DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.23

冻融循环对钢纤维混凝土动力性能的影响研究

周 涛[1], 熊小斌[2], 李 岩[2]
(1. 国家电力投资集团有限公司大坝管理中心, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 通过对冻融循环劣化后的钢纤维混凝土试件进行动态三轴压缩试验,分析了冻融循环及钢纤维掺量对混凝土轴向极限抗压强度、轴向峰值应变和应力-应变曲线的影响。结合扫描电子显微镜(SEM)分析冻融前后钢纤维混凝土的微观结构。目的在于探明冻融循环对钢纤维混凝土动态力学性能的影响规律,为寒冷地区钢纤维混凝土在实际工程中的应用提供理论参考。结果表明:增加冻融循环次数导致轴向极限抗压强度下降且100次冻融循环后下降速度明显增大,而轴向峰值应变基本呈线性增大。应变速率的增加导致轴向极限抗压强度增大且轴向峰值应变逐渐减小。冻融循环破坏了钢纤维混凝土内部结构,导致应力-应变曲线包围面积减小,钢纤维混凝土吸收能量的能力降低。钢纤维掺量对冻融劣化后混凝土动力性能影响较大,本试验中1%的钢纤维掺量下冻融劣化后混凝土最优。SEM微观结构揭示了钢纤维增强混凝土抗冻性的强化机理,以及过量掺入钢纤维对抗冻性的弱化机理,与宏观试验结果一致。

关键词: 钢纤维混凝土; 动力性能; 冻融循环; 三轴压缩试验; 微观结构
中图分类号:TV431$^+$.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2021)03-0167-06

Influence of freeze – thaw cycles on dynamic performance of steel fiber reinforced concrete

ZHOU Tao[1], XIONG Xiaobin[2], LI Yan[2]
(1. *Dam Supervision Center, State Power Investment Corporation Limited, Xi'an* 710061, *China*; 2. *Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: The dynamic triaxial compression tests for steel fiber reinforced concrete (SFRC) subjected to freeze – thaw (F – T) cycles were conducted to analyze the effect of F – T cycles and steel fiber content on the axial ultimate compressive strength, axial peak strain and stress – strain curve of the SFRC. Moreover, the microstructure of the samples before and after F – T cycles were observed using a scanning electron microscopy (SEM) in order to explore the influence of F – T cycles on the dynamic mechanical properties of SFRC, and provide a theoretical reference for the application of SFRC in practical engineering in cold regions. It is found that the increase of F – T cycles resulted in the decrease of axial ultimate compressive strength, and the decrease rate increased significantly after 100 cycles, whereas the axial peak strain of SFRC increased linearly. The increase of the strain rate led to the increase of the ultimate compressive strength and the decrease of the axial peak strain. The area of the stress – strain curve was diminished and the energy absorption capacity of SFRC decreased because F – T cycles damaged the internal structure of the SFRC. The steel fiber content had a great influence on the dynamic performance of the concrete after F – T deterioration. In this test, the concrete with 1% steel fiber content performed the best. SEM microstructure illustrates the strengthening mechanism of SFRC frost resistance and the weakening mechanism of excessive steel fiber content, and the results are consistent with the macroscopic test.

Key words: steel fiber reinforced concrete (SFRC); dynamic performance; freeze – thaw cycle; triaxial compression test; microstructure

收稿日期:2020-09-29; **修回日期**:2021-02-24
基金项目:国家自然科学基金项目(50779051)
作者简介:周 涛(1977-),男,江苏江阴人,硕士,高级工程师,主要从事大坝安全管理。
通讯作者: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。

1 研究背景

钢纤维混凝土具有强度高和韧性好的特点,广泛应用于土木和水利工程。钢纤维混凝土在寒冷地区服役期间,需要承受冻融循环和动力荷载的双重作用。由于冻融循环作用对钢纤维混凝土造成不同程度的劣化,势必对其动力性能产生不利的影响,严重影响钢纤维混凝土结构的正常使用和安全运行。因此冻融循环对钢纤维混凝土动力性能的影响研究意义重大。

