

文章编号:1007-9629(2023)09-1031-08

# 冻融循环下废弃纤维再生混凝土与 钢筋的黏结性能

刘 昱, 周静海\*, 吴 迪, 康天蓓, 于杭琳  
(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳, 110168)

**摘要:**首先通过冻融循环试验,研究冻融循环次数、再生骨料取代率、废弃纤维体积分数对再生混凝土与钢筋黏结性能的影响.其次从能量守恒与耗散的角度分析黏结性能损伤机理.最后基于损伤和强度劣化理论建立了黏结-滑移模型.结果表明:废弃纤维再生混凝土与钢筋的黏结性能随着冻融循环次数和再生骨料取代率的增大而降低;在再生混凝土中掺入废弃纤维可以显著提升黏结性能;当废弃纤维体积分数为 0.12% 时,黏结强度提升了 11.35%;建立的黏结-滑移模型较好地表征了黏结强度与相对抗压强度之间的关系.

**关键词:**再生混凝土;废弃纤维;黏结性能;冻融循环

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.011

## Bond Behavior between Waste Fiber-Recycled Concrete and Reinforcement under Freeze-Thaw Cycles

LIU Yu, ZHOU Jinghai\*, WU Di, KANG Tianbei, YU Hanglin

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Firstly, the effects of freeze-thaw cycles, replacement rate of recycled aggregates, and volume fraction of waste fibers on bond behavior between recycled concrete and reinforcement were studied under freeze-thaw cycle test. Secondly, the bond damage mechanism was analyzed from the perspective of energy conservation and dissipation. Finally, the bond-slip model was established based on the damage and strength degradation theory. The results show that the bond performance between waste fiber-recycled concrete and reinforcement becomes poor with increasing freeze-thaw cycles and replacement rate of recycled aggregates. The proper amount of recycled fiber is beneficial to the bond behavior between recycled concrete and reinforcement after freeze-thaw cycles, and the bond strength is improved by 11.35% when the volume fraction of recycled fibers is 0.12%. The proposed bond-slip model can better characterize the relationship between bond strength and relative compressive strength.

**Key words:** recycled concrete; waste fiber; bond behavior; freeze-thaw cycle

2021 年中国混凝土年产量约为 32.9 亿 m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>, 同时也产生了大量的建筑垃圾.采用建筑垃圾制备再生混凝土可以有效降低其对自然环境的影响<sup>[2]</sup>.此外,2021 年中国化纤年产量约为 6 708.5 万 t<sup>[1]</sup>.废弃

纤维与再生混凝土的有机结合,可以提升再生混凝土的力学性能及耐久性能<sup>[3]</sup>,对于“碳达峰”“碳中和”战略目标的实现具有重要的现实意义<sup>[4-5]</sup>.

黏结性能对于再生混凝土结构的安全性能和耐

收稿日期:2022-10-29; 修订日期:2022-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108235,51678374);辽宁省教育厅青年基金资助项目(lnqn202003);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2019011);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102341511)

第一作者:刘 昱(1989—),男,河北宽城人,沈阳建筑大学博士生.E-mail:liuyu@stu.sjzu.edu.cn

通讯作者:周静海(1965—),男,黑龙江尚志人,沈阳建筑大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhoujinghai@sjzu.edu.cn

久性能至关重要.肖建庄等<sup>[6]</sup>研究了再生骨料取代率对再生混凝土与钢筋之间黏结性能的影响,结果表明,当再生骨料取代率为50%、100%时,黏结强度分别降低了12%、6%,并基于试验结果建立了再生混凝土与钢筋间的黏结-滑移关系模型.林红威等<sup>[7-9]</sup>研究表明,加入聚丙烯纤维,混凝土与钢筋之间的黏结强度可提升12.9%~18.2%.曹芙波等<sup>[10]</sup>通过冻融条件下的梁式试验,发现每冻融循环50次,黏结应力降低7%.张广泰等<sup>[11]</sup>进行了聚丙烯纤维混凝土的冻融循环试验,分析了纤维混凝土的劣化损伤机理,建立了纤维混凝土与钢筋的黏结强度损伤模型.目前考虑环境因素对黏结滑移性能的影响研究较少,采用废弃纤维提升黏结滑移性能的研究也亟待开展.

本文研究了冻融循环次数( $N$ )、再生骨料取代率( $w_{RA}$ )和废弃纤维体积分数( $\varphi_{RF}$ )对废弃纤维再生混凝土(WFRC)与钢筋黏结性能的影响,并从能量守恒与耗散的角度分析了黏结性能退化机理.此外,基于损伤力学和强度劣化理论,以冻融损伤后的相对

抗压强度为基础,建立了WFRC与钢筋的黏结强度损伤模型.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料为河砂,细度模数2.8,表观密度2 610 kg/m<sup>3</sup>;天然骨料(NA)选取天然碎石,再生骨料(RA)取自废弃混凝土板,原始强度C40,性能指标见表1;纤维取自废弃地毯,材质为丙纶,长度18~20 mm,直径2 mm;钢筋选取HRB400钢筋,直径10 mm.

