

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 包浆再生粗骨料对自密实混凝土力学性能及抗冻性的影响

曹鑫铖<sup>1</sup>, 金宝宏<sup>1,2</sup>, 侯玉飞<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学新华学院工程与应用科学系, 银川 750021)

**摘要:**通过自密实包浆再生骨料混凝土力学性能及快速冻融循环试验,从试件的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度及冻融后试件的质量损失率、抗压强度损失率及相对动弹性模量角度研究了再生粗骨料包浆对自密实再生混凝土性能的影响,结合SEM电镜试验从微观上分析了骨料包浆对混凝土抗冻性能的改善机制。结果表明:普通混凝土和再生混凝土的劈裂抗拉强度、抗折强度与抗压强度之间的换算关系式不适用于自密实包浆再生骨料混凝土,提出的新关系式与试验数据较吻合;再生粗骨料包浆优化了骨料物理性能,改善了混凝土新旧界面过渡区,增强了其密实性,提高了混凝土的抗冻性能;采用42.5R水泥浆对骨料进行包浆时,混凝土的抗冻性能最优,虽不及普通混凝土,但与骨料未包浆的混凝土相比,150次冻融循环后混凝土相对动弹性模量提高了18.6%;基于冻融后抗压强度和相对动弹性模量建立的冻融损伤模型拟合精度较高,能较好地反映自密实包浆再生骨料混凝土的冻融损伤破坏规律。

**关键词:**自密实再生混凝土;包浆;力学性能;冻融循环;冻融损伤模型;微观结构

**中图分类号:**TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0149-11

## Experimental study on the effect of the wrapped slurry recycled coarse aggregate on the mechanical properties and frost resistance of self-compacting concrete

CAO Xincheng<sup>1</sup>, JIN Baohong<sup>1,2</sup>, HOU Yufei<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. Department of Engineering and Applied Sciences, Xinhua College of Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China)

**Abstract:** Through the mechanical properties and rapid freeze-thaw cycle test of self compacting recycled aggregate concrete, the influence of recycled coarse aggregate slurry on the properties of self compacting recycled aggregate concrete is studied from the aspects of compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength, mass loss rate, compressive strength loss rate and relative dynamic elastic modulus of specimens after freeze-thaw. Combined with SEM electron microscopy test, the mechanism of improving

**收稿日期:**2020-07-01

**基金项目:**宁夏高等学校科学研究项目(NGY2020103)

**作者简介:**曹鑫铖(1994-),男,主要从事混凝土结构理论与应用研究,E-mail:excjly521@163.com。

金宝宏(通信作者),男,教授,E-mail:jimbaohong@nxu.edu.cn。

**Received:**2020-07-01

**Foundation items:**Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Ningxia (No. NXY2020103)

**Author brief:**CAO Xincheng (1994-), main research interests: theory and application of concrete structure, E-mail: excjly521@163.com.

JIN Baohong (corresponding author), professor, E-mail: jimbaohong@nxu.edu.cn.

the frost resistance of concrete by wrapped slurry aggregate is analyzed microscopically. The results show that, the conversion relationship between the split tensile strength, flexural strength and compressive strength of ordinary concrete and recycled concrete is not applicable to self-compacting wrapped slurry recycled aggregate concrete and the new relationship proposed in this paper is in good agreement with the experimental data. Wrapped slurry recycled coarse aggregate optimizes the physical performance of the aggregate, improves the transition area between the old and new concrete interfaces, enhances its compactness, and improves the frost resistance. When 42.5R cement slurry is used to wrap the aggregate, the frost resistance of concrete is the best. Although it is not as good as ordinary concrete, the relative dynamic elastic modulus of concrete increases by 18.6% after 150 cycles of freeze-thaw compared with the concrete of aggregate without wrapping slurry. The freeze-thaw damage model established based on the compressive strength and relative dynamic elastic modulus after freeze-thaw has a higher fitting accuracy, and can better reflect the freeze-thaw damage failure law of self-compacting wrapped slurry recycled aggregate concrete.

**Keywords:** self-compacting recycled concrete; wrapped slurry; mechanical properties; freezing and thawing cycles; freeze-thaw damage model; microstructure

混凝土的抗冻性始终是土木工程界持续关注和研究的重大问题,尤其在东北、西北地区,由于冻融破坏,混凝土结构经常出现不能继续承载的现象,缩短了建筑物的使用寿命,造成严重的经济损失。自密实再生混凝土具有绿色环保、节约自然资源、施工时不需要振捣等诸多优点,符合可持续发展战略,因此,对其抗冻性的研究显得尤为重要。但再生骨料自身存在强度低、表面粗糙、吸水率高等缺点,导致其抗冻性低于普通混凝土,采用水泥浆对再生骨料进行包浆处理,既可弥补骨料内部的微裂缝,也可改善骨料表面的粗糙程度,提高再生骨料的性能,改善混凝土的抗冻性。

