

# 陶粒混凝土-普通混凝土环氧树脂界面 冻融后抗剪性能试验研究

朱红兵<sup>1,2,3</sup>, 郭正发<sup>1</sup>, 韩 蓓<sup>1</sup>, 段亦雪<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 城市更新湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430065;  
3. 武汉科技大学 高性能工程结构研究院, 湖北 武汉 430065)

**摘要:** 采用全轻陶粒混凝土加固普通混凝土构件, 可在实现既有结构性能提升的同时降低加固体自重, 改善加固结构承载特性. 为研究新老混凝土环氧树脂粘结界面冻融损伤后抗剪性能退化规律, 开展了 7 组新老混凝土试件和 2 组整浇试件的冻融试验, 测试各组试件分别在经历 0、5、10、15、20、25 及 30 次冻融后的界面抗剪强度, 分析试件外观损伤、抗剪破坏形态及抗剪强度退化规律. 研究结果表明: 冻融次数低于 15 时试件剪切破坏均发生在普通混凝土与环氧树脂界面剂之间, 冻融次数超过 25 时发生在全轻陶粒混凝土与环氧树脂界面剂之间, 15~25 次时为过渡状态; 冻融后试件界面抗剪强度出现明显退化, 经历 5、10、15、20、25、30 次冻融循环后, 界面抗剪强度较冻融前的下降率分别为 7.83%、20.91%、25.54%、31.11%、36.54%、45.27%. 建立了环氧树脂界面的抗剪强度退化计算公式, 可较准确地预测出冻融后环氧树脂界面抗剪强度. 研究结论可为工程结构加固及类似新老混凝土连接界面研究与设计提供参考.

**关键词:** 全轻陶粒混凝土; 混凝土结构加固; 冻融; 环氧树脂界面; 抗剪性能; 试验; 计算公式

中图分类号: TU37; U445.7<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0578-07

## Experimental study on shear resistance properties of epoxy resin interface of ordinary concrete members-lightweight ceramsite concrete after freeze-thaw

ZHU Hongbing<sup>1,2,3</sup>, GUO Zhengfa<sup>1</sup>, HAN Bei<sup>1</sup>, DUAN Yixue<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan 430065, China;

3. Institute of High Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Using lightweight ceramsite concrete to strengthen ordinary concrete members can improve the performance of existing structures, reduce the dead weight of added solids, and improve the bearing characteristics of strengthened structures. In order to study the degradation law of shear performance of epoxy resin bonding interface of new and old concrete after freeze-thaw damage, the freeze-thaw tests of 7 groups of new and old concrete specimens and 2 groups of cast-in-place specimens were carried out. The interfacial shear strength of each group of strengthened specimens after 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 freeze-thaw cycles was tested, and the appearance damage, shear failure morphology and degradation law of shear strength of specimens were analyzed. The results show that when the freeze-thaw times are less than 15, the shear failure occurs between ordinary concrete and epoxy resin interface agent, and when the freeze-thaw times are more than 25, the shear failure occurs between all lightweight ceramsite concrete and epoxy resin interface agent, and it is in a transitional state when the freeze-thaw times are 15-25. After freezing and thawing, the shear strength of the interface of the specimen shows significant degradation. After 5, 10, 15, 20, 25, and 30 freezing and thawing cycles, the shear strength of the interface decreases by 7.83%, 20.91%, 25.54%, 31.11%, 36.54%, and 45.27%, respectively, compared with that before freezing and thawing. The shear strength degradation formula of epoxy resin interface is established,

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178182); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划基金项目(T2022002); 武汉科技大学湖北省“十四五”优势特色学科(群)基金项目(2023D0501)

第一作者: 朱红兵(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土结构耐久性. E-mail: zhuhongbing@wust.edu.cn

which can accurately predict the shear strength of epoxy resin interface after freezing and thawing. The research conclusions can provide reference for the research and design of engineering structure reinforcement and similar new and old concrete connection interface.

