[文章编号] 1003－4684(2025)01-0093-07

冻融循环下玄武岩纤维混凝土梁的受弯承载力研究

张玉泽，陈月顺，易怀书，李传雄
（湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为研究玄武岩纤维混凝土梁在冻融环境下的受弯承载力，对不同冻融次数(0、50、100)下的普通混凝土梁和玄武岩纤维混凝土梁进行静力受弯试验，研究了试件梁的极限荷载和开裂荷载、梁截面应变、梁荷载-钢筋应变、梁荷载-挠度曲线等。结果表明：掺入玄武岩纤维的试件梁，对其开裂荷载和极限荷载分别提升了 13%和 5%；随着冻融次数的增加所有试件梁的极限荷载和开裂荷载都随之减小，但掺入玄武岩纤维的试件梁退化速率要小于普通混凝土梁，冻融 100 次后的玄武岩纤维混凝土梁较没冻融之前的梁的极限荷载和开裂荷载分别降低了 11%和 8%，而普通混凝土梁下降了 13%和 10%。经历 100 次冻融后的普通混凝土梁由设计的适筋破坏变为了超筋破坏，而玄武岩纤维混凝土梁仍为适筋破坏，说明玄武岩纤维的掺入不仅提高了试件梁的界限配筋率，还降低了冻融带来的损伤。

[关键词] 玄武岩纤维；冻融循环试验；正截面承载力；钢筋混凝土梁
[中图分类号] TU528.572 [文献标识码] A

寒冷地区温度环境影响是导致混凝土性能退化的主要原因之一，由于温度变化较大，混凝土内部孔隙水反复冻融，使得混凝土内部受到损伤[1]。混凝土结构在潮湿环境、排水系统、接触雨水等部位都会受到不同程度的冻融损伤。郭容邑[2]对 48 根钢筋混凝土梁进行冻融试验，试验结果表明：试件梁在经历了冻融循环后，其承载力呈现下降的趋势，并且随着冻融次数的增多，承载力的衰减速度越来越快；曹大富[3]对不同强度和不同配筋率的混凝土梁进行了冻融循环试验，结果表明：冻融循环后部分设计的适筋梁会发生超筋破坏；现行的混凝土结构设计规范中的极限承载力、开裂弯矩仍然适用于冻融后的混凝土梁；曹大富[4]研究了冻融循环后混凝土受压本构模型，研究表明：冻融循环作用后的混凝土，在单轴受压初期存在一个“压实”的效应，应力－应变曲线开始时内凹，随后变为外凸。

20 世纪中叶以来，研究者提出在混凝土结构中掺入纤维材料，来提高混凝土结构的力学性能，研究人员对各种纤维混凝土结构进行了多项研究。玄武岩纤维是一种绿色新型的混凝土增强材料，它拥有良好的综合性能，并且造价相较于其他纤维成本更低。徐存东[5]等人对玄武岩纤维在冻融环境下的力学性能进行了研究，其试验结果表明：玄武岩纤维的最佳掺量为 0.1%～0.15%之间，此时的掺量对于混凝土的力学性能提升最大。赵艳茹[6]用四点弯曲试验，对玄武岩纤维混凝土梁进行了研究。试验结果表明：玄武岩纤维的掺入使得梁的开裂荷载、极限荷载、挠度等都有所提升。谭智芳[7]研究了玄武岩纤维混凝土梁的抗弯性能，其结果表明：加入了玄武岩纤维的混凝土梁，其抗弯承载力会有所提升，且承载力随着纤维掺量体积的增加而增加。

可以看出玄武岩纤维的掺入使得混凝土结构的力学性能得到了改善，但对于冻融环境下的纤维混凝土结构目前的研究较少，本文选题针对玄武岩纤维混凝土梁构件在冻融环境下的抗弯承载力进行研究。

