

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.024

改性再生骨料对自密实混凝土性能的影响

王怀亮^{1,2}, 张楠³

(1.大连大学 建筑工程学院,116622 辽宁 大连;2.清华大学 深圳研究生院-格林美城市资源循环利用工程技术研究中心,518055 广东 深圳;3.大连理工大学 建设工程学部,116024 辽宁 大连)

摘 要:为提高再生骨料的性能,使之适用于自密实混凝土,使用4种强化手段对简单破碎后的两种来源再生骨料进行改性处理,研究其对新配RA-SCC工作性能和硬化后物理力学等性能的影响.结果发现:骨料来源和原生混凝土强度对再生骨料的品质有较大影响,而经过改性处理以后,不同来源的再生骨料品质都有所提升,所制成的RA-SCC性能差异变小;裹浆法以及水玻璃浸泡的方法能够较大程度地改善新拌RA-SCC的自密实性能;高温煅烧法、酸性溶液浸泡法、水玻璃分散技术可使硬化后的RA-SCC内部结构更加致密,从而明显改善了RA-SCC的抗拉强度、抗干燥收缩性能和抗冻性能,但大部分骨料增强技术对RA-SCC的抗压强度和弹性模量的影响较小.

关键词: 再生骨料;自密实混凝土;骨料强化;性能

中图分类号: TU311.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)06-0150-07

Assessment of treated recycled concrete aggregates on the properties of recycled-aggregate-self-compacting concrete

WANG Huailiang^{1,2}, ZHANG Nan³

(1.Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, 116622 Dalian, Liaoning, China; 2. Joint Research Center of Urban Resource Recycling Technology of the Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University and Shenzhen Green Eco-Manufacturer High-Tech, 518055 Shenzhen, Guangdong, China; 3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To improve the recycled concrete aggregates (RA) quality for using in self-compacting concrete (SCC), the effect of four alternative treatment methods of RA with two sources on the fresh and hardened properties of RA-SCC were evaluated. The result shows that the RA sources and parent concrete strength has great influence on the quality and properties of RA. While after the pretreatment of RA, the RA qualities from different sources are improved and the performance difference of RA-SCC becomes small. The presoaking in the water glass dispersion and cement-fly ash slurry can significantly improve self-consolidating characteristics of fresh RA-SCC. The thermal expansion method, low-concentration acid dissolution method and water glass dispersion method provide denser and connected microstructures leading to the significant improvement in tensile strength, dry shrinkage resistance and frost resistance of RA-SCC. Most enhancement methods have a limited effect on compressive strength and modulus of elasticity.

Keywords: recycled concrete aggregate; self-compacting concrete; enhancement of aggregates; properties

自密实混凝土(SCC)^[1]具有良好的流动性、填

充性、间隙通过性及抗离析性,在许多特殊结构(如大型薄壁、钢筋布置密集部位、振捣特别困难的结 构)中体现出巨大的优越性.再生骨料混凝土^[2]是利用旧建筑物上拆下来的废弃混凝土块,经过破碎、清洗和筛分后,作为部分或全部骨料重新拌制的混凝土.如果将再生骨料添加到自密实混凝土中制成再生骨料自密实混凝土(RA-SCC),这样就集合了建

收稿日期:2015-04-06.

基金项目:清华大学深圳研究生院-城市资源循环利用工程技术研究中心开放基金(URRT2014006);辽宁省自然科学基金(2015020593);大连大学大学生创新项目(2015030).

作者简介:王怀亮(1979—),男,博士,副教授.

通信作者:王怀亮,whuailiang@163.com.

筑垃圾作为再生骨料循环利用和自密实混凝土免振捣两方面的优势,是一种真正绿色环保的高性能混凝土.但目前关于 RA-SCC 研究较少,已有资料^[3-4]主要研究了再生骨料替代率对 RA-SCC 性能的影响.

再生骨料在破碎过程中往往残留一定量的旧水泥砂浆,这些旧水泥砂浆微观上是疏松多孔结构,导致再生骨料具有孔隙率高、表观密度低、吸水率高、内在微裂纹多、强度低等特点,因此,振捣成型的再生骨料混凝土各项力学性能指标要劣于天然骨料混凝土.为了制备高性能的再生骨料自密实混凝土,一个非常可行的思路就是对再生骨料进行预处理,使之成为品质优良的骨料,目前主要的再生骨料预处理技术有:超声波破碎法^[5]、微波加热法^[6]、高温法^[7]、二次搅拌法^[8]、酸性溶液浸泡法^[9]、水玻璃分散法^[10]以及裹浆法^[11]等等.以上方法均试图尽可能的去除骨料上的老旧松散水泥砂浆,以改善再生骨料品质、增强再生骨料与新水泥浆体的黏结性能.但某些方法往往需要比较复杂昂贵的机械设备、材料以及能耗也比较高,失去了绿色混凝土节能减排的意义.为此,本文着重选取 4 种比较经济可行的再生骨料强化技术,针对两种来源的再生骨料,探讨不同再生骨料增强技术和再生骨料来源对新拌自密实混凝土工作性能和硬化后物理、力学性能以及耐久性能的影响,以期对 RA-SCC 的配合比设计及其力学性能指标的评估提供参考.

