

冻融循环下导电混凝土压阻效应的稳定性研究

陈仟春, 孔祥东, 陈建康*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 以碳纤维、石墨为导电相材料, 掺入粉煤灰和硅灰制备导电混凝土, 研究了粉煤灰、硅灰的掺量对导电混凝土抗冻融性能的影响, 定义了压阻效应稳定性的指标, 探究了压阻效应稳定性随冻融循环的变化规律, 建立了导电混凝土在冻融循环下的电阻率演化模型和压阻效应稳定性模型. 研究表明: 在导电混凝土中加入粉煤灰、硅灰可有效提高其抗冻融能力; 当粉煤灰、硅灰总掺量相同时, 较高掺量的粉煤灰可以提升导电混凝土压阻效应的稳定性.

关键词: 导电混凝土; 冻融循环; 电阻率; 压阻效应

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 05-0054-10

在混凝土中加入石墨、碳纤维等导电掺合料能有效提升混凝土的导电性能^[1-2], 而导电混凝土的压阻效应是由于施加的应力改变了其电阻率的现象. 基于此, 导电混凝土可用于制备传感器^[3-4]埋入建筑物中监测结构变形和损伤, 也可铺设路面融化冰雪^[5-7]. 导电混凝土无论是用于建筑物的健康监测还是用于道路的融雪化冰, 都要求其同时具备高耐久性和压阻效应的稳定性^[8-11].

有关导电混凝土压阻效应稳定性的研究, 已有一些学者开展了相关工作. 比如 Liu 等^[12]利用涂有碳纳米管的废碎玻璃作为导电填料, 开发了新型自感应水泥基传感器, 通过提高废玻璃含量, 来增强水环境中导电性和压阻率的稳定性. 此外, Frqc 等^[13]发现当膨胀石墨含量为水泥总质量的 5% 时, 导电混凝土的压阻效应最为明显, 并且在循环荷载下的压阻效应是稳定的.

在冻融循环条件下, 导电混凝土性能的研究也取得了一定进展. 混凝土的冻融劣化从微观上看, 实际上是水在微孔中冻结和移动导致微孔破裂的过程^[14]. 侯作富等^[15]将碳纤维导电混凝土经过连续 15 次的冻融循环, 发现其电阻并没有很大的变化, 说明短时间的冻融循环对导电混凝土的影响并不是很大. Wang 等^[16]将压阻性能随冻融循

环的演变归因于冻融损伤、离子传导和电极化, 提出了导电混凝土压阻性能演化的机理. Xiao^[17]基于三参数 Weibull 分布模型, 得出了典型损伤量下冻融循环次数的分布参数及其相应保证率下的冻融次数, 给出了冻融环境下普通混凝土损伤量与冻融循环次数的概率关系曲线.

在导电混凝土中加入各种掺合料能提升导电混凝土的性能. 比如 Ma 等^[18]和董波^[19]研究了粉煤灰掺量对混凝土抗冻融性能的影响; Tripathi 等^[20]讨论了冻融循环条件下硅灰掺量对于减缓混凝土材料损伤的作用.

总结前人的研究结果, 尽管取得了一定的冻融循环条件下导电混凝土材料与性能的研究进展, 但是在导电混凝土电学和力学性能的优化设计研究工作还远远不够, 甚至还没有一个定量的指标来表征导电混凝土压阻效应的稳定性.

本文开展了导电混凝土材料的优化设计研究, 设计了 4 种不同粉煤灰、硅灰配合比的导电混凝土, 分别进行 0 次、100 次、200 次、300 次冻融循环, 并对冻融后的导电混凝土进行抗压强度、静态电阻率、压阻效应的测试, 定义了表征压阻效应稳定性的无量纲指标. 以此为基础, 建立了导电混凝土在冻融循环下的静态电阻率演化模型和电阻率稳定

收稿日期: 2022-03-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11772164, 11832013).

第一作者: 陈仟春(1996-), 男, 江苏扬州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土智能骨料. E-mail: 1091964108@qq.com

*通信作者: 陈建康(1957-), 男, 江苏宿迁人, 教授, 主要研究方向: 混凝土腐蚀损伤力学. E-mail: chenjiankang1957@163.com

性演化模型.

1 实验

在混凝土中添加粉煤灰和硅灰可减少混凝土的孔隙率, 提升混凝土的力学性能. 在导电混凝土中, 由于孔隙的减少, 压阻稳定性也应有一定的提升. 在考虑了粉煤灰和硅灰的 4 种不同配合比后, 从中优选出导电混凝土较优的力学-电学性能配合比方案. 设置冻融循环环境最低温度为-40~-35 ℃, 最高温度为室温, 实验温度设置涵盖我国大部分北方地区的冬季最低温度. 参考文献[21], 并同时考虑到材料优化后性能的提高, 本文确定最高冻融循环次数为 300 次.

1.1 实验材料

实验中所用材料: 42.5R 普通硅酸盐水泥、长度为 3 mm 的无胶短切碳纤维、石墨粉(纯度 99%)、粉煤灰、硅灰、消泡剂(磷酸三丁酯)、高效减水剂

表 1 水泥基本物理力学性能

项目	数值
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	0.385
三氧化硫/%	2.35
氧化镁/%	3.83
烧失量/%	2.62
氯离子/%	0.04
3 天抗折强度/MPa	5.2
3 天抗压强度/MPa	22.2

表 2 短切碳纤维参数

项目	数值
单丝直径/μm	385
拉伸强度/μm	3 500
拉伸模量/GPa	228
含碳量/%	≥95
伸长量/%	1.5
密度/(g·cm ⁻³)	1.75
体积电阻率/(Ω·cm)	1.5×10 ⁻³

表 3 石墨参数

项目	数值
碳含量/%	> 99
密度/(g·cm ⁻³)	1.6~2.2
灼烧残渣/%	0.24
干燥失重/%	0.5

(聚羧酸)、分散剂(甲基纤维素), 相应详细的参数见表 1~表 5.