学者们已对混凝土的抗冻性作了大量研究。再生混凝土的抗冻性能明显低于普通混凝土,且随着冻融循环次数增加,较普通混凝土,再生混凝土的破坏形态越来越明显<sup>[1-5]</sup>;在再生混凝土中掺入聚丙烯纤维、钢纤维等纤维材料<sup>[6-8]</sup>及粉煤灰、硅灰等矿物材料<sup>[9-10]</sup>能改善其孔隙结构,增强整体密实性,提高混凝土的抗冻性;Yang 等<sup>[11]</sup>通过改进“EMV 法”(等砂浆配比设计法)配置出的再生混凝土抗冻性也有较好改善;雷斌等<sup>[12]</sup>在再生混凝土中掺入氧化石墨烯,发现氧化石墨烯可以优化砂浆的微观结构,降低空隙率,进而改善混凝土抗冻性;王玲玲等<sup>[13]</sup>通过试验发现,掺量为 15% 的纳米  $\text{CaCO}_3$  和 1% 的纳米  $\text{SiO}_2$  对再生混凝土的抗冻性提高最为显著。目前的研究主要是通过外掺各种材料来达到改善再生混凝土的抗冻性,对于从骨料入手改善混凝土抗冻性的研究相对较少。笔者采用不同强度等级的水泥浆对再生粗骨料进行包浆处理,研究自密实包浆再

生骨料混凝土的力学性能及抗冻性,并结合 SEM 电镜试验,从微观的角度分析了骨料包浆对混凝土抗冻性的改善机制。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥:赛马牌 32.5R、42.5R、52.5R 普通硅酸盐水泥;粉煤灰:灵武发电厂生产的一级粉煤灰,45  $\mu\text{m}$  筛余 5.7%;粗骨料:镇北堡生产的 5~20 mm 人工碎石;细骨料:青铜峡人工水洗中砂;再生粗骨料:废弃路缘石混凝土,经回弹仪测定强度为 C30,强度较高,机械破碎后筛选出 5~20 mm。减水剂:北京慕湖公司生产的聚羧酸高效减水剂。

采用水胶比为 0.5 的水泥浆对再生粗骨料表面进行包浆处理,其中,粉煤灰掺量为胶凝材料的 30%,骨料包浆后晾干于阴凉处,待骨料达到不再相互粘结的状态时,放入标准养护室养护,28 d 后取出晾干,用于混凝土搅拌,如图 1 所示。各种骨料的基本性能见表 1。

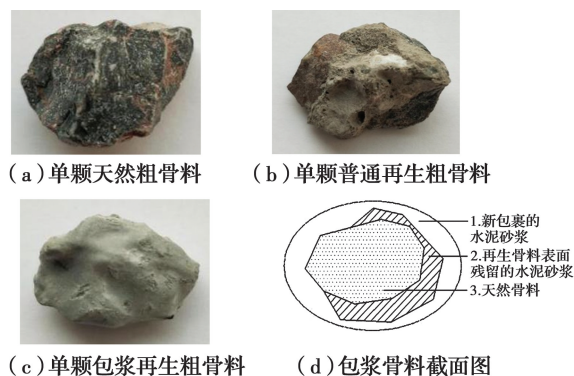


图 1 再生粗骨料

Fig. 1 Recycled coarse aggregate

表 1 粗骨料的基本性能

Table 1 Basic properties of coarse aggregate

类型	表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	吸水率/%	含水率/%	压碎指标/%
天然	2 660	1 490	0.63	0.2	10.7
未包浆再生	2 608	1 131	4.84	1.0	15.2
32.5R 包浆	2 549	1 222	6.32	0.7	14.9
42.5R 包浆	2 574	1 273	5.28	0.6	13.6
52.5R 包浆	2 561	1 272	5.56	0.8	14.0

## 1.2 试验方案设计

设置两个试验,试验 1 用于测量混凝土力学性能的四因素四水平正交试验,试验 2 为研究骨料包浆对混凝土抗冻性影响的单因素试验。试验 1 选取粉煤灰掺量  $A$ 、包浆水泥的强度  $B$ 、再生粗骨料替代率  $C$  和减水剂掺量  $D$  等 4 个因素,每个因素选择 4 个水平,依据正交表  $L_{16}(4^5)$  安排试验,因素水平见表 2,其中,粉煤灰按照等质量替代水泥的方式掺入,减水剂按照胶凝材料的百分比掺入;试验 2 在试验 1 正交试验得出的最优组合基础上以包浆水泥强度为单因素进行冻融试验。

表 2 正交因素、水平

Table 2 Orthogonal factors and levels

水平	粉煤灰掺量 $A/\%$	包浆水泥的强度 $B$	再生粗骨料替代率 $C/\%$	减水剂掺量 $D/\%$
1	25	无	10	0.7
2	30	32.5R	20	0.9
3	35	42.5R	30	1.1
4	40	52.5R	40	1.3

根据试验的需求,分别制作尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  和  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  两种试件,前者用于混凝土的抗压与劈裂抗拉试验,后者用于抗折和冻融试验,冻融试验采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[14]</sup> 规定的快速冻融法,每冻融循环 25 次后,取出试件,测其横向基频和质量,待相对动弹性模量下降到 60% 或质量损失达到 5% 时,视为冻融试验结束。

## 1.3 配合比设计

试验混凝土强度等级为 C30,其配合比按照《自密实混凝土技术应用工程》<sup>[15]</sup> 进行设计,见表 3、表 4,表 3 为混凝土力学性能试验的配合比,表 4 为混凝土冻融试验的配合比,“NSCC”表示普通自密实混凝土,为基准组,“RSCC”表示自密实再生混凝土,其后数字为包浆水泥强度等级,无数字为未包浆。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土力学性能分析

