

单掺和混掺纤维面板混凝土抗盐冻耐久性试验研究

熊小斌, 王瑞骏, 李阳, 雷妍, 陶喆

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了研究盐冻作用下掺纤维面板混凝土耐久性的问题, 将钢纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚丙烯-钢纤维、聚丙烯-钢纤维和聚丙烯-聚丙烯腈纤维掺入面板混凝土中, 在质量分数为3.5%的氯盐浓度下进行冻融循环试验, 并对盐冻循环后的试件开展电镜扫描。研究表明: 掺纤维面板混凝土的质量损失率随盐冻循环次数增加呈现先减小再增大的趋势, 相对动弹性模量和抗压强度则持续减小; 单掺钢纤维面板混凝土抗盐冻性能最优, 其次是混掺钢纤维面板混凝土, 再次是混掺聚丙烯纤维面板混凝土, 最差的是单掺聚丙烯纤维面板混凝土, 但均优于普通面板混凝土抗盐冻性能。电镜扫描微观结果有效验证了单掺和混掺纤维对面板混凝土抗盐冻性能的作用效果。

关键词: 掺纤维面板混凝土; 盐冻循环试验; 混凝土耐久性; 电镜扫描

中图分类号: TV42⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0173-06

Experimental study on salt-freezing durability of single and mixed fiber-doped panel concrete

XIONG Xiaobin, WANG Ruijun, LI Yang, LEI Yan, TAO Zhe

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

Abstract: In order to explore the concrete durability of fiber-doped panels under the action of salt-freezing, different fibers (steel fiber, polypropylene fiber, polyacrylonitrile fiber, polypropylene-steel fiber, polyacrylonitrile-steel fiber and polypropylene-polyacrylonitrile fiber) were doped in the panel concrete, which underwent freeze-thaw cycling test under the chlorine salt concentration of 3.5%. After the test, the specimens were inspected using a scanning electron microscope (SEM). The study found that as the number of salt-freezing cycles increased, the mass loss of the concrete specimens first decreased and then increased, whereas the relative dynamic elastic modulus and compressive strength kept decreasing. The salt-freezing resistance of panel concrete doped with single steel fiber was the best, followed by the panel concrete doped with polypropylene-steel fiber and polyacrylonitrile-steel fiber, and then polypropylene-polyacrylonitrile fiber, single polypropylene fiber-doped panel concrete performed the poorest; however they were all better than ordinary panel concrete. The microscopic test results of SEM verified the improving effect of single and mixed fibers on the salt-freezing resistance of panel concrete.

Key words: fiber-doped panel concrete; salt-freezing cycle test; concrete durability; scanning electron microscope (SEM)

1 研究背景

在我国高寒地区, 面板混凝土在低温环境下易受冻胀力引起的弯剪作用的影响, 发生裂缝破坏, 致使面板混凝土耐久性受到严重的损害^[1]。针对这一问题许多专家学者通过向面板混凝土中掺入纤维

进行混凝土抗冻耐久性研究, 发现纤维可抑制微裂缝的发展, 增强混凝土的抗裂性能, 提升混凝土的耐久性^[2]。

大多数试验中, 研究聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、钢纤维、玄武岩纤维等对混凝土基本性能的影响^[3-8]。靳贺松等^[9]利用聚丙烯纤维制成水泥基复

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2019JQ-318); 陕西省教育厅科研计划项目(19JS048)

作者简介: 熊小斌(1994-), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事水工结构分析和数值仿真研究。