表 4 粉煤灰参数 %

项目	数值
细度*	≤12
需水量比	≤95
烧失量	≤5
含水量	≤1
氧化硫	≤3

注: “*” 表示为 0.045 mm 方孔筛余.

表 5 硅灰化学成分 %

项目	数值
SiO ₂	75~98
Al ₂ O ₃	1.0±0.2
Fe ₂ O ₃	0.9±0.3
MgO	0.7±0.1
CaO	0.3±0.1
Na ₂ O	1.3±0.2

1.2 实验方法

1.2.1 试样制备

冻融循环处理的导电混凝土根据粉煤灰和硅灰掺量的不同共设置 4 种配合比(表 6). 设置 4 种周期的冻融循环, 分别为 0 次、100 次、200 次、300 次, 为减少实验误差, 每个配合比、不同冻融循环次数的试样数为 3 个, 总试样数为 48 个. 在制备完试样后, 将该试样放入标准养护箱中养护 28 d; 在将试样进行冻融处理前, 先用清水浸泡 24 h, 使试样内部充分浸湿. 将浸湿的试样放入分体式酒精冻融循环机, 设置 2 个 T₁ 和 T₂ 温度传感器, 其中 T₁ 放在酒精溶液中, T₂ 在试样的内部(在备用试样上钻孔, 用以插入温度传感器探头). 通过实验统计, 1 个冻融循环的时间约为 300 min, 其中降温时间约 175 min, 升温时间约 125 min. 试样中心温

表 6 导电混凝土配合比

组别	石墨(w)	碳纤维(w)	粉煤灰(w)	硅灰(w)	水灰比
A	10	2	0	0	0.4
B	10	2	10	15	0.4
C	10	2	15	10	0.4
D	10	2	20	5	0.4

注: 除水灰比以外, 石墨、碳纤维、粉煤灰、硅灰均为该掺合料质量占水泥质量的百分比.

度最高 5℃, 最低-20℃, 符合国标(GB/T 50082-2009)的要求。在达到规定的冻融循环次数后, 将所有试样取出, 放在室内自然干燥 15 d, 使其充分干燥, 然后再进行后续测试。

1.2.2 静态电阻率测试

待导电混凝土试样干燥后, 用静态电阻测量仪测试其在自然状态下的电阻, 导电混凝土电阻率 ρ 可以表示为:

$$\rho = \frac{R \times S}{d}, \quad (1)$$

式中: ρ 为试样的电阻率; R 为两电极之间的电阻; d 为两电极之间的距离; S 为试样的截面积。

1.2.3 动态电阻率测试

动态电阻率采用间接法测得。具体测量方法如下: 使用串联方法将恒压电源、电阻箱和导电混凝土试样连接成回路, 再将动态信号测试仪并联到固定电阻两端, 用来收集固定电阻两端的电压。开始对试样施压时, 试样电阻会发生改变, 固定电阻两端的电压也会随着发生改变。通过欧姆定律可得:

$$R = R_1 \times \frac{U_0 - U_1}{U_1}, \quad (2)$$

式中: R 为导电混凝土试样的电阻; R_1 为电阻箱电阻; U_0 为电源电压; U_1 为电阻箱两端电压。

将式(2)代入式(1), 可以得到试样的动态电阻率:

$$\rho = \frac{R \times S}{d} = R_1 \times \frac{U_0 - U_1}{U_1} \times \frac{S}{d}. \quad (3)$$

1.2.4 抗压强度测试

将干燥的导电混凝土试样放在微机控制电液伺服万能试验机上, 将试样中心与加载夹具中心对齐, 保证轴心施压。将恒压电源(电压设置为 10 V)、电阻箱、动态信号测试仪、测量试样接通至同一电路。此电路用以测量导电混凝土压缩至破坏时电阻率的变化, 当导电混凝土应力出现陡然下降时, 可判定为试样破坏, 即刻停止加载, 同时停止电信号的采集。相应测试如图 1 所示。

2 实验结果

2.1 导电混凝土在不同冻融循环周期下的外表变化

混凝土在冻结过程中, 孔隙中的水结冰, 体积



图 1 导电混凝土强度测试图

增大, 会在混凝土内部形成膨胀力, 逐渐撑大孔隙, 形成裂纹。在一次次的冻融循环过程中, 孔隙持续扩大, 裂纹持续扩展, 使得导电混凝土受冻融循环而破坏。尽管在导电混凝土中掺入碳纤维可以在一定程度上提升抗拉强度, 但是依然避免不了冻融损伤的影响。图 2 展示了导电混凝土冻融循环 300 次的损伤情况。由此可见, 随着冻融循环次数的增加, 导电混凝土试样逐渐出现损伤, 表面碳纤维的析出越来越严重。此外, 还能观察到因为在 B、C、D 组导电混凝土中掺加了粉煤灰和硅灰, 孔隙率降低, 其损伤情况没有 A 组严重, 并发现 4 组试样中, D 组试样损伤最小。

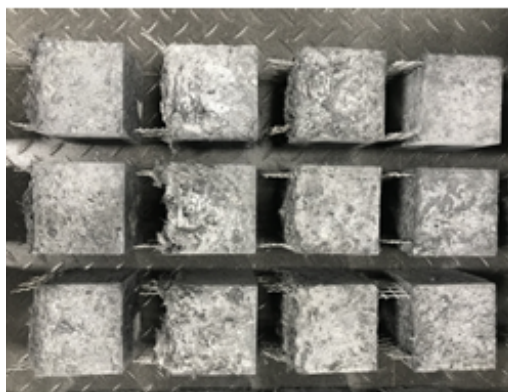
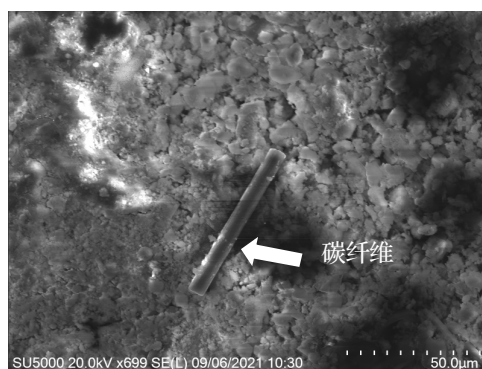