1 试验内容与方法

1.1 再生粗骨料预处理方式

使用两种来源的再生骨料:一种为结构试验后废弃试件破碎而成,原生混凝土强度等级在 C40 到 C80 之间,龄期为 3 个月,制成的再生骨料记作 RA1;一种来自某建筑结构拆除后的废弃构件破碎而成,原生混凝土强度等级在 C30 以下,龄期为 20 a 以上,制成的再生骨料记作 RA2.正式试验前,根据实验室的条件采用几种比较经济实用适合大批量再生骨料生产的预处理手段:

- 1) 预湿水法(未做增强处理):将再生骨料预先在水中浸泡和清洗,晾干后进行筛分;
- 2) 高温煅烧法:先将所有废弃试件破碎成大块,放置到高温炉中快速升温至 300 ℃,用冷水快速冷却,使用破碎机将其二次破碎和研磨,并进行筛分;
- 3) 酸性溶液浸泡法:采用浓度为 3 mol · L⁻¹ 的 HCl 溶液浸泡再生骨料 24 h,之后浸泡在清水中清洗,去除残留酸性溶液后进行筛分,制成骨料级配和

- 颗粒外形符合自密实混凝土要求的再生骨料;
- 4) 水泥-粉煤灰裹浆法:将初步筛分后的再生骨料与水泥-粉煤灰粉混合加少量的水进行混合搅拌,养护 28 d 后进行筛分;
 - 5) 水玻璃分散法:选用建筑工程常用的高模数水玻璃对再生骨料进行表面改性处理,本次试验用水玻璃模数为 3.2,密度为 1.384 g · cm⁻³.

1.2 试验配合比

依据普通天然骨料自密实混凝土配合比设计方法,并考虑再生骨料的高吸水率特性,经过调整减水剂掺量多次试验得到了工作性能良好的再生骨料自密实混凝土.拌合物中再生骨料替代率为 100%,分为未做增强处理骨料和经过上述 4 种办法处理的骨料.表 1 列出了拌合物的配合比.RA-SCC 分组用骨料来源(RA1、RA2)和再生骨料预处理方法来划分.如第一种再生骨料 RA1 的拌合物代号分别为 RA1-U(未做增强处理)、RA1-H(高温)、RA1-HCl(低浓度盐酸溶液浸泡)、RA1-CFS(水泥-粉煤灰裹浆)和 RA1-WG(水玻璃).试验采用普通硅酸盐 52.5R 水泥;细骨料采用天然河砂,中砂,级配良好,细度模数 2.5;掺合料为 I 级粉煤灰,F 类;外加剂采用聚羧酸系高效减水剂,减水率(质量分数)为 15%~20%.破碎和预处理后所有再生粗骨料按粒径范围划分为 5~10 mm 和 10~20 mm 两批,粗细骨料级配均满足规范要求.

表 1 RA-SCC 配合比							kg · m ⁻³
编号	粉煤灰	水泥	砂	RA (5~10 mm)	RA (10~20 mm)	水	减水剂
RA-U	260	410	676	430	430	178	4.2
RA-H	260	410	676	430	430	178	3.1
RA-HCl	260	410	676	430	430	178	3.1
RA-CFS	260	410	676	430	430	178	3.6
RA-WG	260	410	676	430	430	178	3.6

1.3 试验过程

根据规范建议的自密实混凝土工作性能试验方法^[12]对新拌 RA-SCC 的工作性能进行测试,包括流动性、填充性、通过能力和抗离析能力等,分别用坍落扩展度试验、T₅₀₀、V 槽试验、L 槽试验以及筛分试验来测试以上工作性能,以比较不同再生骨料预处理技术和不同骨料来源对新拌自密实混凝土工作性能的影响.

