[文章编号] 1003－4684(2025)02-0092-07

冻融循环下钢纤维混凝土梁受弯承载力

易怀书，陈月顺，张玉泽，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] 为了研究钢纤维混凝土梁在冻融循环后承载力的退化规律，选取 1.5 kg/m³钢纤维掺量的混凝土梁并分析其在经历有限次数的冻融循环后承载力的变化。将 C30(2C14)、C40(2C16)两种类型的钢纤维混凝土梁进行 50、100、150 次的冻融循环试验。通过对经历不同冻融循环次数的试验梁进行静载实验可以得到钢纤维混凝土梁冻融后的破坏形态和裂缝拓展情况以及跨中挠度、截面应变开裂荷载和极限受弯承载力的变化。试验结果表明：随着冻融循环次数的增加，开裂荷载总体呈降低趋势，极限荷载以及跨中挠度逐渐降低，并根据已有规范结合冻融循环对混凝土强度及尺寸的影响推导出钢纤维混凝土梁开裂荷载及极限荷载的计算模型，通过模型计算得到的理论值与试验值较为符合。

[关键词] 钢纤维混凝土梁；冻融循环试验；受弯承载力；开裂荷载
[中图分类号] TU528.572 [文献标识码] A

混凝土结构因其良好的性能已广泛应用于社会上的各大领域，但由于各种极端环境影响，混凝土结构的耐久性成为考验各大学者、专家的一大问题，而在这些极端环境中，冻融破坏日渐成为了其中不可忽视的一个因素。现阶段关于冻融环境对混凝土材料影响及纤维材料改善混凝土抗冻性及力学性能的研究已数不胜数，有关冻融循环对普通混凝土构件性能影响的研究也在逐渐上升。

牛荻涛[1]通过对不同掺量的钢纤维混凝土进行水冻与盐冻循环得到了 1.5％为最佳钢纤维掺量。郭容邑[2]，张文超[3]主要研究冻融循环对梁构件基本性能的影响，通过对试验梁进行冻融循环及受弯试验分析冻融循环次数对不同试件梁开裂荷载、极限荷载及刚度的影响。随着冻融次数的增加，构件基本性能(开裂荷载，极限荷载)下降，但混凝土强度越高的构件组在相同冻融循环次数下性能更好。曹大富[4]对不同强度不同配筋率的混凝土梁进行一定次数的冻融后的静力试验，通过在已有规范的基础上考虑冻融影响推导出构件梁发生超筋破坏的界限配筋率公式，开裂荷载和极限荷载仍可按现行结构设计规范计算。王方波[5]、关虓[6]、王宏伟[7]在混凝土冻融损伤模型结合有限元分析的基础上，推导出冻融循环后受弯构件受弯承载力的计算模型。魏延超[8]主要通过等效面积缩减法和 BP 神经网络进行冻融后构件梁承载力的计算和后期预测。RA Raju 等[9]研究混凝土类型、纤维含量和试件深度对纤维分布和取向的影响并通过抗弯试验结果得出结论：由于纤维的分布和方向的改善，自密实钢纤维混凝土梁比钢纤维混凝土梁具有更好的受弯性能。Carlos R C Rossi[10]研究混凝土和钢筋之间的粘结行为和钢筋在钢纤维混凝土(SFRC)的发展长度。结果表明，SFRC 的受弯极限荷载高于普通混凝土梁。

目前国内外主要研究还是集中在纤维混凝土抗冻性的研究，而对纤维混凝土构件冻融后相关性能的研究较少。因此本文选用不同强度等级及不同配筋率的钢纤维混凝土梁进行快速冻融试验，研究冻融后钢纤维混凝土梁承载力退化规律，在冻融环境(如我国东北地区)下对钢纤维构件的设计提供依据，对相关钢筋混凝土规范进行补充。

1 试验设计

1.1 试验材料与混凝土配合比

所用硅酸盐水泥品牌为华新堡垒，标号为 42.5，细骨料采用Ⅱ级配区的中沙，石子选用粒径 5～20 mm的碎石，钢纤维选用衡水某公司的剪切型钢纤维，性能指标如表 1 所示。钢纤维混凝土配合比如表 2 所示。

[收稿日期] 2023－01－22
[第一作者] 易怀书(1998－)，男，河南信阳人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为混凝土耐久性。