图 2 冻融循环 300 次后试样

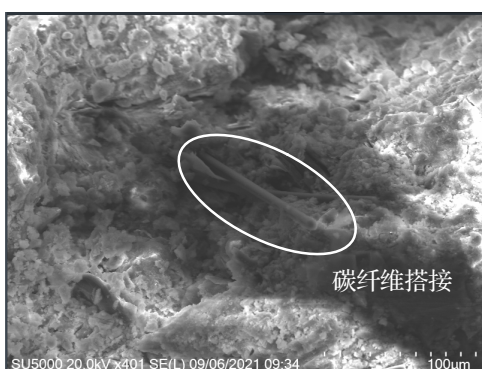
图 2 冻融循环 300 次后试样

2.2 导电混凝土 SEM 测试

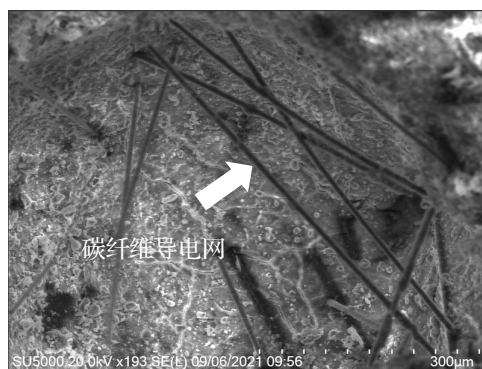
对于导电混凝土的导电机理以及其受冻融损伤的原因可以通过 SEM 观察导电混凝土的微观形貌来解释。图 3(a)为导电混凝土中碳纤维的微观形貌图。在导电混凝土中加入碳纤维会使其电阻率降低, 增加混凝土的导电性。其原因是短切碳纤维之间的搭接(图 3(b))使得原本不连通的区域连通,



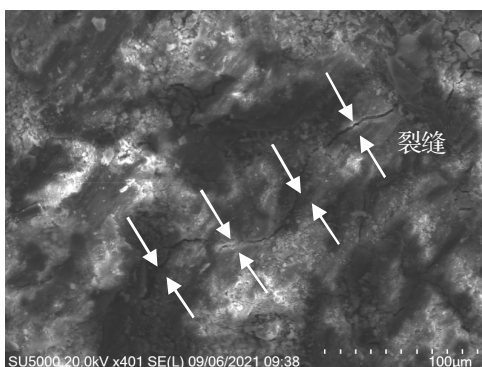
(a) 观形貌图



(b) 碳纤维搭接图



(c) 碳纤维导电网图



(d) 冻融 100 次后裂纹微观图

图3 导电混凝土 SEM 测试图

形成导电通路, 在有些孔隙较多的地方甚至形成导电网(图 3(c)). 在经过冻融循环后, 孔隙中的水、盐等结晶膨胀, 使混凝土内部产生微裂缝, 影响混凝土的强度以及电阻率(图 3(d)), 造成导电混凝土发生损伤破坏.

2.3 导电混凝土在不同冻融循环周期下抗压强度弱化

将试验测得的抗压强度数据绘制于图 4. 从图中可见, 掺加了粉煤灰和硅灰的 B、C、D 组导电混凝土的抗压强度有明显提升, 其中 D 组试样的抗压强度最高. 随着冻融循环次数的增加, 4 组导电混凝土试样的强度均不断弱化, 说明冻融循环对导电混凝土的性能弱化有很大影响, 同时也说明可以通过合理的材料设计能使导电混凝土的抗压强度得到提升, 增加其受压稳定性.

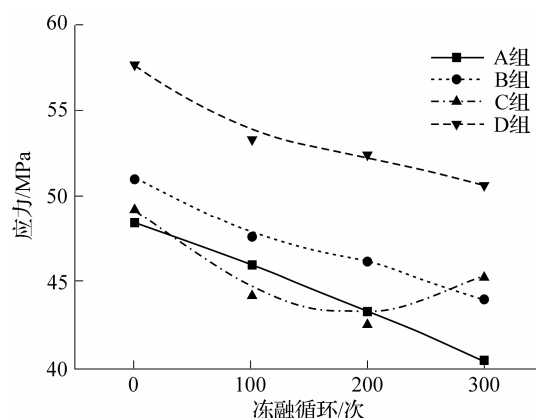


图4 导电混凝土抗压强度随冻融循环演化规律

由于各组导电混凝土的初始强度不同, 为了更加直观地表现导电混凝土在冻融循环下强度的弱化程度, 定义残余强度百分比 D :

$$D = \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: σ_i 为冻融处理后试样的抗压强度; σ_0 为试样初始抗压强度.

指标 D 能准确地描述导电混凝土强度受冻融循环影响的大小. 图 5 是 4 种不同配方导电混凝土残余强度百分比随冻融循环次数的变化图线; 图 6 描述的是当冻融循环进行到 300 次时, 4 种导电混凝土残余强度百分比图. 可以看出, 随着冻融循环的进行, 未掺粉煤灰和硅灰的 A 组导电混凝土试样损伤最为严重, D 组试样损伤较小. 当冻融循环进行到 300 次, 导电混凝土强度的损伤程度从 A 组

到D组呈阶梯式下降.由此可见,通过在导电混凝土中加入粉煤灰、硅灰等掺合料可以有效提高其抗冻融能力,不仅可以提高导电混凝土结构强度,也能够提升其使用寿命.因为掺合料的加入可使导电混凝土内部更加密实,减少孔隙率,减少了含水量.当导电混凝土冻结时,内部水分结冰产生的内膨胀力就会减小.同时,实验发现当粉煤灰和硅灰复掺的总量一定时,较多的粉煤灰能够更加有效地减小导电混凝土孔隙率,提升抗压强度和抗冻融能力.其中,C组冻融循环300次的试样残余强度突然上升,属于样本数据偏少的系统误差,需要更多的样本数据来减小误差.