1 实验设计

1.1 原材料与配合比

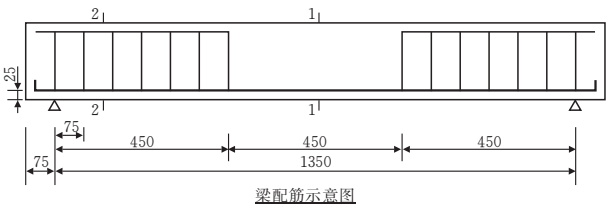
以玄武岩纤维掺量和冻融次数为关键参数设计 6 根钢筋混凝土梁进行静力受弯实验，每根梁预留 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块，用于测量混凝土的抗压强度。试件梁的截面尺寸均为 130 mm×220 mm。所有试件的箍筋均配置 A8@75、架立筋均配置 B6。箍筋为 HPB300 级，受拉钢筋和架立筋均为 HRB400 级。混凝土强度适配为 C40 等级，试件梁的保护层厚度为 25 mm，玄武岩纤维掺量均为 0.15%。试件尺寸及配筋如图 1 所

[收稿日期] 2022－11－22
[第一作者] 张玉泽(1995－)，男，湖北咸宁人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为混凝土耐久性。

示，试件主要参数如表 1 所示。

表 1 试件主要参数

试件序号	试件编号	混凝土强度	纤维掺量/%	配筋率 ρ/%	冻融循环次数/n
1	CC1	C40	0	1.61	0
2	CC2	C40	0	1.61	50
3	CC3	C40	0	1.61	100
4	BF1	C40	0.15	1.61	0
5	BF2	C40	0.15	1.61	50
6	BF3	C40	0.15	1.61	100



梁配筋示意图

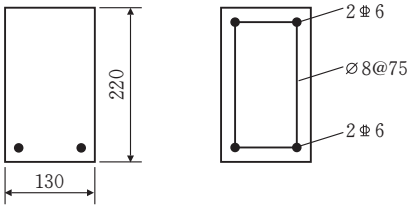


图 1 梁尺寸 （单位：mm）

按规范 α_1 取值为 1，β_1 为 0.8，f_c 为 19.1 MPa，本文纵筋为 HRB400，ξ_b 为 0.518，计算的本次试件的界限配筋率为 2.7%。因为冻融后会降低混凝土抗压强度的数值，所以适筋梁有可能发生超筋破坏，为验证此现象，本文试验设计的配筋率为 1.61%。

1.2 实验方案设计

使用 TDR-1 型迅速冻融测试机进行 0、50、100 次快速冻融循环试验。28 d 的水养护后，编号试件。因为梁尺寸问题，需要定制冻融试件盒，试件盒尺寸为 1600 mm×200 mm×250 mm，然后将试件放置冻融盒内，再放入冻融测试机中；混凝土试块放入冻融机自带的冻融盒内，设定机器内温度（−18 ± 2）～（5 ± 2）℃，冻融循环 1 轮时间 4 h 左右（图 2）。达到相应的循环次数后，取出试件并进行抗弯试验。



图 2 TDR-1 型迅速冻融测试机

在每根试件梁的 2 根纵筋跨中部位分别布置 1 片钢筋电阻应变片，由于本次试验需要经历冻融环境，所以需要对钢筋应变片进行防冻防潮处理，用环氧树脂加固化剂涂抹到应变片表面进行防冻，待其凝固后用纱布缠绕进行防潮。混凝土应变在梁跨中表面处进行粘贴，顶部和底部应变片距离梁顶部和底部各 10 mm，其余沿截面高度 50 mm 均匀分布，在截面中部均匀加密 2 片应变片，具体如图 3 所示。

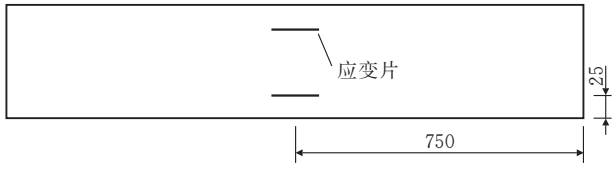
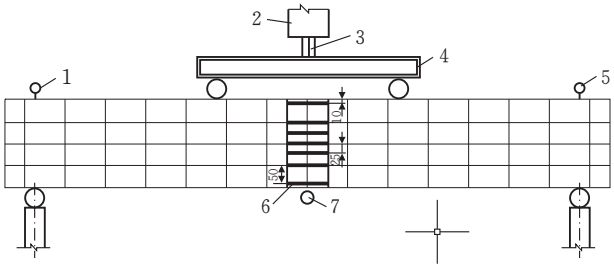