同时进行 RA-SCC 试块的浇筑,采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块在标准条件下养护,分别在 3、7、14 和 28 d 测定 RA-SCC 的抗压强度和劈裂抗拉强度,采用 150 mm×150 mm×300 mm 试件量测 RA-SCC 的弹性模量,试验方法参照 GBT

50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行.参照 GBT 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行干缩变形性能和冻融循环试验,其中收缩试件为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体,收缩试件成型后,覆盖静置 24 h 拆模,随后移至标准养护室养护,养护室环境温度为(20±5)℃,相对湿度为 60%±5%,并按规定龄期测定试件的收缩变形,每组 3 块,取平均值作为试验结果.冻融循环试验采用普通混凝土耐久性试验中的慢冻法,试块为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体,设定冻融循环 300 次,每 50 次停机对自密实混凝土的相对动弹模、质量损失率进行测试,并对 300 次冻融试验后的试件进行抗压和劈裂抗拉试验.

2 试验结果与分析

2.1 再生骨料性能

配制自密实混凝土前,为对比起见,试验测试了饱和面干状态下再生骨料的表观密度、压碎指标和 24 h 吸水率等指标,见表 2.源于高强原生混凝土的再生骨料品质要高于源于低强度原生混凝土的再生骨料,如 RA1 的颗粒密度要高于 RA2,而吸水率则低于 RA2;高温煅烧法、酸性溶液浸泡法和水玻璃分散法可以显著改善再生骨料的品质,提高了再生骨料的表观密度,降低了其吸水率和压碎指标,但水泥-粉煤灰裹浆法对再生骨料品质的改善效果十分有限.

表 2 再生骨料性能

编号	密度/(kg·m ⁻³)		吸水率/%		压碎指标/%
	5~10 mm	10~20 mm	5~10 mm	10~20 mm	10~20 mm
RA1-U	2 430	2 480	5.70	4.60	12.20
RA1-H	2 460	2 502	3.70	3.10	9.46
RA1-HCl	2 450	2 504	3.60	2.70	10.52
RA1-CFS	2 370	2 410	6.20	5.70	12.62
RA1-WG	2 470	2 565	1.30	0.70	9.85
RA2-U	2 380	2 430	6.10	5.20	18.70
RA2-H	2 410	2 457	4.10	3.60	12.22
RA2-HCl	2 408	2 448	4.20	3.80	10.60
RA2-CFS	2 350	2 425	6.70	5.90	18.80
RA2-WG	2 470	2 490	1.10	0.80	11.35

2.2 工作性能

表 3 列出了 RA-SCC 工作性能试验结果.所有 RA-SCC 拌合物流动扩展度直径都在 700±50 mm 的范围内,扩展流动时间 T_{500} 都小于 5 s,均符合自密实混凝土的流动性要求,可用于主要的结构构件^[13].RA 经过预处理后,新拌 RA-SCC 流动扩展度

直径提高, T_{500} 变小,V 槽流动时间 T_V (5 min 后流动时间)也有所降低,其中,水玻璃分散法对流动性的改善作用最为显著.L 槽试验主要为了衡量新拌自密实混凝土通过钢筋的能力,再生骨料经过预处理后,L 槽试验的 $T_{20\text{ cm}}$ 和 $T_{40\text{ cm}}$ 时间都有所减少,表明 RA 处理后吸水率降低,RA-SCC 拌合物均能顺利通过钢筋,在钢筋密集处无堵塞现象.湿筛试验是为了测试新拌 SCC 的抗离析能力,抗离析系数 SR (segregation ratio) 越小,SCC 的抗离析性能越好,RA 没经过预处理的 RA1-U 和 RA2-U 的抗离析系数均低于 5%,这说明 RA 未经处理的 RA-SCC 中自由水比较少,黏度比较大.

表 3 新拌 RA-SCC 的工作性能

编号	扩展度/ mm	T_{500} / s	T_V / s	L 槽 H_2/H_1	$T_{20\text{ cm}}$ /s	$T_{40\text{ cm}}$ /s	SR/%
RA1-U	655	4.1	21.8	0.81	4.2	9.8	4.8
RA1-H	720	3.5	17.8	0.86	2.4	4.5	5.8
RA1-HCl	720	3.2	16.4	0.88	1.4	3.1	5.6
RA1-CFS	735	2.6	13.4	0.86	2.8	5.5	7.6
RA1-WG	740	1.8	12.5	0.92	1.8	4.7	11.7
RA2-U	680	4.6	23.3	0.80	5.0	10.0	4.4
RA2-H	710	3.4	18.1	0.85	1.8	4.8	5.6
RA2-HCl	700	3.9	19.4	0.84	2.2	5.1	5.2
RA2-CFS	725	2.8	15.7	0.83	3.0	5.0	6.4
RA2-WG	730	2.2	14.1	0.88	1.9	3.6	9.3

2.3 物理性能

各种再生骨料预处理技术对养护 28 d 后 RA-SCC 试块吸水率的影响见图 1,可发现,除了水泥粉煤灰裹浆法之外,其他预处理技术可有效降低吸水率.这是由于这些预处理技术或者减小了残余砂浆含量,或者改善了再生骨料表面的多孔疏松微观结构,均为 RA 和浆体之间提供了比较强的黏结力,使内部结构更加致密.