**Key words:** lightweight ceramsite concrete; concrete structure reinforcement; freezing and thawing; epoxy resin interface; shear resistance; experiment; calculation formula

增大截面法是混凝土墩柱构件加固的一种常用方法,该法能增加构件的承载力和刚度,明显改善结构的力学性能<sup>[1]</sup>。由于增大截面会在一定程度上增加构件自重,增加下部结构和地基基础的荷载,在不少工程中面临较大困难,制约了增大截面法的应用范围<sup>[2]</sup>。本文提出采用全轻陶粒混凝土(新混凝土)作为加固用混凝土,充分利用其轻质高强的物理力学特性,实现既能满足加固结构的力学性能要求,又能有效控制因加固引起的结构自重增量。增大截面法加固时,新老混凝土之间协同工作的关键在于连接界面的粘结性能,界面粘结形式比较常见的有三种方式:在新老混凝土粘结界面涂抹界面剂、界面植筋、施作切槽或凿毛等构造<sup>[1,3-4]</sup>。对于施工便捷性和减少对既有结构的损伤角度,涂抹界面剂具有很大的优势,而环氧树脂界面剂相比于其他界面剂具有更好的力学性能,发展空间更大<sup>[3,5]</sup>。

剪力传递是新老混凝土之间传力的主要形式,界面抗剪强度是衡量新老混凝土协同工作性能的关键指标<sup>[6-7]</sup>。在经历冻融循环后,新老混凝土界面的粘结性能会出现劣化,其劣化规律需要通过试验及分析予以明确<sup>[8-9]</sup>。对涂刷环氧树脂界面剂的新老混凝土连接界面的试验研究表明:新老混凝土结合面的粘结性能直接决定了修补后的新老混凝土的粘结强度,新混凝土强度对新老混凝土界面的粘结性能的影响有限,过分追求新混凝土强度不经济<sup>[7]</sup>;新老混凝土粘结的力学性能较新、老混凝土本身更弱<sup>[10-11]</sup>;冻融后新老混凝土抗折试件的破坏模式有粘结面处破坏和强度较低的混凝土破坏<sup>[12-13]</sup>。可见,现有研究对环氧树脂加固界面的力学性能进行了积极探索,但是采用全轻陶粒混凝土作为加固用的新混凝土则缺少相关研究报道。尤其是在经历冻融循环后,环氧树脂界面剂与新老混凝土的粘结性能会出现退化,界面抗剪强度随着冻融循环次数的增加而降低<sup>[14-16]</sup>,但对受冻融影响的界面抗剪强度退化规律还不明晰。对经受冻融循环后全轻陶粒混凝土与普通混凝土间环氧树脂连接界面及周边混凝土的抗剪性能退化开展试验研究,并建立冻融循环后环氧树脂界面抗剪强度的退化规律,对工程实践非常有

意义<sup>[17-18]</sup>。

为探讨全轻陶粒混凝土加固普通混凝土构件环氧树脂粘结界面在冻融损伤后的抗剪性能退化规律,本文开展了 7 组新老混凝土试件和 2 组整浇试件的冻融试验,测试了各组试件分别在经历 0、5 次、10、15、20、25 及 30 次冻融后的界面抗剪强度,分析了各组试件的外观损伤、抗剪破坏形态及抗剪强度退化规律,最终建立环氧树脂界面的抗剪强度退化计算公式,以达到可较准确地预测出冻融后环氧树脂界面抗剪强度的目标。

1 混凝土配合比及试件制作

老混凝土采用普通混凝土,新混凝土采用全轻陶粒混凝土。

1.1 新老混凝土共用原材料

(1) 水泥采用湖北华新水泥股份有限公司生产的 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥,技术指标如表 1;

表 1 水泥性能指标

Tab. 1 Cement performance indexes

安定性	初凝时 间/min	终凝时 间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
合格	110	350	22.5	47.3	4.8	7.6

(2) 拌和水采用武汉市自来水;