迄今为止进行了许多关于钢纤维混凝土性能的研究。力学性能方面,赵冬雪等[1]发现钢纤维能够增强自密实混凝土的抗拉性能和劈裂强度。杨松霖等[2]发现不同钢纤维种类和掺量组合对钢纤维混凝土的抗压强度、抗弯强度和弯曲韧度会产生不同程度的优化效果。张颖等[3]研究了不同钢纤维掺量对高强混凝土轴心抗拉强度的影响,发现钢纤维能提高混凝土的韧性,并建立了轴拉应力 - 应变曲线数学表达式。纤维混凝土良好的抗裂能力和韧性归功于纤维的阻裂性能[4]。钢纤维混凝土动力性能方面,王志亮等[5]通过常规三轴压缩试验对钢纤维混凝土进行强度和韧度研究,发现钢纤维体积分数增加,峰值应力和峰值应变明显提高。仵鹏涛等[6]研究了超高性能混凝土动态抗压强度受钢纤维的影响,发现钢纤混凝土动态强度和韧度受钢纤维掺量的影响显著。Ren 等[7]对掺有钢纤维的超高性能水泥基复合材料进行分离式霍普金森压杆试验,发现极限动态韧性随钢纤维含量的增加而增加。彭刚等[8]采用常规三轴动态压缩试验对不同围压和钢纤维掺量的混凝土动态压缩性能进行分析并得到了修正后的动态常三轴压缩作用下应力 - 应变全曲线。潘慧敏等[9]通过落锤冲击试验,研究了钢纤维在冲击荷载下的增韧和阻裂机理。Jin 等[10]对钢纤维超高强度混凝土动、静态力学性能进行试验研究,在高应变率情况下超高强度钢纤维混凝土展现出良好的吸能能力和压缩韧性。彭帅等[11]发现钢纤维混凝土动态抗压强度在高温状态下大幅度降低,但能相比普通混凝土能保持较好的抗冲击性能。钢纤维混凝土力学性能受冻融循环影响方面,Zhang 等[12]发现冻融循环降低了钢纤维混凝土的冲击强度,尤其在 250 次冻融循环后下降显著。朱晨飞等[13]和杨益等[14]研究了钢 - 玄武岩混杂纤维对混凝土冻融耐久性的影响并建立了冻融损伤模型。牛荻涛等[15-16]发现钢纤维能有效增强混凝土抗冻融耐久性,并从微观角度讨论孔径分布特征对抗冻融耐久性的影响。Wang 等[17]发现钢纤维能显著提高喷射混凝土早期抗压强度,密实内部结构使得喷射混凝土具备良好的抗冻性能和抗硫酸盐侵蚀性能。乔宏霞等[18]研究了钢纤维的两种掺混方式对混凝土抗冻性的影响,发现层布式掺混比整体式更佳。纤维在一定掺量范围内会增强混凝土抗冻性,过多掺入会对混凝土整体性能带来负面影响[19-20]。

综上所述,国内外研究主要集中在钢纤维混凝土的静态力学性能方面,大量的钢纤维混凝土动力性能研究并未考虑冻融循环作用的影响。而在严寒地区,钢纤维混凝土在经历动力荷载前结构已经遭受冻融循环的损伤作用。因此,本试验考虑应变速率以及冻融循环次数,并采用常规三轴试验探究冻融循环作用对钢纤维混凝土动力性能的影响,以期为寒冷地区钢纤维混凝土结构的设计提供一定的参考依据。

2 试验概况

2.1 试验材料

本试验中 P. O 42.5R 普通硅酸盐水泥来自陕西秦岭水泥厂,物理力学性能见表 1;灞河中砂作为细骨料,碎石作为粗骨料具体性能指标如表 2 所示;钢纤维为苏州史尉康弯钩型钢纤维,其形状及相关性能指标如表 3 所示;西安市红旗外加剂厂聚羧酸减水剂,三萜皂甙高效引气剂;养护和拌和水为自来水。