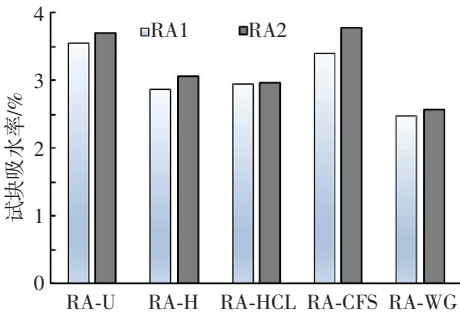


图 1 骨料增强技术对试块吸水率的影响

图 2 给出了 RA-SCC 试块密度与再生骨料颗粒密度(表观密度)之间的关系,可以看出,预处理技术对 RA-SCC 密度改善作用不大,RA 经过处理后骨料颗粒密度得到提高,试块密度也要略高于再生骨

料不进行预处理的RA-SCC.另外,骨料来源和原生混凝土强度对 RA-SCC 的试块密度有较大影响^[14],而经过再生骨料预处理过程以后,不同来源的再生骨料制成的 RA-SCC 试块密度差异变小.对本文两种来源的再生骨料,RA-SCC 试块密度与再生骨料的颗粒密度有着非常好的相关性.

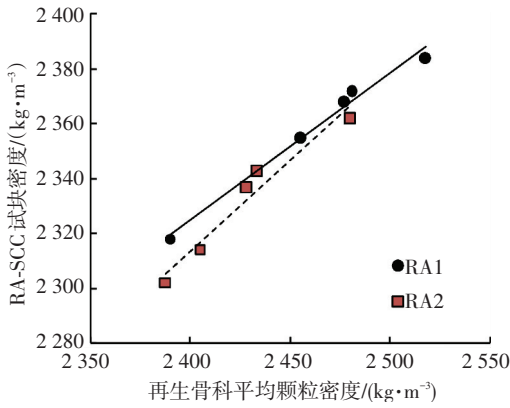


图 2 试块密度与再生骨料平均颗粒密度的关系

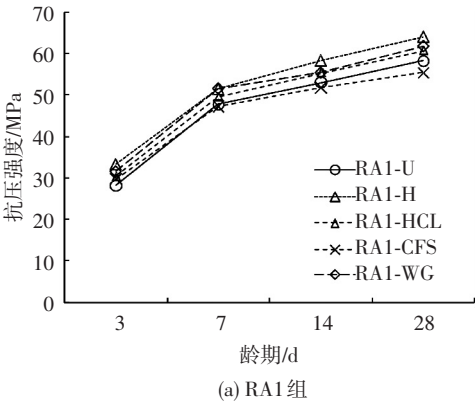
2.4 力学性能

图 3 给出了两种再生骨料来源时 RA-SCC 抗压强度随龄期的发展规律,由图易见,所有试块的 3 d 强度都在 28 d 强度的 50±10% 范围内,经过 RA 预处理的 RA-SCC 3 d 强度都高于 RA 未处理的试块,并且均在 28 d 强度 50% 以上,RA-SCC 未强化处理的试块 3 d 强度低于 28 d 强度的 50%,因此 RA 预处理技术改善了骨料和新水泥砂浆之间界面层的性能,提高了 RA-SCC 的早期强度.随着水化作用的发展,所有经过 RA 预处理的试块 7 d 抗压强度都在 28 d 强度的 85% 以上,而 RA 未处理的自密实混凝土试块,抗压强度则低于 28 d 强度的 80%.对比各组的 28 d 抗压强度见图 4,可以发现,由于制成 RA1 组自密实混凝土的再生骨料源于较高强度的原生混凝土,因此 RA1 组配制的 RA1-SCC 抗压强度要高于 RA2 组.对同一再生骨料来源的自密实混凝土,大部分骨料强化手段对抗压强度的改善效果都不是十分明显.