(3) 环氧树脂界面剂:水性环氧树脂乳液,性能见表 2。

表 2 环氧树脂乳液性能指标

Tab. 2 Performance index of epoxy resin emulsion

状态	外观	易刷性	剪切粘结 强度/MPa	拉伸粘结 强度/MPa	固化时 间/d
液体	乳黄	易刷	1.6	0.8	2

1.2 普通混凝土材料及配合比

(1) 粗骨料为连续级配碎石,表面粗糙,最大粒径 25 mm;

(2) 细骨料采用普通河砂(中砂),表观密度为 2.54 g/cm<sup>3</sup>,细度模数为 2.91;

(3) 配合比参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)经过试配得到,如表 3。实测 28 d 立方体抗压强度、抗拉强度平均值分别为 35.4 MPa、2.472 MPa,28 d 弹性模量值为 30.44 GPa。

表 3 普通混凝土配合比(单位: kg/m³)

Tab. 3 Mix proportion of ordinary concrete (Unit: kg/m³)

强度等级	碎石	砂	水泥	水
C30	1251	512	461	175

1.3 全轻陶粒混凝土材料及配合比

(1) 粗骨料选用宜昌光大陶粒制品有限公司生产的 900 级碎石型页岩陶粒, 试验前将陶粒在水中浸湿 2 h, 取出沥干 12 h 后使用. 参数见表 4;

表 4 页岩陶粒性能指标

Tab. 4 Performance indexes of shale ceramsite

粒径/mm	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	筒压强度/MPa	1 h 吸水率/%
5~20	814	1517	6.8	2.43

(2) 细骨料采用陶砂, 直径小于 5mm. 见表 5;

表 5 陶砂物理性能指标

Tab. 5 Physical performance indexes of ceramic sand

表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含泥量/%	细度模数
1 823	890	≤2	3.5

(3) 减水剂采用 HSC 聚羧酸高性能减水剂, 减水效率为 25%;

(4) 配合比. 参考《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ/T12—2019)和预研成果并经多次试配, 全轻陶粒混凝土 LC50 的配合比如表 6 所示. 实测 28 d 立方体抗压强度、抗拉强度平均值分别为 52.1 MPa、2.660 MPa, 28 d 弹性模量值为 33.56 GPa.

表 6 全轻陶粒混凝土配合比(单位: kg/m³)

Tab. 6 Mix proportion of full lightweight ceramsite concrete (Unit: kg/m³)

强度等级	陶粒	陶砂	水泥	水	减水剂
LC50	550	620	600	154	5.1

1.4 全轻陶粒混凝土-老混凝土试件

(1) 老混凝土试件制作与养护. 根据混凝土配合比, 浇筑好 100 mm×100 mm×200 mm 的老混凝土试块, 待 20 ℃环境养护 24 h 成型后拆模. 脱模后试件放在温度为 20±2 ℃, 相对湿度≥95% 的混凝土养护箱内养护至 28 d;

(2) 老混凝土试件界面处理. 老混凝土试块养护 28 d 后, 清除表面浮浆, 选择 100 mm×100 mm 的自然面作为与陶粒混凝土连接的粘结面, 在老混凝土粘结面均匀涂抹环氧树脂界面剂, 厚度按 1.5 mm 控制;

(3) 全轻陶粒混凝土浇筑. 按表 6 配合比制作全轻陶粒混凝土. 将已涂抹界面剂的老混凝土试块放回 100 mm×100 mm×400 mm 的试模, 涂抹界面剂的粘结面临空并与后浇全轻陶粒混凝土连接. 将拌和好的陶粒混凝土倒入装有老混凝土的模具的剩余 100 mm×100 mm×200 mm 空间. 将浇筑成型的新老混凝土试件放在 20 ℃环境下 48 h, 待成型后脱模. 脱模后试件在混凝土养护箱内标准养护 28 d.

图 1 为试件示意图, 浇筑后试件照片见图 2.