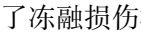
表 1 试验用水泥物理力学性能

强度等级	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
P. O 42.5R	120	300	4.0	6.5	21	45.7

表 2 试验用骨料性能指标

性能指标	粗骨料	细骨料
粒径/mm	5 ~ 20	0.35 ~ 0.5
细度模数		2.5
表观密度/(kg · m^{-3})	2710	2630
堆积密度/(kg · m^{-3})	1590	1500

表 3 试验用钢纤维性能指标

形状	长度/mm	直径/mm	长径比	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
	30	0.5	60	200	1195

2.2　试验配合比设计

本试验参照《钢纤维混凝土》(JG/T 472—2015)规范,根据现场调试,进行配合比设计,材料的具体配合比如表 4 所示。SF0 为没有掺入钢纤维的混凝土,SF10 和 SF20 分别为掺有 1.0% 和 2.0% 钢纤维的混凝土。

2.3　试验主要设备和方法

参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行冻融试验,采用 TDR－28V 快速冻融试验机。标准养护室内养护钢纤维混凝土 24 d,然后放入 18～22 ℃的水中浸泡 4 d,之后进行快速冻融试验,每 50 次冻融循环后取出目标试件进行常规三轴压缩试验。

本试验采用 DTD－2000 kN 粗粒土动静三轴试验仪进行动力试验,该设备最大垂直出力可满足 2 000 kN。本试验采用常规三轴试验法,参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)试件为 Φ100×200 mm 圆柱体,采用围压为 5 MPa,试验设计应变速率为 10^{-5}/s(准静态应变速率)、10^{-4}/s、10^{-3}/s 和 10^{-2}/s 4 种,每种应变速率下,每组均为 15 个试件,每 50 次冻融循环试验一次,每次 3 个试件。将经历过规定冻融循环次数的试件放置在试验仪器上,将透水垫片分别放在试件的上下两端之后用热缩套将压头、圆柱体试件和透水垫片套住并用热风枪进行加热使其与混凝土试件贴合。调试位移传感器之后进行三轴压缩试验。试验中用规定的应变速率进行荷载施压,全过程采用位移控制并且要求均匀连续进行,最终达到试件失效,之后分别采集 SF0、SF10 和 SF20 的轴向极限抗压强度和轴向位移的数据。

表 4　钢纤维混凝土配合比

试件编号	水/(kg·m^{-3})	水泥/(kg·m^{-3})	砂/(kg·m^{-3})	石/(kg·m^{-3})	减水剂/%	引气剂/%	钢纤维/(kg·m^{-3})
SF0	150	375	765	1135	0.7	0.03	0
SF10	150	375	730	1095	0.7	0.03	78
SF20	150	375	710	1045	0.7	0.03	156

本试验采用捷克 TESCAN 公司 VGEA3 扫描电镜试验系统对冻融循环作用前后的钢纤维混凝土进行微观分析。取试件破碎后的微小颗粒作为观察样本(直径≤25 mm,厚度≤20 mm),放置于载物盘,准备完毕后将样本放置于扫描电镜中观察。

3　试验结果与分析

3.1　试件破坏过程及形态

图 1、2 和 3 分别为 SF0、SF10 和 SF20 三轴压缩试验后冻融损伤试件的表观形貌。0～50 次冻融循环试件表面相对完整,没有明显的损伤变化。100～200 次冻融循环试件表面砂浆剥落逐渐明显并伴随少量钢纤维外露,表面微小孔隙和裂缝增多且麻面区域增大,由此可知钢纤维混凝土试件表面劣化程度随着冻融循环次数增多而加重。动态三轴压缩试验后,经历不同冻融循环次数的钢纤维混凝土破坏形式基本一致,都以一条倾斜的主裂纹贯穿试件。这是因为钢纤维和围压的约束作用阻碍了垂直裂纹的发展,使试件主要以斜剪破坏模式破坏。