通讯作者: 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事坝工应力研究。

合材料并通过试验探明其抗冻性,试件的抗压、抗折、抗拉强度随冻融循环次数增加而逐渐下降,质量损失明显增大,冻融温度上下交替导致试件体积膨胀应力时程发生规律性变化。朱红兵等^[10]研究了聚丙烯纤维掺量为0.8、1.0、1.2 kg/m³的陶粒混凝土冻融后的抗冻性能及力学性能,结果表明,冻融循环作用导致纤维陶粒混凝土的相对动弹性模量、抗压强度均逐渐降低,陶粒混凝土中掺入聚丙烯纤维能提高抗冻性能。乔宏霞等^[11]将纤维通过整体式和层布式两种掺混方式掺入混凝土,发现层布式掺混纤维混凝土抗冻性能更佳。王跃东等^[12]发现将纤维掺入混凝土可显著提升冻融循环后的抗折强度,对抗压强度影响微小。杨益等^[13]发现纤维体积掺量和种类能显著影响混凝土抗冻性能,混掺体积率为0.05%玄武岩纤维和1.5%钢纤维时抗冻性最佳。郭少龙等^[14]发现玄武岩纤维能有效提升水泥土的抗疲劳性能,随着纤维掺量增加,其抗冻性能逐渐增强。

本试验以单掺和混掺的方式向面板混凝土中掺入3种纤维(聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和钢纤维),对掺纤维面板混凝土在同一氯盐浓度(质量分数为3.5%)下进行盐冻循环试验,并对各盐冻次数下掺不同纤维混凝土的抗压强度、相对动弹性模量和质量损失率结果进行对比研究,进一步对盐冻后的混凝土进行电镜扫描分析,以期面板混凝土耐久性研究提供依据。

2 材料与方法

2.1 试验原材料

本次试验采用42.5R强度等级的普通硅酸盐

水泥(P·O);掺合料为陕西永泽建材厂的Ⅱ级粉煤灰;骨料采用细度模数为2.5的灞河中砂和粒径为5~30 mm的碎石;纤维采用聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和钢纤维,聚丙烯和聚丙烯腈纤维的性能指标见表1,钢纤维的性能指标见表2。采用聚羧酸系高性能减水剂和三萜皂甙高性能引气剂。

表1 聚丙烯和聚丙烯腈纤维性能指标

指标	聚丙烯纤维	聚丙烯腈纤维
纤维类型	束状单丝	束状单丝
比重	0.91	1.18
抗酸性	极高	极高
导热性	极低	极低
抗低温性	强	强
抗拉强度/MPa	>486	>736
纤维直径/ μm	18~48	10~15
吸水性	无	小
拉伸极限/%	>15	>15

表2 钢纤维性能指标

长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
30	0.5	230	1300

2.2 试验方案

本试验根据混凝土面板堆石坝设计规范以及已建工程的实际参数确定实验配合比,具体配合比见表3。本试验变量为纤维种类,O组不掺入纤维,A组掺入聚丙烯纤维,B组掺入聚丙烯腈纤维,C组掺入钢纤维,AB组掺入聚丙烯-聚丙烯腈纤维,AC组掺入聚丙烯-钢纤维,BC组掺入聚丙烯腈-钢纤维。

表3 掺纤维面板混凝土配合比

组次 编号	水灰 比	材料用量/(kg·m ⁻³)									
		水	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料	聚丙烯纤维	聚丙烯腈纤维	钢纤维	减水剂	引气剂
O	0.38	138	292	71	695	1235				3.27	0.07
A	0.38	138	292	71	695	1235	1.0			3.27	0.07
B	0.38	138	292	71	695	1235		1.0		3.27	0.07
C	0.38	138	292	71	695	1217			50	3.27	0.07
AB	0.38	138	292	71	695	1235	0.5	0.5		3.27	0.07
AC	0.38	138	292	71	695	1226	0.5		30	3.27	0.07
BC	0.38	138	292	71	695	1226		0.5	30	3.27	0.07