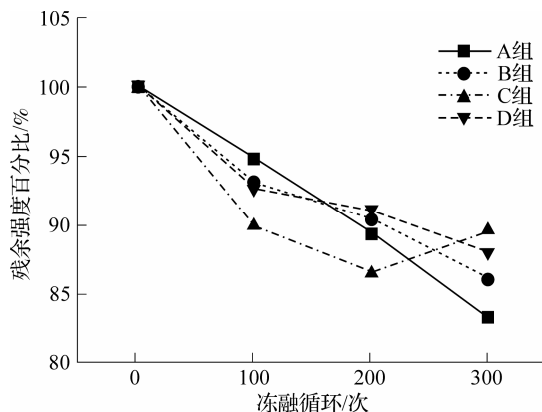


图5 冻融循环300次残余强度百分比

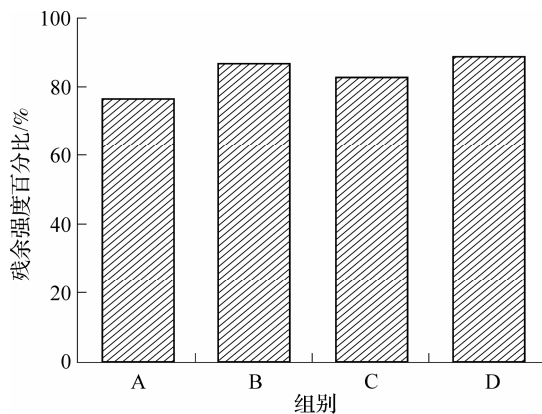


图6 残余强度百分比曲线

2.4 导电混凝土在冻融循环下的静态电阻率变化规律

每100次冻融循环后,将冻融循环试验箱内的试样进行静态电阻率的测量,电阻率随冻融循环次数的变化如图7所示.从图中可以看出,在冻融循环初期,导电混凝土电阻率随着循环次数而增大.这是因为在冻融循环初期,孔隙中的水、盐等

结晶膨胀,使混凝土内部产生微裂缝,从而增加了导电介质之间的距离,导致电阻率增大.D组导电混凝土试样在冻融300次后,电阻率依然很小,相对于初始电阻率并没有很大的变化,说明其冻融损伤程度较小,冻融循环后电阻率稳定性高.

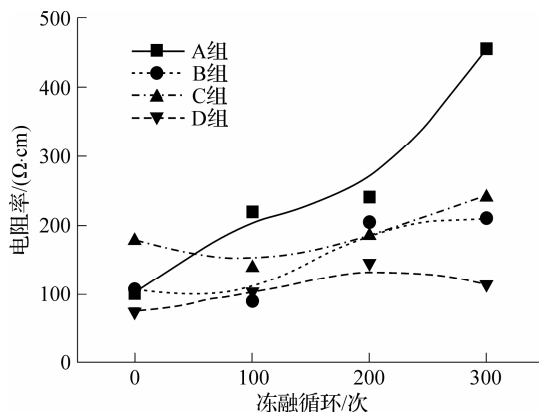


图7 导电混凝土静态电阻率随冻融循环变化图

2.5 导电混凝土压阻效应随冻融循环的变化规律

导电混凝土冻融循环0~300次的静压测试结果如图8~11所示,数据图像采用双Y轴绘制,左边Y轴是抗压强度,右边Y轴是试样的电阻率.D组300次冻融循环由于仪器未采集,缺失一个电阻率的数据.从图中可见,随着冻融循环次数的增加,其电阻率更易受到外部荷载的影响(即压阻效应更明显),其中未掺加粉煤灰和硅灰的A组导电混凝土的压阻效应显然更易受到冻融损伤的影响.

3 理论模型

3.1 静态电阻率演化模型

对于碳纤维混凝土来说,基体是混凝土,碳纤维是导电夹杂,碳纤维的掺入可以使导电混凝土的电阻率降低,具备导电性,导电机理以隧道效应为主.因此,碳纤维混凝土的电阻率与碳纤维之间的距离有关.经过冻融循环后,孔隙中的水、盐结晶产生内膨胀力,导电混凝土内部产生微裂缝,增加了碳纤维之间的距离,导致电阻率增加.假设在冻融循环作用下,碳纤维之间的距离从 s_0 增加到 s 时,导电混凝土的电阻从 R_0 增加到 R ,则其电阻率 ρ 可以表示为:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{R_0} = \frac{s}{s_0} \times \exp(\gamma(s - s_0)), \quad (5)$$

式中: ρ_0 为初始电阻率.

