

冻融与盐蚀耦合作用下钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土劣化机理研究

代明江*, 殷帅帅, 袁晓洒

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2022年6月13日; 录用日期: 2022年7月11日; 发布日期: 2022年7月18日

摘要

在再生混凝土中加入钢纤维和玄武岩纤维能增强抗冻性能和抗硫酸盐侵蚀。通过对再生骨料进行超声清洗, 基于冻融循环 - 硫酸盐耦合试验测定了试件的质量损伤、相对动弹性模量、抗压强度损失。讨论了钢纤维和玄武岩纤维对再生骨料工作性能的影响, 研究了试件冻融循环50次、100次和150次的应力 - 应变曲线。基于纤维增加理论, 提出了复合材料效应, 深入探讨了混凝土受压破坏机理。结果表明: 钢纤维和玄武岩纤维掺入再生骨料, 会降低再生混凝土的工作性能; 在不受冻融循环影响时, 钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土比对照组再生混凝土抗压强度增强13.27%。经过150次冻融循环后, SBFRCC-3的强度损失为22.63%, 再生混凝土强度损失为31.62%; 当钢纤维掺量为1.5%时, 通过对钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土的质量损失、相对动弹性模量、抗压强度损失数据分析后, SBFRCC-3的抗冻性和抗硫酸盐侵蚀性能均优于普通再生混凝土; 钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土中钢纤维起到支撑作用, 玄武岩纤维则是阻止裂缝的延展。

关键词

抗冻, 硫酸盐, 钢纤维, 玄武岩纤维, 再生混凝土

Deterioration Mechanism of Steel Fiber-Basalt Fiber Recycled Concrete under the Coupling Action of Freeze-Thaw and Salt Erosion

Mingjiang Dai*, Shuaishuai Yin, Xiaosa Yuan

Shaanxi Provincial Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 代明江, 殷帅帅, 袁晓洒. 冻融与盐蚀耦合作用下钢纤维-玄武岩纤维再生混凝土劣化机理研究[J]. 材料科学, 2022, 12(7): 666-677. DOI: 10.12677/ms.2022.127073

Abstract

The addition of steel fibers and basalt fibers to recycled concrete can enhance frost resistance and sulfate attack resistance. The recycled concrete was prepared after ultrasonic cleaning of recycled aggregate. The mass damage loss, relative dynamic elastic modulus loss and compressive strength loss of the specimens were determined based on the freeze-thaw cycle-sulfate coupling test. The effects of steel fibers and basalt fibers on the performance of recycled aggregates were discussed, and the stress-strain curves of the specimens were studied for 50, 100 and 150 freeze-thaw cycles. Based on the fiber increase theory, the composite material effect is proposed, and the compression failure mechanism of concrete is discussed in depth. The results show that the steel fiber and basalt fiber mixed with recycled aggregate will decrease the slump of recycled concrete; when not affected by freeze-thaw cycles, the compressive strength of steel fiber-basalt fiber recycled concrete is 13.27% higher than that of the control group recycled concrete. After 150 freeze-thaw cycles, the strength loss of SBFRC-3 was 22.63%, and the strength loss of recycled concrete was 31.62%. The frost resistance and sulfate corrosion resistance of SBFRC-3 are better than ordinary recycled concrete after analysis of the loss data of dynamic elastic modulus and compressive strength; the steel fiber plays a supporting role in recycled concrete. In addition, basalt fiber plays a role in preventing crack development.

Keywords

Antifreeze, Sulfate, Steel Fiber, Basalt Fiber, Recycled Concrete

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球混凝土使用量已超过 40 亿立方米/年, 砂石材料使用量已经超过 60 亿/年至 80 亿吨/年[1]。开采就是为了满足如此大规模的砂石和骨料需求[2]。然而, 开采消耗了许多自然资源, 并造成了环境污染和生态破坏[3] [4] [5] [6]。此外, 老房子、工厂和其他建筑由于各种原因被拆除产生了大量的废弃混凝土[7] [8]。统计数据显示, 中国建筑垃圾年产量达到 18 亿吨并且在逐年递增[9]。目前, 废混凝土一般堆放或放置在垃圾填埋场。

采矿方法不仅占地面积大, 还会造成环境污染。同时, 在回收废混凝土时, 将其碾碎、研磨得到再生骨料, 根据实际需要部分或完全替代再生骨料制备再生混凝土。这样在一定程度上能缓解天然骨料开采压力, 解决废混凝土造成的土地占用和环境污染问题, 从而实现废混凝土的绿色可持续发展[10] [11]。与天然集料相比, 废弃混凝土集料具有吸水率高、孔隙率大、表观密度低、破碎值高的缺点, 导致制备的再生混凝土强度低、耐久性差[12]。因此, 提高再生混凝土的性能至关重要。目前, 对废弃混凝土集料处理的方法有利用物理或化学作用去除水泥砂浆表面硬化后的再生骨料或发生化学反应生成碳酸盐、凝胶和其它填充部分孔隙和物质。Pawluczuk 等人使用加热研磨处理再生骨料。但是温度过高, 再生骨料的性能会下降, 温度过低, 又达不到处理效果[13]。Katz 和 Cho 等人采用超声清洗再生骨料[14] [15] [16]。超声处理的再生骨料的混凝土抗压强度提高 7%。其它增强的方式有采用钢纤维、聚乙烯醇纤维、碳纤维

等多种纤维来提高再生混凝土的强度和韧性。钢纤维对再生骨料具有增强增韧效果。碳纤维价格昂贵，玄武岩纤维作为一种绿色环保材料，具有抗拉强度高、弹性模量大、价格低廉、增强增韧等特点。