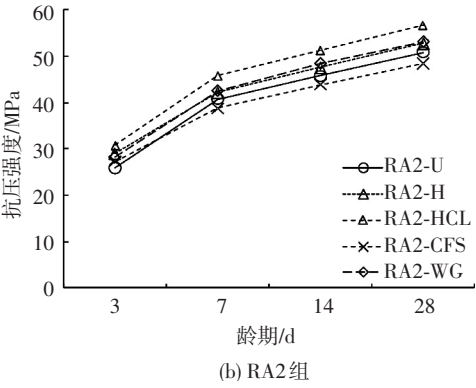
图 5(a)为 28 d 龄期各组 RA-SCC 的弹性模量,RA1 组的弹性模量要高于 RA2,有效的再生骨料处理技术可提高两组试件的弹性模量.与试块密度相类似,当再生骨料颗粒密度提高 8% 时,RA-SCC 的 28 d 抗压强度和弹性模量都提高了大致 10% 左右.经过对本文两种再生骨料来源的再生骨料自密实混凝土弹模试验数据以及文献[15]中天然骨料(石灰岩骨料) SCC 弹模数据的回归分析,可得出 SCC 弹性模量 E_{SCC} (GPa) 和立方体抗压强度 f_{cu} (MPa) 的关系:

$$E_{SCC} = 9.405 f_{cu}^{0.343} \left(\frac{\gamma}{2400} \right)^{3.3}, \quad (1)$$

式中 γ 为自密实混凝土的表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),按式(1)计算的自密实混凝土弹性模量与其实测值的对比见图 5(b),可见本文所建立的自密实混凝土弹性模量计算模型不仅适用于天然骨料自密实混凝土,还适用于再生骨料自密实混凝土.



(a) RA1 组



(b) RA2 组

图 3 再生骨料增强手段对抗压强度发展的影响

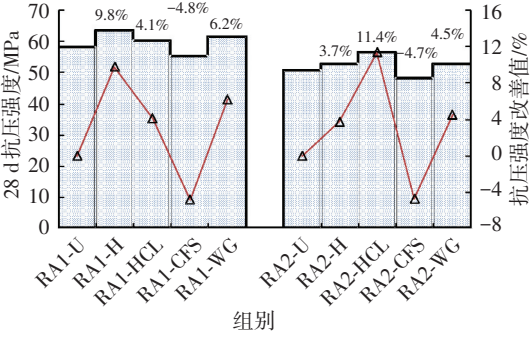


图 4 不同再生骨料预处理技术改善抗压强度的效果

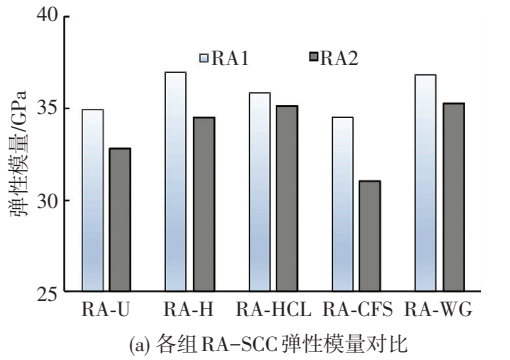
图 6(a)为各组 RA-SCC 28 d 劈拉强度的对比.与对照组 RA 未处理的自密实混凝土相比,高温法、低浓度盐酸浸泡处理和水玻璃改性处理的自密实混凝土 28 d 劈拉强度提高了 4%~10%,但水泥-粉煤灰裹浆处理的 RA-SCC 劈拉强度未得到提高.经过对本文两种再生骨料来源的 RA-SCC 劈裂抗拉强度试验数据以及文献[15]中天然骨料 SCC(石灰岩骨料,掺合料为超细粉煤灰)劈拉强度数据的回归分析,可得出自密实混凝土劈拉强度 f_{ct} (MPa) 和立方体抗压强度 f_{cu} (MPa) 的关系:

$$f_{ct} = 0.241 f_{cu}^{2/3}. \quad (2)$$

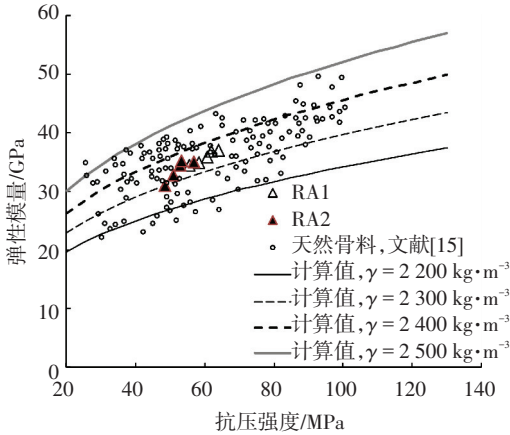
另外肖建庄等^[16]给出了振捣成型再生混凝土

劈拉强度与抗压强度的关系式:

$$f_{ct} = 0.212f_{cu}^{0.731} \tag{3}$$

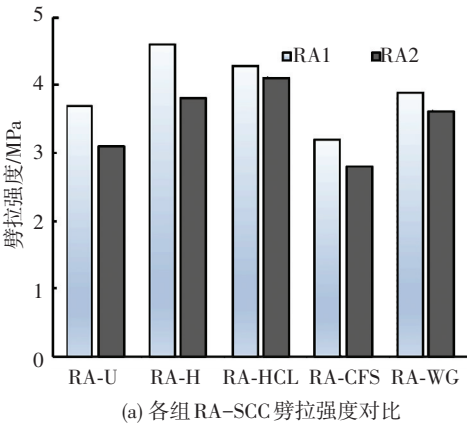


(a) 各组 RA-SCC 弹性模量对比

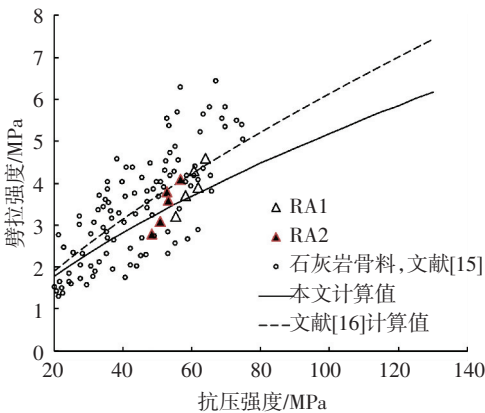


(b) 弹性模量试验值与计算值对比

图 5 28 d 龄期弹性模量



(a) 各组 RA-SCC 劈拉强度对比



(b) 劈拉强度试验值与计算值对比

图 6 28 d 龄期劈拉强度

本文试验配制的 RA-SCC 劈拉强度与抗压强度的关系见图 6(b), 可以看出, 按由振捣成型的再生混凝土回归分析式(3) 计算得出的劈拉强度对 RA-SCC 而言偏于不安全, 而 RA-SCC 与天然石灰岩骨料 SCC 都比较符合式(2) 所描述的函数关系, 因此使用 100% 再生骨料所配制的 RA-SCC 力学性能也可达到天然骨料 SCC 的性能要求. 同等条件下, RA1 组劈拉强度要高于 RA2 组. 为了解释再生骨料来源对 RA-SCC 劈拉强度的影响, 图 7 给出了再生骨料压碎指标与劈拉强度的关系. 显然, RA-SCC 劈拉强度不仅与砂浆-骨料界面层黏结强度有关, 还与再生骨料品质指标即压碎指标有很强的关联.

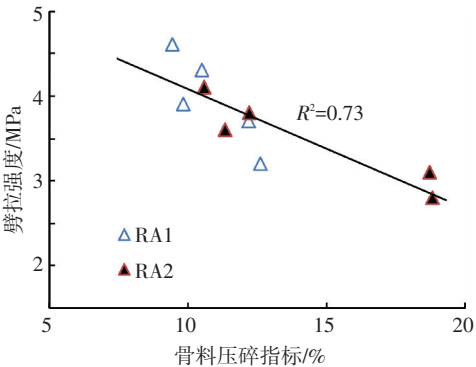


图 7 劈拉强度与再生骨料压碎指标的关系

2.5 收缩性能

一般认为再生混凝土的收缩值比普通混凝土大^[17], 但再生骨料对自密实混凝土收缩性能的影响还未见报道, 长期收缩变形是 RA-SCC 应用需解决的主要问题之一. 不同来源再生骨料对 RA-SCC 长期收缩性能的影响见图 8. 所有试件干燥收缩在 56 d 左右慢慢趋于稳定, 基本达到 112 d 干燥收缩值的 95% 左右. RA1 组骨料由于附着的废旧水泥砂浆较少, 骨料吸水率低, 最终长期收缩变形要小于 RA2 组. 对同一来源再生骨料, 以 RA-U 组的干燥收缩值为基准, 可以发现, 高温法、低浓度盐酸浸泡处理和水玻璃改性处理等手段都显著降低了试件的干燥收缩. 一般认为, SCC 体积稳定性比如自收缩、干燥收缩和徐变等与其内部水化反应和水分迁移有关^[18], RA 经过表面改性处理后, RA 强度较高, 骨料与新水泥砂浆的黏结较好, 有利于改善 RA-SCC 的内部孔隙结构、降低材料与水润湿性, 由此可能减小 RA-SCC 内部的水分扩散速率, 即有效的再生骨料预处理技术有利于提高 RA-SCC 的保水性, 从而抑制 RA-SCC 的干缩变形. 文献[19] 采用低吸水性 ($\leq 1\%$) 天然骨料、28 d 抗压强度为 55~65 MPa 的 SCC, 其 180 d 龄期时的收缩率值范围是 $3.2 \times 10^{-4} \sim 5.7 \times 10^{-4}$, 而本文两种再生骨料 RA-WG 组 112 d 龄期时收缩率为 3.7×10^{-4} , 这进一步说明了

水玻璃分散技术十分有效地降低了 RA-SCC 的长期收缩变形,使 RA-SCC 抗收缩变形性能接近于天然骨料自密实混凝土.