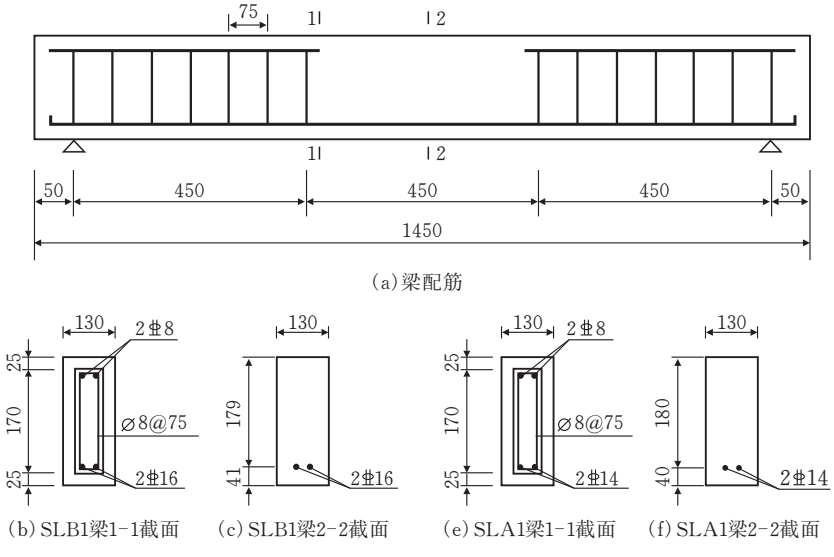
表 1　钢纤维性能指标

指标	剪切型
直径/mm	0.76
长度/mm	36
抗拉强度/MPa	615

表 2　钢纤维混凝土配合比

材料/单位	C30	C40
水/(kg·m^{-3})	165	185
水泥/(kg·m^{-3})	367	462
砂/(kg·m^{-3})	732	631
石头/(kg·m^{-3})	1100	1172
减水剂/%	0.6	0.3
钢纤维/(kg·m^{-3})	1.5	1.5

试验梁基本尺寸为：b(宽)=130 mm，h(高)=220 mm，L(长)=1500 mm，保护层厚度为 25 mm；纵筋采用 14 mm 与 16 mm 强度均为 HRB400 级的钢筋；架立筋均选用直径 10 mm，强度 HRB400 级的纵向钢筋，箍筋选用直径8 mm，强度等级为 HPB300 的钢筋。选择冻融循环次数为 0～200 次，钢纤维掺量选用 1.5%(牛荻涛等对五种掺量的钢纤维混凝土分别进行水冻及盐冻试验，通过对其基本性能的分析得到了 1.5%为最佳钢纤维掺量)。混凝土基体强度选择两种不同强度 C30、C40、C30 混凝土梁配筋率为 2C14，C40 混凝土梁配筋率为 2C16 。梁配筋如图 1 所示。



(a)梁配筋　(b) SLB1梁1-1截面　(c) SLB1梁2-2截面　(e) SLA1梁1-1截面　(f) SLA1梁2-2截面

图 1　梁配筋

1.2　试验方法

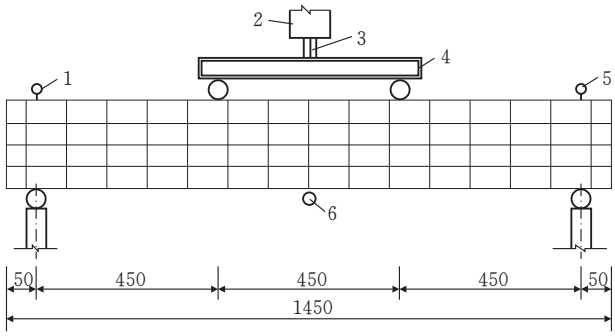
1.2.1　冻融实验　本次试验采用快冻法进行钢纤维混凝土梁冻融试验。本次实验需试件梁没于水中，预留约 4 mm 的水面高度，在冻融机中心需放置测温试块，一次冻融时间约为 4 h。试件梁分组如表 3 所示。

表 3　混凝土试件的数量分组

试件编号	混凝土强度	冻融/次	纤维掺量/%	配筋率/%
SLA1	C30	0	1.5	2C14
SLA2	C30	50	1.5	2C14
SLA3	C30	100	1.5	2C14
SLA4	C30	150	1.5	2C14
SLB1	C40	0	1.5	2C16
SLB2	C40	50	1.5	2C16
SLB3	C40	100	1.5	2C16
SLB4	C40	150	1.5	2C16

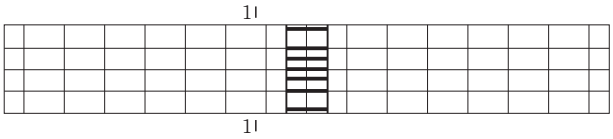
SLA 试件组与 SLB 试件组分别需浇筑 30 个立方体试块来测抗压、劈拉强度。