本文使用超声清洗再生骨料，用玄武岩纤维和钢纤维增强再生骨料的耐久性能，探究混杂纤维再生混凝土在硫酸盐-冻融耦合条件下的耐久性能。

2. 试验材料

2.1. 材料

本研究使用普通硅酸盐水泥，P·O42.5和I级粉煤灰。表1是水泥和粉煤灰的基本性能；再生骨料为粗骨料，最大粒径为19 mm，表2给出了粗骨料的性能，该再生骨料的各项性能均符合《混凝土用再生粗骨料》(GBT25177-2010)；使用的细骨料是河砂，吸水率为1.14%，细度模数为2.81；钢纤维和玄武岩纤维的基本性能见表3和表4。试验采用减水率为20%的聚羧酸高效减水剂。

Table 1. Ordinary Portland cement and fly ash chemical composition (%)

表 1. 普通硅酸盐水泥和粉煤灰化学成分(%)

类别	化学成分									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	碱含量	烧失量
水泥	21.58	3.36	5.62	61.31	2.32	2.41	0	0	0.54	2.86
FA	49.02	6.97	31.56	4.88	0.83	0	1.05	0.73	0	0

Table 2. The basic properties of aggregate

表 2. 骨料基本性能

名称	表观密度(kg/cm ³)	堆积密度(kg/cm ³)	细度模数/Mx
细骨料	2640	1490	2.83
粗骨料	2840	1730	0.55
再生粗骨料	2630	1550	4.05

Table 3. The basic properties of steel fibers

表 3. 钢纤维基本性能

长度/mm	直径/mm	厚度/mm	抗拉强度/MPa	密度(g/cm ³)
37	1	5	400	7.83

Table 4. The basic properties of basalt fiber

表 4. 玄武岩纤维基本性能

长度/mm	直径/μm	密度(g/cm ³)	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa
18	15	2.64	110	4800

2.2. 混凝土制备

表5表示的是对照组和试验组的混凝土配合比，再生骨料替代率为100%。采用7.5 kg/m³的玄武岩纤维和掺量为0.9%、1.2%和1.5%的钢纤维。试件采用150 mm × 150 mm × 300 mm的尺寸，浇筑24 h后脱模，放入温度21℃ ± 1℃，湿度 ≥ 95%的标准养护箱中养护28 d。然后放入快速冻融箱中进行试验，设置冻融循环周期为6 h。

Table 5. The mix ratio in recycled concrete**表 5.** 配合比

试件编号	水泥 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	砂子 (kg/m ³)	天然骨料 (kg/m ³)	再生骨料 (kg/m ³)	减水剂 (kg/m ³)	S (%)	BF (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)
OAC	347.2	156	708	1061	0	2	0	0	86.8
RCC	347.2	156	708	0	1061	2	0	0	86.8
SBFRCC-1	347.2	156	708	0	1061	2	1.2	7.5	86.8
SBFRCC-2	347.2	156	708	0	1061	2	0.9	7.5	86.8
SBFRCC-3	347.2	156	708	0	1061	2	1.5	7.5	86.8

3. 试验方法

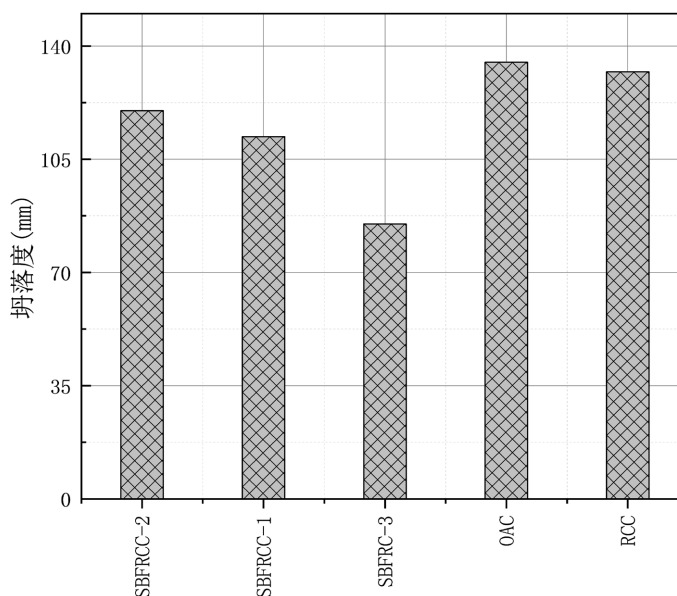
本研究采用快冻法，每组设计三个试块，并根据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》开展试验，以质量变化、相对动弹性模量和抗压强度变化作为指标，评价钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土的抗冻性能。冻融液采用自来水和污水硫酸钠粉末混合配制质量分数为 5% 的 Na₂SO₄ 溶液。

4. 结果与讨论

4.1. 混凝土工作性能

为了解该配合比下的新拌混凝土的工作性能，故进行了混凝土坍落度试验，结果如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，与对照组混凝土 OAC 相比，试验组 SBFRCC-2、SBFRCC-1 和 SBFRCC-3 的坍落度值分别降低了 11.11%、17.04% 和 37.03%，与 RCC 的坍落度相比，坍落度差值几乎相等。含有钢纤维和玄武岩纤维的再生混凝土获得了相对较低的坍落度值。此外，试验组再生混凝土坍落度值随着钢纤维含量的增加而降低。RCC 的坍落度与 OAC 坍落度几乎相等，在 RCC 加入玄武岩纤维和钢纤维坍落度降低的主要原因可能是由于纤维具有高表面积、高吸水率的特点，增加了新拌混凝土的粘度。结果表明，为获得较好的和易性，钢纤维用量建议为 0.9% 以下。