图 3 钢筋应变片贴粘位置

试验采用三分点加载，如图 4 所示。荷载测量通过力值传感器收集，混凝土应变和钢筋应变数据通过采集仪收集，梁的挠度数值使用位移计测量；加载机制为力值控制，加载速率为 0.05 kN/min，加载过程分为开裂前和开裂后，试件开裂前按照预估开裂荷载的 15%分级加载，开裂后按照预估极限荷载的 20%分级加载，每一级荷载持荷 3 分钟，使试件梁的变形得到充分发展，期间对跨中挠度、应变片读数、荷载值进行记录，并描绘裂缝的发展，并对跨中主裂缝进行宽度测量。



1,5,7－位移计；2－压力机；3－力传感器移计；
4－分配梁；6－应变片

图 4 静力受弯试验

1.3 立方体试块试验结果及分析

立方体抗压强度：

混凝土立方体抗压强度按照规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081－2002）[10] 中规定的公式计算：

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \times 0.95 \tag{1}$$

式中：f_{cc} 为混凝土立方体试件抗压强度，MPa，计算结果应精确值 0.1 MPa；F 为试件破坏荷载，N；A 为试件承压面积，mm^2。

本次试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 的非标准试块，采用 YA-3000 型压力机（图 5）。

立方体抗压强度及强度损失如表 2 所示。



图 5　压力机

表 2　冻融后混凝土试块抗压强度

混凝土类别	冻融次数 N	立方体抗压强度/MPa	相对抗压强度/%
普通混凝土	0	44.4	1.00
	50	39.1	0.88
	100	32.1	0.72
玄武岩纤维混凝土	0	48.1	1.00
	50	43.3	0.90
	100	37.5	0.78

分析上述抗压强度数据可以看出，冻融循环次数与混凝土的抗压强度有着紧密联系，无论是普通混凝土还是玄武岩纤维混凝土其抗压强度随着冻融次数的增多而不断减小。冻融 50 次后，普通混凝土的相对抗压强度为 88%，玄武岩纤维混凝土相对抗压强度为 90%；冻融 100 次后两种混凝土相对抗压强度曲线衰减速率均增大，混凝土相对抗压强度下降速率提升。两种类型混凝土的相对抗压强度下降趋势相似，但玄武岩纤维混凝土下降趋势要缓和一些，说明玄武岩纤维的掺入降低了混凝土抗压强度对于冻融循环的敏感性。

将表 2 中混凝土抗压强度的数据利用线性拟合，拟合出混凝土相对抗压强度与冻融次数 N 之间关系，拟合曲线相关数值见表 3，两种混凝土的拟合效果较好。

表 3　冻融后混凝土抗压强度与冻融次数的拟合

试件编号	拟合公式	决定系数 R^2
CC	$\frac{f_{cu}^{n}}{f_{cu}^{0}} = -0.003N + 1.02$	0.98
BF0.15	$\frac{f_{cu}^{n}}{f_{cu}^{0}} = -0.0028N + 1.02$	0.96

2　静力试验结果及分析

2.1　裂缝分布与破坏形态

1）CC1 试件梁：试件未出现裂缝前，试件未见明显变化。当荷载加载至 23 kN 时，在梁的纯弯段出现了首条竖向裂缝，裂缝宽度测量为 0.02 mm，随着荷载增大，初始裂缝缓慢向上延申，并且出现其他新裂缝。随着荷载继续增加，跨中竖向主裂缝不断向上加宽发展，斜裂缝以较缓于跨中裂缝的加宽速度向上延展。钢筋屈服后，梁的挠度迅速增加，且裂缝的宽度有明显增加。试件破坏时荷载为 180 kN，纯弯段主裂缝发展至宽度超过 1.5 mm，同时梁顶部出现数条横向裂缝，最终受压区混凝土被压碎。试件梁发生正截面适筋破坏。