自密实包浆再生骨料混凝土的工作性能及力学性能试验结果见表 5。

表 3 混凝土力学性能试验配合比

Table 3 Mix proportion of concrete mechanical properties test

kg/m<sup>3</sup>

编号	水泥	粉煤灰	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	减水剂
1	361	120	816	766	85(无)	202	3.4
2	361	120	816	681	170(32.5R)	202	4.3
3	361	120	816	596	255(42.5R)	202	5.3
4	361	120	816	511	340(52.5R)	202	6.3
5	339	145	816	681	170(32.5R)	198	5.3
6	339	145	816	766	85(无)	198	6.3
7	339	145	816	511	340(52.5R)	198	3.4
8	339	145	816	596	255(42.5R)	198	4.4
9	321	173	816	596	255(42.5R)	192	6.4
10	321	173	816	511	340(52.5R)	192	5.4

续表 3

编号	水泥	粉煤灰	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	减水剂
11	321	173	816	766	85(无)	192	4.4
12	321	173	816	681	170(32.5R)	192	3.5
13	298	198	816	511	340(52.5R)	188	4.5
14	298	198	816	596	255(42.5R)	188	3.5
15	298	198	816	681	170(32.5R)	188	6.5
16	298	198	816	766	85(无)	188	5.5

表 4 混凝土冻融循环试验配合比

Table 4 Mix proportion of concrete freeze-thaw cycle test

kg/m<sup>3</sup>

编号	水泥	粉煤灰	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	减水剂
NSCC	361	120	816	851	0	202	4.3
RSCC、RSCC-32.5R、42.5R、52.5R	361	120	816	681	170	202	4.3

表 5 混凝土正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of concrete

编号	T50/s	坍落扩展度/mm	离析程度	抗压强度/MPa	劈拉强度/MPa	抗折强度/MPa
1	4	700	轻微泌水	43.1	2.65	4.1
2	4.5	605	均匀	46.5	3.07	4.8
3	3.8	690	轻微泌水	46.7	2.87	5.0
4	4.1	600	均匀	41.6	2.61	4.6
5	4.6	685	轻微泌水	41.3	2.51	4.2
6	3.5	735	泌水,中间堆积	43.1	2.59	4.5
7	5.8	615	均匀	45.1	2.83	4.6
8	4.5	645	均匀	44.7	2.54	4.5
9	4.8	630	均匀	40.3	2.34	4.0
10	4.4	665	均匀	42.4	2.43	4.2
11	3.6	705	轻微泌水	45.9	2.71	4.6
12	4.3	630	均匀	45.0	2.58	4.0
13	4.6	650	均匀	38.5	2.25	3.8
14	7.7	580	均匀	41.3	2.55	4.3
15	5.3	650	均匀	43.5	2.54	4.2
16	3.9	655	均匀	42.2	2.25	4.0

注:试验各种强度为每组 3 个试件强度取平均值。

2.1.1 坍落扩展度分析 根据《自密实混凝土技术应用工程》<sup>[15]</sup>的规定,当坍落扩展度为 550~650 mm 时,混凝土属于 SF1 等级;当坍落扩展度为 650~750 mm 时,属于 SF2 等级;当坍落扩展度为 750~850 mm 时,属于 SF3 等级。从图 2 坍落扩展度柱状图可以看出,各组混凝土的坍落扩展度均能达到性能等级 SF1,大部分组扩展度的 5%误差线均达到性能等级 SF2,其中,第 6 组达到了 SF3,出现了较

为严重的泌水现象,这是因为第 6 组中再生粗骨料替代率最低,相较于替代率高的其他组,骨料的吸水率低,同时,天然骨料表面光滑,在一定程度上可以增强混凝土的流动性;其次,该组的减水剂掺量最大,在混凝土的搅拌过程中,水泥颗粒之间形成絮凝结构,减水剂能够分散这种结构,释放其中的水分,增大了坍落扩展度,过量的减水剂则导致了泌水现象的出现,这种情况不满足自密实混凝土的工作性

能要求。

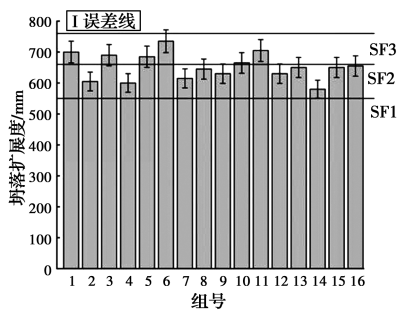


图 2 坍落扩展度测定

Fig. 2 Determination of slump expansion

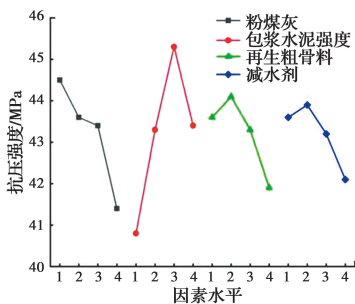
2.1.2 正交试验分析 从表 6 及图 3 各因素对抗压强度的影响可看出,随着粉煤灰掺量的增加,抗压强度呈现出持续下降的趋势,当掺量由 25%增长为 40%时,混凝土的抗压强度分别降低了 2%、2.5% 和 7%;经过水泥包浆后,抗压强度有了不同程度的提高,其中,42.5R 水泥的包浆效果最优,强度提高了 11%;随着再生粗骨料替代率和减水剂掺量的增

加,抗压强度均出现先增加后减少的趋势,在替代率为 20%时,强度达到最大,为 44.1 MPa,减水剂掺量为 0.9%时达到最大,为 43.9 MPa。故考虑上述因素对抗压强度的影响,最优组合为粉煤灰掺量 25%、包浆水泥强度 42.5R、再生粗骨料替代率 20%和减水剂掺量 0.9%。同理,劈拉强度的最优组合为粉煤灰掺量 25%、包浆水泥强度 42.5R、再生粗骨料替代率 20%和减水剂掺量 0.7%,抗折强度的最优组合为粉煤灰掺量 25%、包浆水泥强度 42.5R、再生粗骨料替代率 30%和减水剂掺量 0.9%。