**Figure 1.** Workability of fresh concrete**图 1.** 新拌混凝土和易性

4.2. 混凝土外观

从图 2 中表示的是混凝土试件在冻融和硫酸盐侵蚀下的外貌。从图中可以看出，随着冻融循环试验

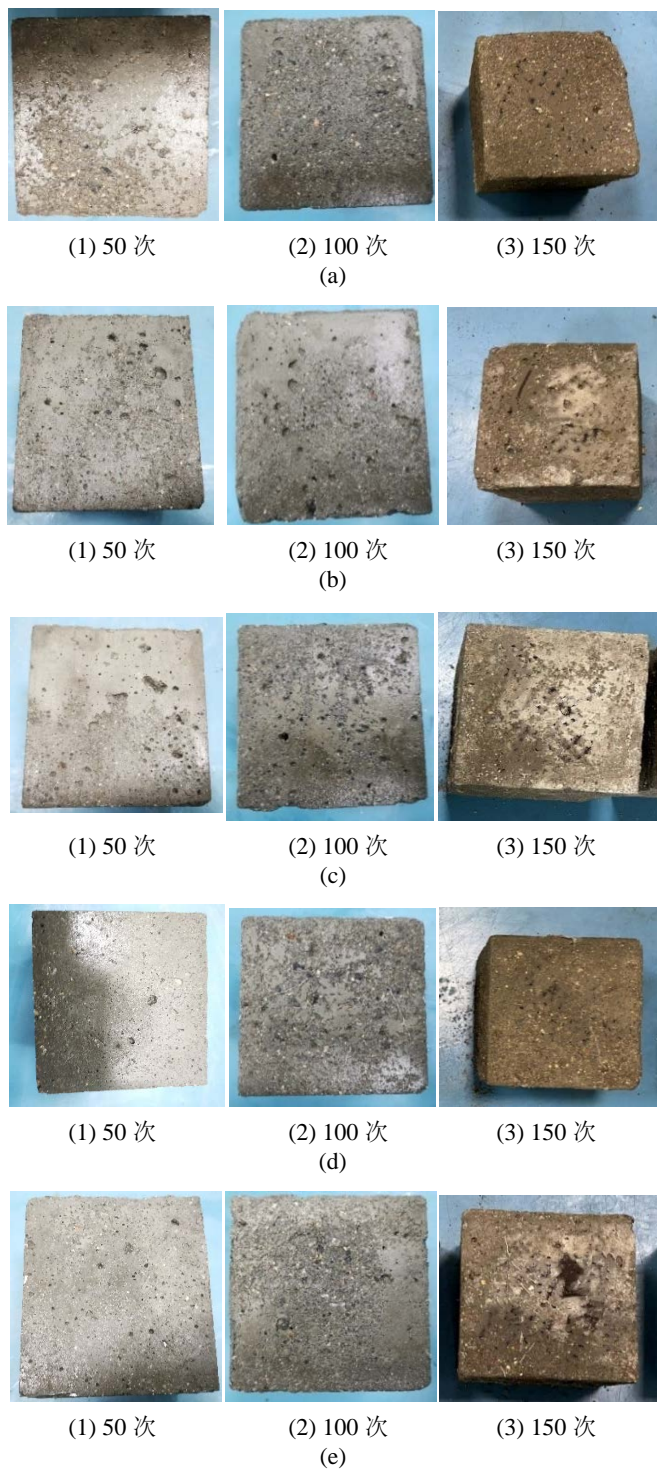


Figure 2. Concrete erodes appearance in freeze-thaw environment: (a) OAC; (b) RCC; (c) SBFRC-2; (d) SBFRC-1; (e) SBFRC-3

图 2. 混凝土在冻融环境下侵蚀外貌: (a) OAC; (b) RCC; (c) SBFRC-2; (d) SBFRC-1; (e) SBFRC-3

的进行, 试件外观的侵蚀情况越来越严重, 表现为试件表层混凝土剥落量越来越大, 试件的棱角缺失, 表面孔洞增多, 质量减轻。图 2(a)和图 2(b)表示的是冻融试验进行 50 次、100 次和 150 次的试件外观侵蚀情况, 试件 OAC 和 RCC 相比, 在冻融 50 次时, OAC 表面孔洞数量和孔径明显小于 RCC 的原因是再生骨料表面附着有旧砂浆层, 使新拌混凝土骨料的与水泥基的桥接效应减弱。随着冻融循环试验的继续进行, 试件表层混凝土逐渐脱落, 裸漏出骨料。在 150 次冻融循环试验后, OAC 和 RCC 试件的表层混凝土基本脱离, 表现出明显的硫酸盐侵蚀外观。将玄武岩纤维和钢纤维加入再生混凝土中, 与 RCC 试件外观相比, SBFRC-2、SBFRC-1 和 SBFRC-3 试件表面混凝土脱落现象有了明显的改善。当冻融循环试验进行到 50 次时, 加入玄武岩纤维和钢纤维的再生混凝土试件表面侵蚀孔洞数量少于 RCC 试件, 在 100 次和 150 次试验中, 其棱角的侵蚀现象也明显被削弱。