2）BF1 试件梁：试验加载到 27 kN 时，在纯弯段区域产生首条 0.02 mm 的竖向裂缝；当加载到 175 kN 后，裂缝的长度基本不再延伸，但宽度仍然在持续加大；荷载加载至 190 kN 时，混凝土纯弯段顶部受压区出现横向裂缝，最终试件破坏。试件梁发生正截面适筋破坏。

3）CC2 试件梁：冻融 50 次后试件表面出现小部分不规则的砂浆脱落，观察到有些许冻融痕迹。试验加载到 22 kN 时，在跨中位置出现竖向裂缝。当荷载不断加大，主裂缝长度也随之变长，并且会伴随着斜裂缝的产生，当荷载至 174 kN 时，试件梁顶部出现横向裂纹，试件被破坏。试件梁发生正截面适筋破坏。

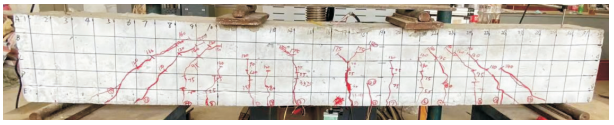
4）BF2 试件梁：冻融 50 次后玄武岩纤维梁的表面基本无变化，当荷载加至 26 kN 时，试件纯弯段出现首条竖向裂缝，当荷载增至 186 kN 时，试件的受压区出现裂缝，试件破坏。试件梁发生正截面适筋破坏。

5）CC3 试件梁：经历了 100 次冻融循环的普通混凝土梁表面出现了明显的冻融损伤，试件表面砂浆有明显剥落。当荷载到 20 kN 时，试件纯弯段出现首条裂缝，当荷载增至 161 kN 时，试件受压区出现横向裂缝，此时试件的钢筋还未屈服，而试件梁已被破坏。试件梁发生正截面超筋破坏表明：随着冻融次数的增加，原本设计的适筋梁会发生超筋破坏。主要原因：1）冻融后降低混凝土的抗压强度，导致梁的界限配筋率下降；2）冻融后混凝土表面损伤明显，降低了混凝土的截面面积，导致梁的配筋率提升。

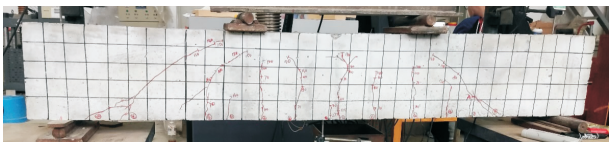
6）BF3 试件梁：冻融 100 次后的玄武岩纤维梁表面砂浆剥落，试件表面原有的孔洞变大。当荷载加至 23 kN 时试件纯弯段出现首条竖向裂缝，宽度为 0.02 mm，当荷载增加至 173 kN 时，试件梁纯弯段顶部出现横向裂缝，试件破坏。试件梁发生正截面适筋破坏。掺入纤维的混凝土梁在冻融 100 次后没有发生超筋破坏是因为玄武岩纤维的掺入不仅提升了梁的抗压强度，且对冻融损伤有一定的抵御作用，因此梁的截面损失也少于普通混凝土梁。



(a) 普通混凝土梁未冻融(试件 CC1)



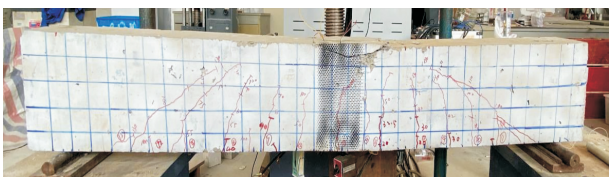
(b) 纤维混凝土梁未冻融(试件 BF1)



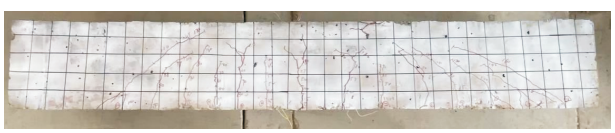
(c) 普通混凝土梁冻融 50 次(试件 CC2)



(d) 纤维混凝土梁冻融 50 次(试件 BF2)



(e) 普通混凝土梁冻融 100 次(试件 CC3)



(e) 纤维混凝土梁冻融 100 次(试件 BF3)