由于 SF0 没有钢纤维的约束作用,裂纹向四周发展贯穿路径形态更加破碎,裂缝宽度更大。0～50 次冻融循环后主裂纹宽度较小破坏不明显,冻融循

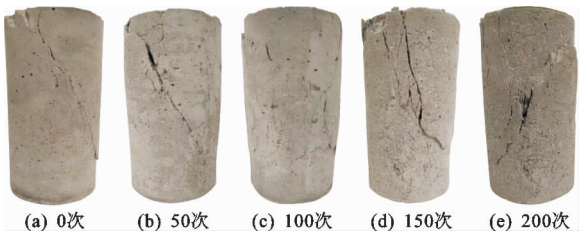


图 1　各冻融次数下 SF0 表观形貌

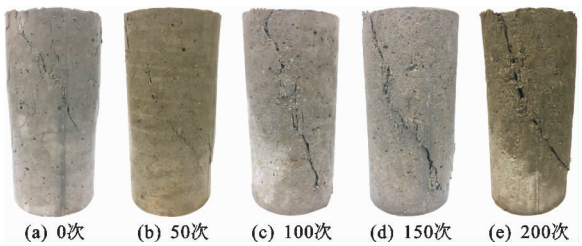


图 2　各冻融次数下 SF10 表观形貌

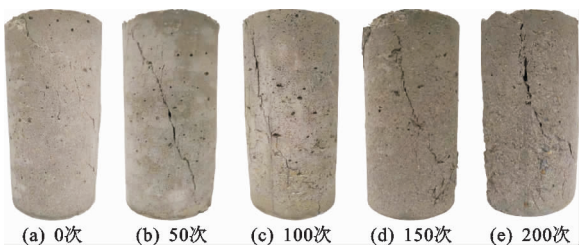


图 3　各冻融次数下 SF20 表观形貌

环次数增加导致破坏后的裂缝宽度逐渐增大且破坏截面面积增加。原因是冻融循环作用损伤了钢纤维混凝土内部结构并增加了薄弱区域,导致轴向极限抗压强度逐渐降低。由于钢纤维的搭接效应,破坏后的试件整体结构仍保持相对较好的完整性。相比于 SF10,SF20 由于钢纤维与水泥基质之间的粘结性降低,导致斜剪破坏截面面积增大。

3.2 轴向极限抗压强度分析

图 4 为钢纤维混凝土在不同应变速率作用下,SF0、SF10 和 SF20 的轴向极限抗压强度随冻融循环次数的变化规律。由图 4 可知,冻融循环破坏降低了轴向极限抗压强度,而且不同冻融循环阶段强度损失率不同。以 SF10 在应变速率为 10^{-3}/s 情况下为例,0 ~ 100 次冻融循环强度损失率为 7.75%,100 ~200 次达到 21.56%。在 100 次冻融循环前轴向极限抗压强度的下降幅度较为缓慢,大于 100 次后降低趋势明显增大。分析其原因为由于砂浆、骨料和钢纤维之间的热膨胀系数差异,在反复冻融过程中存在于三者界面之间的裂纹会不断扩散,界面和水泥基质中的微裂纹和孔隙数量不断增加,裂纹相互贯通,钢纤维混凝土内部损伤程度更为严重,轴向极限抗压强度降低幅度增大。

应变速率 10^{-5}/s 下,200 次冻融循环后 SF0、SF10 和 SF20 轴向极限抗压强度相比 0 次冻融循环,分别降低了 40.49%、30.90% 和 36.01%,结果表明钢纤维掺量增加减少了冻融循环后混凝土轴向极限抗压强度的降低幅度,这说明钢纤维提高了混凝土的抗冻性,且 SF10 组极限抗压强度减小程度最低,可知掺加 1% 的钢纤维对混凝土抗冻性提高最优。SF10 经历 200 次冻融循环后,在应变速率分别为 10^{-4}/s、10^{-3}/s 和 10^{-2}/s 下,相比于准静态应变速率轴向极限抗压强度分别增加了8.32%、12.06% 和 16.97%。结果表明,钢纤维混凝土轴向极限抗压强度随着应变速率的增大而增大。原因在于冻融循环作用后钢纤维混凝土的应变速率强化效应,混凝土内部裂纹的延伸速度随着应变速率的增加而变快,裂纹来不及在水泥基质中扩展延伸而贯穿粗骨料导致强度增大。