4.3. 质量损失

图 3 表达了对照组 OAC、RCC 和试验组试件在冻融循环和硫酸盐耦合作用下的质量损失曲线。从图中可得, 试件的质量损失随着冻融循环次数的增加而增大, RCC 的质量损失曲线位于最上方, SBFRC-3 位于最下方, 从上到下依次为: $RCC > OAC > SBFRC-1 > SBFRC-2 > SBFRC-3$, 即普通再生混凝土的质量损失远大于含由钢纤维和玄武岩纤维的再生混凝土。从冻融开始到冻融循环试验结束, RCC、OAC 和 SBFRC-3 的质量损失依次为 1.89%、1.68% 和 1.503%, 含有 0.9% 和 1.2% 的钢纤维试件质量损失曲线明显低于 RCC, 质量损失曲线上升速度明显小于 RCC 质量损失曲线, 这说明了将钢纤维和玄武岩纤维加入再生混凝土能减小冻融循环和硫酸盐侵蚀导致的质量损失。基于图中的变化规律, SBFRC-3 和 SBFRC-2 对比 SBFRC-1 和 OAC, 在冻融次数达到 125 次时, S1.5BFRC 和 SBFRC-2 的质量损失始终低于 SBFRC-1 和 OAC, 这表明了在一定条件下, 钢纤维和玄武岩纤维含量越多, 试件的质量损失越小。通过 SBFRC-2、SBFRC-1、SBFRC-3、RCC 和 OAC 的质量损失规律可以得出, 在冻融循环 25 次时, 试件的质量损失很小, 试件受冻融损伤劣化程度不高, 当冻融次数达到 50 次时, 质量损失曲线开始出现分层, 试件的冻融损伤逐渐加大, 即 SBFRC-2、SBFRC-1、SBFRC-3 的质量损失小于 RCC 和 OAC。在冻融循环试验进行到 125 次时, SBFRC-2 的质量损失小于 SBFRC-1 的原因, 有可能是

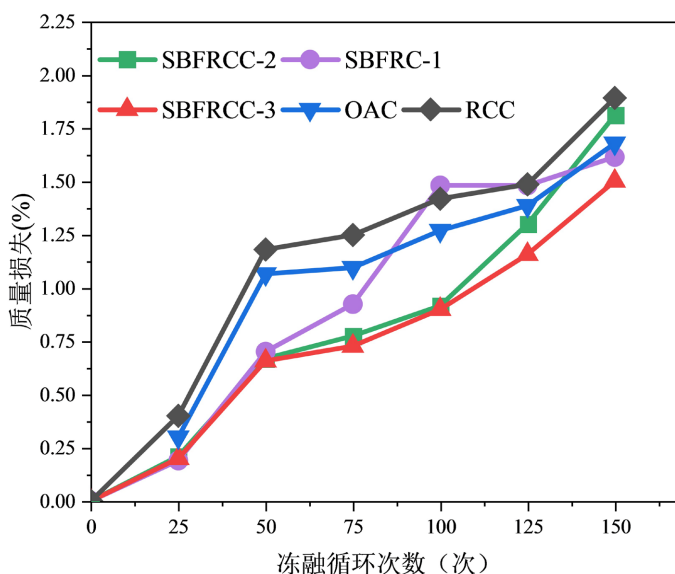


Figure 3. Mass loss of specimens

图 3. 试件的质量损失

SBFRCC-1 的试件内部钢纤维发生团聚, 也有可能是钢纤维和玄武岩纤维在拌合过程中聚合, 使试件出现内部劣化。在试验结束时, 即 150 次冻融循环, SBFRCC-3 的质量损失最小。

4.4. 相对动弹性模量

图 4 表示的是试件在冻融试验过程中相对动弹性模量的变化。从图中可知, 相对动弹性模量与冻融循环次数呈现负相关, 即冻融循环次数越多, 试件的相对动弹性模量越小, 损伤劣化越轻微。在整个(150 次循环)冻融循环试验中, 试件损伤劣化程度最大的是 RCC, SBFRCC-3 则是损伤劣化最小, 即 RCC 密实度小于 SBFRCC-3。根据图 4 试件的相对动弹性模量曲线变化图, 试件密实度从大到小分别为: SBFRCC-3 > SBFRCC-2 > SBFRCC-1 > OAC > RCC, 含钢纤维和玄武岩纤维的试件在冻融试验过程中的密实度均大于对照组试件 RCC 和 OAC, 表明了钢纤维和玄武岩纤维能增强再生混凝土的密实度, 增加在冻融过程中的硫酸盐抗性。在冻融初期(50 次循环), SBFRCC-3、SBFRCC-1、SBFRCC-2 和 OAC 的相对动弹性模量差值不大, 曲线下降速度基本相同, 试件的受冻融损伤和硫酸盐侵蚀的程度比较小, 当冻融次数达到 75 次时, 各试件的相对动弹性模量出现明显分成, 即试件的密实度差值逐渐增大, 表现出不同的抗冻融性能, 从大到小依次为 SBFRCC-3 > SBFRCC-2 > OAC > SBFRCC-1 > RCC, 当冻融循环试验结束时, SBFRCC-3 的相对动弹性模量曲线下降速率最小, 其次是 SBFRCC-2、SBFRCC-1 和 OAC, 而 RCC 的相对动弹性模量下降速度最快, 出现这样试验结果的原因是硫酸盐溶液进入试块内部, 与水泥浆发生反应, 使得试块的孔隙率增大。同时在冻融环境下, 试块内部产生膨胀应力, 增多了再生混凝土内部的裂缝数量, 使密实度下降。试验结果说明了钢纤维和玄武岩掺入再生混凝土可以有效抑制混凝土中微裂缝的产生和发展, 细化粗孔结构。从而降低了再生混凝土总孔隙率和有害孔隙率, 使混杂纤维再生混凝土相对动弹性模量的在整个冻融循环过程中下降速度减缓[17][18][19]。