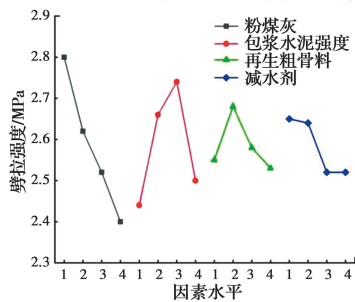
表 6 极差分析表

Table 6 Range analysis table

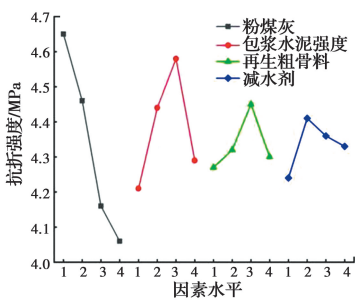
指标	因素	k1	k2	k3	k4	极差
抗压强度	A	44.5	43.6	43.4	41.4	3.1
	B	40.8	43.3	45.3	43.4	4.5
	C	43.6	44.1	43.3	41.9	2.2
	D	43.6	43.9	43.2	42.1	1.8
	空白列	43.4	43.5	43.3	42.5	1.0
劈裂抗拉强度	A	2.80	2.62	2.52	2.40	0.4
	B	2.44	2.66	2.74	2.50	0.3
	C	2.55	2.68	2.58	2.53	0.15
	D	2.65	2.64	2.52	2.52	0.13
	空白列	2.54	2.62	2.57	2.60	0.08
抗折强度	A	4.65	4.46	4.16	4.06	0.59
	B	4.21	4.44	4.58	4.29	0.37
	C	4.27	4.32	4.45	4.30	0.18
	D	4.24	4.41	4.36	4.33	0.17
	空白列	4.25	4.35	4.33	4.41	0.16



(a) 各因素对抗压强度的影响



(b) 各因素对劈拉强度的影响



(c) 各因素对抗折强度的影响

图 3 各因素对指标的影响

Fig. 3 Influence of various factors on indicators

综上所述,粉煤灰掺量 A、包浆水泥强度 B 两个因素对于 3 个指标来说,都分别以 A<sub>1</sub>、B<sub>3</sub> 为最优;再生粗骨料替代率 C 因素,抗压强度和劈裂抗拉强度均是 C<sub>2</sub> 好,从 k 值可以看出 C 因素取 C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>,抗折强度相差不大,故选取 C<sub>2</sub>;减水剂掺量 D 因素,抗压强度和抗折强度均是 D<sub>2</sub> 好,对于 3 个指标来说,D 因素均为处于末尾的次要因素,故选取 D<sub>2</sub>。故最佳方案为 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>,即粉煤灰掺量为 25%,包浆水泥强度 42.5R,再生粗骨料替代率 20%和减水剂掺量 0.9%。

2.1.3 力学性能指标换算关系分析 从表 7 和图 4 劈裂抗拉强度与抗压强度的关系可看出,式(1)、式(2)、式(4)计算的 C60 以下混凝土劈裂抗拉强度明显

高于本文研究的自密实再生混凝土的强度,式(3)计算的 C30 以上混凝土的劈裂抗拉强度明显低于本文的自密实再生混凝土的强度。同理,抗折强度与抗压强度的关系也是如此,故普通混凝土、再生混凝土劈

裂抗拉和抗折强度的计算式已经不再适用于自密实包浆再生骨料混凝土。新提出的式(5)、式(9)的计算结果与试验数据较吻合,可以作为自密实包浆再生骨料混凝土劈裂抗拉和抗折强度的计算式。

表 7 力学性能指标换算关系

Tab. 7 Conversion relation of mechanical property index

公式类别	公式编号	来源	公式
劈裂抗拉与抗压强度之间的关系	(1)	混凝土结构设计规范 <sup>[16]</sup>	$f_{ts}=0.19f_{cu}^{0.75}$
	(2)	金昌等 <sup>[17]</sup>	$f_{ts}=0.81f_{cu}^{0.40}$
	(3)	杨曦等 <sup>[18]</sup>	$f_{ts}=0.2396f_{cu}^{0.5782}$
	(4)	向星赞等 <sup>[19]</sup>	$f_{ts}=0.945f_{cu}^{0.34}$
	(5)	本文	$f_{ts}=0.0534f_{cu}^{1.0297}$ ( $38.5 \leq f_{cu} \leq 46.7$ )
抗折与抗压强度之间的关系式	(6)	美国混凝土协会 <sup>[20]</sup>	$f_f=0.54f_{cu}^{0.5}$
	(7)	金昌等 <sup>[17]</sup>	$f_f=0.77f_{cu}^{0.5}$
	(8)	陈宗平等 <sup>[21]</sup>	$f_f=0.12f_{cu}$
	(9)	本文	$f_f=0.0413f_{cu}^{1.2366}$ ( $38.5 \leq f_{cu} \leq 46.7$ )

