

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.010



# 冻融下预湿方式对塑钢纤维轻骨料混凝土与 钢筋粘结性能的影响

牛建刚<sup>1</sup>, 谢承斌<sup>1</sup>, 郝吉<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 北京工业大学 土木工程学院, 北京 100124)

**摘要:**通过常压预湿和加压预湿两种方式对烧结页岩陶粒轻骨料进行处理,探究不同冻融循环次数下,塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋的粘结性能,着重分析了两种预湿方式下试件力学性能、粘结强度、荷载-滑移曲线、粘结韧性的变化规律。试验结果表明:加压预湿试件的力学性能、极限粘结强度低于常压预湿试件,且加压预湿试件的破坏形态均为劈裂破坏;加压预湿试件的极限粘结韧性  $A_u$  随冻融循环次数增加而减小,残余粘结韧性  $A_{80}$ 、 $A_{60}$  下降较为平缓,但常压预湿试件粘结韧性均高于加压预湿试件。建立了冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土剩余粘结强度与抗压强度之间退化模型和粘结韧性退化模型,模型计算值与试验值吻合较好。

**关键词:**常压预湿;加压预湿;混凝土;粘结性能;冻融环境

**中图分类号:**TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0066-07

## Bonding properties of plastic fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel bar under freezing-thawing

Niu Jiangan<sup>1</sup>, Xie Chengbin<sup>1</sup>, Hao Ji<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

**Abstract:** The sintered shale ceramsite lightweight aggregate was treated by the atmospheric pre-wetting and pressurized pre-wetting. The bonding properties of the lightweight aggregate concrete and the steel bar under different freezing and thaw cycles were investigated. The mechanical properties, bond strength, load-slip curve and bond toughness of the specimen under pre-wetting were analyzed. The experimental results show that the mechanical properties and ultimate bonding strength of the preheated wetting specimen were lower than those of the pre-wetting specimen, and the failure modes of the pre-wetting specimen were all fractured. The ultimate bond toughness of  $A_u$  decreases with the increase of freeze-thaw cycle, and the residual toughness of  $A_{80}$  and  $A_{60}$  is relatively flat, but the bond toughness of the pre-wetting specimen is higher than that of pressurized pre-wetting specimen. Under the freezing and thawing environment, the bond toughness degradation model and the degenerative model of the residual strength

收稿日期:2017-09-18

基金项目:国家自然科学基金(51368042)

作者简介:牛建刚(1976-),男,教授,博士,主要从事混凝土耐久性及建筑可靠度研究, E-mail: niujiangan@imust.edu.cn。

Received: 2017-09-18

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (No. 51368042)

Author brief: Niu Jiangan(1976-), professor, PhD, main research interests: durability of concrete & building reliability, E-mail: niujiangan@imust.edu.cn.

and compressive strength of the steel fiber lightweight aggregate concrete were established. The calculated values of the model were in good agreement with the experimental values.

**Keywords:** atmospheric prewetting; pressurized prewetting; concrete; bonding properties; freezing thawing environment

中国北方严寒及寒冷地区的混凝土结构主要受冻融侵蚀。严重的冻融损伤可致使混凝土构件无法继续承担荷载,缩短了混凝土结构的使用寿命。钢筋与混凝土的粘结性能是影响构件结构力学性能退化的主要原因之一<sup>[1]</sup>。因此,在严寒地区工程中,对混凝土粘结性能研究至关重要<sup>[2]</sup>。