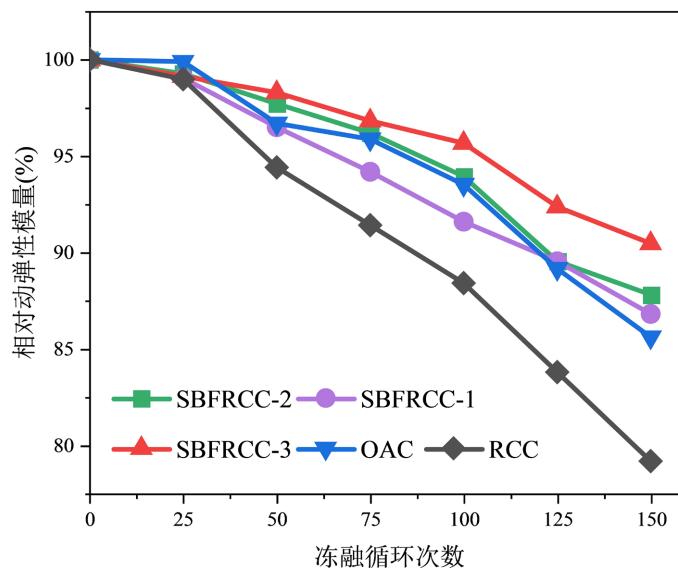


Figure 4. Relative dynamic elastic modulus of concrete specimen
图 4. 混凝土试件相对动弹性模量

4.5. 抗压强度变化

从图 5 可知, 各组试件的抗压强度随着冻融循环试验的进行, 抗压强度越来越小, 强度差值逐渐增大。SBFRCC-3、OAC 和 SBFRCC-2、SBFRCC-1、RCC 相比, 经过 28 d 的标准养护后, 抗压强度从大到小依次

为: SBFRC-3 > OAC > SBFRC-2 > SBFRC-1 > RCC。与 RCC 的抗压强度相比, SBFRC-3 的抗压强度为 62.3 MPa, 增强 13.27%。含有钢纤维和玄武岩纤维的试件抗压强度均高于再生混凝土 RCC, 这表明了钢纤维和玄武岩纤维能增加再生混凝土的抗压强度, 对再生混凝土的缺陷起到补偿强度的作用。随着各组试件进行冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合试验, 在冻融次数相同的情况下, 抗压强度从大到小依次为: SBFRC-3 > OAC > SBFRC-2 > SBFRC-1 > RCC。冻融开始至冻融结束, SBFRC-3、SBFRC-2、OAC、RCC 的强度损失率分别为 22.63%、30.19%、31.62%、31.82%, 其强度曲线下下降速度从小到大依次为: SBFRC-3 > OAC > SBFRC-2 > SBFRC-1。这说明了钢纤维和玄武岩纤维混掺能增加再生混凝土的抗冻融性和减小抗压强度的损失。通过 SBFRC-3、SBFRC-1、SBFRC-2、OAC、RCC 强度损失曲线可以看出, 在冻融初期(25 次循环), 各试件的冻融破坏损失基本相同, 损伤程度较小, 试验进行到 75 次时, OAC、RCC、SBFRC-2 的曲线下下降速度增大, 说明了试件的冻融损伤程度增大。随着冻融循环次数增加, 在循环 100 次至 150 次时, SBFRC-2、OAC、RCC 的强度曲线下下降速度明显大于 SBFRC-3 和 OAC, 这说明了试件的抗冻性能被进一步削弱。试验结束时, SBFRC-3 的抗压强度最大, 表明了该配合比下的试件具有良好的抗冻性能。

结合图 3、图 4、图 5 可得, 将玄武岩纤维和钢纤维加入再生混凝土, 能有效的改变再生混凝土的内部结构, 增加纤维与骨料之间的粘结力和桥接效应[20] [21]。当纤维加入再生混凝土的含量较少时, 纤维的阻裂效应不明显, 随着纤维含量的增加, 增加了纤维与混凝土基质之间的结合力, 纤维不易被拔出从而增加了试件的整体性能, 增强了混凝土的抗冻性能。

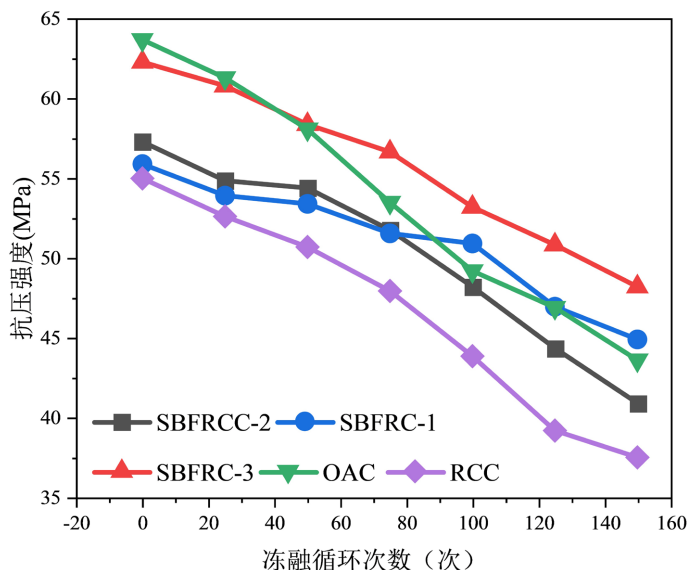


Figure 5. Compressive strength changes of concrete specimens under the coupling action of freeze-thaw sulfate

图 5. 混凝土试件冻融硫酸盐耦合作用下的抗压强度变化

4.6. 混凝土的峰值应变分析

为了研究试件在冻融循环试验过程中, 混凝土试件的应力应变是否发生了变化, 故对冻融循环 50 次、100 次和 150 次的试件进行了单轴压缩试验, 对试验结果进行处理后得到了图 6。