2.3 试验方法

本试验依据《水工混凝土试验规程》(DL/T

5150—2017)^[15]和《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[16]进行。

具体方法为:(1)将 O、A、B、C、AB、AC、BC 7 组试件在混凝土标准养护箱养护 24 d,之后 4 d 浸泡在常温水里。(2)保持试件饱水面干并测量初始横向基频和初始质量,之后进行冻融前电镜扫描分析。(3)用 NaCl 溶液(质量分数 3.5%)浸泡试件,液面高于试件顶部 20 mm,放入冻融试验机进行盐冻循环,每隔 25 次盐冻循环取出试件擦干表面水,测量混凝土试件的抗压强度、质量损失率和相对动弹性模量。试验测定质量损失率和相对动弹性模量用 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试件,测定抗压强度用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件。其中,棱柱体试件每组配合比制作 3 个试件;立方体试件每组配合比制作 27 个试件,每个盐冻循环测试周期各 3 个。

本试验按公式(1)计算质量损失率;按公式(2)计算相对动弹性模量,相对动弹性模量试验如图 1 所示,试件表面与测杆相接触,根据共振频率选择相应的频率测量范围,读取数字计数器上的横向基频;按公式(3)计算抗压强度,抗压强度试验如图 2 所示。

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_n} \times 100\% \quad (1)$$

$$E = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (2)$$

$$f_{cu} = \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中: W_n 为 n 次冻融后试件质量损失率,%; G_0 为冻融前试件质量,kg; G_n 为 n 次冻融后试件质量,kg; E 为试件相对动弹性模量,%; f_n 为第 n 次冻融时横向基频,Hz; f_0 为冻融前横向基频初始值,Hz; f_{cu} 为试件抗压强度,MPa; P 为立方体破坏荷载,N; A 为立方体承压面积,mm²。

本试验采用 VEGA3 - TESCAN 型扫描电镜试验仪对掺纤维面板混凝土进行微观分析。取冻融前后被压碎试件的微小颗粒样品,用喷金机在样品表面喷金以提高成像质量,随后放入载物盘,将载物盘和样品通过导电银浆相连接,待样品表面银浆干燥后放入扫描电镜。



图1 相对动弹性模量试验



图2 抗压强度试验

3 结果与分析

3.1 质量损失率

盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土质量损失率变化曲线如图 3 所示。

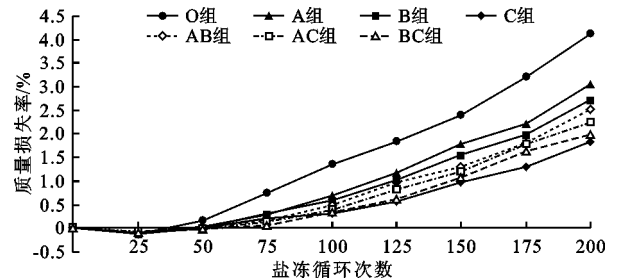


图3 盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土质量损失率变化曲线

由图 3 可知,盐冻循环次数的增加导致质量损失率呈先减小后增大趋势,并且掺纤维面板混凝土的质量损失率整体比普通面板混凝土低。这是因为混凝土试件受盐冻作用在内部产生较多微裂纹,增加了试件的渗透性,外部溶液进入混凝土内部导致质量损失率下降,随着冻融循环次数增加,试件表面剥落质量大于吸水质量导致质量损失率上升。纤维具有延展性,掺入混凝土中会粘结骨料和砂浆,减缓试件中微裂缝的扩展,减少试件表皮剥落。对于单一掺量的纤维,A 组试件的质量损失率大于 B 组,C 组质量损失率最低。这是由于聚丙烯纤维表面比聚丙烯腈纤维更加光滑,与水泥砂浆及水化产物的粘结性较低;而钢纤维较为粗大,有较多水泥砂浆附着在钢纤维上,得到的试件较为完整,裂缝较少,因此质量损失较少。

对掺混杂纤维的面板混凝土试件来说,AB 组试件的质量损失率增长最快,AC 组次之,BC 组质量损失率增长最慢。这一现象可能是因为聚丙烯纤维和聚丙烯腈纤维均为合成纤维,具有相似的特征,使得混杂后的纤维只起到掺量叠加的效果;而钢纤维与前两种纤维有较大差异,且钢纤维对水泥砂浆的粘结性更强,更能减少面板混凝土的质量损失,因此 AC 组试件的质量损失小于 AB 组。AC 和 BC 组试件有所不同的是掺入的纤维,其中 BC 组中聚丙烯腈纤维与砂浆的粘结性高于 AC 组的聚丙烯纤维,这就导致 BC 组质量损失率较 AC 组的小。