### 1.2 配合比及试件制备

混凝土配制强度C40,水灰比<sup>1)</sup>0.5,在普通混凝土(NC)配合比的基础上,以再生骨料取代率 $w_{RA}$ 和废弃纤维体积分数 $\varphi_{RF}$ 为试验变量,设置试验组.试件编号方式如下:RC50代表再生骨料取代率为50%的再生混凝土;WFRC50-12代表再生骨料取代率为50%,废弃纤维体积分数为0.12%的再生混凝土.试件用水量参考文献[3],具体配合比见表2.

表1 粗骨料性能指标

Table 1 Performances of coarse aggregates

Type	Gradation/mm	Apparent density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Bulk density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Water absorption(by mass)/%	Crushing index(by mass)/%
NA	5-20	2 730	1 850	1.12	6.4
RA	5-20	2 460	1 275	4.36	17.0

表2 试件配合比

Table 2 Mix proportions of specimens

Specimen	$w_{RA}/\%$	$\varphi_{RF}/\%$	Amount of material/(kg·m <sup>-3</sup> )				
			Cement	Sand	NA	RA	Water
NC	0	0	390	709	1 156	0	195
RC50	50	0	390	709	578	578	219
RC100	100	0	390	709	0	1 156	243
WFRC50-12	50	0.12	390	709	578	578	219
WFRC50-24	50	0.24	390	709	578	578	219

试验采用二次投料法:先投放水泥和细骨料,充分搅拌,再加入废弃纤维和水,搅拌均匀后,加入粗骨料,拌和均匀后装模.试件为边长100 mm的立方体.钢筋黏结长度为 $5d$ ( $d$ 为钢筋直径),黏结区域设置在钢筋中段,见图1.未黏结部分用PVC管套住,防止局部应力影响试验结果.

### 1.3 试验方法

冻融循环试验采用快冻法<sup>[12]</sup>,每冻融25次,擦干试件表面水分后称量1次试件质量,并进行相应力学

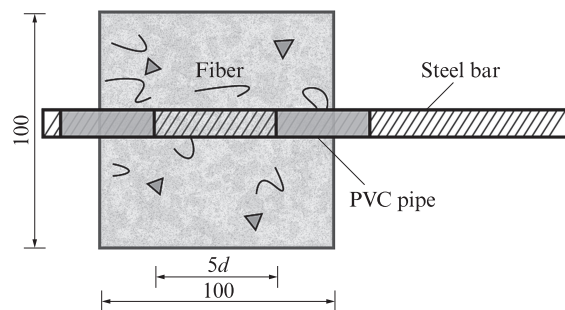


图1 中心拔出试件示意图

Fig. 1 Sketch of center pull-out specimen(size: mm)

1)文中涉及的水灰比、取代率等除特别说明外均为质量比或质量分数.

性能试验.中心拔出试验仪器为WAW-600C型万能试验机,将试件加载端钢筋朝下依次穿过荷载传感器和中心开孔的自制钢架,试件的加载端和自由端分别布设位移计.试验时,荷载传感器采集荷载,位移计同步测量荷载产生的滑移量,采集仪自动记录.采用等位移加载,加载速度 $0.3\text{ mm/min}$ <sup>[12-13]</sup>.每冻融50次进行1次中心拔出试验,结果取3块试件的平均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融循环对质量损失率的影响

汇总各冻融周期的试件质量数据,计算各试件质量损失率随冻融循环次数 $N$ 的变化,结果见图2.由图2可见,各曲线发展趋势相同.混凝土的冻融破坏是一个由表及里的发展过程.当冻融循环次数小于25次时,试件质量增加.此时的冻融损伤仅作用于试件表面,剥落的砂浆质量小于微裂纹与孔隙相互贯通的吸水量,由于再生骨料的高吸水率,表现为再生骨料取代率越大,质量增加越明显.随着冻融循环次数的增加,曲线迅速上升,质量损失率显著增加,表明冻融损伤向试件内部发展.再生骨料取代率越大,内部进入的水分越多,冻结膨胀力越大,破坏越严重,混凝土质量损失率越大.文献[14]也得出了相同的结论.而废弃纤维的加入,可以阻塞微裂纹,减少水分的进入,减轻冻融作用对再生混凝土的破坏.