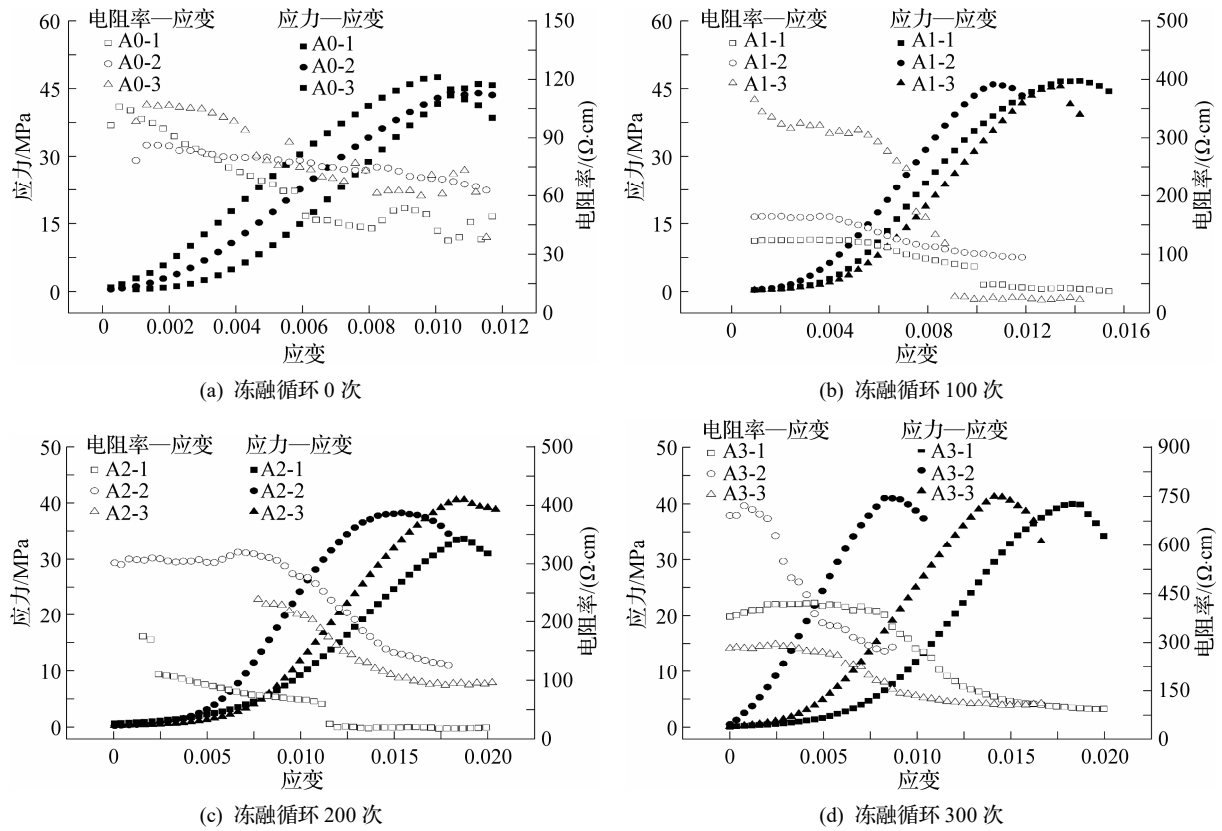


图 8 A 组导电混凝土静压测试结果

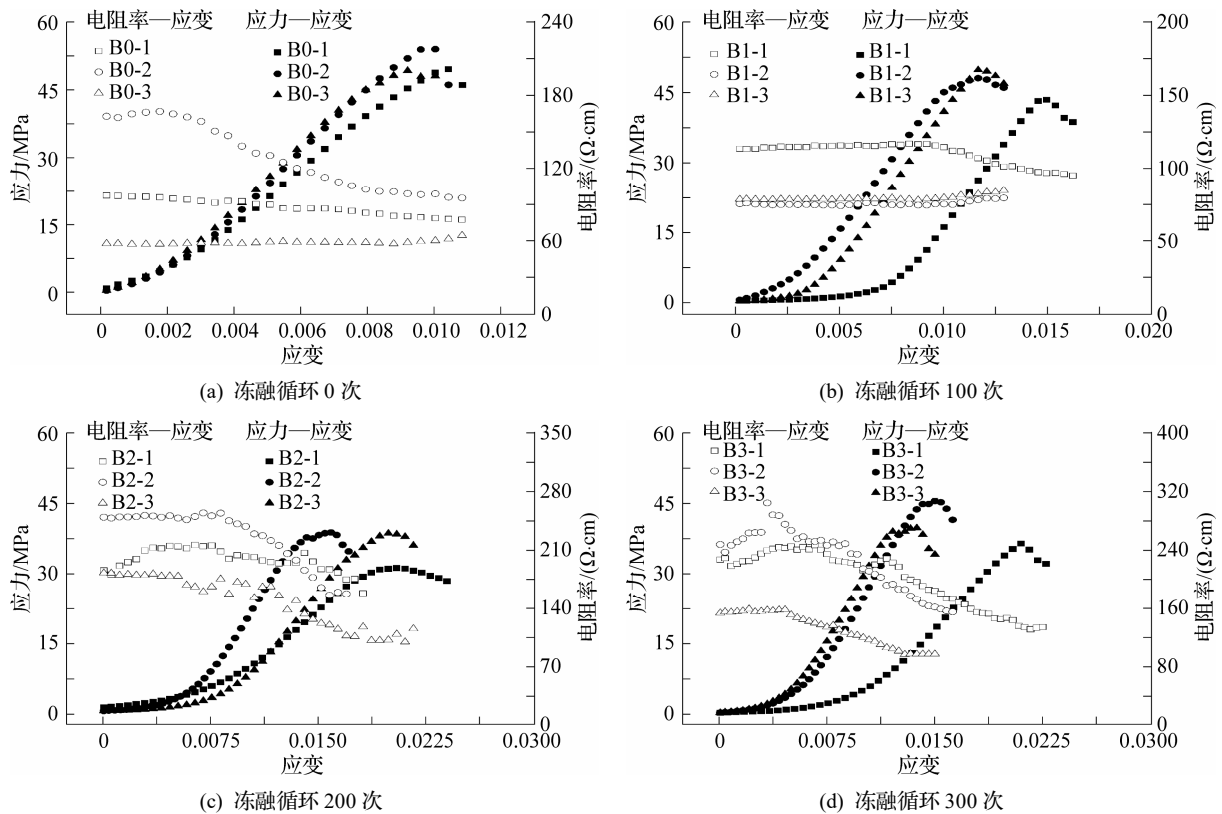


图 9 B 组导电混凝土静压测试结果

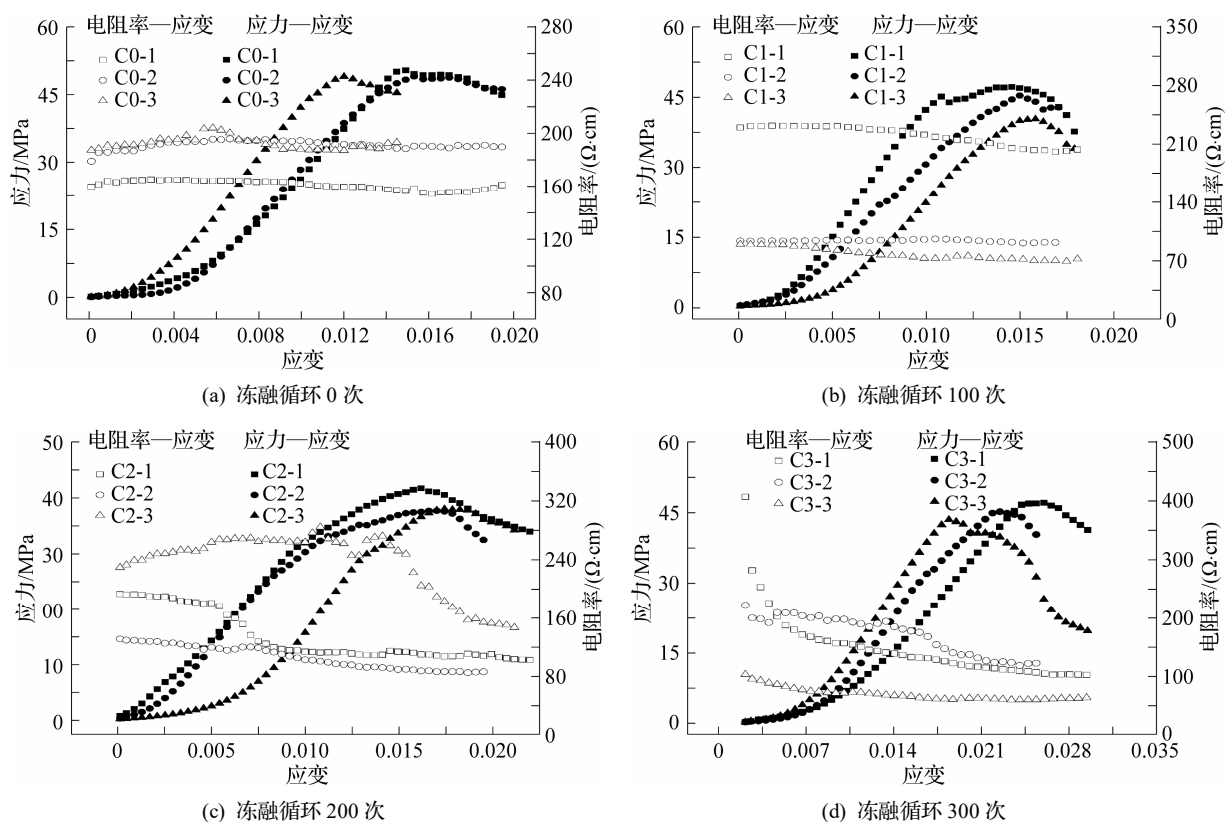