1.2.2　静载实验　本次实验加载分为预加载与正式加载，在正式加载前需要对试验梁进行预加载，本次预加载值设为构件预计开裂荷载的 50%，约 15 kN。正式加载采用分级加载制，试件开裂前，两类构件梁均设置为每 5 kN 一级的荷载，在试件开裂后，继续加载，SLA 系列构件梁每级荷载为 25 kN，SLB 系列梁每级荷载为 30 kN。加载实验如图 2 所示。试验梁纯弯段侧面沿梁高水平布置应变片如图 3 所示。

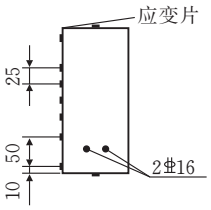


1，5，6—位移计；2—压力机；3—力传感器移计；4—分配梁

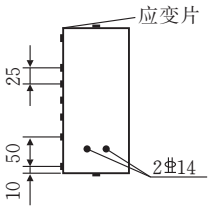
图 2　梁加载



(a)应变片



(b)1-1 SLA1梁截面



(c)1-1 SLB1梁截面

图 3 应变分布

2 实验结果与分析

2.1 试验现象

图 4 依次为 SLA 与 SLB 两种试验梁 0～150 次冻融循环外观，在冻融循环 50 次时，SLA1 实验梁与 SLB1 实验梁表面均无明显损伤痕迹，少量混凝土脱落，钢纤维无外漏现象。冻融循环 100 次时，外层混凝土开始剥落，骨料开始外漏，露出一部分小孔洞，SLA2 试验梁表面麻面更多，骨料外漏更严重。冻融循环 150 次，可以看出 SLA3 试验梁外层混凝土脱落更为严重，骨料外漏，掺入纤维的两组试件有部分钢纤维显露出来，试件表面呈麻面状。可以看出强度更高的 SLB 试验梁表层损伤较 SLA 试验梁更浅，说明钢纤维混凝土梁强度越高，他的抗冻性能也随之增强。



(a)SLA1



(b)SLA2



(c)SLA3



(d)SLA4



(e)SLB1



(f)SLB2



(h)SLB3



(g)SLB4

图 4 试验梁冻融损伤实验

图 5 为 0～150 次冻融循环下两种不同配筋率的钢纤维混凝土梁破坏形态及裂缝扩展状况。



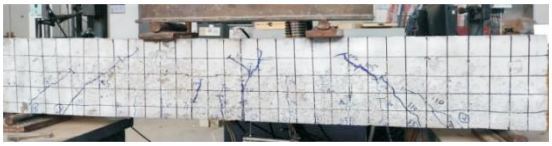
(a)SLA1(未冻融)



(b)SLA2(冻融 50)



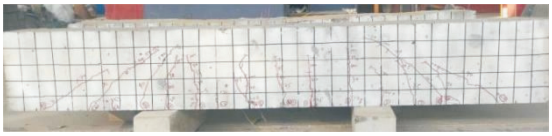
(c)SLA3(冻融 100)



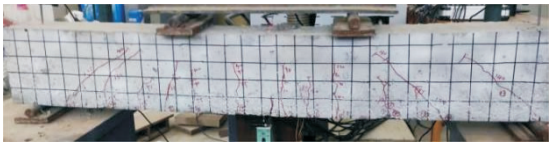
(d)SLA4(冻融 150)



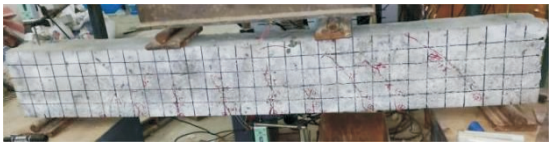
(e)SLB1(未冻融)



(f)SLB2(冻融 50)



(g)SLB3(冻融 100)



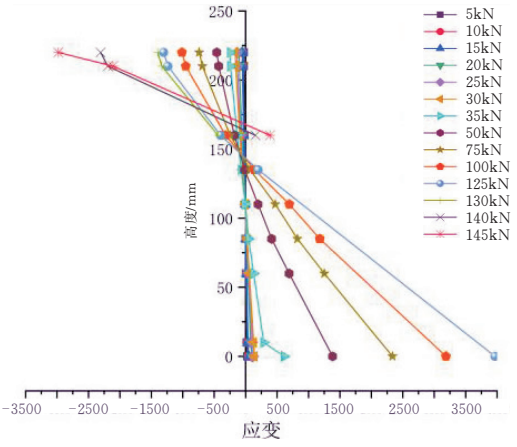
(h)SLB4(冻融 150)