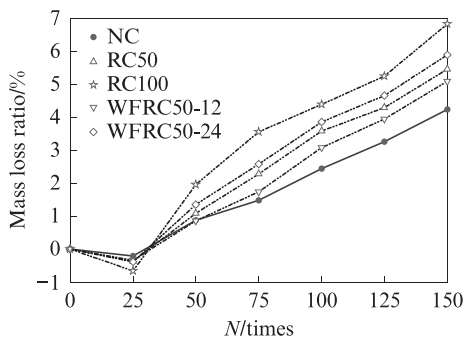


图2 冻融循环对试件质量损失率的影响

Fig. 2 Influence of freeze-thaw cycles on mass loss ratio of specimens

### 2.2 冻融循环对抗压强度的影响

对经历不同冻融周期的立方体试件进行抗压强度试验,绘制抗压强度随冻融循环次数的变化曲线,见图3.由图3可见,各试件抗压强度均随着冻融循环次数的增加而降低.冻融循环150次后,试件NC、RC50、RC100、WFRC50-12和WFRC50-24的抗压强度较冻融前分别降低了42.97%、50.49%、61.70%、40.42%、46.50%.这表明相同冻融循环次数下,再生骨料取代率越大,试件抗压强度越低.这是

因为:再生骨料在制备之初,可能存在初始损伤<sup>[15]</sup>,导致试件原始强度降低;此外,再生混凝土内部界面过渡区更为复杂,薄弱界面相对较多,经历冻融循环后,再生混凝土内部的微裂纹迅速发展,在承受荷载时更容易破坏<sup>[16]</sup>.骨料取代率越大,原始裂纹越多,试件抗压强度降低越明显.而废弃纤维的加入,能够延缓微裂纹的发展和贯通,使试件抗压强度有所提升.

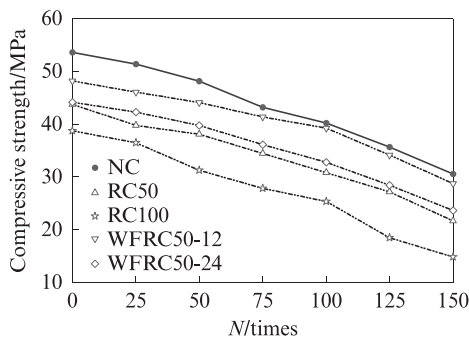


图3 冻融循环对各试件抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of freeze-thaw cycles on compressive strength of specimens

### 2.3 冻融损伤机理

WFRC的冻融损伤是一个复杂的物理过程.其破坏由外向内发展,升温时,水分通过微裂纹渗透到混凝土内部,达到饱和;降温时,在正负温差作用下,混凝土内部的水分冻结膨胀.冻融循环不断进行,渗透压及膨胀压反复作用,相当于重复的加载、卸载.再生骨料可能伴随一定的初始微裂纹.重复的加载、卸载导致微裂纹相互扩展,逐渐形成宏观裂纹,宏观裂纹相互贯通,最终导致再生混凝土破坏.因此,冻融循环可以看作再生混凝土的疲劳破坏<sup>[17]</sup>.

从材料层面看,废弃纤维在混凝土内部均匀分布,且废弃纤维的方向具有随机性,可以增强各相材料间的黏结性,使再生混凝土结构更加密实,阻断再生混凝土内部的毛细孔道,延缓水分的渗透;同时,废弃纤维的絮状结构,可以优化再生混凝土的孔隙结构,减少有害孔数量<sup>[3]</sup>,起到引气剂的作用,从而使试件抗冻性提高.

从细微观层面看,废弃纤维能够抑制再生混凝土的早期开裂,延缓再生混凝土基体的破坏,吸收因冻结而产生的膨胀力,减少新裂纹的产生.随着冻融损伤的加深,再生混凝土内部逐渐出现裂纹,而横跨在裂纹处的废弃纤维,可以限制裂纹的进一步扩展,延缓裂纹间的相互贯通,进一步降低冻融损伤的破坏程度.采用VHX-1000超景深三维显微镜,对破坏后的WFRC进行扫描,结果见图4.图4验证了前述分析的正确性.

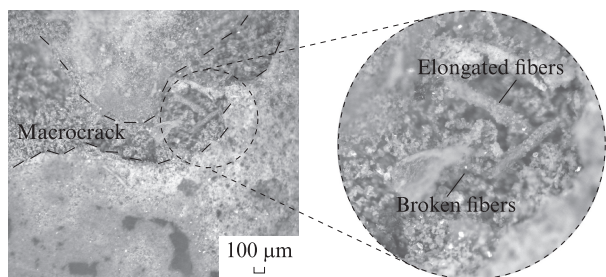


图4 WFRC超景深三维显微扫描

Fig. 4 3D micro scanning of WFRC in ultra-depth of field

## 2.4 冻融循环对极限黏结强度的影响

中心拔出试验过程中发现,各组试件均出现劈裂-拔出破坏,即:钢筋部分被拔出,试件表面产生贯通裂纹,但仍具有完整性.假设黏结应力均匀分布,可按式(1)计算试件黏结应力 $\tau$ .