图 10 C 组导电混凝土静压测试结果

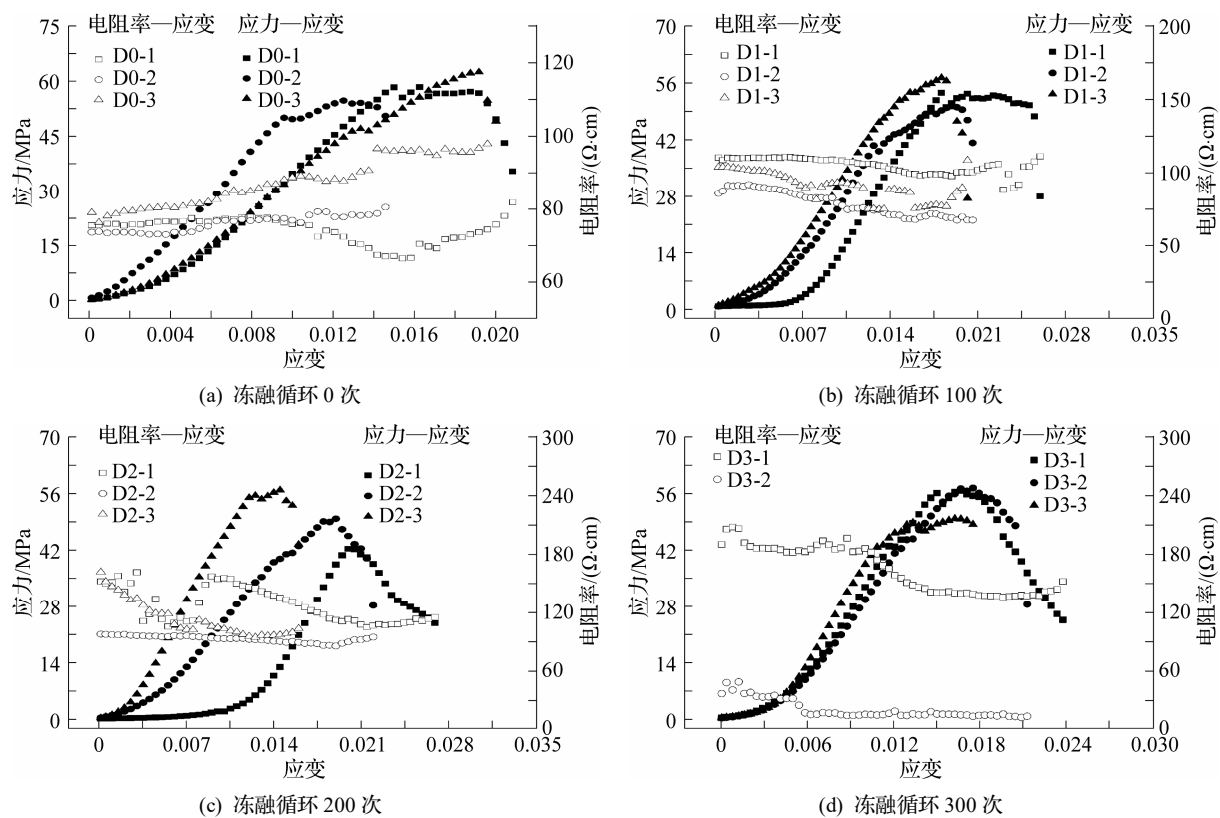


图 11 D 组导电混凝土静压测试结果

$$\gamma = (4\pi/h)\sqrt{2m\varphi},$$

式中: m 为电子质量; h 为普朗克常数; φ 为相邻粒子间的势垒高度.