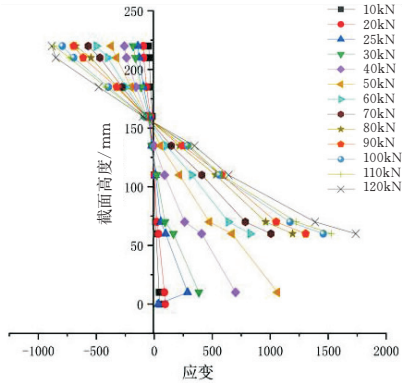
图 6 试件梁裂缝分布

2.2 试件梁的应变发展

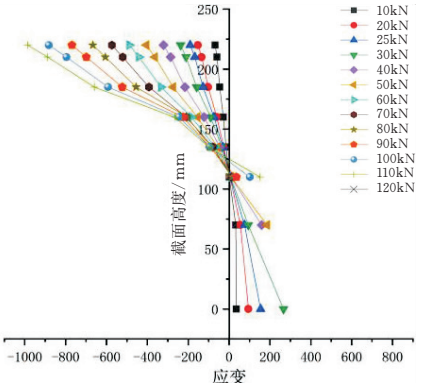
对比分析 CC1 梁和 BF1 梁的混凝土应变随截面高度变化的规律,如图 7a、b 所示。从图中可以看出,混凝土沿截面高度的应变分布呈线性,这说明玄武岩纤维混凝土梁在受弯过程中平截面假定仍然适用,并且可以看到随着荷载的不断增加,底部受拉区裂缝不断上沿,梁的中和轴不断上移。CC1 试件梁在荷载 20～25 kN 时底部应变发生了突变;BF1 试件梁在 25～30 kN 时底部应变发生了突变,且都在试件表面观察到了裂缝,观测到裂缝时的 CC1 梁荷载为 23 kN,BF1 梁荷载为 27.5 kN。之后随着荷载的增加,裂缝继续向上扩展,底部应变逐渐失效。掺入玄武岩纤维的试件梁,开裂荷载提升了 13%。

由图 7c、d 可以看到冻融 50 次后,CC2 试件在荷载加至 20～25 kN 时,底部应变发生突变,混凝土底部出现裂缝,观测到裂缝时的荷载为 22 kN;BF2 底部应变在 25～30 kN 时发生突变,观测到裂缝时的荷载为 26 kN。冻融 50 次后普通混凝土梁的开裂荷载由 23 kN 降低至 22 kN,玄武岩纤维混凝土的开裂荷载由 27 kN 降低至 26 kN。

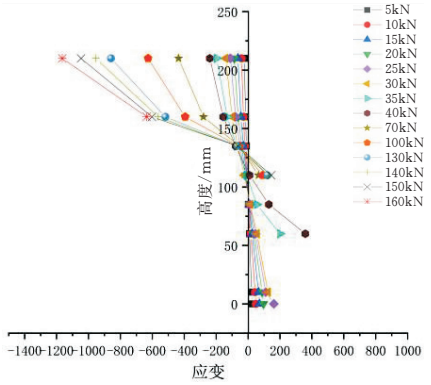
图 7e、f 为冻融 100 次后,不同荷载下试件梁的混凝土应变随截面高度的变化图。由图可以看出混凝土的应变随截面的分布大体呈现线性。试验时,CC3 底部应变在力值保持为 20 kN 时,发生突变;BF3 底部应变在 20～25 kN 时发生突变;在冻融 100 次后普通混凝土梁的开裂荷载由23 kN下降至 20 kN,下降了 13%;冻融 100 次后玄武岩纤维混凝土梁的开裂荷载由 26 kN 下降至 23 kN,下降了 11%;因此玄武岩纤维不仅提高了普通混凝土梁的开裂荷载;并且在冻融后抵御冻融损伤的效果也强于没有掺纤维的混凝土梁。