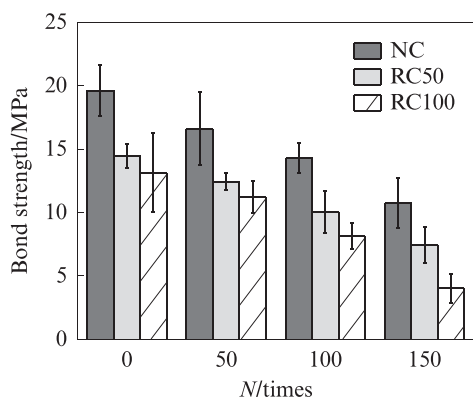
$$\tau = \frac{P}{\pi d l_a} \quad (1)$$

式中: $P$ 为拔出荷载,kN; $l_a$ 为黏结锚固长度,mm.

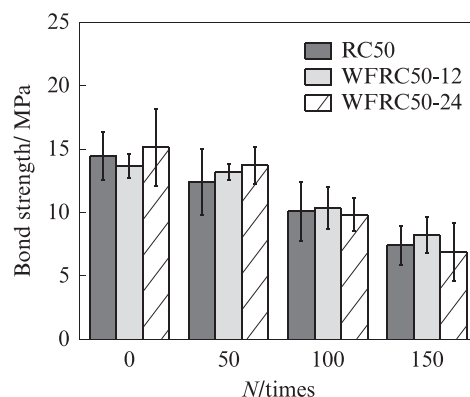
对各试件的黏结强度进行计算,得到图5.由图5可以发现,随着冻融循环次数的增加,各试件极限黏结强度均逐渐降低.由图5(a)可知,相同冻融循环次数下,再生骨料取代率越大,试件黏结强度越小.再生骨料的使用,引入了新老砂浆界面过渡区(ITZ),该区域材料性能最为薄弱<sup>[15]</sup>.相比于普通混凝土NC,在冻

融循环作用下,再生混凝土承受载荷时更容易破坏.经历150次冻融循环后,试件NC、RC50和RC100的黏结强度损失率分别为45.24%、48.79%、69.41%.试件NC和RC50的黏结强度损失率之差为3.55%,在整个冻融循环过程中,试件RC50黏结强度始终为试件NC黏结强度的70.00%左右,可见,适量的再生骨料可以满足寒冷地区普通工程的耐久性要求.

图5(b)给出了废弃纤维体积分数对试件黏结强度的影响.由图5(b)可见:经历150次冻融循环后,试件RC50、WFRC50-12和WFRC50-24的黏结强度较冻融前分别损失了48.79%、39.63%、54.56%;相比于试件RC50,试件WFRC50-12经历150次冻融循环后,黏结强度增加了11.35%,试件WFRC50-24则降低了7.03%.可见,适量的废弃纤维对再生混凝土的黏结性能起积极作用.搭接在界面处的废弃纤维,可以提升再生混凝土的抗拉性能,以抵抗钢筋挤压混凝土产生的拉应力,防止试件突然劈裂.过量的纤维作用则相反:一方面在混凝土拌和过程中,过量纤维不易分散,降低了拌和物的均质性;另一方面,纤维对黏结性能的提升是被动的,界面处的纤维若过于集中,胶凝材料则势必较少,试件的荷载承受能力反而降低.



(a) Different RA replacement rates



(b) Different volume fractions of waste fibers

图5 冻融循环对各试件黏结强度的影响

Fig. 5 Influence of freeze-thaw cycles on bond strength of specimens

## 2.5 冻融循环对黏结-滑移曲线的影响

图6(a)为冻融试验开始前试件的黏结-滑移曲线.由图6(a)可见,各曲线具有相同的变化趋势,再生骨料取代率越大,黏结应力越低,这与文献[18-19]的结论一致.黏结-滑移曲线上升段的斜率,表示黏结刚度,可以反映试件抵抗变形的能力.再生骨料的加入,降低了试件的黏结刚度,试件RC50、RC100较试件NC的黏结刚度分别下降了20.64%、30.69%.

加入废弃纤维后,再生混凝土的黏结刚度有所提升,试件WFRC50-12的黏结刚度较RC50提升了36.22%.可见,适量的废弃纤维,对再生混凝土的性能起到了一定的积极作用.

图6(b)为冻融循环150次后试件的黏结-滑移曲线.由图6(b)可见,各试件黏结应力明显降低,并且再生骨料取代率越大,曲线越平坦.说明经历冻融循环后,混凝土结构变得疏松、开裂,黏结性能损伤明显.