图 5　冻融循环 0～200 次试验梁破坏形态

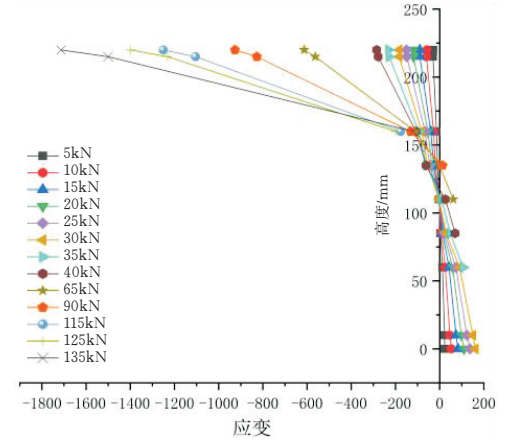
可以看出 SLA 和 SLB 系列共 8 根试验梁均为适筋破坏，两种类型的试验梁冻融后的裂缝扩展形态与未冻试验梁扩展形态相似。首先是试验梁底部应变发生突变，在纯弯段出现少量竖向裂缝，伴随着荷载的不断增加，梁体纯弯段底部裂缝持续增加，同时在梁体剪弯区出现一些斜裂缝，斜裂缝开始为竖向发展，随着荷载的增加开始斜向发展，随后钢筋开始屈服，纯弯段主裂缝扩张速度增大，此时纯弯段受压区混凝土应变迅速增大达到其极限压应变，梁构件纯弯段顶部混凝土压碎，混凝土梁宣告破坏。分析两组构件梁的裂缝拓展状况得出：在冻融循环 0～150 次过程中，试验梁基体混凝土强度不断下降，混凝土梁开裂荷载降低，但因为钢纤维的掺入能约束混凝土的横向变形，抑制了裂缝的出现[11]，因此部分试验梁开裂荷载未有明显降低，如试验梁 SLA3、SLA4 在 20 kN 加载 35 kN 出现裂缝，SLB4、SLB5 在 25 kN 加载至 30 kN 时出现裂缝。

2.2　截面应变分析

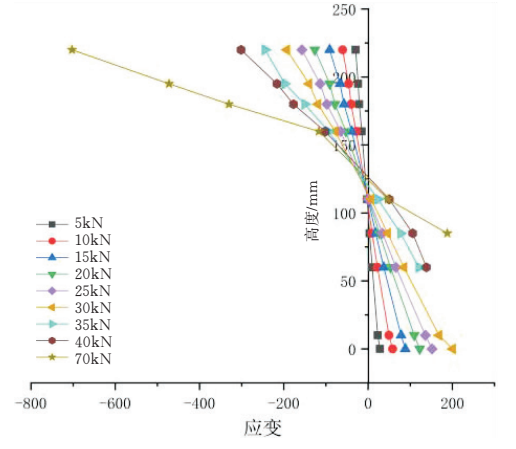
图 6 为两种类型的试验梁在不同冻融次数下混凝土应变沿截面高度的变化规律，在 0～150 次冻融阶段，混凝土受压区高度逐渐增大。伴随着荷载的增加，中和轴也在逐渐上移，当受拉区混凝土到达其极限拉应变时，受拉区混凝土出现塑性变形，底部应变会发生突变呈折线状如 SLA1 梁，当混凝土梁开裂(荷载从 30 kN 加载至 35 kN)时，混凝土底部应变发生突变，应变图呈折线状，而受压区混凝土仍处于弹性阶段，应变仍沿截面呈直线分布。所以两组试验梁在冻融循环后，截面应变基本符合平截面假定。



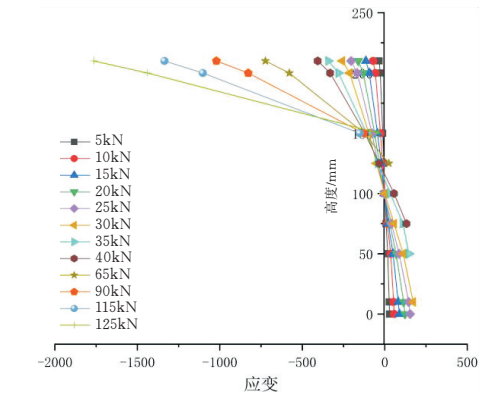
(a)SLA1(未冻融)