由图 3 还可看出,掺单一纤维的面板混凝土试件的质量损失率大都高于掺混杂纤维的试件。这是因为两种纤维混掺能在尺寸和性能方面相互增强,

使水泥浆在纤维作用下更好的粘结在一起。C组比AB、AC和BC组的质量损失率都低,这是因为与C组试件相比掺混杂纤维的试件里钢纤维掺量低,钢纤维相比其他两种纤维有更高的抗拉强度,对大裂缝的产生和发展有更好的控制作用,阻裂性能更强;而且钢纤维更容易分散,对混凝土整体结构有更好的约束作用,使得钢纤维在面板混凝土抗盐冻性能中起主导作用,导致C组有更好的抗盐冻性能。

3.2 相对动弹性模量

盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土相对动弹性模量变化曲线如图4所示。

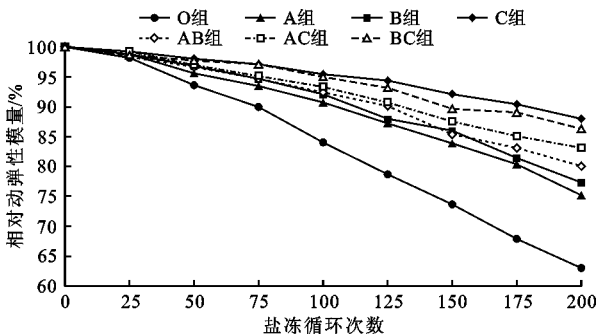


图4 盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土相对动弹性模量变化曲线

由图4可知,掺入不同纤维的面板混凝土试件的相对动弹性模量在盐冻循环初期下降较少,随着盐冻循环次数的增加,相对动弹性模量下降幅度越来越大。这可能是因为随着盐冻循环次数的增加,试件遭受氯盐与冻融循环共同侵蚀,使得试件表皮剥落,抵抗弹性变形的能力变差,从而相对动弹性模量降低更加明显。在200次盐冻循环之后,O、A、B、C、AB、AC、BC组试件的相对动弹性模量分别降低了36.89%、24.77%、22.70%、12.07%、19.98%、16.86%和13.72%,这7组混凝土试件在200次盐冻循环后的相对动弹性模量排序为O < A < B < AB < AC < BC < C。普通面板混凝土试件的相对动弹性模量比掺纤维试件更低,这是因为纤维掺入到面板混凝土中,是以一种三维乱向的状态填充在水泥与骨料之间,有效缓解了裂缝的扩展,提高了混凝土内部结构的密实程度,减缓了水分、氯盐溶液等进入结构的速率,从而减小了水分对结构内部的膨胀应力,降低了氯盐溶液的侵蚀作用。掺不同纤维的面板混凝土试件的相对动弹性模量各有不同,这是因为不同纤维对试件的粘结效果不同,各纤维的抗盐冻性能排序为钢纤维 > 聚丙烯腈纤维 > 聚丙烯纤维。由于本试验选取的纤维掺量低,纤维之间的团聚效应弱,其改善

作用占主导地位,因此纤维掺量越多,试件的抗盐冻性能越好。根据参考文献[16],通过分析混凝土试件冻融后的相对动弹性模量和质量损失率,确定A、B、AB、AC、BC和C组抗冻等级水平均大于F200,且C组抗盐冻性能最优。