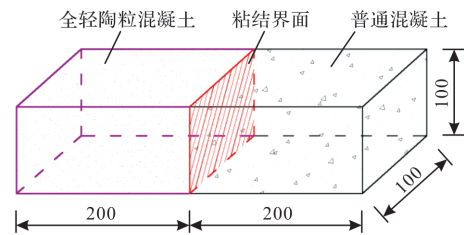


图 1 环氧树脂界面试件整体示意(单位: mm)

Fig. 1 Overall schematic diagram of epoxy resin interface specimen (Unit: mm)



图 2 浇筑陶粒混凝土后试件照片

Fig. 2 Photos of test pieces after ceramsite concrete pouring

2 冻融后试件界面抗剪性能退化试验

2.1 冻融试验

制作 33 个全轻陶粒混凝土-老混凝土的环氧树脂界面试件, 分别在试件冻融 0、5、10、15、20、25、30 次后, 观察或测试试件外观损伤、界面损伤, 界面抗剪强度性能指标. 为便于对比分析, 另制作了 1 组普通混凝土整浇试件和 1 组全轻陶粒混凝土试件. 试验分组见表 7.

冻融试验在国产 TDRI 型混凝土自动快速冻融机上进行, 温控试件的温度控制在 -15~15 ℃ 之间, 由棱柱体试验中心的温度探头和冷冻液中的温度探头通过控制柜自动控制, 一个冻融循环时间 3 h 左右, 试件在冻融过程中始终处于水饱和状态.

冻融试验前, 将试件放置在 20±3 ℃ 的清水中浸泡 4 d, 然后放入冻融机内正式试验.

试验过程中,分别对试件在清水中进行 5、10、15、20、25、30 次冻融循环,达到预定次数后取出,对外观进行观察,并进行剪切试验,研究界面损伤规律和抗剪强度。

表 7 试验分组及冻融后界面抗剪强度  
Tab. 7 Test groups and interface shear strength after freezing and thawing

试件编组	界面类型	冻融 次数/次	界面抗剪强度/MPa					
			试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5	平均值
NC-T	普通混凝土整体浇筑	0	7.580	7.340	7.520	-	-	7.480
LC-T	全轻陶粒混凝土整体浇筑	0	5.300	5.810	5.690	-	-	5.600
W-0-E	环氧树脂界面	0	3.340	3.224	3.095	-	-	3.218
W-5-E		5	2.910	2.992	3.001	2.993	2.934	2.966
W-10-E		10	2.350	2.665	2.665	2.500	2.545	2.545
W-15-E		15	2.435	2.135	2.395	2.445	2.570	2.396
W-20-E		20	2.225	2.275	2.025	2.213	2.347	2.217
W-25-E		25	2.125	2.170	2.100	2.010	1.805	2.042
W-30-E		30	1.755	1.745	1.783	1.863	1.660	1.761

注:“W-5-E”表示环氧树脂界面试件在清水冻融循环 5 次,以此类推。

2.2 冻融后试件外观损伤

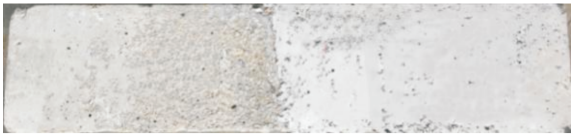
图 3 为涂抹环氧树脂界面剂的试件(W-30-E 组试件 1)在清水冻融 0、5、10、15、20、25、30 次的外观形态。



(a) 冻融0次



(b) 冻融5次



(c) 冻融10次



(d) 冻融15次



(e) 冻融20次



(f) 冻融25次



(g) 冻融30次

图 3 冻融后试件外观损伤(W-30-E 组试件 1)

Fig. 3 Appearance damage of specimen after freezing and thawing

图 3 可见,试件外观主要表现为麻面和骨料外露,普通混凝土与全轻陶粒混凝土在清水冻融环境下表现出的外观损伤破坏程度有一定差异。缺陷情况统计如表 8。

表 8 冻融后环氧树脂界面试件表面缺陷

Tab. 8 Surface defects of epoxy resin interface specimen after freezing and thawing