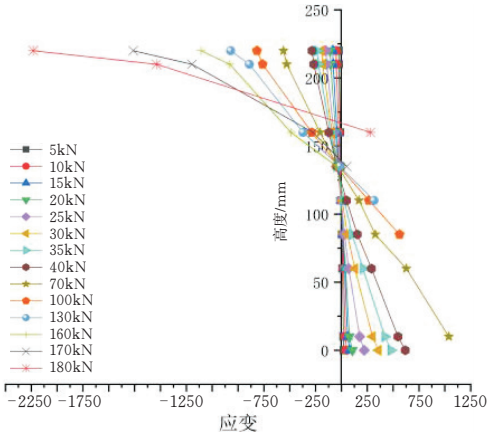
(b)SLA1(冻融 50 次)



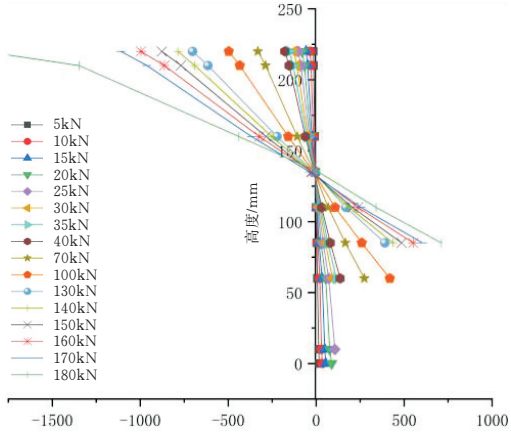
(c)SLA1(冻融 100 次)



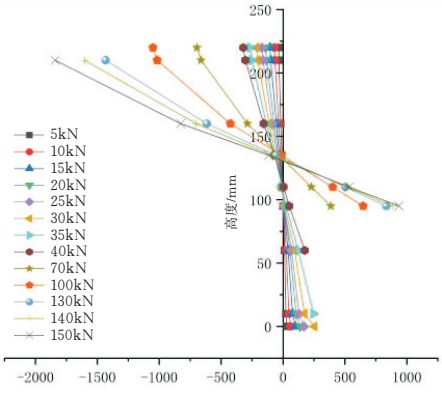
(d)SLA1(冻融 150 次)



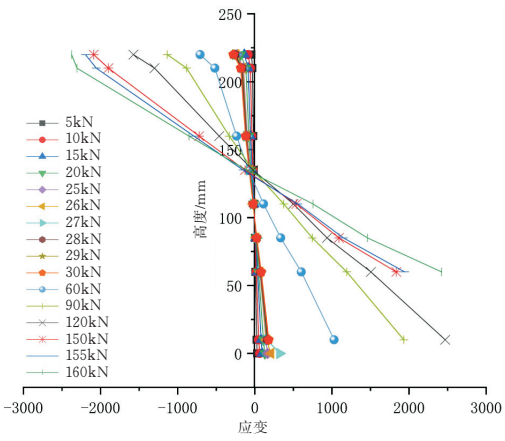
(e)SLB1(未冻融)



(f)SLB1(冻融 50 次)



(g)SLB1(冻融 100 次)

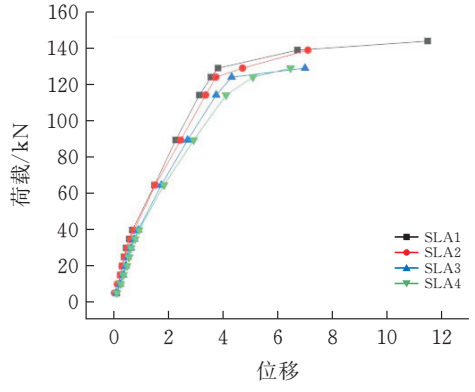


(h)SLB1(冻融 150 次)

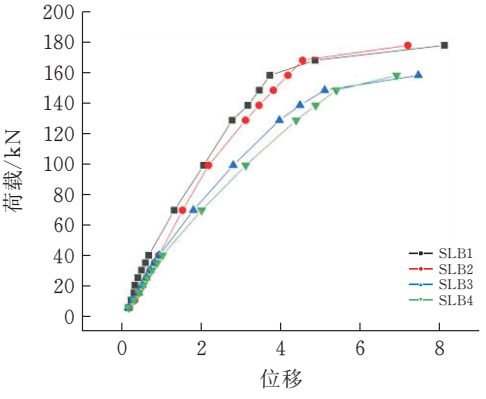
图 6 截面应变分布

2.3 荷载位移分析

从图 7 可以看出两种类型的梁都经历了三个受力阶段，分别是梁体未裂阶段，混凝土开裂带裂缝工作至钢筋屈服前的裂缝阶段以及钢筋屈服至梁体破坏阶段。在开裂未裂阶段各冻融循环次数试验梁的荷载挠度曲线呈线性上升，各试验梁在相同荷载下挠度差别不大，但在混凝土开裂后，各阶段试验梁挠度曲线斜率开始下降。在截面破坏阶段可以明显看出各试验梁挠度明显增加，同时随着冻融循环次数的增加试验梁的跨中位移也在逐渐减小，表示冻融次数增加，试验梁塑性降低[12]。