轻骨料混凝土密度小,混凝土结构自重较轻,表面多孔,可增强混凝土的抗冻性,但轻骨料混凝土强度低,易发生脆性破坏<sup>[3-4]</sup>。为了解决这一缺陷,在水泥基体中掺加纤维是最有效的方法,塑钢纤维具有质轻、耐腐蚀等优点,掺入轻骨料混凝土中能明显提高其韧性及其他力学性能<sup>[5-6]</sup>。由于轻骨料自身质量较轻,在混凝土搅拌、运输、振捣及浇筑过程中会出现骨料上浮现象,同时,轻骨料在养护时会吸收骨料表面的水分,从而影响骨料与水泥浆界面的强度。预湿骨料可以在一定程度上抑制骨料上浮<sup>[7-8]</sup>,轻骨料预湿可采用常压预湿与加压预湿两种方法,常压预湿较便捷,但由于其预湿压力有限,使得预湿时间较长,且很难使骨料达到饱水状态,从而使骨料上浮的抑制作用受到限制<sup>[9-10]</sup>;加压预湿轻骨料由于外部较高的水压力,使骨料很快就接近饱水状态,可以极大地缩短预湿时间,实现轻骨料混凝土的工业化生产以及规模化使用<sup>[11-12]</sup>。对于冻融环境下不同预湿方式塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结性能的理论及试验资料较少。

笔者研究不同冻融循环次数(0、50、100、150)、轻骨料预湿方式对塑钢纤维轻骨料混凝土的力学性能、粘结强度、粘结韧性的影响规律,并基于试验数据拟合冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土抗压强度与粘结强度的退化模型和粘结韧性的退化模型。

## 1 原材料与试验方案

### 1.1 原材料及配合比

水泥:内蒙古蒙西水泥股份有限公司生产的P·O 42.5水泥;粗骨料:湖北宜昌宝珠陶粒生产的烧结圆球型页岩陶粒,主要性能指标见表1;塑钢纤维:宁波大成新材料生产的聚丙烯粗纤维,呈波浪型,其性能参数见表2,根据前期研究成果,轻骨料混凝土中塑钢纤维掺量采用 $8\text{ kg/m}^3$ ;外加剂:B2萘系高效减水剂,AH-1型引气剂,新拌混凝土含气量

为 $3.6\%$ ;参照《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)中的松散体积法进行塑钢纤维轻骨料混凝土配合比的初步设计,塑钢纤维轻骨料混凝土的配合比见表3。

表1 陶粒性能指标

Table 1 Performance index of ceramsite

类型	粒径/ mm	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	筒压强度/ MPa	1 h 吸水 率/%
页岩 陶粒	5~20	1 421	792	8.5	5.3

表2 塑钢纤维性能参数

Table 2 Performance parameters of plastic steel fiber

长度/ mm	直径/ mm	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/MPa	伸长 率/%
30	0.8	0.95	530	9 884	$15 \pm 2$

表3 轻骨料混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of lightweight aggregate concrete

设计强 度等级	水灰 比	水/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水泥/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	轻骨料/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	减水剂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
LC50	0.32	144	450	764	598	8.1

### 1.2 试验方案

根据文献[13]中轻骨料预湿试验研究结果可知:常压预湿页岩陶粒1 h,轻骨料的含水状态已接近稳定;页岩陶粒在1.5 MPa压力下预湿15 min处理,轻骨料已接近饱水状态。按照上述方法进行预湿,常压预湿骨料在清水中浸泡1 h,表干状态的轻骨料最终含水率为 $5.2\%$ ;加压预湿使用骨料加压预湿机,陶粒在1.5 MPa的压力下预湿15 min,然后将陶粒表面处理至表干,骨料最终含水率为 $16.28\%$ 。

参照《纤维混凝土试验方法》(CECS 13—2009)进行轻骨料混凝土的搅拌与振捣试验,冻融试验程序参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),试件标准养护24 d后水养4 d,对试件进行快冻法,分别冻融循环0、50、100及150次。试件编号中A代表常压预湿、P代表加压预湿,A-050表示骨料常压预湿下冻融循环

50 次。

通过钢筋内贴应变片的方法测得锚固段内钢筋在加载过程中的应变趋势。钢筋沿纵向剖切为两片,在钢筋的两个剖面中间位置处开槽,槽口宽为 5 mm,深为 2 mm。在钢筋锚固段内均匀分布粘贴 5 个应变片。然后用 AB 胶将槽填满,以保护应变片,最后将钢筋剖面打磨平整,将两片钢筋焊接固定在一起。在试件加载端及自由端的非粘结段使用 PVC 套筒隔离钢筋与混凝土,以免影响试件的锚固长度。使用胶枪密封钢筋与 PVC 管间的缝隙,避免浆体渗入缝隙内影响锚固效果。直接拔出试验用 60 t 液压式万能试验机施加荷载,直接拔出试件基准设计图与试验加载装置分别如图 1、图 2 所示。