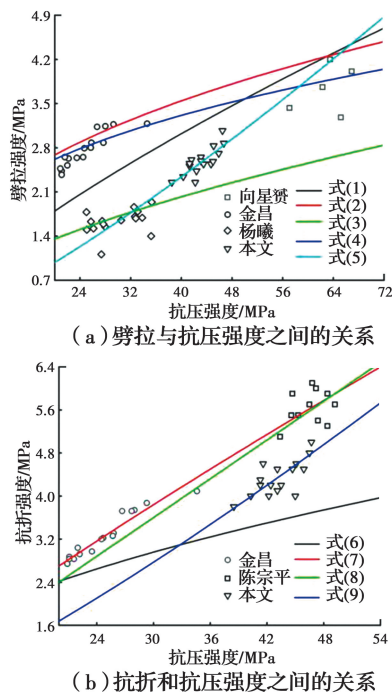


图 4 混凝土劈裂抗拉强度、抗折强度与抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between splitting tensile strength, flexural strength and compressive strength of concrete

## 2.2 混凝土抗冻性能分析

2.2.1 性能指标分析 从图 5 混凝土质量损失曲线图可看出,在 50 次冻融循环之前,普通混凝土的质量损失率逐渐增大,而再生混凝土组均出现负增长趋势。这是因为与天然骨料相比,再生粗骨料自

身存在较多微裂缝及孔洞,在冻融前期,随着冻融次数的增多,这种微裂缝进一步扩展,大量吸收外界水分,造成了试件质量的增加;50 次循环之后,各组试件质量损失率均逐渐增长,普通混凝土的增长趋势明显缓于再生混凝土,在 150 次冻融循环后,未包浆的 RSCC 组质量损失率达到最大,为 3.71%,普通混凝土 NSCC 组为 3.43%,经过包浆的 32.5R、42.5R、52.5R 三组分别为 3.24%、2.97%、3.09%。这是因为再生混凝土的冻融损伤在初期就高于普通混凝土,随着冻融循环次数的增多,损伤不断累积,导致新旧界面过渡区破坏严重,试件外表剥落更为显著。经过包浆处理后,水泥浆优化了再生粗骨料的物理性能,强化了界面过渡区,提高了混凝土抗冻性,降低了质量损失率。

从图 5 强度损失率曲线图可以看出,在 25 次冻融循环后,未包浆的 RSCC 组抗压强度损失率最大,为 6.9%,包浆的 3 组与普通混凝土的强度损失相差不多,随着冻融循环次数的增加,各组的强度损失出现明显差别,100 次循环后,RSCC 组强度损失率最大,为 27.8%,NACC 组最小,为 16.7%,经过包浆的 32.5R、42.5R、52.5R 三组分别为 23.1%、19.5%、22.3%。经比较,虽然包浆后的再生混凝土强度损失率不及普通混凝土,但相较于未包浆的,已经有了明显的改善,其中,42.5R 的水泥包浆效果最好。这是因为水泥浆填充了再生粗骨料内部的细小

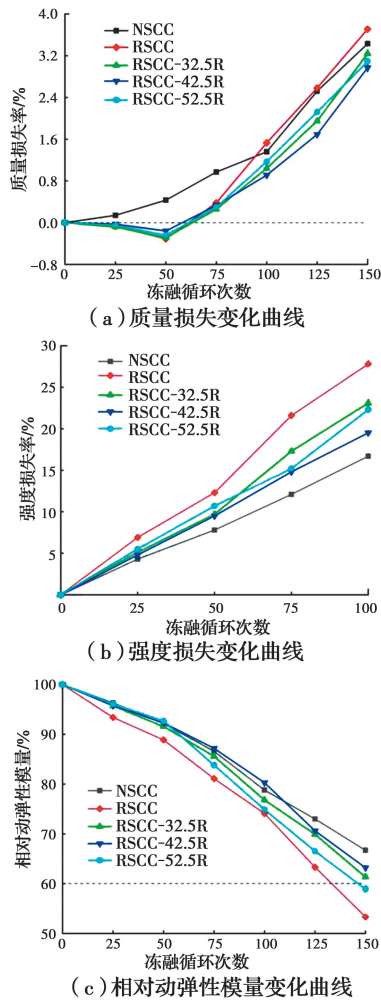


图 5 混凝土性能指标与冻融循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between performance index of concrete and freeze-thaw cycles

裂缝,提高了其整体密实性,同时,在骨料表面形成一种保护层,增强了其坚固性,进而改善了冻融后的混凝土抗压强度。

从图 5 相对动弹性模量曲线图可以看出,随着冻融循环次数的增加,各组试件的相对动弹性模量均逐渐降低,在整个冻融过程中,未包浆的 RSCC 组下降趋势一直最快,150 次冻融循环后,其相对动弹性模量仅为 53.3%。在 50 次冻融循环前,普通混凝土与包浆的 32.5R、42.5R、52.5R 三组相差不大,50 次循环之后,随着次数的增加,差别逐渐显著,在 150 次循环后差别达到最大,相对动弹性模量分别为 66.7%、61.3%、63.2%、58.9%。经过包浆的 32.5R、42.5R、52.5R 三组与未包浆的 RSCC 组相比,150 次后,相对动弹性模量分别增加了 8%、9.9%、5.6%,其中,42.5R 水泥的效果最好。这是因为再生粗骨料内部具有众多的微小裂缝,表面残