3.3 抗压强度

盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土抗压强度变化曲线如图5所示。

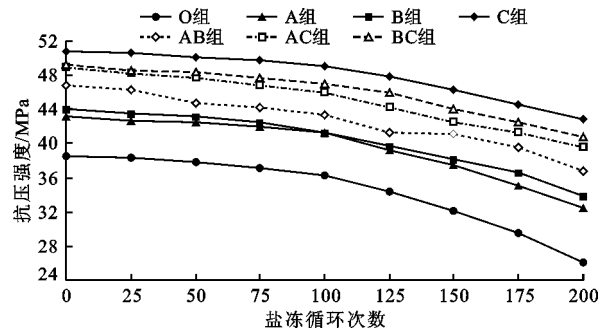


图5 盐冻作用下单掺和混掺纤维面板混凝土抗压强度变化曲线

由图5可知,面板混凝土试件的抗压强度随着盐冻循环次数的增加而逐渐降低,各组次降低的幅度略有不同,在200次盐冻循环之后,O、A、B、C、AB、AC、BC组试件的抗压强度分别降低了32.27%、25.05%、23.06%、15.70%、21.14%、19.07%和17.08%。这是因为随着盐冻循环次数的增加,面板混凝土试件受到氯盐和冻融循环的共同作用,使得试件表皮剥落,试件内部裂缝与孔隙加大,结构疏松,导致混凝土试件的抗压强度降低。

由图5还可看出,掺纤维面板混凝土试件的抗压强度高于普通面板混凝土,掺混杂纤维的试件大多比掺单一纤维的试件抗压强度高。这7组混凝土试件在200次盐冻循环后的抗压强度排序为O < A < B < AB < AC < BC < C。这是因为聚丙烯纤维掺到面板混凝土试件中能使试件结构更紧密,较普通面板混凝土更能抵抗压应力;聚丙烯腈纤维更能紧密连接骨料和砂浆,效果较聚丙烯纤维好;单独掺钢纤维的试件性能最佳,粗大的钢纤维能聚集更多的水泥砂浆与骨料,试件的抗压强度最优。掺混杂纤维比单掺的试件纤维含量高,从而导致面板混凝土更致密,骨料、砂浆与纤维之间的粘结性更高。

3.4 盐冻损伤演变模型

盐冻循环次数的增加增大了掺纤维面板混凝土的内部损伤,抗压强度呈逐渐下降趋势。将O、A、B、C、AB、AC、BC 7组面板混凝土的抗压强度下降

幅度与盐冻循环次数按公式(4)进行线性拟合,拟合结果见表4。

$$y = a + bx \quad (4)$$

根据表4可知,O组面板混凝土抗压强度模型为 $y = -3.0909 + 0.0685x$,C组面板混凝土抗压强度模型为 $y = -1.7745 + 0.0444x$ 。随着盐冻循环次数的增加,O组试件的抗压强度下降幅度最大,说明内部损伤程度最大;而C组试件的抗压强度下降幅度最小,内部损伤程度最小,抗盐冻性能最好。7组面板混凝土数据拟合的决定系数 R^2 均大于0.9,说明7组面板混凝土试件的盐冻损伤演变模型精度较高。通过建立纤维面板混凝土盐冻损伤演变模型,探明不同纤维种类面板混凝土盐冻损伤的衰减规律和劣化过程,为实际工程应用中预测纤维面板混凝土

土在盐冻后的损伤程度提供可靠依据。

表4 7组试件抗压强度与盐冻循环次数线性拟合的相关参数

试件编号	a	b	R^2
O	-3.0909	0.0685	0.9209
A	-2.6023	0.0598	0.9153
B	-2.0018	0.0551	0.9536
C	-1.7745	0.0444	0.9368
AB	-0.9670	0.0491	0.9604
AC	-1.4114	0.0511	0.9727
BC	-1.5302	0.0457	0.9391

