP 组相比,掺加矿物掺合料试件组气体渗透性系数均小于 OP 组试件,且 SC4 组试件气体渗透性系数最小。经过冻融循环以后,各组水工混凝土的气体渗透性均出现了不同程度的增长。不同冻融温度下经过 300 次冻融循环后气体渗透系数增长率见图 6。

表 4 冻融前后不同冻融温度下混凝土气体渗透系数

编号	气体渗透系数/ $\ln(\text{mbar} \cdot \text{min}^{-1})$			
	初始	-20℃	-25℃	-30℃
OP	0.96	1.45	1.49	1.55
DC1	0.92	1.36	1.36	1.45
DC2	0.87	1.22	1.31	1.38
DC3	0.85	1.19	1.27	1.34
SC1	0.75	1.04	1.11	1.17
SC2	0.72	0.99	1.05	1.11
SC3	0.67	0.92	0.97	1.02
SC4	0.58	0.79	0.83	0.88

根据图 6 可知,在冻融温度为 20℃ 下混凝土气

体渗透性系数增长为:OP > DC1 > DC2 > DC3 > SC1 > SC2 > SC3 > SC4,相应的增长率为 51%、47.8%、40.2%、40%、38.7%、37.5%、37.3%、36.2%。可以看出,三掺矿物掺合料的试件组 SC4 气体渗透性系数增长最小,表明混凝土在冻融循环作用下内部密实程度损伤最小。本试验得到的掺加矿物掺合料混凝土气体渗透性系数变化规律与文献[15]的研究结果基本一致,但混凝土的损伤程度有一定的差异,分析原因是本次试验不仅考虑矿物掺合料单掺,同时考虑双掺与三掺矿物掺合料下的配合比所引起的。

从图 6 可以看出,随试件中心冻融温度的降低,未掺加矿物掺合料试件、单掺、双掺以及三掺矿物掺合料的试件组的气体渗透性系数均增大,水工混凝土的抗气体渗透性变差。

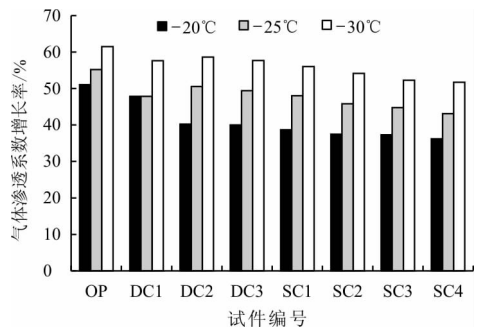


图 6 不同冻融温度下经过 300 次冻融循环以后气体渗透系数增长率

4 矿物掺合料与冻融温度对混凝土抗冻性的影响机理分析

4.1 矿物掺合料的影响

根据相对动弹性模量、抗压强度及气体渗透性分析可知,水工混凝土抗冻性依次为:SC4 > SC3 > SC1 > DC3 > SC2 > DC2 > DC1 > OP,可知矿物掺合料三掺情况下抗冻性最优。分析原因:不同矿物掺合料复掺以后,由于矿物掺合料的火山灰效应、界面耦合效应、微集料复合效应^[12],当矿物掺合料掺量较低(小于 30%)时,水泥是影响混凝土内部孔隙结构的主要因素;FA、SL、RH 的自愈合能力有效地填充了水泥水化留下的孔隙及微裂缝,会导致混凝土内部的小孔与中孔的数量增多,大孔的数量减少,孔结构的总体积有所减少。

由于混凝土内部的无害孔隙(小孔与中孔)增多,有害孔隙(大孔)减少,因此会增强复掺矿物掺合料混凝土的抗冻性能。另一方面,由于 3 种矿物掺合料 FA、SL、RH 的粒径不同,FA 粒径最大,RH 粒径居

中,RH 粒径最小。当各种混凝土矿物掺合料粒径及水化时间有所不同时,会相互填充影响,从而产生超叠加效应。以混凝土相对动弹性模量为耐久性评价指标,FA、SL、RH 三掺情况下混凝土的超叠加效应的大小为 1.15。在 20℃ 冻融温度下混凝土经过 300 次冻融循环以后内部结构电镜扫描图见图 7。从图 7(a)可以看出,未掺加矿物掺合料的试件组 OP 内部出现明显裂缝,裂缝贯穿在两个较大孔隙之间贯穿。

单掺粉煤灰的试件组 DC1 也可以观察到一条裂缝,但是并没有出现贯穿裂缝(图 7(b))。双掺试件组 SC1 内部的裂缝宽度较小,且可以观察到未水化完全的矿物掺合料(图 7(c))。三掺试件组 SC4 的表面完整度较好,只观察到较小的细微裂缝(图 7(d))。微观测试结果与宏观测试结果相呼应,表明单掺、双掺以及三掺矿物掺合料均可以提高水工混凝土的抗冻融循环性能。