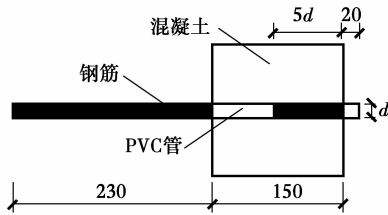


图 1 基准试件设计

Fig. 1 Benchmark specimen design



图 2 直接拔出试验加载装置

Fig. 2 Direct pull-out test loading device

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

塑钢纤维轻骨料混凝土试块表面的混凝土剥落情况随冻融循环次数的增加逐渐加重,试块上轻骨料与塑钢纤维表面附着水泥浆随之剥落,常压预湿轻骨料混凝土表面剥落情况少于加压预湿试件,如图 3 冻融环境下不同预湿方式轻骨料混凝土试件表面现象所示。

两组试件在不同冻融循环次数下,试件破坏形貌基本类似。图 4 为未冻融时页岩陶粒劈裂破坏

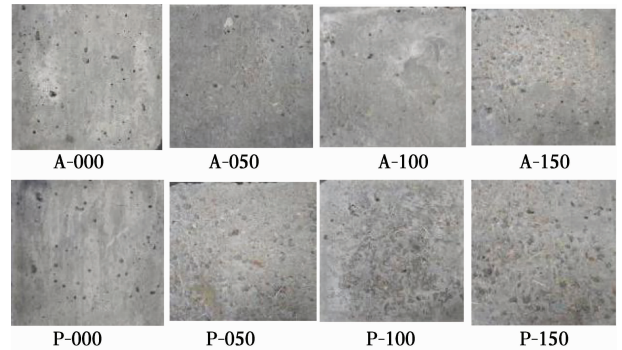


图 3 冻融环境下不同预湿方式轻骨料混凝土试件表面现象

Fig. 3 Surface phenomena of lightweight aggregate concrete specimens in different pre-wetting manner under freezing-thawing

图,试件断裂面处的陶粒皆为劈裂破坏,塑钢纤维被拔断;50 次冻融时试件断裂面中约 40% 陶粒被劈裂,其余陶粒保持完整,且塑钢纤维皆被拔断,劈断面略显粗糙;100 次冻融试件断裂面仅有少部分陶粒被劈裂,且塑钢纤维皆被拔出;150 冻融时试件断裂面的陶粒均与水泥浆体相剥离,且塑钢纤维皆被拔出。

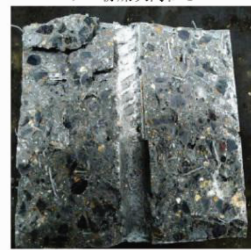


图 4 页岩陶粒劈裂破坏图

Fig. 4 Fracture splitting diagram of shale ceramsite

### 2.2 冻融环境下预湿方式对试件力学性能的影响

从图 5、图 6 可以看出,冻融环境下,加压预湿与常压预湿轻骨料混凝土抗压强度和劈拉强度皆随冻融循环次数的增加而降低,且加压预湿轻骨料混凝土的抗压强度均低于常压预湿试件。这是因为常压预湿下陶粒的吸水能力没有加压预湿下陶粒的吸水能力强,在混凝土拌和过程中,常压预湿轻骨料并未达到饱和水状态,陶粒吸水造成混凝土有效水灰比下降,从而抗压强度变大。并且,在硬化水化过程中,常压预湿陶粒返水能力低于加压预湿陶粒返水能力。

### 2.3 冻融环境下预湿方式对试件粘结强度的影响

由图 7 可以看出,两组粘结试件的极限粘结强度退化规律与试件强度退化规律相似,其中,加压预湿轻骨料试件的抗冻性相较于常压预湿试件表现得较差。这是由于加压预湿饱和水状态下陶粒表面孔隙的水分比常压预湿陶粒表面孔隙的水分多,在混