假设在冻融循环下, 碳纤维间距的增量与冻融循环次数、初始间距成比例, 即:

$$\Delta s = \beta s_0 N \quad (0 < \beta < 1), \quad (6)$$

式中: N 代表冻融循环次数; β 是介于 0~1 的一个系数.

因此, 冻融循环后导电夹杂的间距可表示为:

$$s = s_0 + \Delta s = s_0 + \beta s_0 N = s_0(1 + \beta N). \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)可得:

$$\rho = \rho_0(1 + \beta N)\exp(\gamma s_0 \beta N). \quad (8)$$

令 $\omega = \gamma s_0$,

$$\rho = \rho_0(1 + \beta N)\exp(\omega \beta N), \quad (9)$$

其中, 无量纲量 β 、 ω 均可由实验数据拟合得到. 可见在冻融循环作用下, 导电混凝土试样的静态电阻率能较好地遵循式(9)的变化规律.

定义电阻率增大系数 α :

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (10)$$

将实验得到的导电混凝土冻融循环次数与电阻率增大系数的关系列示于图, 并根据式(9)作出拟合曲线(图 12), 具体拟合参数见表 7.

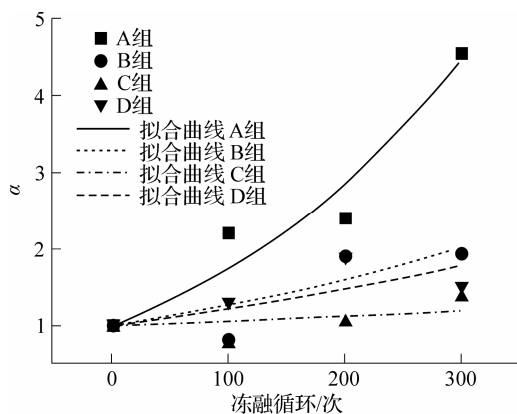


图 12 电阻率归一化后拟合曲线

表 7 式(9)的拟合参数

试样编号	β	ω
A	1.607e-3	2.292
B	8.979e-05	25.42
C	1.869e-05	32.54
D	1.753e-4	10.03

通过上述演化模型可以确定 D 组配方的导电

性能较好, 并可以预测导电混凝土在冻融循环一定次数后的电阻率.

3.2 压阻效应稳定性演化模型

为了更加直观地展现冻融损伤后导电混凝土的压阻效应变化, 引入电阻率变化率 μ :

$$\mu = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: ρ_0 为初始电阻率; ρ_t 为压缩到试样破坏瞬间的电阻率.

整理 4 组导电混凝土在 4 种不同冻融损伤条件下的电阻率变化率数据, 并做出拟合曲线. 从图 13 可以直观地看出, 掺入了粉煤灰和硅灰后, 能有效提高导电混凝土的电阻率稳定性. 到第 300 次冻融循环结束时, D 组的导电混凝土电阻率变化率最小, 说明 20% 水泥质量的粉煤灰、5% 水泥质量的硅灰导电混凝土受压时电阻率更稳定, 即压阻效应的稳定性更好.

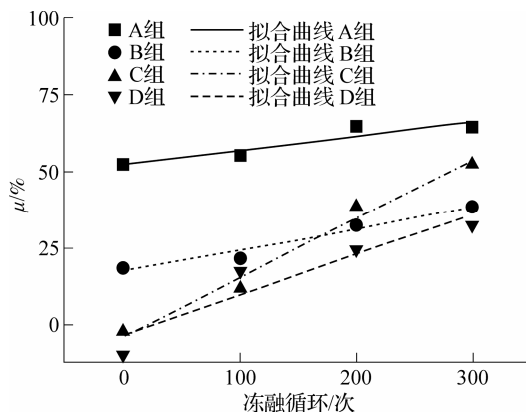


图 13 电阻率变化率拟合曲线

压阻稳定性可以用冻融循环后的电阻率变化率来表征, 如果经过冻融循环后, 电阻率变化率较大, 则表示压阻效应的稳定性就较差. 基于此, 本文定义无量纲参数 η 来表征压阻效应的稳定性:

$$\eta = \frac{1}{\mu_i - \mu_0 + 1}, \quad (12)$$

式中: μ_0 表示未冻融循环试样的电阻率变化率; μ_i 表示冻融循环 i 次后试样的电阻率变化率.

由式(12)可以看出, 未受冻融循环的导电混凝土的压阻稳定值为 1, 经冻融循环后电阻率变化率越小, η 值越大, 压阻效应的稳定性越好.

假定压阻效应的稳定性 η 随冻融循环次数 N 指数衰减, 即:

$$\eta = a \times e^{-bN}, \quad (13)$$

式中: a 和 b 为无量纲待定参数.

图 14 为压阻效应的稳定性演化图, 其中, A 组试样随着冻融循环次数的增加, 与冻融循环 0 次相比, 电阻率变化最小. 相应的拟合参数见表 8.