留大量的水泥砂浆,在配置成混凝土时,一般存在多种界面过渡区,与普通混凝土相比,这些过渡区相对脆弱,更易受到破坏。在冻融循环过程中,骨料自身的微裂缝加上界面过渡区受到破坏产生的微裂缝为水分的迁移提供了大量通道,使得混凝土内部形成静水压力及渗透压力,当压力超出一定范围时,再生混凝土产生破坏。随着冻融次数的增加,再生混凝土内部的裂缝逐渐增多、加宽,相互贯通,导致混凝土的破坏逐渐加剧<sup>[2]</sup>。再生骨料经过包浆后,水泥水化反应加上粉煤灰与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等高碱性物质发生二次水化反应能够生成大量的水化硅酸钙和铝酸钙等物质,弥补了内部的微裂缝,改善了表面粗糙程度,使得混凝土的不同类型界面过渡区有了不同程度的增强,提高了混凝土的抵抗冻胀能力。

2.2.2 基于抗压强度和相对动弹性模量的冻融损伤模型分析 混凝土的抗压强度随着冻融循环次数的增加不断下降,为了详细地研究不同种类骨料配置的混凝土强度与冻融循环次数的关系,以抗压强度为损伤变量,冻融前的混凝土抗压强度为基准值,对各组混凝土的试验数据进行拟合,建立抗压强度的非线性关系式

$$f_{\text{cu},N} = f_{\text{cu},0} - aN^2 - bN \quad (10)$$

式中:  $f_{\text{cu},N}$  为冻融循环  $N$  次后的抗压强度;  $f_{\text{cu},0}$  为冻融循环前的抗压强度;  $N$  为冻融循环次数;  $a$ 、 $b$  为拟合系数。

基于抗压强度建立的损伤模型式(10),得到各组的拟合系数  $a$ 、 $b$ ,见表 8,相应的抗压强度与冻融循环次数拟合曲线如图 6(a)所示。从表 8 可以得出,相关系数  $R^2$  均在 0.99 以上,拟合精度较高,说明抗压强度与冻融循环次数之间具有较好的相关性,基于抗压强度建立的混凝土冻融损伤模型合理。

表 8 抗压强度损伤模型系数和  $R^2$ Table 8 Damage model coefficient and  $R^2$  of compressive strength

试件编号	$f_{\text{cu},0}$	$a$	$b$	相关系数 $R^2$
NSCC	50.4	0.000 06	0.077 6	0.998 3
RSCC	46.2	0.000 1	0.118 3	0.994 8
RSCC-32.5R	47	0.000 2	0.086	0.997 4
RSCC-42.5R	48.7	0.000 04	0.091 6	0.999 6
RSCC-52.5R	47.6	0.000 1	0.093 4	0.996 0

根据 Lemaitre 应变等价原理<sup>[22]</sup>,用无损材料的应变等价代替受损材料的应变,定义自密实包浆再生骨料混凝土的冻融损伤变量  $D$  为

$$D(N) = 1 - E_N/E_0 = 1 - E_r \quad (11)$$

式中: $E_N$  为冻融循环  $N$  次后的动弹性模量; $E_0$  为冻融循环前的动弹性模量; $E_r$  为相对动弹性模量。

根据式(11)计算各组混凝土不同冻融循环次数的损伤值,将试验数据进行拟合,建立混凝土冻融损伤模型的关系式

$$D(N) = \ln(c + dN) \quad (12)$$

式中: $N$  为冻融试验次数; $c$ 、 $d$  为拟合系数。

基于损伤值建立的模型式(12),得到各组的拟合系数  $c$ 、 $d$ ,见表 9,绘制损伤值与冻融循环次数的拟合曲线如图 6(b)所示,从表 9 可以得出,相关系数  $R^2$  均在 0.94 以上,拟合精度较高,说明损伤值与冻融循环次数之间具有较好的相关性,基于相对动弹性模量建立的混凝土冻融损伤模型是合理的,同时,从拟合曲线图 6 中可以看出,未包浆 RSCC 组的损伤值一直处于最大,包浆的 3 组相较之下损伤值均有所减少,混凝土的抗冻性有了不同程度的改善,其中 42.5R 水泥的包浆效果最好。

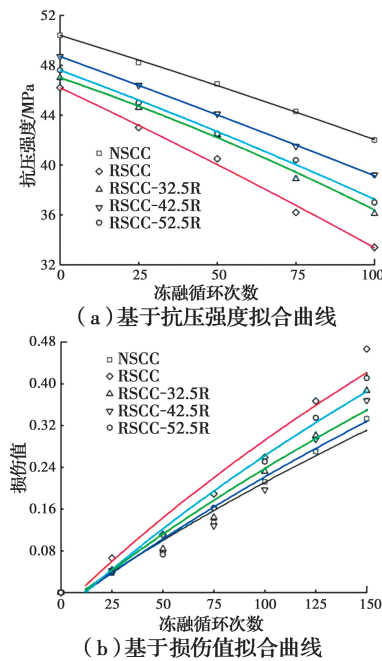


图 6 混凝土冻融损伤拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of freeze-thaw damage of concrete

表 9 相对动弹性模量损伤模型系数和  $R^2$

Table 9 Damage model coefficient and  $R^2$  of relative dynamic elasticity modulus

试件编号	$c$	$d$	相关系数 $R^2$
NSCC	0.975 1	0.002 6	0.976 5
RSCC	0.969 1	0.003 7	0.962 6
RSCC-32.5R	0.968 4	0.003	0.964 2
RSCC-42.5R	0.968 1	0.002 8	0.949 7
RSCC-52.5R	0.959 9	0.003 4	0.959 3