3.3 轴向峰值应变分析

图 5 为不同应变速率下冻融循环次数对 SF0、SF10 和 SF20 组轴向峰值应变的影响。由图 5 可以看出,SF10 在应变速率为 10^{-2}/s 下经过 50、100、150 和 200 次冻融循环后,相比于 0 次冻融循环轴向峰值应变分别增加了 6.45%、14.73%、26.23% 和 35.77%,轴向峰值应变随着冻融循环次数增多而增大。因为冻融循环的作用,钢纤维混凝土内部孔隙水冻结产生的膨胀应力导致孔隙周围的裂缝得到发展,孔隙结冰水融化后孔隙率增大,混凝土内部结构形成较大的可压缩空间,所以冻融循环次数越多外压力下混凝土的变形量越大。

准静态应变速率下,SF10 经过 50、100、150 和 200 次冻融循环后,轴向峰值应变相比未经冻融破坏分别增加了 5.84%、15.80%、27.09% 和 39.35%;应变速率为 10^{-2}/s 情况下,分别增加了 5.45%、14.73%、26.23% 和 35.76%。结果表明相同冻融循环次数下,钢纤维混凝土的轴向峰值应变在低应变速率下的增长幅度更大。分析原因是在低应变速率情况下,内部孔隙和裂缝有足够的时间完成闭合,可变形空间被充分压缩,形成较大的形变。当混凝土处于高应变速率状态下,内部缺陷来不及充分的发展和密实,试件便已经破坏,所以轴向峰值应变值相对较小。在准静态应变速率下,200 次冻融劣化后 SF0、SF10 和 SF20 的峰值应变比未冻融分别增加了 42.06%、39.34% 和 40.50%,SF10 组峰值应变增加最小。可以看出钢纤维减小了冻融循环后混凝土峰值应变的增长幅度。这是因为钢纤维的桥接作用,更有效地保证了冻融损伤后结构的完整性,SF10 呈现出最佳的抗冻融损伤能力。

3.4 应力 – 应变曲线分析

应变速率为 10^{-3}/s,SF10 应力 – 应变曲线在不同冻融循环次数下的变化如图 6 所示。由图 6 可知冻融循环次数递增导致轴向峰值应变点后移且轴向极限抗压强度点降低,应力 – 应变曲线整体逐渐后移和下降而且曲线与横坐标所包围的面积逐渐减小,在 100 次冻融循环后减小程度更加明显。这反映出钢纤维混凝土经受冻融循环作用后吸收能量的能力下降且韧性变差。在 0 ~100 次冻融循环,钢纤维混凝土应力 – 应变起始阶段基本呈直线上升趋势;150 ~200 次冻融循环,起始处出现明显的反弯段,冻融循环次数递增导致应力 – 应变曲线起始段与横坐标的夹角逐渐减小。这是因为冻融循环作用加重了钢纤维混凝土内部结构的损伤劣化程度,引起大量裂纹的产生,导致在外部作用力下,可变形空间增大,相比于未经受冻融循环的钢纤维混凝土,冻融劣化后达到相同的应力需要更大的应变。当外荷载加载到一定程度混凝土内部裂纹和孔隙被压实可变形空间减小,产生相同应变需要更大的应力,应力 – 应变曲线斜率增大出现反弯段。

SF0、SF10 和 SF20 经过 200 次冻融循环后应力 – 应变曲线如图 7 所示。SF10 和 SF20 的应力 – 应变曲线相似,但是和 SF0 的应力 – 应变曲线相比,曲线趋势延后,下降段延长。原因是钢纤维对混凝土的增韧效应,混凝土内部能量的释放得到了缓冲,延缓了混凝土破坏过程。