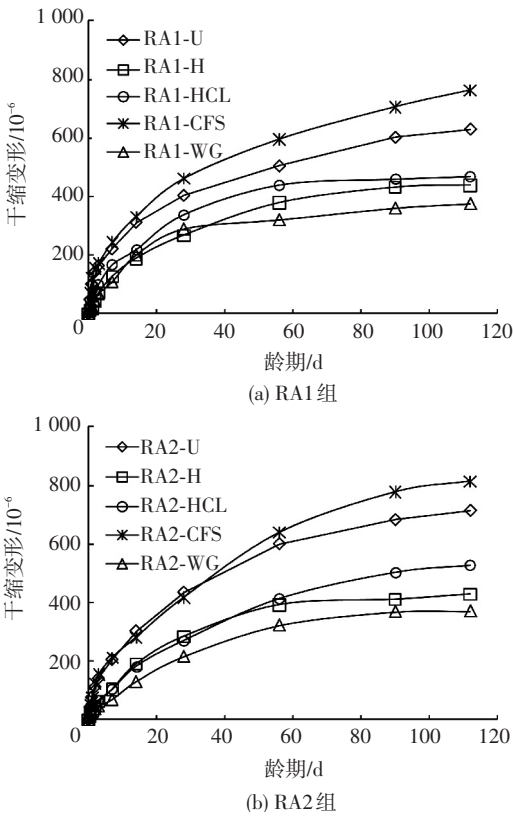


图 8 RA-SCC 干缩变形对比

2.6 抗冻性能

图 9 为冻融 300 次后 RA-SCC 主要性能指标的对比,冻融试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的非标准试块,抗压强度和劈拉强度分别用 f_{cu100} 和 f_{sp} 表示.可以看出,RA 未做改性处理时,300 次冻融循环后,RA1 和 RA2 组试件之间的质量损失差异比较大,这说明再生骨料品质较低(粗骨料吸水率较大时),RA-SCC 抗冻融性能就差,但经过再生骨料的强化处理后,两组的质量损失有大幅度的降低,并且两组之间的差异变小.在经过 300 次冻融循环后,RA1-U、RA1-H、RA1-HCL、RA1-CFS 和 RA1-WG 的抗压强度分别降低了 17.18%、10.02%、10.38%、20.04%和 6.31%;劈拉强度降低百分比按顺序依次为:RA-U>RA-CFS>RA-HCL>RA-H>RA-WG,这一变化说明高温煅烧法、水玻璃分散法以及 HCl 溶液浸泡法通过改善再生骨料的品质性能,明显提高了 RA-SCC 的抗冻融耐久性能.但由于水泥-粉煤灰粉裹浆处理的 RA 与新的水泥砂浆之间的黏结性能比较弱,微观上依旧属于多孔疏松结构,这种再生骨料预处理技术未能明显减少冻融条件下 RA-SCC 的抗压强度和抗拉强度损失值.