### 2.3 微观分析

图 7 为冻融循环前混凝土微观形貌,其中图 7(a)为普通混凝土试件,可以看出,28 d 时该组水化反应比较充分,大量的水化产物 C-S-H(水化硅酸钙)凝胶将骨料紧密地粘结在一起,界面过渡区未发现明显微裂缝,整体密实度高,孔洞较少,这也是该组冻融循环前抗压强度最高的微观原因;图 7(b)为未包浆的再生骨料混凝土试件,可以清楚看见大量水化产物 C-S-H 凝胶,未水化的球形粉煤灰颗粒等物质,但与图 7(a)相比,整体密实度低,存在较多孔洞,骨料与浆体的界面过渡区存在明显的裂缝,这是因为再生骨料表面存在较多的旧水泥砂浆,在配置混凝土时与新水泥砂浆的粘结力较差,容易出现微裂缝,造成界面过渡区薄弱,降低再生混凝土的强度;图 7(c)为再生骨料采用 42.5R 水泥浆包裹的混凝土,可以看出,骨料自身存在着裂缝,但裂缝里存

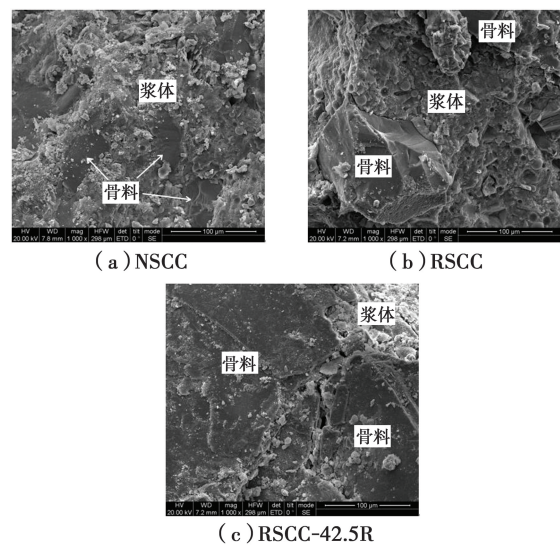


图 7 0 次冻融循环的混凝土微观形貌

Fig. 7 Microstructure of concrete with 0 freeze-thaw cycles



在大量的水化产物。这是因为再生骨料自身强度较低,在机械破碎时容易造成损伤,产生一定的裂缝,经过水泥浆包裹后,水泥水化反应产生的 C-S-H 凝胶等物质弥补了骨料内部的微裂缝,同时改善了骨料表面的粗糙程度,加强了骨料与浆体的界面过渡区,提高了混凝土的强度。

图 8 为 100 次冻融循环后混凝土的微观形貌,图 8(d)、(e)、(f) 分别为图 8(a)、(b)、(c) 3 幅图在电镜 5 000 倍下的微观图片。与图 7 中未冻融试件相比,100 次冻融循环后,由于各组试件中的毛细水反复冻结融化,受到膨胀压应力和渗透压应力的气孔出现膨胀破裂,导致水化产物由密实变疏松,且出现不同程度的裂缝,如图 8 所示。从电镜 5 000 倍下的图片可以看出,普通混凝土的裂缝最大宽度为  $1\ \mu\text{m}$ ,骨料经过包浆的再生混凝土最大裂缝为  $1.67\ \mu\text{m}$ ,未包浆的再生混凝土裂缝最大宽度则达到了  $5\ \mu\text{m}$ ,远大于其他两组,且裂缝不断延伸,逐渐出现相互贯通的趋势,宏观上表现为抗压强度的下降。再生混凝土抗冻性差的一个关键因素是骨料与浆体的界面过渡区较普通混凝土相对薄弱,在冻融循环过程中极易受到破坏,再生骨料经过水泥浆的包裹处理后,能够在一定程度上强化薄弱的界面过渡区,延缓冻融循环后裂缝的产生,进而达到提高混凝土抗冻性的效果。

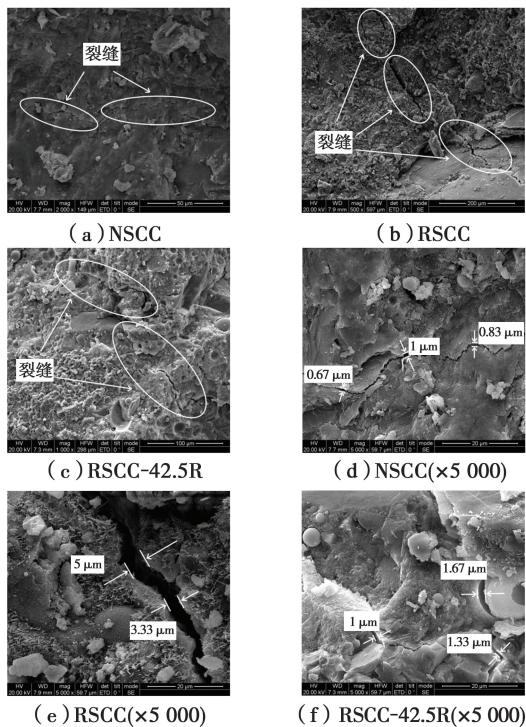


图 8 100 次冻融循环的混凝土微观形貌

Fig. 8 Microstructure of concrete with 100 freeze-thaw cycles

### 3 结论

采用的再生粗骨料取自废弃的路缘石混凝土,该混凝土强度高于其他楼板之类的混凝土,其破碎后的再生粗骨料性能相对更优,经过试验研究后得到以下结论:

1) 通过正交试验得出,自密实包浆再生骨料混凝土的最佳配比方案为:粉煤灰掺量 25%,包浆水泥强度 42.5R,再生粗骨料替代率 20%和减水剂掺量 0.9%,且普通混凝土和再生混凝土的力学性能之间的关系式不适用于该混凝土,提出的劈裂抗拉强度、抗折强度与抗压强度的新关系式与试验数据较吻合。

2) 从质量损失、抗压强度及相对动弹性模量 3 个方面均可看出采用包浆骨料的自密实再生混凝土相较于骨料未包浆的混凝土抗冻性能有了明显地提高,其中,42.5R 的水泥包裹效果最佳。

3) 基于抗压强度和相对动弹性模量建立的混凝土冻融损伤模型,相关系数均在 0.9 以上,拟合精度较高,能够直观地反映出自密实包浆再生骨料混凝土的冻融损伤规律。

4) 从微观分析得出,再生粗骨料经过包浆改善混凝土的性能主要通过优化再生粗骨料物理性能及强化混凝土的界面过渡区实现。

#### 参考文献:

- [1] HU B, ZHENG S, REN G S. The experimental study on the frost resistance of different recycled coarse aggregate replacement rate of recycled concrete [J]. DEStech Transactions on Materials Science and Engineering, 2017.
- [2] 王晨霞, 刘路, 曹美波, 等. 冻融循环后再生混凝土力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 193-202.
- [3] WANG C X, LIU L, CAO F B, et al. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 193-202. (in Chinese)
- [4] NAGATAKI S, GOKCE A, SAEKI T, et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 965-971.
- [5] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing

- and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(5): 799-806.
- [5] ZAHARIEVA R, BUYLE-BODIN F, WIRQUIN E. Frost resistance of recycled aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(10): 1927-1932.
- [6] 霍俊芳, 王聪, 侯永利, 等. 纤维再生混凝土的抗冻性能及孔结构研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(7): 2141-2145.  
HUO J F, WANG C, HOU Y L, et al. Frost resistance and pore structure of recycled fiber concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(7): 2141-2145. (in Chinese)
- [7] 陈爱玖, 王静, 马莹. 钢纤维橡胶再生混凝土的抗冻性试验[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(4): 933-941.  
CHEN A J, WANG J, MA Y. Test of frost resistance for steel fiber rubber recycled concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(4): 933-941. (in Chinese)
- [8] MURALI G, VINODHA E. Experimental and analytical study of impact failure strength of steel hybrid fibre reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(10): 5487-5497.
- [9] 赵飞, 周志云, 陈新星, 等. 再生粗骨料和矿物掺合料对再生混凝土抗冻性影响的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 183-186, 191.  
ZHAO F, ZHOU Z Y, CHEN X X, et al. Study on effect of recycled coarse aggregate and mineral admixture on frost resistance of recycled concrete [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 183-186, 191. (in Chinese)
- [10] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 砖粒及粉煤灰掺量对再生混凝土抗冻性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(14): 237-240.  
AN X Z, NIU W, ZHANG Y F, et al. Influence of brick particle and fly ash on frost resistance of recycled coarse aggregate concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(14): 237-240. (in Chinese)
- [11] YANG S, LEE H. Freeze-thaw resistance and drying shrinkage of recycled aggregate concrete proportioned by the modified equivalent mortar volume method [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2017, 11(4): 617-626.
- [12] 雷斌, 邹俊, 饶春华, 等. 氧化石墨烯对再生混凝土改性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(Sup2): 103-108.  
LEI B, ZOU J, RAO C H, et al. Experimental study on modification of recycled concrete with graphene oxide [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Sup2): 103-108. (in Chinese)
- [13] 王玲玲, 谷亚新, 李育霖, 等. 纳米强化技术对再生混凝土耐久性影响研究[J]. *混凝土*, 2014(7): 48-51.  
WANG L L, GU Y X, LI Y L, et al. Effects of nano-strengthening technology on the durability of recycled concrete [J]. *Concrete*, 2014(7): 48-51. (in Chinese)
- [14] 普通混凝土长期性能和耐久性性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T 283—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T 283-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 金昌, 王雪萍, Akinkulore Olufunke Olanike, 等. 再生混凝土力学性能指标换算关系试验研究[J]. *混凝土*, 2008(11): 37-39, 49.  
JIN C, WANG X P, OLANIKE A O, et al. Experimental research on the conversion relationships between the mechanical performance indexes of recycled concrete [J]. *Concrete*, 2008(11): 37-39, 49. (in Chinese)
- [18] 杨曦, 吴瑾, 梁继光. 再生混凝土抗拉强度与抗压强度关系的试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2009, 35(5): 190-192.  
YANG X, WU J, LIANG J G. Experimental study on relationship between tensile strength and compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. *Sichuan Building Science*, 2009, 35(5): 190-192. (in Chinese)

- [19] 向星赞, 赵人达, 李福海, 等. 自密实再生混凝土的基本力学性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 359-365.  
XIANG X Y, ZHAO R D, LI F H, et al. Experimental investigation of basic mechanical properties of self-compacting recycled aggregate concrete [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 359-365. (in Chinese)
- [20] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete(ACI 318-95)and commentary (ACI 318-95 ) [ S ]. Detroit: American Concrete Institute, 1995.
- [21] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.  
CHEN Z P, XU J J, ZHENG H H, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 24-32. (in Chinese)
- [22] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
YU T Q, QIAN J C. Damage theory and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 41-42. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)