试件编号	冻融 次数	清水冻融循环作用阶段	
		普通混凝土	全轻陶粒混凝土
W-0-E	0	基本完好	基本完好
W-5-E	5	麻面, S=6%	基本完好
W-10-E	10	麻面, S=10%	麻面, S=5%
W-15-E	15	麻面, S=16%	麻面, S=18%
W-20-E	20	麻面, S=27%	麻面, S=25%
W-25-E	25	麻面, S=39%	麻面、骨料外露, S=34%
W-30-E	30	麻面, S=42%	麻面、骨料外露, S=45%

注: S 表示麻面面积率,即麻面面积与试件表面面积比值。

由表 8 和图 3 可知,随着冻融次数的增长,普通混凝土和全轻陶粒混凝土麻面现象逐渐增多。冻融 15 次后试件破坏较轻;经过 20 次冻融后表面

缺陷明显增多,全轻陶粒混凝土出现明显骨料外露现象;麻面面积率最高可为42%。全轻陶粒混凝土在早期的冻融后外观缺陷较普通混凝土轻微,但后期发展速度快,冻融30次后外观缺陷更严重。

冻融20次后粘结面出现了不连通的裂纹,且随着冻融次数的增加,粘结面产生的裂纹逐渐增多。

### 2.3 冻融后试件界面抗剪性能退化试验

#### 2.3.1 抗剪试验加载装置

采用万能试验机和剪切夹具,试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB 50081—2019)的规定来进行。加载装置如图4。试验加荷速率为0.5 MPa/s,连续均匀加荷,当试件破坏时,立即停止加载,记录峰值荷载。剪切夹具参考文献[19]并进一步改进。

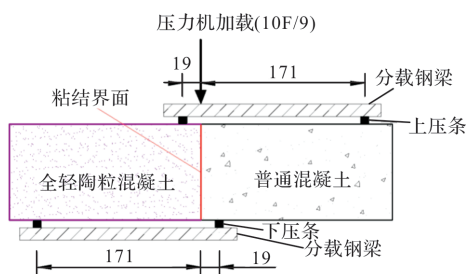


图4 试件加载示意(单位: mm)

Fig. 4 Loading diagram of specimen (Unit: mm)

#### 2.3.2 剪切试验破坏特征

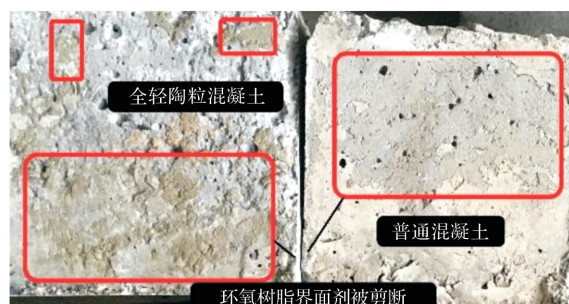
涂抹环氧树脂界面剂的新老混凝土试件,经历冻融损伤后的剪切破坏形态如图5所示。试验过程中观察到,加载到一定荷载时,界面粘结面出现竖向裂缝,当荷载持续增加至破坏荷载时,试件沿新老混凝土粘结面处瞬间断裂,并伴有响声,具有明显的脆性破坏特征。

观察试件破坏界面发现,冻融次数不超过15次时,剪切破坏发生在普通混凝土与环氧树脂界面剂之间,普通混凝土和全轻陶粒混凝土沿粘结面完全分离,粘结面无骨料拉扯现象,如图5(a);冻融循环20次,剪切破坏形式为新老混凝土粘结面处破坏,剪切破坏从环氧树脂界面剂处破坏,全轻陶粒混凝土侧和普通混凝土侧粘结界面上均局部粘附有界面剂,如图5(b);冻融循环25~30次后,环氧树脂界面剂试件剪切加载至破坏前,界面处出现一条肉眼可见竖向裂缝,裂缝的产生和破坏几乎同时出现,粘结面存在骨料拉扯现象,界面剪切破坏发生在全轻陶粒混凝土与环氧树脂界面剂之间,如图5(c)。由此可见,冻融次数低于15次时,普通混凝土侧的粘结强度低于全轻陶