(a)SLA 荷载位移



(b)SLB 荷载位移

图 7 梁荷载位移

2.4　钢筋应变对比分析

随钢筋配筋率的提高，可以看出配筋率更高的 SLB 试件组钢筋应变逐渐变缓，由荷载钢筋应变对比(图 8)可知：在试件开裂前期两组实验梁钢筋应变变化均无明显差异，而在钢筋屈服后，配筋率高的 SLB 纵筋应变变化小于 SLA 钢筋，提高了 SLB 组试验梁的抗弯承载力。

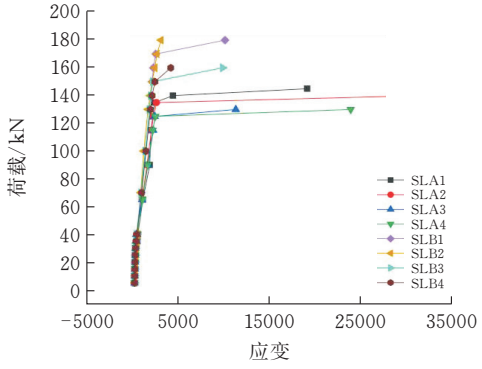


图 8　钢筋应变对比

3　开裂荷载及极限荷载分析

通过伴随试块的抗压强度及劈拉强度试验可以得到不同冻融实验阶段实验值通过公式(1)与(2)可以得到其轴心抗压强度及轴心抗拉强度，如表 4 所示。

$$f_c(n) = 0.88\alpha_1\alpha_2 f_{cu}(n) \tag{1}$$

$$f_t(n) = \frac{2F(n)}{\pi dl} \tag{2}$$

式中：$f_c(n)$ 为冻融后混凝土轴心抗压强度，$f_{cu}(n)$ 为冻融后钢纤维混凝土立方体抗压强度；α_1 取 0.76，α_2 取 2，$f_t(n)$ 为冻融后钢纤维混凝土抗拉强度；$F(n)$ 为冻融后劈拉试验中试块的破坏荷载，d，l 为立方体试块边长。

表 4　抗压强度及劈拉强度实验值

试件编号	F_{cu}(n)	F_{ts}(n)	F_c(n)	F_t(n)
SLA1	35.89	6.06	24	3.86
SLA2	34.69	5.89	23.2	3.75
SLA3	32.15	5.07	21.5	3.23
SLA4	30.38	5.02	20.32	3.2
SLB1	44.6	6.34	29.83	4.04
SLB2	43.36	6.25	29	3.98
SLB3	37.83	5.34	25.3	3.4
SLB4	36.06	5.26	24.12	3.35

钢纤维混凝土梁开裂弯矩可按照过镇海开裂荷载计算模型同时考虑标准抗拉强度的降低及截面高度的损失得到

$$M_{fcr}(n) = 0.256 f_t(n) b h_0(n)^2 \tag{3}$$

式中：$f_t(n)$ 为冻融后试验梁基体混凝土标准抗拉强度，$b(n)$，$h_0(n)$ 分别为冻融后梁截面宽度以及有效高度。

表 5 为钢纤维混凝土梁开裂荷载实验值与理论值的对比，经过计算可以得到理论值与实验值比值的平均值与方差分别为 0.98 与 0.012，说明理论值与实测值符合较好。

表 5　开裂荷载

试件编号	$Ffcrt$	$Ffcre$	$Ffcrt/Ffcre$
SLA1	28.92	28.50	1.01
SLA2	28.49	25.00	1.14
SLA3	24.34	22.50	1.08
SLA4	23.98	21.00	1.14
SLB1	27.63	32.50	0.85
SLB2	26.84	30.00	0.89
SLB3	23.12	26.00	0.89
SLB4	22.90	25.50	0.9

由《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ/T 465—2019[13](以下简称《标准》)已有承载力计算公式，考虑冻融因素的影响得到如下的冻融循环后的钢纤维混凝土梁正截面受弯承载力计算(图 9)及公式：