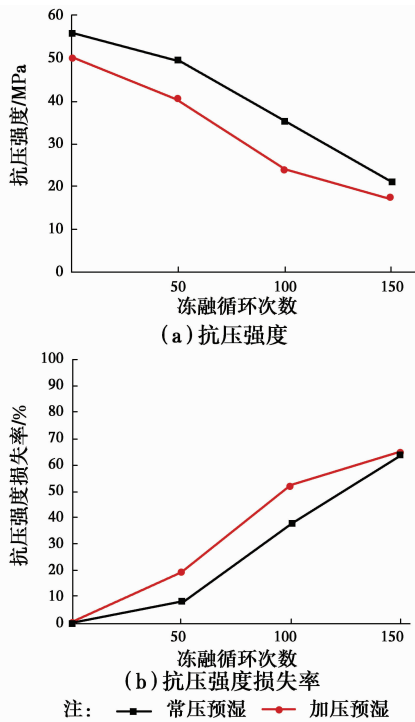


图 5 塑钢纤维轻骨料混凝土抗压强度变化趋势

Fig. 5 Compressive strength variation trend of lightweight fiber reinforced plastic aggregate concrete

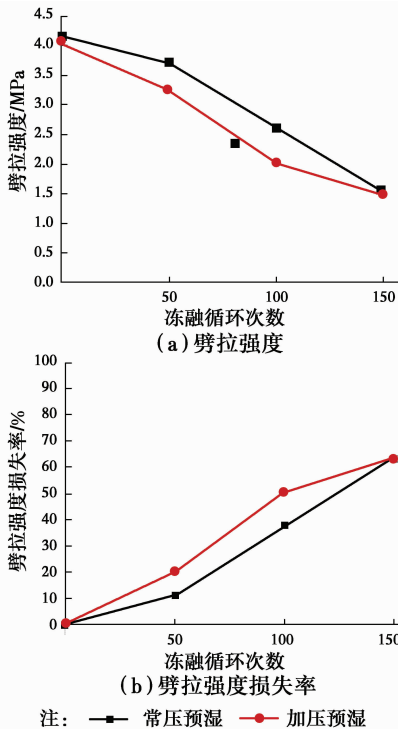


图 6 的塑钢纤维轻骨料混凝土劈拉强度变化趋势

Fig. 6 Variation trend of splitting tensile strength of plastic fiber light weight aggregate concrete

水量小而返水能力强,静水压力和渗透压力加剧了加压预湿骨料的劣化,使得加压预湿陶粒抗冻性低于常压预湿陶粒,导致加压预湿试件的粘结性能弱于常压预湿试件。

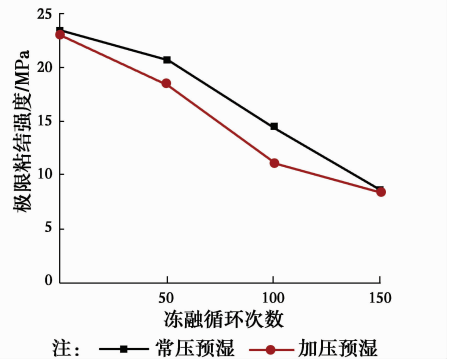


图 7 极限粘结强度

Fig. 7 Ultimate bond strength

### 2.4 冻融环境下预湿方式对试件荷载-滑移曲线的影响

如图 8(a)所示,P-000 与 A-000 在微滑阶段与滑移阶段几乎重合;当曲线进入到劈裂阶段时,A-000 试件产生较大的滑移而后拔出破坏,而 P-000 试件在自由端稍有滑移后即发生劈裂破坏,两组试件的峰值滑移量差距较大。

如图 8(b)所示,试件经受 50 次冻融循环,两组试件的上升曲线几乎重合,P-050 试件在劈裂阶段仅产生较小的滑移即发生劈裂破坏,随后荷载迅速下降。而 A-050 则在试件的劈裂阶段产生较大的滑移,试件达到极限粘结强度后仍具有较高的承载力,且该试件的卸载过程较为平缓。