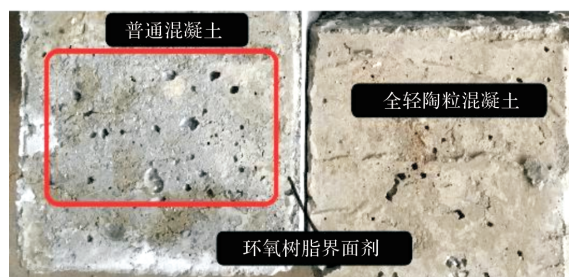
粒混凝土侧;但随着冻融次数增加,全轻陶粒混凝土侧的粘结强度衰减较快,逐渐成为制约界面粘结的薄弱处。



(a) 冻融10次



(b) 冻融20次



(c) 冻融循环30次

图5 环氧树脂界面试件剪切破坏形态

Fig. 5 Shear failure pattern of epoxy resin interface specimen

#### 2.3.3 抗剪强度

冻融后环氧树脂界面抗剪强度实测值见表7。采用环氧树脂连接的新老混凝土界面抗剪强度,能够达到普通混凝土抗剪强度值的43.0%、全轻陶粒混凝土抗剪强度值的57.5%。随着冻融次数的增加,界面抗剪强度逐渐退化。

### 3 冻融后试件界面抗剪性能

#### 3.1 界面抗剪强度退化

根据表7试验数据绘制折线图,分析冻融后环氧树脂界面试件抗剪强度退化规律,如图6。

根据表7和图6可以看出,试件的界面抗剪强度自开始冻融后就随冻融次数增加而快速下降;未经过冻融的环氧树脂界面试件界面抗剪强度为3.218MPa,分别为普通混凝土、全轻陶粒混凝土整体强度的43.02%和57.46%;冻融循环5、10、

15、20、25、30 次后,界面抗剪强度较未冻融时的下降率分别为 7.83%、20.91%、25.54%、31.11%、36.54%、45.27%。

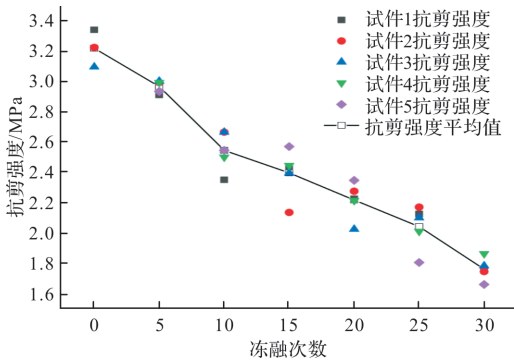


图 6 冻融后环氧树脂界面抗剪强度

Fig. 6 Shear strength of epoxy resin interface after freezing and thawing

3.2 界面抗剪强度退化计算公式

由界面剪切破坏形态和试验数据分析可知,界面抗剪强度与冻融循环次数基本呈直线下降规律,因此,假设冻融后试件界面的抗剪强度退化计算公式为

$$\tau_{WE} = (1 - a_{WE}n)\tau_{0WE}$$
 (1)

式中:  $\tau_{WE}$ 、 $\tau_{0WE}$  分别为冻融  $n$  次后、未冻融环氧树脂界面试件的抗剪强度, MPa;  $n$  为试件经历的冻融循环次数, 次;  $a_{WE}$  为与冻融循环次数有关的抗剪强度衰减系数。

根据表 7 数据进行拟合, 可得待定系数  $a_{WE} = 0.0155$ 。因此, 采用环氧树脂连接的全轻陶粒混凝土与普通混凝土界面在冻融后抗剪强度退化计算公式为:

$$\tau_{WE} = (1 - 0.0155n)\tau_{0WE}$$
 (2)

将式(2)计算结果与试验实测数据绘制成图 7。可见各试件的实测值与公式计算值较接近, 离散程度较低。表 9 将实测平均值与公式计算值进行对比, 可见误差在 3.6% 以内, 吻合度较高。