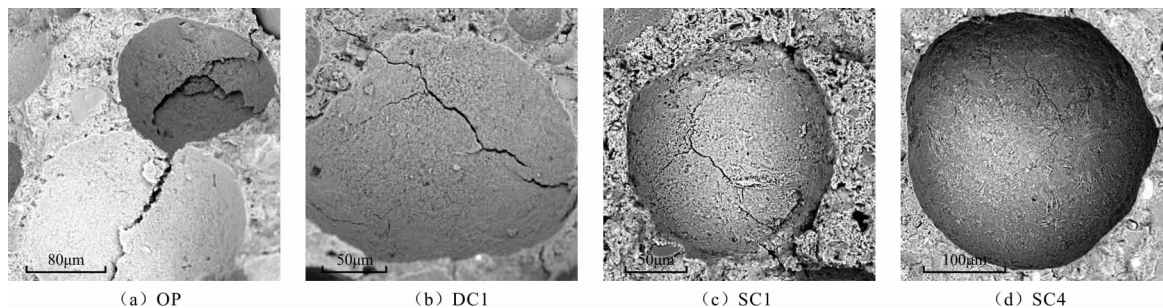


图 7 混凝土在 -20℃ ~ 8℃ 的试件中心温度下冻融 300 以后各组试件内部结构电镜扫描图

4.2 试件中心温度的影响

如上文所述,混凝土的冻融循环劣化宏观表现为表面脱落、开裂与膨胀。而混凝土的内部损伤可以用动弹性模量、抗压强度以及渗透性来表征。冻融的过程可以分为降温阶段与升温阶段。这两个阶段,由于温度的梯度、化学能差等原因,混凝土孔隙中的水分发生迁移,膨胀所造成内部结构发生破坏。随着冻融循环过程中试件中心的温度降低,会导致混凝土内部的温度梯度变大,外部的环境水与内部的孔隙水溶液温度交换迅速,结冰孔增多,因此导致孔隙内部的膨胀压力增大,冻融破坏明显。

5 结 论

高寒区水工混凝土在服役期一般会受到冻融循环的作用。本文通过在模拟高寒环境中调整水工混凝土在冻融循环过程中试件中心的温度,研究了单掺、双掺及三掺矿物掺合料水工混凝土抗冻融循环性能的劣化机理,主要结论如下:

(1) 在冻融循环作用下,单掺、双掺及三掺矿物掺合料混凝土的抗冻性均大于未掺加矿物掺合料混凝土。矿物掺合料能减少水工混凝土的孔隙率及渗透性,且粉煤灰、硅灰、稻壳灰的颗粒粒径不同会相互填充,从而产生超叠加效应。

(2) 试验结果表明各掺合料混凝土的抗冻性从劣到优依次是:SC4 > SC3 > SC1 > DC3 > SC2 > DC2 > DC1 > OP。相同单掺条件下,掺加稻壳灰试件组

抗冻性最强,硅灰居中,粉煤灰最弱。复掺矿物掺合料情况下,三掺粉煤灰、硅灰、稻壳灰混凝土抗冻性最强。

(3) 冻融循环过程中冻融温度对水工混凝土质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度、气体渗透性的影响规律相似,均随着冻融循环过程中试件中心温度的降低,水工混凝土的冻融损伤越大,主要是由于混凝土内部的温度梯度变大,孔隙内部的膨胀压力增大导致混凝土内部结构破坏。

参考文献:

- [1] 王志刚,李鑫,刘数华. 紫外线辐射对水工混凝土耐久性影响研究与展望[J]. 水力发电,2013,39(5):46-47+54.
- [2] CWIRZEN A, SZTERMEN P, HABERMEHL - CWIRZEN K. Effect of baltic seawater and binder type on frost durability of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 26(2):283-287.
- [3] 徐帆,贺新星,王瑞骏,等. 紫外线与冻融循环作用下的混凝土耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):188-193.
- [4] CORINALDESI V, MORICONI G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8):2869-2876.
- [5] 杨益,宁翠萍,程瑞芳,等. 掺钢和玄武岩纤维混凝土的冻融循环试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):182-186+192.
- [6] ŞAHMARAN M, ÖZBAY E, YÜCEL H E, et al. Frost re-

- sistance and microstructure of engineered cementitious composites; Influence of fly ash and micro poly - vinyl - alcohol fiber[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34: 156 - 165.
- [7] YAZICI H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22:456 - 462.
- [8] 李 阳,王瑞骏,闫 菲,等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):219 - 226.
- [9] 姚 军,程 宁. 基于复掺矿物掺合料的高性能混凝土耐久性研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,33(8):44 - 47.
- [10] 何智海,刘运华,钱春香,等. 双掺粉煤灰和石灰石粉对混凝土抗冻融性能的影响研究[J]. 新型建筑材料,2010(2):1 - 4.
- [11] 张小龙,曾馨花,张会苹,等. 复掺矿物掺合料混凝土性能试验研究[J]. 铁道建筑,2015(9):121 - 124.
- [12] 李 琛. 复掺矿物掺合料混合骨料混凝土微观抗冻性研究[J]. 商品混凝土,2013(10):63 - 64.
- [13] 霍俊芳,李伟玲,杨 慧,等. 矿物掺合料对混合骨料混凝土抗冻性能的影响[J]. 混凝土,2013(9):63 - 65.
- [14] 陆建飞. 大掺量粉煤灰混凝土冻融循环作用下的力学性能研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2011.
- [15] 胡晓鹏,杨 兰,杨 超,等. 早期受冻掺合料混凝土服役性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(5):93 - 99.

(上接第190页)

- [11] 郑水明,周宝峰,温瑞智,等. 强振动加速度记录基线校正问题探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(3):47 - 50.
- [12] 邓天鑫,巨能攀,李龙起,等. 陡倾顺层岩质斜坡动力倾倒变形机理研究[J]. 水利水电技术,2017,48(12):146 - 152.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non - stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903 - 995.
- [14] 王 济. Matlab 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006. 105 - 108.
- [15] 姚艳华,彭 刚,陈灯红. 拟合水工设计反应谱的人工地震波的生成与 Huang 变换校正[J]. 西北地震学报,2008,30(3):255 - 260.
- [16] 田玉基,杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. 工程力学,2005,22(5):170 - 174.
- [17] 陈 驰,杨 迪. ANSYS 在航空发动机控制器结构应力分析时大质量法应用的研究[C]//中国航空学会,中国航空学会第十三届发动机自动控制学术交流会,北京:北京航空航天大学出版社,2006:255 - 264.