图 6 揭示了对照组和试验组试件在冻融循环过程混凝土的应力应变情况。从图 6(a)中可知, 在 50 次冻融过程中, 试件损伤劣化程度较轻, SBFRC-3、RCC、OAC 的峰值应力依次减少了 6.42%、7.82%、8.91%。随着试验的继续进行 100 次循环, SBFRC-3、RCC、OAC 试件受到冻胀力和硫酸盐的双重侵蚀,

试件的峰值应力进一步下降,当循环次数至 150 次时,SBFRCC-3、RCC、OAC 的峰值应力分别减少了 22.63%、31.82%、31.57%,如图 6(c)所示。试验结果表明,玄武岩纤维和钢纤维可以减少再生混凝土的峰值应力损失。结合图 6(a)~(c)可以知道,应力应变曲线上升段符合线弹性特征,并且各试件的上升段未重合,说明了混凝土的弹性模量存在差值。从图 6(a)应力应变曲线中可以知道,峰值应力从右到左依次为:SBFRCC-3→RCC→SBFRCC-2→OAC→SBFRCC-1。含有钢纤维和玄武岩纤维试件的曲线下降速度小于 OAC 和 RCC,这说明了纤维含量与试件的弹性模量存在着关系,该试验结果在图 6(b)和图 6(c)中得到了印证。产生这种现象的原因可能是钢纤维和玄武岩纤维掺入再生混凝土中表现作用不同,钢纤维高强度,玄武岩纤维具有高韧性。试件在下压过程中,钢纤维有效提高了再生混凝土的支撑性,玄武岩纤维提高再生混凝土的延性,两者纤维结合使再生混凝土抗压性能更好。

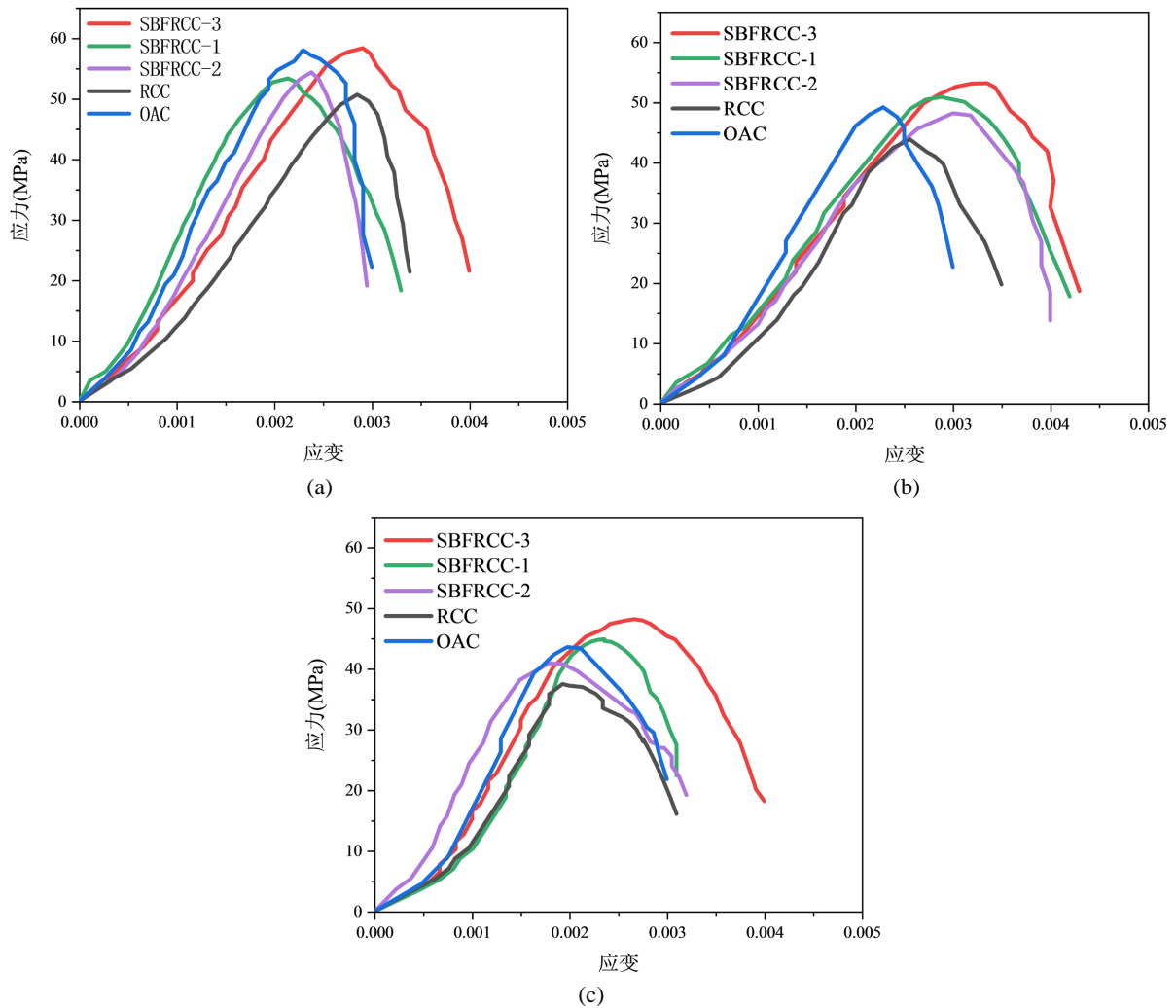


Figure 6. Stress-strain curve of concrete: (a) 50 freeze-thaw cycles; (b) 100 freeze-thaw cycles; (c) 150 freeze-thaw cycles
图 6. 混凝土的应力 - 应变曲线图: (a) 50 次冻融循环试验; (b) 100 次冻融循环试验; (c) 150 次冻融循环试验