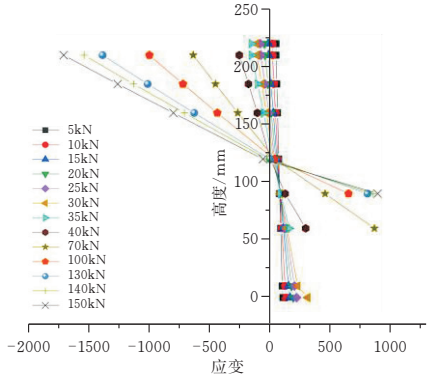
(a)试件 CC1



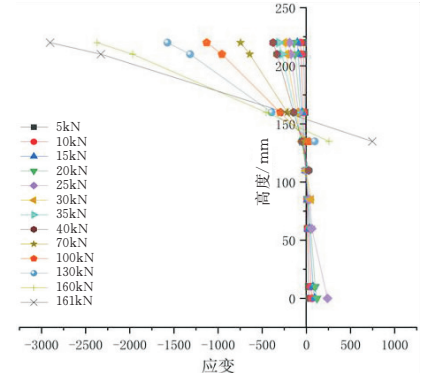
(b)试件 BF1



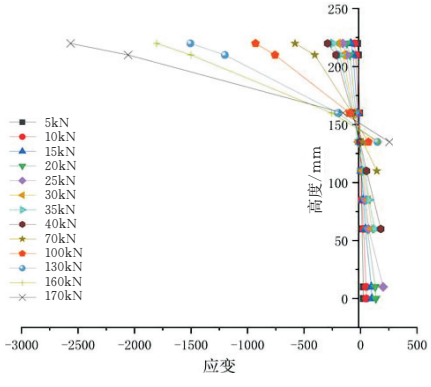
(c)试件 CC2



(d)试件 BF2



(e)试件 CC3



(f)试件 BF3

图 7　试件梁截面应变

2.3　试件梁的荷载-挠度

为消除支座影响，最终跨中挠度采用跨中位移计数据减去 2 边支座处位移计数据的平均值得到。

由图 8 可以看出，6 根试件梁在加载初期，其挠度随着荷载呈线性分布。待荷载加至接近极限荷载时，CC1、CC2、BF1、BF2、BF3 的曲线斜率减小较快，在荷载变化很小时，位移不断增大[8]；而 CC3 梁在达到极限荷载时，荷载快速下降，但位移仍不断增加。从试件梁的破坏形式来说，CC3 并没有出现其他试件梁那样具有延时性的屈服平台，而是没有预兆性的骤然下降[9]。

2.4　试件梁的荷载-钢筋应变

由图 9a 可以看出，在梁开裂前，受拉钢筋的应变随着荷载的增加呈线性增长；当荷载增至开裂荷

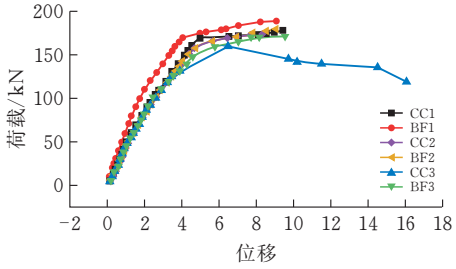
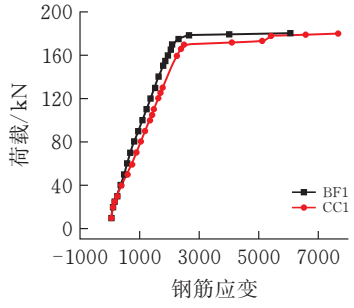
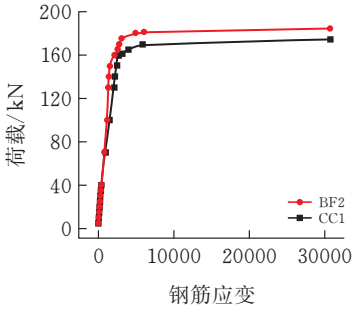