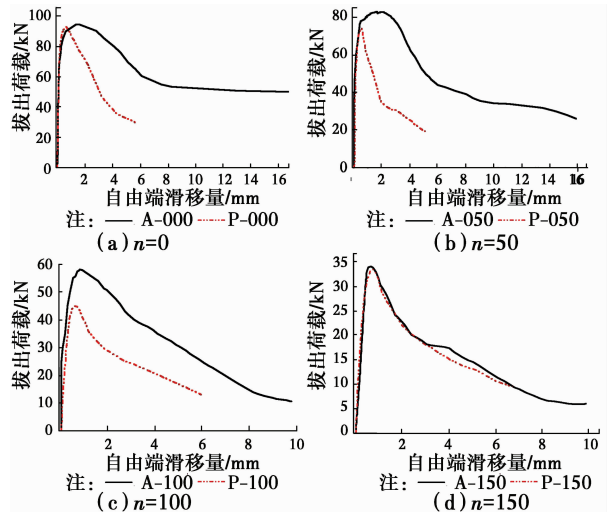


图 8 不同预湿方式轻骨料混凝土在冻融环境下的 F-S 曲线

Fig. 8 F-S curves of lightweight aggregate concrete under different freezing and thawing conditions

凝土搅拌过程中水泥浆体很难进入加压预湿陶粒表面孔隙中,降低了轻骨料与水泥浆体界面间的化学胶着力。同时,在反复冻融作用下,加压预湿陶粒吸



经历 100 次冻融循环后, 两组试件的破坏形态均为劈裂破坏, 且曲线发展趋势相似。由于不同预湿方式试件基体强度经 100 次冻融循环后表现出较大的差别, 导致 P-100 与 A-100 试件的曲线从滑移阶段就表现出一定的差异, 如图 8(c) 所示。

常压预湿与加压预湿轻骨料混凝土经 150 次冻融循环皆进入冻融响应阶段, 混凝土的强度与刚度基本相同, 所以, 两组试件的荷载-滑移曲线在加载与卸载过程中基本相同, 二者的曲线如图 8(d) 所示。

## 2.5 冻融环境下预湿方式对试件粘结韧性的影响

定义塑钢纤维轻骨料混凝土直接拔出试件荷载-滑移曲线下的面积作为拔出试件的韧性指标, 以衡量直接拔出试件在加载过程中界面粘结能量的变化情况, 定义 3 个粘结韧性参数: 极限韧性  $A_u$ 、残余韧性  $A_{80}$  和残余韧性  $A_{60}$ 。极限韧性  $A_u$ : 从加载到极限粘结荷载, 荷载-滑移曲线下的面积, 表示试件破坏时所吸收的拔出荷载能量; 残余韧性  $A_{80}$ : 从加载到下降段残余荷载为极限粘结荷载值 80%, 荷载-滑移曲线下的面积, 表示试件破坏后拔出荷载能量的耗散; 残余韧性  $A_{60}$ : 从加载到下降段残余荷载为极限荷载 60%, 荷载-滑移曲线下的面积, 如图 9 所示。

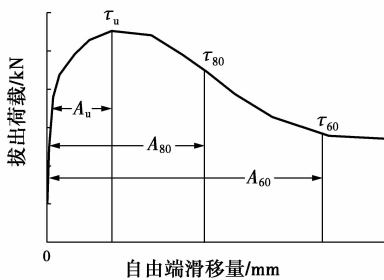


图 9 粘结韧性参数定义图

Fig. 9 Definition diagram of bond toughness parameters

从图 10 可看出, 加压预湿轻骨料混凝土试件  $A_u$ 、 $A_{80}$  与  $A_{60}$  均随冻融循环的增加而减小; 在冻融前期, 常压预湿轻骨料混凝土试件  $A_u$  略有增大趋势, 冻融后期  $A_u$  逐渐降低, 而  $A_{80}$  与  $A_{60}$  均随冻融循环的增加而减小。其原因是: 加压预湿的轻骨料几乎为饱水状态, 陶粒在混凝土试件的养护期内会一直向陶粒表面的水泥浆体中返水, 提高水泥浆-轻骨料粘结界面过渡区的水灰比, 同时影响早期水化物在陶粒表面孔隙内的生成与发展, 从而影响轻骨料混凝土早期的基体强度, 导致加压预湿轻骨料混凝土的抗冻性低于常压预湿轻骨料混凝土。因此, 在容易遭受冻融侵蚀的环境中, 建议使用常压预湿轻骨料混凝土。