4.7. 混凝土受压破坏机理分析

根据 SBFRCC 的基本力学性能试验结果,SBF 能提高再生混凝土的强度和韧性,尤其是替代率 100% 的再生混凝土。以 RCA 置换率为 100%、钢纤维含量分别为 0.9%、1.2%、1.5% 和 7.5 kg/m³ 的再生混凝土为例

基于冻融 - 盐蚀耦合试验进行单轴抗压试验, 揭示了其抗压抗裂效果结合试验观察, 揭示其作用机理。

图 7(a)-(c)显示了再生水泥基应力前后的约束条件。将钢纤维和玄武岩纤维对再生水泥基板的桥接和抑制作用分为三个阶段。第一阶段, 钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土在固化阶段形成若干微小裂纹和微孔隙。第二阶段, 钢纤维、玄武岩纤维随机分布于再生混凝土基质中, 呈现交叉排列。钢纤维 - 玄武岩纤维 - 水泥基形成纤维基板界面, 限制了内部微裂纹的发展和扩展。当再生混凝土受力至肉眼可见第一道裂缝时, 因钢纤维含量比较少, 沿裂缝分布的钢纤维大多被拉出或断裂, 钢纤维只能部分担部分压应力, 钢纤维与玄武岩纤维的协作效应不明显。当钢纤维掺量较多, 钢纤维能承受大部分压应力和玄武岩纤维承受大部分横向拉伸力, 从而减缓试件内部的应力集中, 有效防止裂缝的扩展和发生。在这种情形

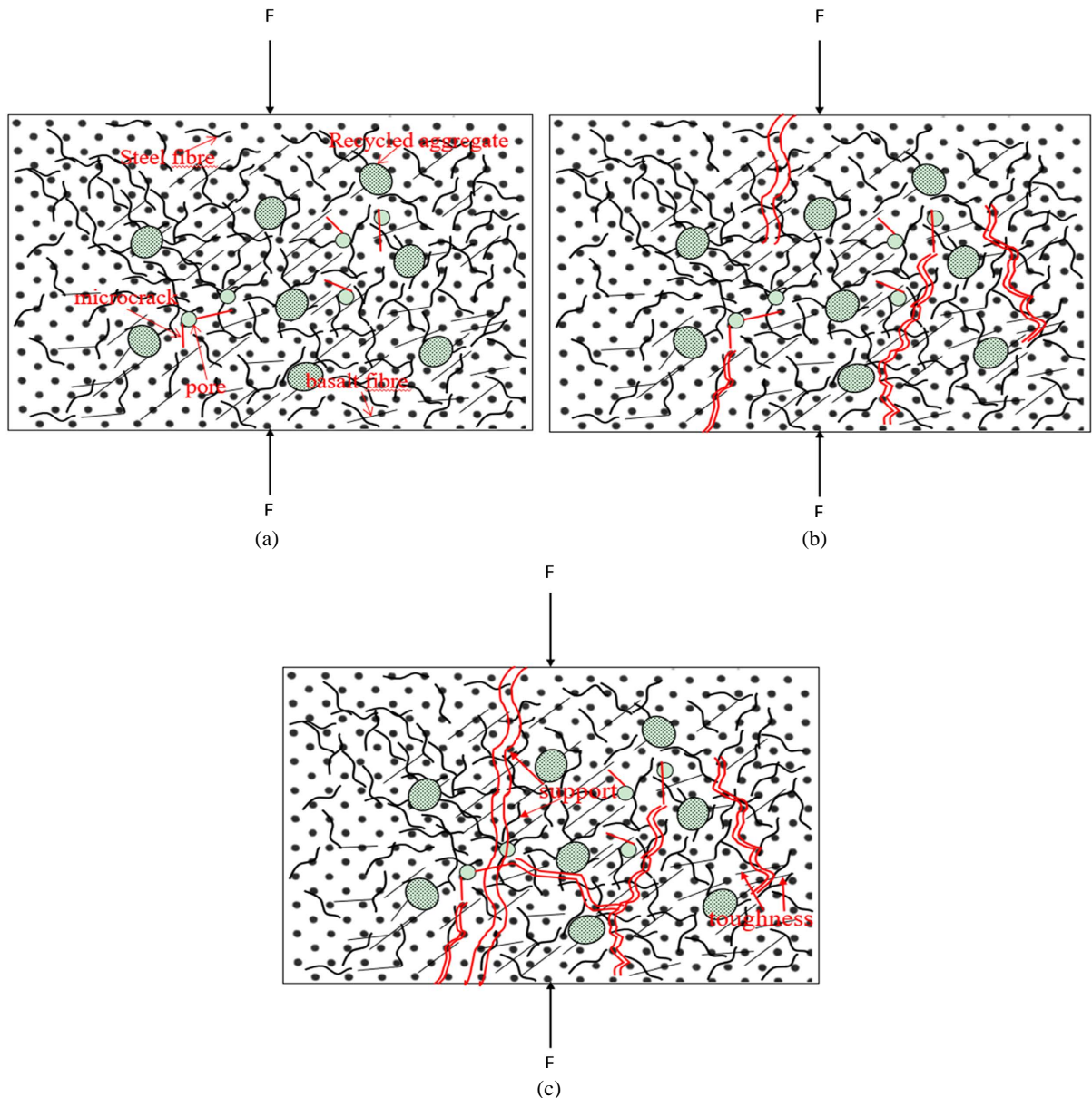


Figure 7. Schematic diagram of concrete compression failure: (a) Steel fiber-basalt fiber bridging microcracks during hardening of recycled concrete; (b) Bridging cracks under cracking loads; (c) Steel fibers-basalt fibers go through cracks