3.5 微观结构分析

200次盐冻循环后掺纤维面板混凝土试件界面过渡区结构分析如图6所示。

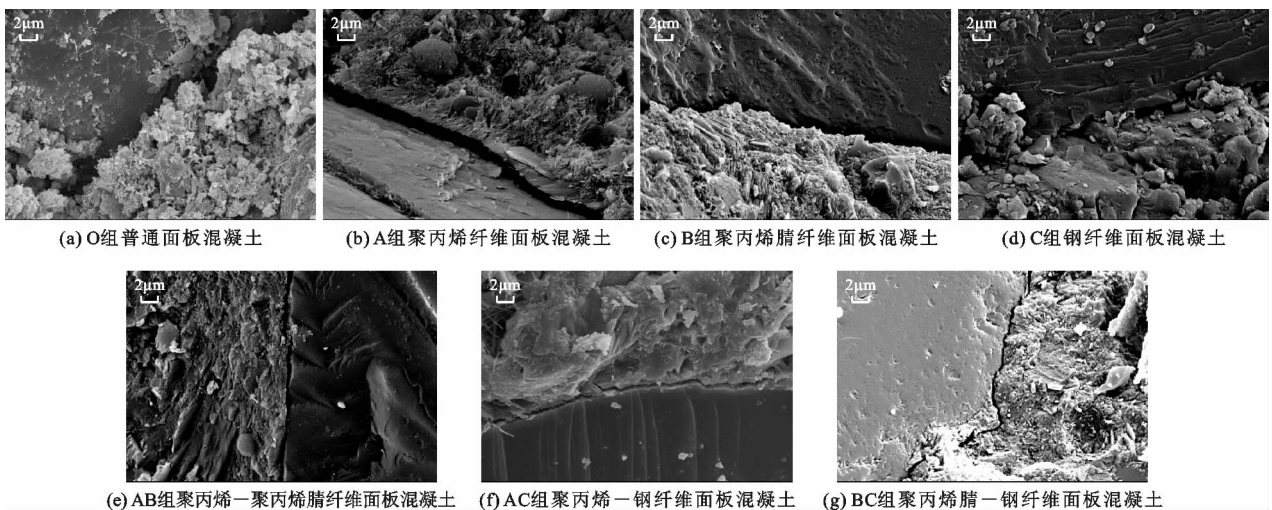


图6 200次盐冻循环后各组掺纤维面板混凝土试件界面过渡区(ITZ)微观结构

由图6(a)可以看出,普通面板混凝土上覆盖有大量水化产物,且盐冻侵蚀后试件的界面过渡区(ITZ)较宽;图6(b)中聚丙烯纤维掺量较低,抗盐冻侵蚀有限,因此其ITZ微裂缝宽度与普通面板混凝土差距不大。图6(b)和图6(c)相比较,在同一纤维掺量的情况下,掺聚丙烯腈纤维的试件ITZ裂缝宽度较小,说明聚丙烯腈纤维阻裂性能更好,混凝土内部粘结性更高,这也体现在了掺聚丙烯腈纤维面板混凝土的宏观性能上面。由图6(d)可看到一些水泥砂浆粘结在钢纤维上,限制了裂缝的扩展。并且钢纤维面板混凝土的ITZ宽度较小,更有利于提高试件的耐久性。图6(e)、(f)、(g)为掺混杂纤维面板混凝土经200次盐冻循环后得到的ITZ微观形态。可以看出,掺混杂纤维的面板混凝土ITZ裂缝宽度均小于单掺聚丙烯及聚丙烯腈纤维面板混凝土的ITZ裂缝宽度,但相对单掺钢纤维面板混凝土稍

有增大,整体看来掺混杂纤维有利于改善面板混凝土耐久性。

4 结论

(1)在盐冻过程中掺纤维面板混凝土试件的质量损失率随盐冻循环次数的增加呈现先下降后上升的趋势,相对动弹性模量和抗压强度随盐冻循环次数增加而呈逐渐下降的趋势。

(2)纤维的掺加方式对面板混凝土抗盐冻性能影响较大,单掺钢纤维的面板混凝土抗盐冻性最优,其次是混掺钢纤维面板混凝土,再次是混掺聚丙烯纤维面板混凝土,单掺聚丙烯纤维面板混凝土抗盐冻效果较差,但仍优于普通面板混凝土,抗盐冻性由弱到强排序为 $O < A < B < AB < AC < BC < C$,C组抗盐冻性能最好,抗冻等级均大于F200等级水平。