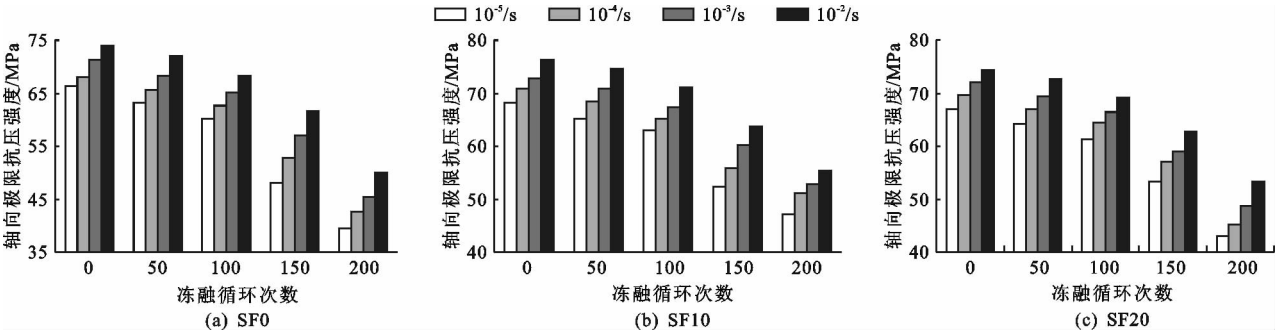


图 4　SF0、SF10 和 SF20 轴向极限抗压强度与冻融循环次数的关系

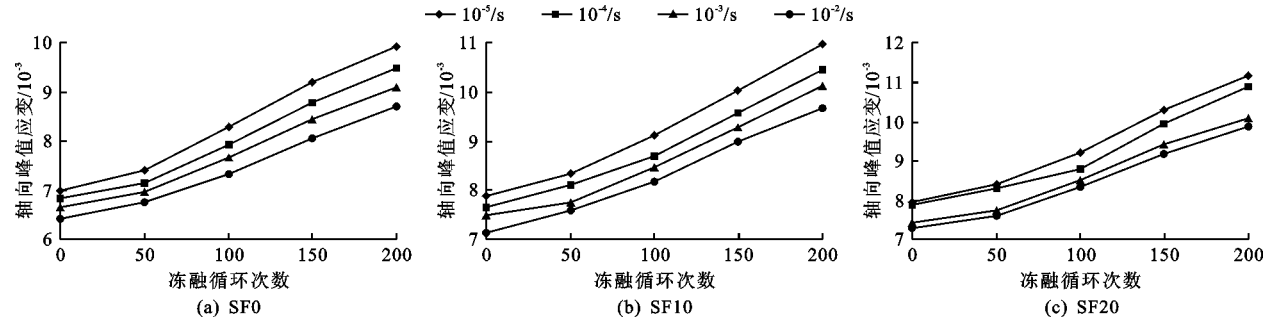


图 5　混凝土轴向峰值应变随冻融循环次数的变化规律

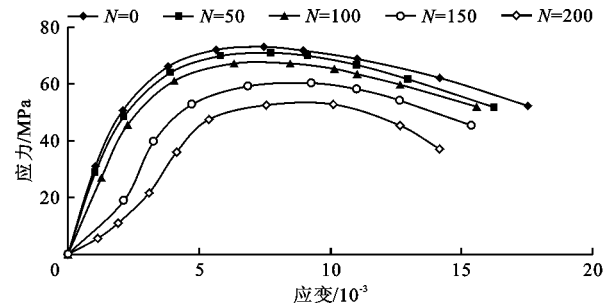


图 6　SF10 试件不同冻融循环次数下的应力 – 应变曲线

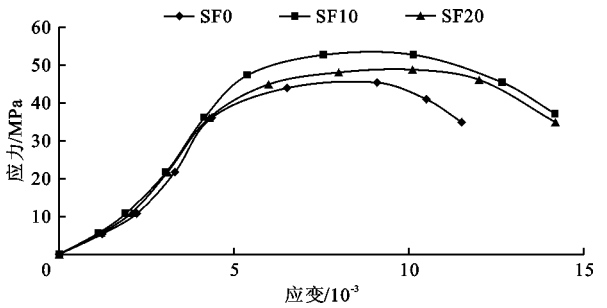


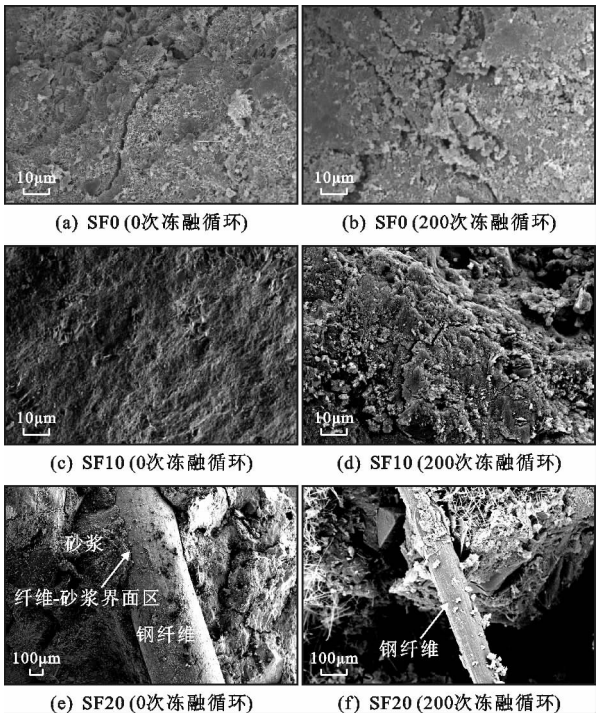
图 7　混凝土 200 次冻融循环后的应力 – 应变曲线

3.5　钢纤维混凝土微观分析

分别取 SF0、SF10 和 SF20 经过 0 次和 200 次冻融循环后的试块进行电镜扫描分析,扫描结果如图 8 所示。未经冻融循环作用的 SF0 存在微裂纹,而 SF10 内部结构密实,颗粒分布紧密且微裂纹少(图 8(a)、8(c))。200 次冻融循环后,SF0 和 SF10 内部呈现出不同状态的微观损伤形貌。SF0 观察到结构内部的微裂纹和孔洞的数量明显增多,微裂纹宽度变大并向周围扩展,裂纹之间相互贯通形成松散片状结构(图 8(b));SF10 内部结构完整性更好,裂缝和松散结构较少(图 8(d))。