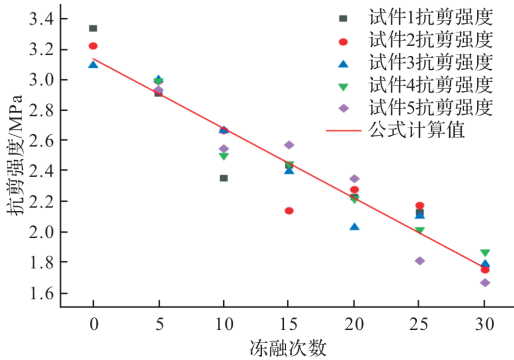


图 7 环氧树脂界面抗剪强度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of epoxy resin interface shear strength

表 9 环氧树脂界面试件界面抗剪强度计算公式验证

Tab. 9 Verification of calculation formula for interface shear strength of epoxy resin interface specimen

编号	冻融次数/次	抗剪强度 实测值/MPa	抗剪强度 计算值/MPa	实测值/ 计算值
W-0-E	0	3.218	3.218	1.000.0
W-5-E	5	2.966	2.969	0.998.9
W-10-E	10	2.545	2.719	0.936.0
W-15-E	15	2.396	2.470	0.970.0
W-20-E	20	2.217	2.220	0.998.6
W-25-E	25	2.042	1.971	1.036.0
W-30-E	30	1.761	1.721	1.023.2

4 结论

(1)混凝土麻面面积随冻融次数逐渐增多, 20 次冻融后陶粒混凝土出现明显骨料外露, 粘结面出现不连通裂纹; 冻融早期陶粒混凝土外观缺陷较老混凝土轻微, 但后期相反;

(2)试件均从粘结面处剪切破坏, 有明显脆性特征。冻融低于 15 次时剪切破坏在老混凝土与界面剂之间, 超过 25 次时在陶粒混凝土与界面剂之间, 15~25 次时为过渡状态;

(3)冻融后界面抗剪强度明显退化, 经历 5、10、15、20、25、30 次冻融后, 界面抗剪强度较冻融前下降率分别为 7.83%、20.91%、25.54%、31.11%、36.54%、45.27%; 具有较明显的线性退化规律;

(4)建立了冻融过程中环氧树脂界面抗剪强度退化计算公式, 可作为冻融后环氧树脂粘结普通混凝土与全轻陶粒混凝土界面的抗剪强度计算。

参考文献 References

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Code for design of strengthening of concrete structure: GB50367—2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.

[2] 邓明科, 李彤, 樊鑫淼. 高延性混凝土加固砖柱轴压性能试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 92-99.  
DENG Mingke, LI Tong, FAN Xinmiao. Experimental investigation on axial compression of brick columns strengthened with HDC[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 92-99.

[3] 陈建国, 吴光军, 孙桂山, 等. 硅灰和聚丙烯纤维净浆界面剂对新老混凝土粘结力学性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(4): 52-55.