(3)微观试验结果表明掺纤维面板混凝土的界

面过渡区裂缝宽度比普通面板混凝土小,纤维增加了砂浆和骨料之间的粘结性能,限制了盐冻过程中微裂纹的扩展,有利于提高面板混凝土的抗盐冻耐久性,与宏观试验结果一致。

(4)建立了普通面板混凝土、单掺和混掺纤维面板混凝土的盐冻损伤演变模型,其抗压强度下降幅度随盐冻循环次数的变化规律近似符合线性函数模型。

参考文献:

- [1] 李岩,王瑞骏,秦睿,等. 面板混凝土冻融劣化后动力性能的研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):184-189.
- [2] 周志云,张晶磊,史晓婉,等. 聚丙烯纤维混凝土的抗冻和抗盐冻耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):152-155+160.
- [3] 张广泰,田虎学,李宝元,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的抗盐冻性能[J]. 材料导报,2018,32(14):2396-2399+2406.
- [4] 白敏,牛荻涛,姜磊,等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(10):2084-2089.
- [5] 伏利鹏,杨建森,冯紫荻,等. 聚丙烯纤维复合胶粉改性混凝土的抗冻性能[J]. 混凝土与水泥制品,2014(11):49-51.
- [6] 张兰芳,梁秋爽,尹玉龙. 聚丙烯纤维增强碱矿渣水泥砂浆性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(11):60-63.
- [7] 田青松,陈月顺,张宇天,等. 纤维混凝土盐冻损伤研究[J]. 湖北工业大学学报,2018,33(2):76-78.
- [8] 陈刚,邵洛,曹川,等. 钢纤维纳米矿粉混凝土劈拉及抗折性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(11):6-10.
- [9] 靳贺松,李福海,何肖云峰,等. 聚丙烯纤维水泥基复合材料的抗冻性能研究[J]. 材料导报,2020,34(8):8071-8076+8082.
- [10] 朱红兵,吕洪林,李秀,等. 氯盐环境下聚丙烯纤维陶粒混凝土冻融损伤模型试验研究[J]. 新型建筑材料,2020,47(7):46-50.
- [11] 乔宏霞,李江川,路承功,等. 纤维掺加方式对混凝土抗冻性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(2):495-500.
- [12] 王跃东,郭小帅,赵超. 基于快冻法的纤维掺量混凝土耐久性试验研究[J]. 四川建材,2020,46(8):5-6+9.
- [13] 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.
- [14] 郭少龙,鹿群,林永良,等. 冻融条件下玄武岩纤维增强水泥土抗疲劳性能的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):200-206.
- [15] 国家能源局. 水工混凝土试验规程:DL/T 5150—2017[S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [14] 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.
- [15] 牛荻涛,姜磊,白敏. 钢纤维混凝土抗冻性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(4):80-84+98.
- [16] NIU Ditaio,JIANG Lei,BAI Min,et al. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition[J]. Materials & Design,2013,44:267-273.
- [17] WANG Jiabin,NIU Ditaio. Influence of freeze-thaw cycles and sulfate corrosion resistance on shotcrete with and without steel fiber[J]. Construction and Building Materials,2016,122:628-636.
- [18] 乔宏霞,李江川,朱飞飞,等. 纤维混凝土抗冻性能研究[J]. 功能材料,2019,50(1):1114-1119.
- [19] 周志云,张晶磊,史晓婉,等. 聚丙烯纤维混凝土的抗冻和抗盐冻耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):152-155+160.
- [20] 周茗如,曹润倬,周群. 基于冻融循环条件下的纤维混凝土抗冻性试验研究[J]. 混凝土,2018(7):5-7+15.
- [21] 白敏,牛荻涛,姜磊,等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(10):2084-2089.

(上接第172页)