可以看出适量的钢纤维掺量可增强混凝土的抗冻性。原因在于钢纤维的保水性能促进了混凝土水化反应使其内部结构更加致密[21]。而且相互联结交错的钢纤维形成网状结构,有助于缓解裂缝尖端区域的应力集中,约束了在冻融循环过程中微裂纹的形成和发展。根据电镜扫描结果分析,SF10 组中钢纤维改善了混凝土内部微观结构,增强了混凝土抗冻融性能,这与 3.2 节冻融循环后 SF10 组轴向极限抗压强度降低程度相比 SF0 减少相互对应。

当 2.0% 钢纤维掺入时,钢纤维和水泥基体之间呈现出一定的粘结效应,但是过量的钢纤维无法被足量的水泥浆包裹,钢纤维发生团聚现象增大了钢纤维混凝土内部孔隙率,结构薄弱区域增多导致混凝土更容易遭受冻融破坏(图 8(e))。经历 200 次冻融循环后,钢纤维 – 基体界面过渡区存在较大

的裂缝和松散的结构,水泥基体剥落导致钢纤维裸露使其失去约束效应(图 8(f))。钢纤维 - 基体界面过渡区将会成为冻融循环过程中微裂纹产生和发展的薄弱区域,过量掺入钢纤维导致桥接作用减弱对混凝土抗冻性能将会带来负面影响,这与 3.3 节中 200 次冻融循环后 SF20 峰值应变增长幅度大于 SF10 峰值应变增长幅度相互联系。