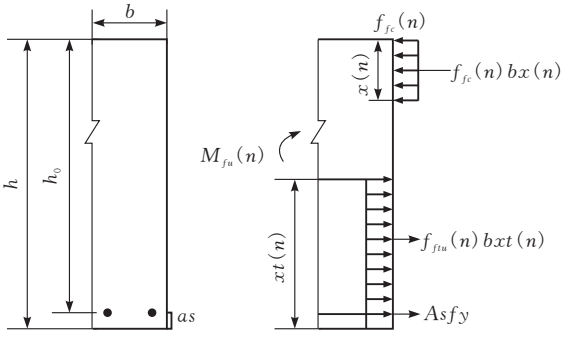


图 9　计算简图

$$f_c(n)bx(n) = f_y A_s + f_{ftu}(n)bx_t(n) \tag{4}$$

$$M_{fu}(n) = f_c(n)bx(n)(h_0 - \frac{x(n)}{2}) - f_{ftu}bx_t(n)(\frac{x_t(n)}{2} - a_s) \tag{5}$$

式中：$M_{fu}(n)$ 为冻融循环后钢纤维混凝土梁极限弯矩；$f_c(n)$ 和 $f_{ftu}(n)$ 为冻融后钢纤维钢筋混凝土实测抗压强度(N/mm^2)及受拉区等效矩形应力图的混凝土抗拉强度(N/mm^2)；$x(n)$ 和 $x_t(n)$ 冻融后等效受压区高度与等效受拉区高度；f_y 与 A_s 分别为纵向受拉钢筋屈服强度设计值和纵向受拉钢筋截面面积；a_s 为受拉钢筋合力点至受拉边缘的距离，$x_t(n)$ 可按下式计算：

$$x_t(n) = h - x_n/\beta_1 \tag{6}$$

$$f_{ftu}(n) = f_t(n)\beta_{tb}(n)\lambda_f \tag{7}$$

式中：$f_t(n)$ 和 $\beta_{tb}(n)$ 分别为冻融循环后混凝土抗拉强度实测值与钢纤维对受拉区钢纤维凝土抗拉强度影响系数(通过试验确定)；λ_f 为钢纤维含量特

征值。

$$\lambda_f = p_f l_f / d_f \tag{8}$$

其中，p_f为钢纤维体积掺率，l_f/d_f为钢纤维长径比。根据试验梁静载试验得到试验弯矩结合式(4)和(5)推导出β_{tb}

$$x(n) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \tag{9}$$

式中：

$$A = 0.125 f_c(n) b(n) \tag{10}$$

$$B = 0.5 f_c(n) b(n) h(n) - 0.625 f_y A_s \tag{11}$$

$$C = f_y A_s (\frac{h(n)}{2} - a_s) - M_{fue} \tag{12}$$

式中：M_{fue}为极限弯矩实测值，将$x(n)$带入式(4)中得到$f_{ftu}(n)$，并通过式(7)得到$\beta_{tb}(n)$，经过计算统计得到$\beta_{tb}(n)$取 1.4。

极限荷载计算如式(13)

$$F_u(n) = \frac{M_{fu}(n)}{l} \times 2 \tag{13}$$

表 6 为钢纤维混凝土梁极限荷载实验值与理论值的对比。

表 6 极限承载力

试件编号	*Fut*	*Fue*	*Fut/Fue*
SLA1	138.25	140.00	0.99
SLA2	138.73	137.50	1.01
SLA3	126.10	127.50	0.99
SLA4	117.28	125.00	0.94
SLB1	180.94	175.50	1.03
SLB2	179.08	172.50	1.04
SLB3	165.15	157.50	1.05
SLB4	160.35	155.00	1.03

通过计算得到理论值与试验值比值的平均值与方差分别为 1.01 与 0.0011，理论值与实测值符合较好。

4 结论

1)基体混凝土强度高的 SLB 系列试验梁冻融后表面破坏形态优于 SLA 试验梁。随着冻融次数的增加导致混凝土强度下降，混凝土梁开裂荷载降低，但因为钢纤维的掺入约束混凝土的横向变形，抑制了裂缝的出现，两种类型的试验梁开裂荷载没有明显的下降。同时因为冻融的影响两种类型的试验梁的受压区均有上升。