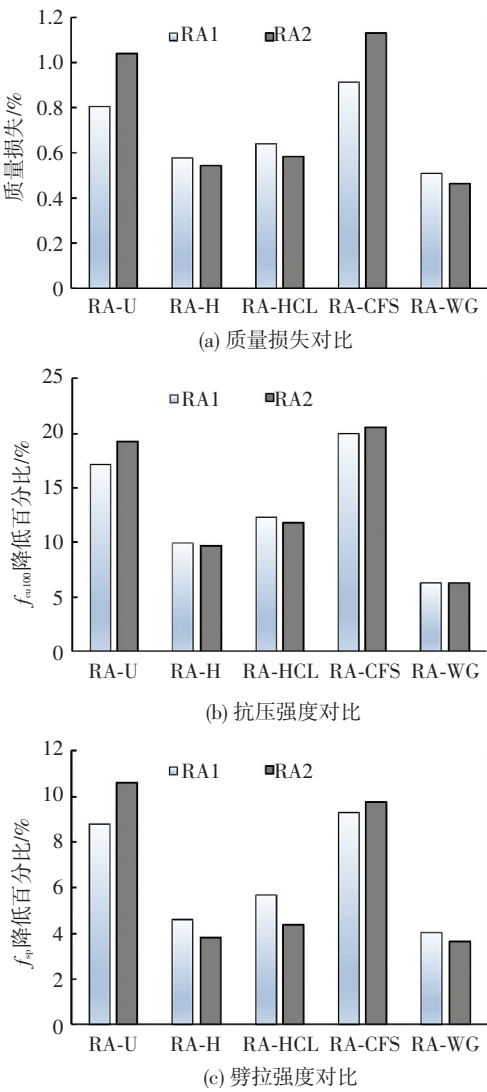


图 9 冻融 300 次后主要性能指标的对比分析

3 结 论

- 1)再生骨料的预处理技术对再生骨料的一些物理性能指标如表观密度、吸水率和压碎值指标有了相当程度的改善,再生骨料采取有效的预处理措施后,基本可以满足自密实混凝土对骨料性能指标的要求,这为绿色高性能混凝土技术的发展又开辟了一条新的途径.
- 2)使用 100%再生骨料替代率的 RA-SCC 基本能满足填充性,流动性和通过能力的要求,没有阻塞和离析现象的出现.各种再生骨料的强化手段非常明显地改善了新拌 RA-SCC 的工作性能.
- 3)原生混凝土的强度和性能对再生骨料的品质有较大的影响,从而不同来源的再生骨料制成的 RA-SCC 性能也有着较大的差异.而经过再生骨料的物理化学强化处理以后,不同来源的再生骨料品质都有所提升,所制成的 RA-SCC 性能差异变小.物理力学性能试验结果还表明大部分再生骨料预处理技术对 RA-SCC 的物理力学性能指标都有一定的提升

作用.通过试验数据的统计回归,初步得出了改性 RA-SCC 各项物理力学性能指标与再生骨料品质特征之间的关系模型.

4) 收缩性能和冻融试验结果表明,高温煅烧法、水玻璃分散法以及 HCl 溶液浸泡法都能有效的改善 RA-SCC 的收缩性能,提高 RA-SCC 的抗冻性能.

值得注意的是,以上再生骨料强化手段都有一定的缺陷和不足,如对 HCl 溶液浸泡法,如果盐酸溶液浓度过高,就可能会腐蚀骨料表面,导致骨料表面重新成为多孔结构;而使用水泥粉煤灰裹浆处理的 RA-SCC 性能并没有得到改善,这可能是由于粉煤灰颗粒不能够有效地填充再生骨料表面的微小裂纹.另外,以上再生骨料的预处理技术对 RA-SCC 抗渗性、抗碳化性和抗硫酸盐侵蚀性能的影响还需要进一步的试验研究.

参考文献

- [1] SHI Caijun, WU Zemei, LÜ Kuixi, et al. A review on mixture design methods for self-compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84 (6): 387-398.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] TUYAN M, AGHABAGLOU A M, RAMYAR K. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate [J]. *Materials and Design*, 2014, 53 (1): 983-991.
- [4] GRDIC Z J, CURCIC G A T, DESPOTOVI I M, et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(7): 1129-1133.
- [5] MASATO T, TAKAFUMI N, TAMURA M, et al. Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, 5 (1): 13-25.
- [6] HEESUP C, RYOMA K, TAKAFUMI N. Effective recycling of surface modification aggregate using microwave heating [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2014, 12(2): 34-45.
- [7] SUI Yuwu, MUELLER A. Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(10): 1487-1495.
- [8] AKBARNEZHAD A, ONG K C G, TAM C T, et al. Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(12): 1795-1802.
- [9] YOUNIS K H, PILAKOUTAS K. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49(12): 688-701.
- [10] ISMAIL S, RAMLI M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44(7): 464-476.
- [11] ELHAKAM A A, MOHAMED A E, AWAD E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35 (10): 421-427.
- [12] 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.
- [13] NAIK T R, KUMAR R, RAMME B W, et al. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30(5): 463-469.
- [14] 吴瑾, 朱磊, 景宪航. 再生粗骨料的随机特性及分级方法研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(2): 97-104.
- [15] ASLANI F, NEJADI S. Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: an analytical study [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36 (11): 330-247.
- [16] 肖建庄, 雷斌, 袁飏. 不同再生粗集料混凝土劈裂抗拉强度分布特征 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(2): 223-229.
- [17] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8): 1070-1078.
- [18] 杨玉红, 李悦, 杜修力. 自密实混凝土早期自收缩及微观孔结构研究 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(5): 601-606.
- [19] ASLANI F, NEJADI S. Shrinkage behavior of self-compacting concrete [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2012, 13 (6): 407-419.

(编辑 赵丽莹)