(a) SF0 (0次冻融循环) (b) SF0 (200次冻融循环)
(c) SF10 (0次冻融循环) (d) SF10 (200次冻融循环)
(e) SF20 (0次冻融循环) (f) SF20 (200次冻融循环)

图 8 不同冻融损伤程度钢纤维混凝土的微观形貌

4 结 论

本文对经冻融循环劣化后的钢纤维混凝土开展了动态三轴压缩试验,研究了钢纤维混凝土动力性能受冻融循环次数的影响,主要得出以下结论:

(1)冻融循环次数增加劣化了钢纤维混凝土内部结构导致轴向极限抗压强度降低,峰值应变逐渐增大。100 次冻融循环后轴向极限抗压强度下降程度更加明显。冻融循环后的钢纤维混凝土存在应变速率强化效应,相同冻融循环次数下轴向极限抗压强度随应变速率增大而增大。

(2)钢纤维的强化作用有效增强了混凝土抗冻性能,降低了冻融劣化后混凝土轴向极限抗压强度损失率和峰值应变增长幅度,高应变速率下冻融劣化后的钢纤维混凝土轴向峰值应变增长幅度更小。

(3)冻融循环次数增加导致钢纤维混凝土的应力 - 应变曲线包围面积减小,钢纤维混凝土吸收能量的能力降低。比较 0、1.0% 和 2.0% 钢纤维掺量混凝土冻融循环后动态力学性能的变化,1.0% 钢纤维掺量呈现出最佳的抗冻性。

(4)SEM 微观结构分析发现冻融循环劣化了混凝土微观结构,钢纤维掺入使内部微观结构更加密实。但钢纤维掺入会产生较多的初始裂缝,增加钢纤维 - 基体界面过渡薄弱区,因此过多掺入钢纤维会降低钢纤维混凝土冻融劣化后的动态力学性能。

参考文献:

[1] 赵冬雪,璩继立. 钢纤维、玄武岩纤维及聚丙烯纤维对自密实混凝土性能的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):174 - 179.

[2] 杨松霖,刁 波. 超高性能钢纤维混凝土力学性能[J]. 交通运输工程学报,2011,11(2):8 - 13.

[3] 张 颖,吕西林,年学成. 钢纤维高强混凝土轴拉应力 - 应变曲线试验研究[J]. 结构工程师,2017,33(1):107 - 113 + 200.

[4] 刘鲁强. 聚合物纤维混凝土试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(6):55 - 57 + 61.

[5] 王志亮,诸 斌. 钢纤维混凝土三轴压缩下的强度和韧度特性[J]. 建筑材料学报,2012, 15(3):301 - 305 + 311.

[6] 仵鹏涛,刘中宪,吴成清,等. 钢纤维对超高性能混凝土动态压缩特性的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(9):939 - 945.

[7] REN Genmao, WU Hao, FANG Qin, et al. Effects of steel fiber content and type on dynamic compressive mechanical properties of UHPCC[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 29 - 43.

[8] 彭 刚,刘德富,戴会超. 钢纤维混凝土动态压缩性能及全曲线模型研究[J]. 工程力学,2009,26(2):142 - 147.

[9] 潘慧敏,马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报,2017,20(6):956 - 961.

[10] JIN Liu, ZHANG Renbo, TIAN Yudong, et al. Experimental investigation on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced ultra-high-strength concretes [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 102 - 111.

[11] 彭 帅,李 亮,吴 俊,等. 高温条件下钢纤维混凝土动态抗压性能试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(22):149 - 154.

[12] ZHANG Wuman, CHEN Shuhang, ZHANG Ning, et al. Low-velocity flexural impact response of steel fiber reinforced concrete subjected to freeze - thaw cycles in NaCl solution[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 522 - 526.

[13] 朱晨飞,刘晓军,李文哲,等. 混杂纤维混凝土冻融耐久性与损伤模型研究[J]. 工业建筑,2014,45(2):10 - 14.

(下转第 178 页)

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, 中华人民共和国国家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.

(上接第 172 页)

[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 Ditao,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 Ditao. 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.