图 7. 混凝土受压破坏原理图: (a) 再生混凝土硬化过程中钢纤维 - 玄武岩纤维桥接微裂缝; (b) 开裂荷载下的桥接裂缝; (c) 钢纤维 - 玄武岩纤维穿过裂缝

中, 钢纤维 - 玄武岩 - 再生混凝土表现出良好的韧性。在第三阶段, 试件被完全压碎, 形成贯通裂缝。试件破碎时, 除了存在渗透性裂纹和硫酸盐侵蚀外貌之外, 还存在着未脱落的混凝土破碎片。

5. 结论

通过冻融循环和硫酸盐侵蚀耦合试验, 测定了钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土的质量损失、相对动弹性模量和抗压强度, 得到了以下结论:

1) 钢纤维和玄武岩纤维降低了再生混凝土的工作性能, 和普通再生混凝土相比, SBFRC-3 的坍落度为 85 mm, 减少了 35.61%。

2) 通过对钢纤维 - 玄武岩纤维再生混凝土、普通混凝土、普通再生混凝土的质量损失、相对动弹性模量变化、抗压强度变化的数据分析后发现, 钢纤维掺量为 1.5% 的 SBFRC-3 的抗冻性能和抗硫酸盐侵蚀性能最佳。

3) 基于试验组和对照组混凝土试件的应力应变曲线, 钢纤维和玄武岩纤维与再生骨料有明显的复合效应, 在单轴压缩试验中含有钢纤维 - 玄武岩纤维的试件, 破坏状态由脆性变为塑性。随着钢纤维含量的增加, 这种塑性行为逐渐明显。这为制备高性能混凝土提供了一种可能。

参考文献

- [1] Wang, R. and Zhang, Y.X. (2018) Recycling Fresh Concrete Waste: A Review. *Structural Concrete*, **19**, 1939-1955. <https://doi.org/10.1002/suco.201800057>
- [2] Marie, I. and Quiasrawi, H. (2012) Closed-Loop Recycling of Recycled Concrete Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, **37**, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>
- [3] Liew, K.M., Sojobi, A.O. and Zhang, L.W. (2017) Green Concrete: Prospects and Challenges. *Construction and Building Materials*, **156**, 1063-1095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008>
- [4] Safiuddin, M., Alengaram, U.J., Rahman, M.M., et al. (2013) Use of Recycled Concrete Aggregate in Concrete: A Review. *Journal of Civil Engineering and Management*, **19**, 796-810. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>
- [5] Li, X. (2008) Recycling and Reuse of Waste Concrete in China: Part I. Material Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.006>
- [6] Akça, K.R., Çakır, Ö. and İpek, M. (2015) Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Using Recycled Aggregates. *Construction and Building Materials*, **98**, 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>
- [7] Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A., et al. (2017) Mechanical Properties of the Concrete Containing Recycled Fibers and Aggregates. *Construction and Building Materials*, **144**, 392-398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>
- [8] Zhu, X., Chen, X., Shen, N., et al. (2018) Mechanical Properties of Pervious Concrete with Recycled Aggregate. *Computers and Concrete*, **21**, 623-635.
- [9] Jin, R., Li, B., Zhou, T., et al. (2017) An Empirical Study of Perceptions towards Construction and Demolition Waste Recycling and Reuse in China. *Resources, Conservation and Recycling*, **126**, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.034>
- [10] Abreu, V., Evangelista, L. and De Brito, J. (2018) The Effect of Multi-Recycling on the Mechanical Performance of Coarse Recycled Aggregates Concrete. *Construction and Building Materials*, **188**, 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.178>
- [11] Mo, K.H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., et al. (2018) Recycling of Seashell Waste in Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **162**, 751-764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
- [12] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., et al. (2016) Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregate—A Review. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 466-472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- [13] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Bołtryk, M., et al. (2019) The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*, **12**, Article No. 367. <https://doi.org/10.3390/ma12030367>
- [14] Katz, A. (2003) Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**, 703-711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)

-
- [15] Cho, Y.S., Baek, S.K., Lee, Y.T., *et al.* (2013) Estimation of Compressive Strength of High-Strength Concrete with Recycled Aggregate Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. *Advanced Materials Research*, **680**, 226-229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.680.226>
- [16] Yuan, X., Dai, M., Li, M., *et al.* (2022) Effect of Graphene Oxide and Fly Ash on Frost Resistance of the Steel Fiber Reinforced Concrete. *Sustainability*, **14**, Article No. 6236. <https://doi.org/10.3390/su14106236>
- [17] Gao, D., Zhang, L., Zhao, J., *et al.* (2020) Durability of Steel Fibre-Reinforced Recycled Coarse Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **232**, Article ID: 117119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117119>
- [18] Cui, S., Liu, P., Cui, E., *et al.* (2018) Experimental Study on Mechanical Property and Pore Structure of Concrete for Shotcrete Use in a Hot-Dry Environment of High Geothermal Tunnels. *Construction and Building Materials*, **173**, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.191>
- [19] 侯晋杰, 贾迎泽, 赵强. 钢纤维-玄武岩纤维混杂对再生混凝土抗冻性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(6): 55-58.
- [20] Zhang, C., Wang, L., Zhang X., *et al.* (2021) A 3-Dimensional Prediction Model for Mechanical Strength of Basalt-Steel Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Concrete Based on Reaction Surface Method. *Construction and Building Materials*, **303**, Article ID: 124376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124376>
- [21] Huang, M., Zhao, Y., Wang, H., *et al.* (2021) Mechanical Properties Test and Strength Prediction on Basalt Fiber Reinforced Recycled Concrete. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article ID: 6673416. <https://doi.org/10.1155/2021/6673416>