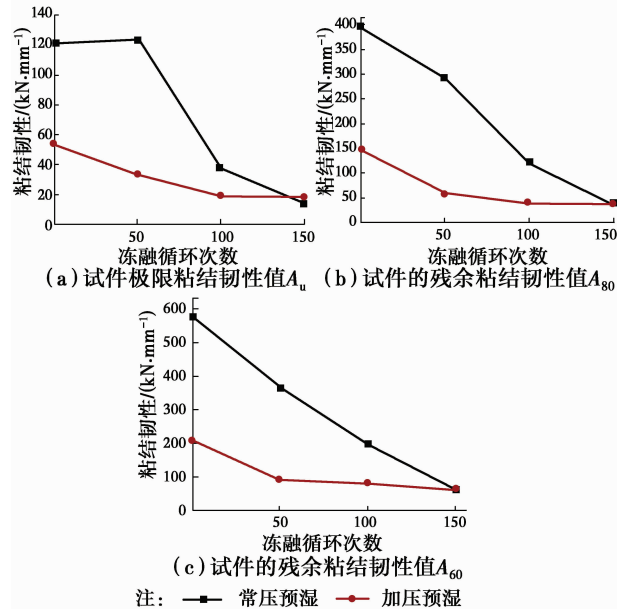


图 10 不同预湿方式的轻骨料混凝土试件的粘结韧性

Fig. 10 Bond toughness of lightweight aggregate concrete specimens with different pre wetting methods

## 3 冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土的强度退化计算模型

根据冻融环境中塑钢纤维轻骨料混凝土的力学试验结果, 得出轻骨料混凝土试件经历不同冻融循环次数的损失规律。

### 3.1 冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结强度计算公式

抗压强度是混凝土力学强度中应用最为广泛、表述最为直观的力学性能指标, 轻骨料混凝土在冻融环境中抗压强度的变化规律直接反应出轻骨料混凝土基体在冻融环境中所承受的冻融损伤<sup>[14]</sup>。因为混凝土与钢筋之间粘结性能由诸多繁杂因素影响, 并且钢筋在混凝土锚固区间内应力状态较为复杂, 难以准确地模拟, 因此, 关于钢筋与混凝土间的粘结强度计算模型基本上都是基于试验结果拟合所得。当混凝土处于冻融环境时, 混凝土与钢筋间粘结强度的计算模型所考虑的影响因素更复杂<sup>[15]</sup>。根据塑钢纤维轻骨料混凝土试件的抗压强度试验结果, 选用混凝土抗压强度作为损伤变量, 并定义混凝土损伤度  $D$  为