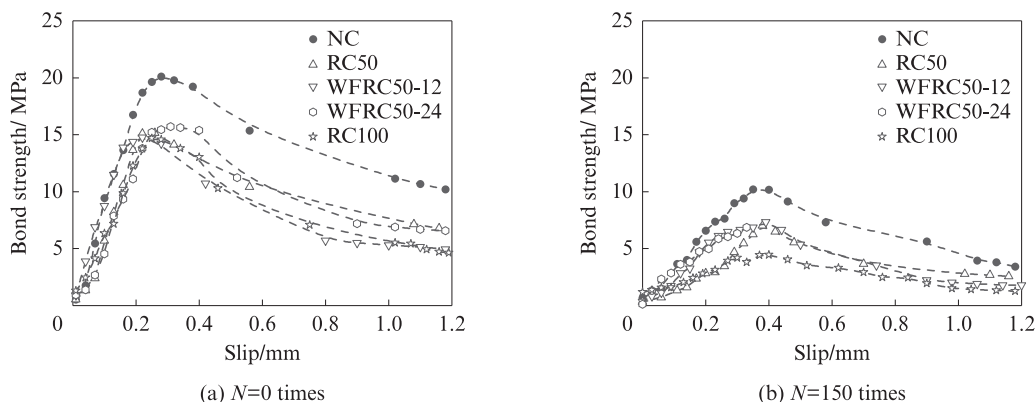


图6 冻融循环对黏结-滑移曲线的影响

Fig. 6 Influence of freeze-thaw cycles on bond-slip curves

## 2.6 黏结-滑移曲线的能量分析

由图6可见,试件的黏结-滑移曲线大致分为3个阶段:微滑移阶段、塑性滑移阶段和破坏阶段.钢筋的拔出过程,其实质是荷载所做的功引起再生混凝土与钢筋黏结界面的变形破坏,可以看作动态的能量转化过程.下面从能量守恒与耗散的角度进行分析.

(1)微滑移阶段.该阶段钢筋自由端尚未出现滑移,黏结力主要由化学胶着力提供,黏结-滑移曲线呈线性增长.界面出现可恢复的微小滑移,界面发生弹性变形.根据非平衡态热力学理论,荷载所做的功全部转化为界面的弹性变形能,此时界面处于热力学平衡稳定状态<sup>[20]</sup>.

(2)塑性滑移阶段.随着荷载的增加,钢筋自由端出现滑移,此时黏结力为摩擦力和机械咬合力,黏结-滑移曲线呈非线性增长.界面发生不可逆的塑性变形,混凝土内部出现微裂纹,微裂纹相互贯通、发展形成微表面.微表面的形成需要消耗能量,微滑移阶段存储的弹性变形能,具有可逆性,部分以表面能的形式耗散.此阶段的界面热力学状态已经开始改变,荷载所做的功逐步转化为塑性变形能<sup>[21]</sup>,存储的弹性变形能开始耗散,随着界面损伤的加剧,塑性变形能、表面能逐渐增加.此时的界面转变为热力学平衡亚稳定状态.

(3)破坏阶段.荷载继续增加,达到峰值荷载,即界面的热力学平衡临界状态.此时黏结力由摩擦力主导,界面内部积聚的大量微裂纹逐渐发展为宏观裂纹.当荷载增加到某一定值时,试件破坏,黏结力迅速下降.此时,界面内能不断减小,内部积聚的能量大量释放.剩余的弹性变形能,除少量转化为塑性变形能和耗散的表面能外,大部分转化为电磁辐射和声发射,这部分能量以辐射能的形式瞬间释放<sup>[22]</sup>.

可见,钢筋的拔出过程,对应界面内能的转化.试件从受力之初到逐渐破坏,旧的能量平衡被打破,但能量始终趋向平衡状态,为了形成新的平衡,多余的能量予以转化、释放.不同荷载对应的能量转化方式不同:峰值荷载之前,能量耗散相对缓慢,能量多以弹性变形能和塑性变形能的形式存储在界面内部;峰值荷载以后,界面的热力学平衡状态被打破,能量耗散增大,大部分存储的能量迅速释放,试件破坏.冻融循环作用加速了能量的转化过程,增加了表面能的耗散,降低了能量储存的阈值,试件破坏后,辐射能较冻融前减少.再生骨料在处理过程中,已经受到初始损伤,存在微裂纹.因此,再生混凝土与钢筋的界面在遭受变形破坏时,所需能量低于NC,再生混凝土取代率越大,所需能量越小.加入废弃纤维后,再生混凝土的抗冻性能得到提升;另外,在受力过程中,废弃纤维可以吸收一部分能量,但并非废弃纤维体积分数越大,能量吸收越多.而是主要取决于再生混凝土中的纤维分散是否良好.纤维的絮状结构导致过多的纤维不易分散、相互缠绕,能量吸收效果反而降低,这也与试验结果相吻合.

## 3 黏结强度损伤模型

基于再生混凝土材料的复杂性,影响其黏结性能的因素较多,不同学者通过试验得到的再生混凝土黏结强度也多呈现一定的离散性,很难建立统一的黏结强度模型.Weibull分布能够以很少的样本,对冻融循环下的纤维混凝土与钢筋的黏结强度试验结果做出可靠的预测<sup>[23]</sup>.基于此,采用基于概率统计理论的Weibull分布来描述WFRC材料的损伤.