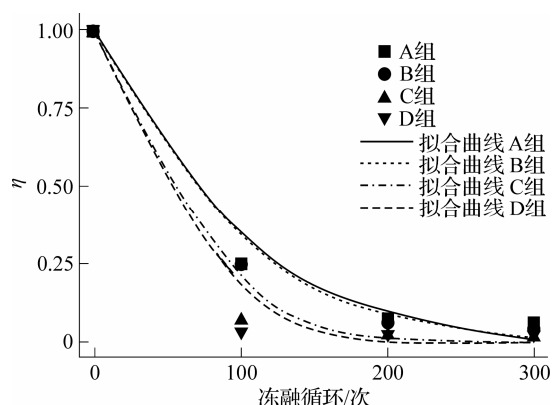


图 14 压阻效应稳定性演化

表 8 压阻效应稳定性演化拟合参数

试样编号	a	b
A	1	0.013 25
B	1	0.013 61
C	1	0.026 70
D	1	0.032 73

4 结论

本文对 4 种配合比的导电混凝土分别进行了不同次数的冻融循环处理, 然后对冻融损伤后的导电混凝土进行包括抗压强度、静态电阻率、压阻效应的测试, 得到以下结果:

(1)在导电混凝土中掺加粉煤灰和硅灰可以提升其抗压强度. 发现掺量为 20%水泥质量的粉煤灰、5%水泥质量的硅灰在 300 次冻融循环后, 抗压强度仅降低 15.5%. 在粉煤灰和硅灰的总掺量一定时, 较高掺量的粉煤灰可以更加有效地提升抗压强度以及压阻效应的稳定性. 并且定义了电阻率增大系数和压阻效应稳定性指标, 发现压阻稳定性与冻融循环次数近似服从指数衰减规律.

(2)揭示导电混凝土在冻融循环下电阻增加的机理. 孔隙中的水、盐等结晶膨胀, 产生冻融损伤, 增加了导电夹杂的势垒, 导致电阻增大.

(3)引入隧道效应理论, 将碳纤维之间的距离与冻融循环次数关联, 建立基于冻融循环次数的

电阻率演化模型, 并根据冻融试验数据对模型进行验证, 结果表明模型理论曲线与试验数据基本吻合, 验证了本文模型的正确性和合理性.

参考文献:

- [1] 秦煜, 唐元鑫, 阮鹏臻, 等. 碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的多尺度研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4278-4289.
- [2] Paudel S R, Yang M, Gao Z. pH level of pore solution in alkali-activated fly-ash geopolymer concrete and its effect on ASR of aggregates with different silicate contents[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 04020257.
- [3] Azhari F, Banthia N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7):866-873.
- [4] Chen M, Gao P W, Geng F, et al. Mechanical and smart properties of carbon fiber and graphite conductive concrete for internal damage monitoring of structure[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142:320-327.
- [5] Tian W C, Liu Y S, Qi B M, et al. Enhanced effect of carbon nanofibers on heating efficiency of conductive cementitious composites under ohmic heating curing[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 117:103904.
- [6] 侯作富, 李卓球, 胡胜良. 导电混凝土导热系数分析的电热有限元法[J]. 实验力学, 2002, 17(4):464-469.
- [7] Bai Y H, Chen W, Chen B, et al. Research on electrically conductive concrete with double-layered stainless steel fibers for pavement deicing[J]. ACI Materials Journal, 2017, 114(6):935-943.
- [8] Hou Z F, Li Z Q, Wang J J. Electrical conductivity of the carbon fiber conductive concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 22(2):346-349.
- [9] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2):253-260.
- [10] Da B, Yu H F, Ma H Y, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122:81-89.
- [11] Cai H, Liu X. Freeze-thaw durability of concrete: Ice formation process in pores[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9):1281-1287.
- [12] Liu X M, Wu S P. Research on the conductive asphalt concrete's piezoresistivity effect and its mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8):2752-

- 2756.
- [13] Frqc M, Pichór W. Piezoresistive properties of cement composites with expanded graphite[J]. Composites Communications, 2020, 19:99-102.
- [14] Hori M, Morihiro H. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36(4):511-522.
- [15] 侯作富, 李卓球, 胡胜良. 融雪化冰用碳纤维导电混凝土的电阻变化特性研究[J]. 混凝土, 2004(3):3-4; 21.
- [16] Wang H, Gao X J, Liu J Z. Effects of salt freeze-thaw cycles and cyclic loading on the piezoresistive properties of carbon nanofibers mortar[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177:192-201.
- [17] Xiao Q H. Analysis of fatigue and cumulative damage characteristics for concrete in freezing-thawing environment[J]. Key Engineering Materials, 2012, 525/526:153-156.
- [18] Ma Y W, Liu W S, Hu J, et al. Optimization on the piezoresistivity of alkali-activated fly ash/slag mortar by using conductive aggregates and carbon fibers[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114:103735.
- [19] 董波. 粉煤灰掺量对混凝土抗冻性能的影响规律研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(3):47-49; 58.
- [20] Tripathi D, Kumar R, Mehta P K, et al. Silica fume mixed concrete in acidic environment[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27:1001-1005.
- [21] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7):855-864.

Stability study of piezoresistive effect of conductive concrete under freeze-thaw cycles

CHEN Qianchun, KONG Xiangdong, CHEN Jiankang*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Conductive concrete is prepared by using carbon fiber and graphite as conductive phase materials and adding fly ash and silica fume, with which the effects of fly ash and silica fume content on the freeze-thaw resistance of conductive concrete are studied. The index of piezoresistive effect stability is defined, and the variation law of piezoresistive effect stability with freeze-thaw cycles is explored. The resistivity evolution model and piezoresistive effect stability model of conductive concrete under freeze-thaw cycles are established. The research results show that the addition of fly ash and silica fume to conductive concrete can effectively improve its freeze-thaw resistance, and when the total content of fly ash and silica fume is the same, a higher content of fly ash can improve the stability of the resistance effect on the pressure of conductive concrete.

Key words: conductive concrete; freeze-thaw cycle; resistivity; piezoresistive effect

(责任编辑 章践立)