$$D = 1 - f_{cu, res} / f_{cu, 0}$$

式中:  $f_{cu, 0}$  和  $f_{cu, res}$  分别为混凝土的初始抗压强度和冻融损伤后的剩余抗压强度。

图 11 为常压预湿和加压预湿下钢筋与塑钢纤维轻骨料混凝土的剩余粘结强度  $\tau_{u, res}$  与损伤度  $D$

的关系散点图及其回归分析结果。

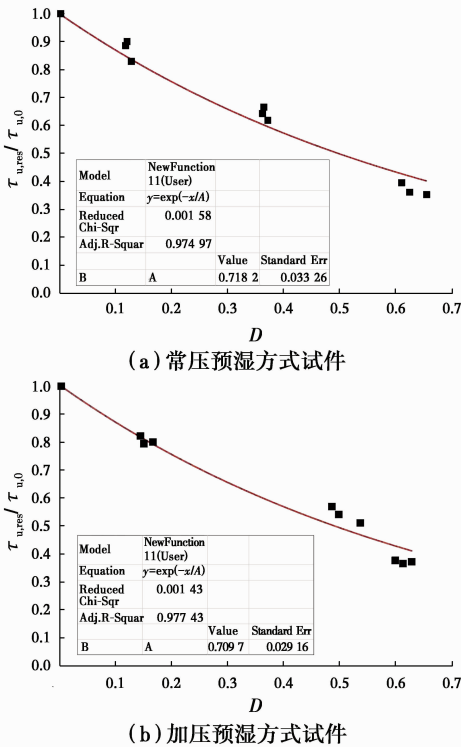


图 11 塑钢轻骨料混凝土  $\tau_{u,res}$  与  $D$  的关系图

Fig. 11 Relation diagram of plastic steel lightweight aggregate concrete  $\tau_{u,res}$  and  $D$

回归分析结果表明,在冻融循环下指数函数能较好地拟合钢筋与塑钢纤维轻骨料混凝土的剩余粘结强度  $\tau_{u,res}$  与损伤度  $D$ ,其关系可表示为

$$\tau_{u,res} = e^{-D/\omega} \cdot \tau_{u,0}$$

式中:  $\tau_{u,0}$  为钢筋与塑钢纤维轻骨料混凝土的初始粘结强度;  $\omega$  为回归参数,与轻骨料预湿方式有关,其具体数值见图 11。

常压骨料预湿和加压骨料预湿回归参数  $\omega$  分别为 0.718 和 0.709,两者相差不大,且都能较好的反映冻融后塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋  $\tau_{u,res}$  与  $D$  之间的关系。

### 3.2 冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土粘结韧性的退化计算公式

对冻融环境下塑钢纤维轻骨料混凝土的粘结韧性值进行拟合,得到试件极限粘结韧性和残余粘结韧性与冻融循环次数间的损伤演化方程,计算模型使用指数型表达式

$$A_N = A_0 \times a^{b \cdot N} \quad (1)$$

式中:  $A_N$  为经  $N$  次冻融循环作用的粘结韧性值;  $A_0$  为未经冻融循环作用的粘结韧性值;  $a$ 、 $b$  为拟合系数。

将极限粘结韧性值和残余韧性值的试验结果按

照式(1)进行拟合,得到的结果如表 4 所示,计算式与试验结果吻合度较高。

表 4 冻融环境下轻骨料混凝土粘结韧性损伤模型拟合结果  
Table 4 Results of bond toughness model of lightweight aggregate concrete in freezing-thawing environment

拟和参数	$A_u$		$A_{80}$		$A_{60}$	
	$A$	$P$	$A$	$P$	$A$	$P$
$a$	1.047	0.943	0.612	2.373	1.744	0.904
$b$	-0.184	0.150	0.021	-0.016	-0.020	0.108
$R$	0.884	0.950	0.970	0.971	0.989	0.956

## 4 结论

通过对冻融环境下不同预湿方式的塑钢纤维轻骨料混凝土进行抗压、劈拉以及直接拔出试验,分析塑钢纤维及预湿方式对轻骨料混凝土试件的影响,根据试验结果得出以下结论:

1) 采用常压预湿的塑钢纤维轻骨料混凝土直接拔出试件,经受 50 次冻融循环作用后的破坏形态为拔出破坏,其极限粘结强度对应的自由端滑移量增加;当冻融循环次数增加到 100 次时,试件的破坏形态变为劈裂破坏,试件的荷载-滑移曲线的极限粘结强度、粘结刚度以及残余粘结强度随冻融循环的增加逐渐减小。加压预湿粘结试件的破坏形态均为劈裂破坏。

2) 加压预湿的塑钢纤维轻骨料混凝土试件的抗压强度、极限粘结强度以及粘结韧性均比常压预湿试件小,并且加压预湿试件的抗冻性比常压预湿试件差,建议在容易遭受冻融侵蚀的环境中,使用常压预湿轻骨料混凝土。