首先以相对抗压强度 $P_R(N)$ 为指标,评价WFRC的冻融损伤程度.

$$P_R(N) = \frac{f_c(N)}{f_{c0}} \quad (2)$$

式中:  $f_c(N)$  为冻融损伤后的抗压强度, MPa;  $f_{c0}$  为初始抗压强度, MPa.

基于损伤力学, 建立损伤度  $D(N)$  与相对抗压强度的关系.

$$D(N) = \frac{f_{c0} - f_c(N)}{f_{c0}} = 1 - P_R(N) \quad (3)$$

假设 WFR 的损伤失效概率服从两参数的 Weibull 分布, 则其累积分布函数  $F(N)$  可表示为:

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为比例参数,  $\alpha > 0$ ;  $\beta$  为形状参数,  $\beta > 0$ .

其概率密度函数  $f(N)$  可表示为:

$$f(N) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta} \quad (5)$$

当 WFR 的损伤演化方程符合 Weibull 分布时, 则有:

$$D(N) = F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta} \quad (6)$$

采用相对抗压强度  $P_R(N)$  来评估 WFR 材料的损伤, 将式(3)代入式(6), 则有:

$$P_R(N) = e^{-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta} \quad (7)$$

以相对黏结强度  $T_R$  为指标, 评价 WFR 的黏结应力损伤程度.

$$T_R = \frac{\tau(N)}{\tau_0} \quad (8)$$

式中:  $\tau(N)$  为冻融损伤后的黏结强度, MPa;  $\tau_0$  为初始黏结强度, MPa.

由试验可知, 冻融循环次数越多, WFR 与钢筋的黏结强度损失率越大. 冻融  $N$  次到  $(N + \Delta N)$  次的黏结强度损失率可表示为:

$$\frac{\tau(N) - \tau(N + \Delta N)}{\tau(N)} = k\Delta N \quad (9)$$

式中:  $k$  为单位冻融循环次数的黏结强度损失率,  $k > 0$ .

将式(9)变换后进行积分, 代入式(8)可得:

$$T_R = \frac{\tau(N)}{\tau_0} = e^{(-kN)} \quad (10)$$

式(10)满足边界条件:  $N = 0$  时,  $T_R = 1$ . 将式(10)恒等变换, 可得:

$$N = -\frac{\ln\left(\frac{\tau(N)}{\tau_0}\right)}{k} = -\frac{\ln T_R}{k} \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)中, 则有:

$$P_R(N) = e^{-\left(\frac{-\ln T_R}{k\alpha}\right)^\beta} \quad (12)$$

将式(12)进行恒等变换, 可得:

$$T_R = e^{-k\alpha \sqrt[\beta]{\ln\left(\frac{1}{P_R(N)}\right)}} \quad (13)$$

式(13)即为三参数黏结强度损伤模型, 该模型的基础为 Weibull 分布连续损伤理论<sup>[23]</sup>与黏结强度劣化理论<sup>[11]</sup>. 其中, 参数  $\alpha$ 、 $\beta$  分别是  $w_{RA}$  和  $\varphi_{RF}$  的关系函数, 具体关系如下:

$$\alpha = (2.21 - 0.04w_{RA} - 0.68w_{RA}^2) \times (1 + 4.50\varphi_{RF} - 20.28\varphi_{RF}^2) \quad (14)$$

$$\beta = (1.14 - 0.11w_{RA} - 0.18w_{RA}^2) \times (1 - 0.28\varphi_{RF} - 3.67\varphi_{RF}^2) \quad (15)$$

式中:  $w_{RA}$  取值范围 0%~100%;  $\varphi_{RF}$  取值范围 0%~0.24%.

利用试验数据进行拟合, 各试件特征参数见表 3. 由表 3 可以看出, 单位冻融循环次数黏结强度损失率  $k$  随着  $w_{RA}$  的增加而增加;  $\varphi_{RF} = 0.12\%$  时,  $k$  减小,  $\varphi_{RF} = 0.24\%$  时,  $k$  增大, 与试验结果吻合.

表 3 各试件特征参数  
Table 3 Characteristic parameters of specimens

Specimen	$k$	$\alpha$	$\beta$	Correlation coefficient
NC	0.45	2.21	1.14	0.95
RC50	0.49	2.02	1.04	0.97
RC100	0.69	1.49	0.85	0.97
WFR50-12	0.40	2.52	0.95	0.91
WFR50-24	0.55	1.84	0.75	0.97

将本文数据和文献[24-25]中数据代入式(13)~(15), 得到相对黏结强度的理论值与试验值, 见图 7. 由图 7 可以看出, 相对黏结强度的理论值与试验值具有较低的离散性, 说明本文黏结强度损伤模型可用于计算冻融条件下再生混凝土与钢筋的黏结强度.