- CHEN Jianguo, WU Guangjun, SUN Guishan, et al. Effect study of silica fume and polymer fiber interface agent on bond mechanics behavior of new and old concrete[J]. *New Building Materials*, 2018, 45(4): 52-55.
- [4] 刘博研, 薛伟辰, 孙哲. 界面构造对预制混凝土柱接缝抗剪性能的影响研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 54(2): 164-173.
- LIU Boyan, XUE Weichen, SUN Zhe. Influence of interface structures on shear performance of precast concrete column joints[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2022, 54(2): 164-173.
- [5] 乔连朋, 袁群, 冯凌云. 新型界面剂作用下新老混凝土黏结的耐久性能[J]. *公路*, 2020, 65(7): 33-37.
- QIAO Lianpeng, YUAN Qun, FENG Lingyun. Durability of new and old concrete bonding under the action of new-type Interface agent[J]. *Highway*, 2020, 65(7): 33-37.
- [6] 朱红兵, 张娜, 余志武, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维陶粒混凝土与螺纹钢的黏结力学特性[J]. *工业建筑*, 2022, 52(2): 32-36, 114.
- ZHU Hongbing, ZHANG Na, YU Zhiwu, et al. Bonding mechanical properties between ceramsite concrete with hybrid fibers of steel and polypropylene and threaded rebars[J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(2): 32-36, 114.
- [7] 张菊辉, 李粤. 新老混凝土结合面黏结强度影响因素研究综述[J]. *混凝土*, 2017(10): 156-159, 162.
- ZHANG Juhui, LI Yue. Research summary on factors about influencing strength of interface between new and old concrete[J]. *Concrete*, 2017(10): 156-159, 162.
- [8] 冯侠, 乔连朋, 袁群, 等. 新混凝土与碳化混凝土黏结抗冻性能研究[J]. *施工技术*, 2014, 43(2): 108-110.
- FENG Xia, QIAO Lianpeng, YUAN Qun, et al. The study on antifreeze property of agglutinating new concrete and carbonized concrete[J]. *Construction Technology*, 2014, 43(2): 108-110.
- [9] ZHU H, FAN J, YI C, et al. Characterization of freeze-thaw resistance of new-to-old concrete based on the ultrasonic pulse velocity method[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2021, 49(1): 20190639.
- [10] 乔连朋, 袁群, 张国岑, 等. 新老混凝土黏结力学性能的时间效应研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(4): 111-114.
- QIAO Lianpeng, YUAN Qun, ZHANG Guocen, et al. Time effect on mechanical properties of agglutinating new concrete and old concrete[J]. *Yellow River*, 2017, 39(4): 111-114.
- [11] ZHANG X, ZHANG S, LUO Y, et al. Effects of interface orientations on bond strength between old conventional concrete and new self-consolidating concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2020, 117(5): 191-202.
- [12] 黄伟, 方张平. 冻融条件下新老混凝土粘结后抗折性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(5): 745-749, 767.
- HUANG Wei, FANG Zhangping. Adhesive bending properties of new-old concrete under freeze-thaw conditions[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2021, 39(5): 745-749, 767.
- [13] FAN J, WU L, ZHANG B. Influence of old concrete age, interface roughness and freeze-thawing attack on new-to-old concrete structure[J]. *Materials*, 2021, 14(5): 1057.
- [14] HU Bo, MENG TengFei, LI Yuan, et al. Dynamic splitting tensile bond behavior of new-to-old concrete interfaces[J]. *Construction & Building Materials*, 2021, 281: 122570.
- [15] 李秀, 徐文康, 朱红兵, 等. 清水及氯盐环境下陶粒混凝土冻融损伤规律试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(4): 29-32.
- LI Xiu, XU Wenkang, ZHU Hongbing, et al. Experimental study on the damage rule of ceramsite concrete under the environment of clear water or chloride solution[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(4): 29-32.
- [16] 李嘉, 董亮, 张坚, 等. UHPC-沥青薄面层环氧界面剂黏结性能试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(1): 49-57.
- LI Jia, DONG Liang, ZHANG Jian, et al. Experimental on bonding performances of UHPC-thin asphalt layer with epoxy adhesive agents for ultra-high performance composite bridge deck[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(1): 49-57.
- [17] 谢剑, 陈玉洁, 孙雅丹. UHPC与普通混凝土试件界面黏结抗冻性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(12): 3945-3955.
- XIE Jian, CHEN Yujie, SUN Yadan. Experimental study on interfacial antifreeze performance of UHPC and normal concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(12): 3945-3955.
- [18] 李妍, 贺柱国. 冻融环境下废旧纤维混凝土与旧混凝土粘结面劈拉试验[J]. *吉林建筑大学学报*, 2020, 37(2): 19-22, 42.
- LI Yan, HE Zhuguo. Split tensile test of the bonding surface between waste fiber reinforced concrete and old concrete under freeze thaw environment[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2020, 37(2): 19-22, 42.
- [19] 叶果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- YE Guo. Study on the anti-shear behavior of bond-interface between new and old concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

(编辑 郑晓龙 沈 波)