3) 以混凝土抗压强度作为损伤度  $D$ ,探究冻融环境下两种预湿塑方式钢纤维轻骨料混凝土试件与钢筋剩余粘结强度  $\tau_{u,res}$  与损伤度  $D$  之间关系,结果表明:两种骨料预湿方式回归参数  $\omega$  相差不大且拟合度较高。并且对两种预湿塑方式钢纤维轻骨料混凝土试件与钢筋粘结韧性退化计算模型进行拟合,得出的计算式计算结果与试验结果的吻合度较高。

### 参考文献:

[1] GARCIA-TAENGUA E, MARTÍ-VARGAS J R, SERNA P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105 (15):275-284.  
[2] 牛建刚,郝吉,孙立斌,等. 塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结锚固试验研究[J]. 工程力学,2017,34(2):

- 42-49.
- NIU J G, HAO J, SUN L B, et al. Experimental study on bonding and bonding of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel bars [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34 (2): 42-49. (in Chinese)
- [3] LOTFY A, HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 43-54.
- [4] 李胡勇, 王丽. 掺入塑钢纤维的轻骨料混凝土与钢筋间的力学性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36 (1): 235-241.
- LI H Y, WANG L. Lightweight aggregate concrete with TB-cand mechanical property of steel bar [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36 (1): 235-241. (in Chinese)
- [5] 李燕, 申向东. 不同纤维掺量轻骨料混凝土冻融循环后力学性能及损伤量的研究 [J]. *工程力学*, 2009, 26 (Sup1): 81-86.
- LI Y, SHEN X D. The research on mechanics and blemish degree of different fiber content lightweight aggregate concrete after freeze-thaw cycle [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26 (Sup1): 81-86. (in Chinese)
- [6] 王丹, 郭志昆, 陈万祥, 等. 混杂纤维轻骨料混凝土性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2014, 44 (14): 21-26.
- WANG D, GUO Z K, CHEN W X, et al. Experimental study on performance of lightweight aggregate concrete reinforced by hybrid fiber [J]. *Building Structure*, 2014, 44 (14): 21-26. (in Chinese)
- [7] JI T, ZHENG D D, CHEN X F, et al. Effect of prewetting degree of ceramsite on the early-age autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 102-111.
- [8] 季韬, 陈彩艺, 陈永波, 等. 陶粒预湿程度对轻骨料混凝土拉伸徐变的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2012, 15 (5): 690-696.
- JI T, CHEN C Y, CHEN Y B, et al. Effect of ceramsite prewetting degree on tensile creep characteristics of lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15 (5): 690-696. (in Chinese)
- [9] KABAY N, AKÖZ F. Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34 (4): 503-507.
- [10] 陈永波, 季韬, 陈彩艺, 等. 陶粒预湿程度对轻骨料混凝土自收缩的影响 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2011, 39 (6): 941-946.
- CHEN Y B, JI T, CHEN C Y, et al. Effect of ceramsite prewetting degree on autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (6): 941-946. (in Chinese)
- [11] 孔丽娟, 高礼雄, 葛勇. 轻骨料预湿程度对混合骨料混凝土抗冻性能影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39 (1): 35-40.
- KONG L J, GAO L X, GE Y. Effect of lightweight aggregate pre-wetting on frost-resistance of combined aggregate concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39 (1): 35-40. (in Chinese)
- [12] CHOI J, ZI G, HINO S, et al. Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 69 (11): 381-389.
- [13] 朱聪. 预湿对塑钢纤维轻骨料混凝土抗冻性及微观结构影响研究 [D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- ZHU C. Study on the influence of pre wetting on frost resistance and microstructure of steel fiber light weight aggregate concrete [D]. Baotou, Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 刘卫东, 苏文悌. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究 [J]. *建筑结构学报*, 2008, 29 (1): 124-128.
- LIU W D, SU W T. Research on damage model of fibre concrete under action of freeze-thaw cycle [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29 (1): 124-128. (in Chinese)
- [15] 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 C F, LIU X J, LI W Z, et al. Study of freeze-thaw durability and damage model of hybrid fiber concrete [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45 (2): 10-14. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)