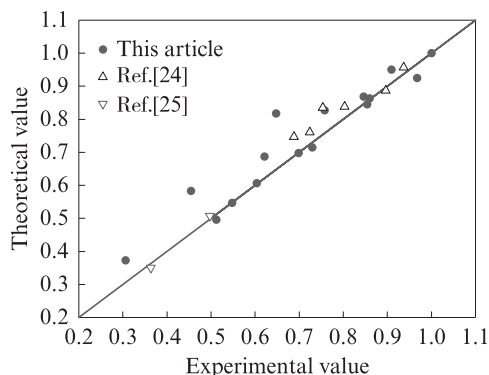


图 7 相对黏结强度理论值与试验值的比较

Fig. 7 Comparison between theoretical value and experimental value of relative bond strength

## 4 结论

(1)冻融循环下,随着再生骨料取代率的增加,再生混凝土与钢筋的黏结性能降低;当废弃纤维体积分数为0.12%时,再生混凝土与钢筋的黏结强度提升了11.35%。

(2)分析了不同试验阶段钢筋拔出的能量变化动态规律,揭示了不同再生骨料取代率和废弃纤维体积分数与能量耗散的关系。

(3)基于损伤力学,结合黏结强度的劣化规律,建立了冻融循环后的黏结强度损伤模型,该模型可用于冻融损伤后再生混凝土与钢筋的黏结强度预测。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2022-02-28)[2023-10-29]. [http://www.gov.cn/shuju/2022-02/28/content\\_5676015.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-02/28/content_5676015.htm).  
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of China in 2021 [R/OL]. (2022-02-28)[2023-10-29]. [http://www.gov.cn/shuju/2022-02/28/content\\_5676015.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-02/28/content_5676015.htm).
- [2] 肖建庄. 再生混凝土创新研究与进展[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-3.  
XIAO Jianzhuang. Innovative research and development of recycled aggregate concrete [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2020: 1-3. (in Chinese)
- [3] 康天蓓, 刘昱, 周静海, 等. 干湿循环下废弃纤维再生混凝土氯离子传输性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4): 389-394.  
KANG Tianbei, LIU Yu, ZHOU Jinghai, et al. Chloride transport performance of waste fiber recycled concrete under dry-wet cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4): 389-394. (in Chinese)
- [4] LIU Y, ZHOU J H, WU D, et al. Bond behavior of recycled fiber recycled concrete with reinforcement after freeze-thaw cycles[J]. Crystals, 2021, 11(12): 1506.
- [5] 鲍玖文, 李树国, 张鹏, 等. 轴压重复荷载作用后再生混凝土毛细吸水性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 71-76.  
BAO Jiuwen, LI Shuguo, ZHANG Peng, et al. Capillary water absorption of recycled aggregate concrete after repeated axial compressive loading[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 71-76. (in Chinese)
- [6] 肖建庄, 李丕胜, 秦薇. 再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 13-16.  
XIAO Jianzhuang, LI Pisheng, QIN Wei. Study on bond-slip between recycled concrete and rebars [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2006, 34(1): 13-16. (in Chinese)
- [7] 林红威, 赵羽习. 变形钢筋与混凝土黏结性能研究综述[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 11-27.  
LIN Hongwei, ZHAO Yuxi. Bond behavior between concrete and deformed steel bar: A review[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 11-27. (in Chinese)
- [8] HUANG L, CHI Y, XU L H, et al. Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 77-92.
- [9] 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, 2015, 45(2): 10-14.  
ZHU Chenfei, LIU Xiaojun, LI Wenzhe, et al. Study of freeze-thaw durability and damage model of hybrid fiber concrete [J]. Industrial Construction, 2015, 45(2): 10-14. (in Chinese)
- [10] 曹芙波, 卢志明, 王晨霞, 等. 冻融循环后钢筋与再生混凝土黏结性能梁式试验有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 1099-1110.  
CAO Fubo, LU Zhiming, WANG Chenxia, et al. Finite element analysis of bond behavior between steel bars and recycled concrete after freeze-thaw cycles in the beam-type test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2019, 35(6): 1099-1110. (in Chinese)
- [11] 张广泰, 李瑞祥, 刘诗拓, 等. 冷热循环下纤维混凝土与高强钢筋间粘结强度损伤模型[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1193-1204.  
ZHANG Guangtai, LI Ruixiang, LIU Shituo, et al. Bond strength damage model between fiber reinforced concrete and high-strength steel bars under thermal-cold cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1193-1204. (in Chinese)
- [12] 冀晓东, 宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 70-74.  
JI Xiaodong, SONG Yupu. Mechanism of bond degradation between concrete and plain steel bar after freezing and thawing[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 70-74. (in Chinese)
- [13] LI Z H, DENG Z H, YANG H F, et al. Bond behavior between recycled aggregate concrete and deformed rebar after freeze-thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118805.
- [14] 王晨霞, 张铎, 曹芙波, 等. 冻融循环后再生混凝土的力学性能及损伤模型研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(5): 199-207.  
WANG Chenxia, ZHANG Duo, CAO Fubo, et al. Research on mechanical properties and damage of recycled concrete after being subjected to freeze-thaw cycles[J]. Industrial Construction, 2022, 52(5): 199-207. (in Chinese)
- [15] 李秋义, 李云霞, 朱崇绩, 等. 再生混凝土骨料强化技术研究[J]. 混凝土, 2006(1): 74-77.  
LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji, et al. Strengthening technique of recycled concrete aggregate[J]. Concrete, 2006(1): 74-77. (in Chinese)
- [16] 陈宇良, 姜锐, 陈宗平, 等. 钢纤维再生混凝土的直剪力学性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(9): 984-990.  
CHEN Yuliang, JIANG Rui, CHEN Zongping, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete under direct shear[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9): 984-990. (in Chinese)
- [17] 陈升平, 王佳雯. 冻融环境下纤维混凝土损伤模型研究[J]. 混