2)钢纤维混凝土梁在经历 0～150 次冻融循环后，SLA 与 SLB 试验梁均存在不同程度的劣化，但 SLB(强度及配筋率高)系列试验梁极限荷载明显高于 SLA 的试验梁。同时，随着冻融次数的增加，两类试验梁塑性降低导致梁最大跨中挠度不断减小，在纵筋应变对比上可以看出在试件开裂前期两组实验梁钢筋应变变化均无明显差异，而在钢筋屈服后，配筋率高的 SLB 纵筋应变变化小于 SLA 钢筋，提高了 SLB 组试验梁的抗弯承载力。

3)依据已有的纤维混凝土梁承载力规范考虑冻融循坏次数对纤维混凝土梁强度及承载力的影响推导出新的计算模型，且试验值与理论值较为符合。

[参 考 文 献]

[1] 牛荻涛，白敏，姜磊，等.钢纤维混凝土抗冻性能研究[J].硅酸盐通报，2013，32(10)：2084-2089.

[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] 张文超，段安，李志远.冻融环境下混凝土梁受弯性能研究[J].结构设计与施工技术，2014，20(04)：42-45.

[4] 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.

[5] 王方波.冻融损伤钢筋混凝土梁正截面受弯承载力研究[D].西安：西安建筑科技大学，2015.

[6] 关虓. 冻融环境钢筋混凝土受弯构件的损伤分析与承载力研究[D].西安：西安建筑科技大学，2015.

[7] 王宏伟.冻融环境下混凝土受弯构件的计算模式研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[8] 魏延超. 冻融环境下混凝土梁计算模式及后期性能预测研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.

[9] 陈升平，鲍威. 冻融循环下不同纤维混凝土损伤模型研究[J]. 混凝土与水泥品，2016(01)：58-61.

[10] RAJU RA，LIM S，KAGEYAMA T，et al. Effect of concrete flow on the flexural behavior of fiber reinforced self-compacting concrete beams[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute，2018，40(02)：1189-1194.

[11] ROSSI，CARLOS RC，OLIVEIRA，et al. Development length and bond behavior of steel bars in steel fiber-reinforced concrete in flexural test.[J]. ASCE，2020，32(01)：1-9.

[12] 关虓，牛荻涛，李强，等. 气冻气融作用下钢筋混凝土梁抗弯承载力试验研究[J]. 建筑结构，2018，48(22)：62-66.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 465-2019《钢纤维混凝土结构设计标准》[附条文说明][D].北京：中国建筑工业出版社，2019.

Study on Flexural Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams under Freeze-Thaw Cycles

YI Huaishu, CHEN Yueshun, ZHANG Yuze, LI Chuanxiong

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

Abstract: In order to study the degradation law of the bearing capacity of steel fiber reinforced concrete beams after freeze-thaw cycles, a concrete beam with steel fiber content of 1.5kg/m^3 was selected and its bearing capacity changes after a finite number of freeze-thaw cycles were analyzed. Two types of steel fiber concrete beams, C30 (2C14) and C40(2C16), were subjected to 50, 100 and 150 freeze-thaw cycles. Through the static load experiments on the experimental beams undergoing different freeze-thaw cycles, the failure forms and crack expansion of steel fiber reinforced concrete beams after freeze-thaw can be obtained, as well as the changes of mid-span deflection, section strain cracking load and ultimate flexural capacity. The results of the static load test show that with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the cracking load tends to decrease, and the ultimate load and mid-span deflection gradually decrease. According to the existing specifications and the influence of freeze-thaw cycles on the strength and size of concrete, a new calculation model is derived, and the theoretical values obtained by the model are in good agreement with the experimental values.

Keywords: steel fiber reinforced concrete beam; freeze-thaw cycle test; flexural capacity; cracking load

[责任编校：裴　琴]

(上接第 41 页)

Online Signature Authentication Algorithm Based on PCM

YAO Ying, JIN Huazhong

(*School of Computer Science, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430086, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that the fuzzy C-means algorithm (FCM) clustering effect is poor due to outliers in online signatures, an online signature authentication algorithm based on possible C-means (PCM) is proposed. First, the sampling points of the signature are analyzed by PCM clustering, and the sampling points of the signature are coded into the probability value of the subspace. Then, the extracted membership features are used for dynamic time warping (DTW) and the matching path is obtained. Finally, we use a variety of distances to measure the similarity between signature features, further mining the difference between the absolute numerical features and shape distribution features between signatures. The experiment is conducted on the SUSIG dataset of the public database. When the global threshold is used, an equal error rate of 2.62% can be obtained, which is about 27% lower than the traditional FCM method.

Keywords: signature authentication; cluster analysis; FCM; PCM; dynamic time warping

[责任编校：裴　琴]