图 8　试件荷载-挠度

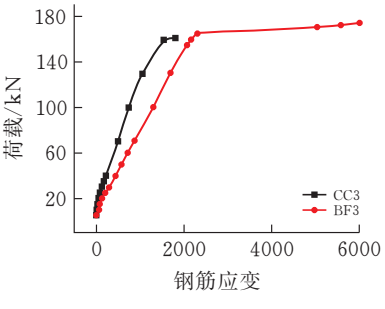
载时，受拉区部分混凝土失效，不再承受拉应力，出现应力重分布现象，钢筋应力增大，曲线斜率降低；钢筋屈服时，其应变会迅速增大，但荷载增幅很小，此时由于混凝土的底部受拉区失效高度持续变高，导致混凝土受压区不断减小，在荷载增量很小的情况下，试件梁的受压区混凝土应力持续递增，最终达到混凝土极限压应力，试件梁受压区出现横向裂缝，但钢筋应变仍在屈服平台内，简支梁发生破坏，这两根试件梁所发生的破坏形式都为正截面适筋破坏；CC1、BF1 梁的极限荷载分别为 180 kN、190 kN。掺入纤维后对于梁的极限承载力提高了 5%。



(a)试件 CC1、BF1



(b)试件 CC2、BF2



(c)试件 CC3、BF3

图 9　试件荷载-钢筋应变

图 9b 为试件梁冻融 50 次后的荷载—钢筋应变图，其曲线走势与没有冻融的试件梁相似，都有明显的屈服平台，所以冻融 50 次后的试件仍然为正截面适筋破坏；CC2、BF2 的极限荷载分别为 174 kN 和 186 kN。

从图 9c 可以看出，冻融 100 次后，BF2 有明显的屈服平台，而 CC2 钢筋还未达到屈服试件梁就已经破坏了，因此 CC2、BF2 的破坏形式为超筋破坏和适筋破坏。没有冻融的梁，在梁开裂的时候，曲线斜率降低；CC3、BF3 的极限荷载分别为 161 kN、173 kN，100 次冻融后掺入纤维的梁极限承载力提高了 7%；冻融后的试件相较于 CC1、BF1 分别降低了 10%、8%。玄武岩纤维的掺入提高了试件梁的极限承载力，同时降低了冻融后试件梁的损伤。

2.5 试件梁数据汇总

从表 4 中可以看到，冻融次数与试件梁的极限荷载和开裂荷载呈负相关，玄武岩纤维的掺入，增强了试件的抗弯性能，提高了试件的开裂荷载和极限荷载，并且减少冻融对于梁的损伤；

在经历了 100 次冻融循环后，原本设计的适筋梁发生了超筋破坏，由于玄武岩纤维会降低冻融带来的损伤，所以玄武岩纤维梁在经历 100 次冻融后仍然为适筋梁。

表 4 试件梁标志荷载

试件序号	冻融次数	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	破坏形式
CC1	0	23	180	适筋破坏
BF1	0	27	190	适筋破坏
CC2	50	22	174	适筋破坏
BF2	50	26	186	适筋破坏
CC3	100	20	161	超筋破坏
BF3	100	23	173	适筋破坏

2.6 界限配筋率理论分析

因为冻融后，有些梁试件的破坏形式发生了转变，下面对界限配筋率进行修正。规范[11]中的界限配筋率公式为：

$$\rho_b = \frac{\alpha_1 \xi_b f_c}{f_y} \tag{2}$$

本次主要考虑冻融后对于混凝土抗压强度的损伤，将式(1)带入式(2)得 CC 系列梁和 BF 系列梁得界限配筋率：

$$\rho_b^n = \frac{\alpha_1 \xi_b 28.22(-0.003N+1.02)}{f_y} \tag{3}$$

$$\rho_b^n = \frac{\alpha_1 \xi_b 30.56(-0.0028N+1.02)}{f_y} \tag{4}$$

计算出各试件的界限配筋率如表 5 所示。

从表 5 中可以看出，表中 CC3 未发生超筋破坏，而试验中 CC3 发生了超筋破坏，可能原因是本文的界限配筋率公式只考虑了冻融对于混凝土抗压强度的影响，未考虑冻融对于混凝土截面的损伤，冻融损伤减小了截面面积，因此会提高试件梁原本的配筋率，所以 CC3 梁试件配筋率提升了，有可能高于此时的界限配筋率。

表 5 试件梁破坏形态判别

试件编号	配筋率 ρ /%	冻融次数 N	ρ_b^n	$\rho > \rho_b^n$
CC1	1.61	0	2.70	否
CC2	1.61	50	2.35	否
CC3	1.61	100	1.99	否
BF1	1.61	0	2.93	否
BF2	1.61	50	2.57	否
BF3	1.61	100	2.03	否