- 凝土, 2017(10):58-61, 67.
- CHEN Shengping, WANG Jiawen. Damage model of fiber reinforced concrete under freezing and thawing environment[J]. Concrete, 2017(10):58-61, 67. (in Chinese)
- [18] 周静海, 刘昱, 康天蓓, 等. 废弃纤维再生混凝土黏结性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(5):66-73.
- ZHOU Jinghai, LIU Yu, KANG Tianbei, et al. Test on bonding behavior of waste fiber recycled concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5):66-73. (in Chinese)
- [19] 赵庭钰. 废弃纤维再生混凝土的钢筋粘结滑移性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2020.
- ZHAO Tingyu. Study on bond slip behavior of steel bars in recycled fiber reinforced concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020. (in Chinese)
- [20] 王博, 白国良, 代慧娟, 等. 再生混凝土与钢筋粘结滑移性能的试验研究及力学分析[J]. 工程力学, 2013, 30(10):54-64.
- WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan, et al. Experimental and mechanical analysis of bond-slip performance between recycled concrete and rebar[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10):54-64. (in Chinese)
- [21] 牛建刚, 边钰, 许尧, 等. 冻融环境下钢筋与再生混凝土粘结性能及界面损伤研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4):132-137.
- NIU Jiangang, BIAN Yu, XU Yao, et al. Bond performance and interface damage between reinforcement and recycled concrete under freezing-thawing environment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4):132-137. (in Chinese)
- [22] 王博, 白国良. 钢筋与再生混凝土黏结破坏过程的能量机制研究[J]. 混凝土, 2011(2):32-35.
- WANG Bo, BAI Guoliang. Energy mechanism of the bonding failure process between the rebars and the recycled concrete[J]. Concrete, 2011(2):32-35. (in Chinese)
- [23] 乔宏霞, 郭向柯, 朱彬荣. 三参数 Weibull 分布的多因素作用下混凝土加速寿命试验[J]. 材料导报, 2019, 33(4):639-643.
- QIAO Hongxia, GUO Xiangke, ZHU Binrong. Accelerated life test of concrete under multiple factors based on three-parameter Weibull distribution [J]. Materials Reports, 2019, 33(4):639-643. (in Chinese)
- [24] XU S H, LI A B, WANG H. Bond properties for deformed steel bar in frost-damaged concrete under monotonic and reversed cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:344-358.
- [25] 曹芙波. 冻融循环后再生混凝土力学性能及与钢筋黏结试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- CAO Fubo. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete and bond-slip between steel rebars and concrete after freeze-thaw cycles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)

(上接第 1030 页)

- 分及水化产物演变的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(10):53-58.
- XU Linglin, YANG Ken, MU Fanyuan, et al. Effect of cellulose ether on the water and hydration products evolution of calcium sulfoaluminate cement paste [J]. Materials Review, 2022, 36(10):53-58. (in Chinese)
- [20] YUAN Q, XIE Z L, YAO H, et al. Hydration, mechanical properties, and microstructural characteristics of cement pastes with different ionic polyacrylamides: A comparative study [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56:104763.
- [21] 季节, 王颖翔, 王琴, 等. 改性废旧橡胶粉对水泥胶砂性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):679-686.
- JI Jie, WANG Haoxiang, WANG Qin, et al. Effect of modified rubber powder on performances of cement mortar [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 24(4):679-686. (in Chinese)
- [22] 唐陈希.  $C_3S$  与  $\beta-C_2S$  碳化养护的影响因素及机理研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021.
- TANG Chenxi. Investigation of influencing factors and its mechanisms on the carbonation curing process of  $C_2S$  and  $\beta-C_2S$  [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [23] 王敏. 高性能水泥基材料的性能及机理研究[D]. 兰州:西北工业大学, 2018.
- WANG Min. Study on properties and mechanism of high performance cement-based materials [D]. Lanzhou: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)