3 结论

1)掺入玄武岩纤维的试件梁，在受弯过程中仍然符合平截面假定；经历过冻融循环后的试件梁在受弯过程中平截面假定仍然适用。

2)随着冻融循环次数的增加，试件梁表面出现不同程度的冻融痕迹，并伴随着试件表面的砂浆剥落；玄武岩纤维混凝土梁表面的剥落程度要小于普通混凝土梁。

3)所有试件梁的开裂荷载和极限荷载都随着冻融次数的增加而减小，但掺入玄武岩纤维的梁试件开裂荷载和极限荷载的下降速率小于普通梁试件；随着冻融循环次数的增加，冻融降低了混凝土的抗压强度和梁试件的截面面积，从而使得梁试件发生超筋破坏；玄武岩纤维的掺入抵御了一定的冻融损伤，提高了梁的界限配筋率，从而使得冻融后的梁仍然在适筋破坏范围内。考虑了冻融对于混凝土抗压强度的影响，重新修正了混凝土界限配筋率公式，实际试验中 CC3 发生了超筋破坏，不符合理论判断，分析原因：未考虑冻融循环对于混凝土截面面积的影响。

[参 考 文 献]

[1] 叶焕军. 玄武岩纤维混凝土梁受弯性能研究[D].哈尔滨：东北林业大学，2011.

[2] 郭容邑. 冻融环境下混凝土受弯构件的试验研究[D].扬州：扬州大学，2011.

[3] 曹大富，葛文杰，郭容邑，等.冻融循环作用后钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报，2014，35(06)：137-144.

[4] 曹大富，富立志，杨忠伟，等.冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J].建筑材料学报，2013，16(01)：17-23.

[5] 徐存东，黄嵩，李洪飞，等.盐冻作用下玄武岩纤维混凝土力学性能损伤研究[J].硅酸盐通报，2021，40(03)：812-820.
[6] 赵燕茹，高健，王磊，等.单面冻融下玄武岩纤维混凝土抗冻性能研究[J].混凝土，2020(04)：70-73.
[7] 谭智芳. 玄武岩纤维增韧钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[D].大连：大连理工大学，2009.
[8] 吴瑾，刘旭. AFSHIN Islamianbarough.冻融循环后再生粗骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报，2020，41(S1)：247-255.
[9] 杨璐，石旭武.钢筋混凝土梁塑性损伤模型的数值模拟[J].沈阳工业大学学报，2016，38(01)：97-101.
[10] 戎君明，陆建雯，姚燕，等.GB/T 5081-2002，《普通混凝土力学性能试验方法标准》[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
[11] 高文安. GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

Study on Flexural Capacity of Basalt Fiber Concrete Beams Under Freeze-Thaw Cycles

ZHANG Yuze, CHEN Yueshun, YI Huaishu, LI Chuanxiong

(*School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In order to study the influence of freezing-thawing cycles on the flexural properties of basalt fiber concrete, static flexural tests were carried out on ordinary concrete beams and basalt fiber concrete beams with different freezing-thawing times (0, 50, 100). The failure mode, ultimate load and cracking load, concrete section strain and reinforcement strain, mid-span deflection of the specimen beam are studied. Results: The cracking load and ultimate load of the specimen beam mixed with basalt fiber increased by 13% and 5% respectively. The cracking load and ultimate load of all specimen beams decrease with the increase of freezing-thawing times, but the decreasing rate of the specimen beams mixed with basalt fiber is smaller than that of ordinary concrete beams. The cracking load and ultimate load of basalt fiber concrete beam after 100 times of freezing-thawing decreased by 11% and 8%, respectively, while that of ordinary concrete beam decreased by 13% and 10%.After 100 times of freezing-thawing, the ordinary concrete beam has over-reinforcement failure, but the basalt fiber concrete beam is still suitable for reinforcement failure. It shows that the addition of basalt fiber reduces the damage caused by freeze-thaw cycle.

Keywords: basalt fiber; freeze-thaw cycle test; normal section bearing capacity; reinforced concrete beam

[责任编校：裴　琴]