

文章编号:1673-9469(2024)06-0001-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.001

溶蚀环境下自密实再生混凝土微观性能研究

蒋建华,张巍,赵克寒,马福良

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要: 为了探究钙溶蚀对自密实再生混凝土微观性能的影响机理,考虑再生粗骨料取代率与粉煤灰掺量的影响,开展了氯化铵溶液加速钙溶蚀条件下自密实再生混凝土的微观性能试验研究。试验结果表明,随着溶蚀龄期增长,自密实再生混凝土超声波速减小,最可几孔径和大毛细孔占比增大,普通自密实再生混凝土孔隙率持续增大,掺有粉煤灰的自密实再生混凝土孔隙率先减小后增大。同一溶蚀龄期内,随着再生粗骨料取代率的增加,自密实混凝土超声波速减小,内部pH值和溶蚀过渡区尺寸减小;随着粉煤灰掺量的增加,自密实再生混凝土超声波速先增大后减小,内部pH值和溶蚀过渡区尺寸增大。溶蚀过程中,当粉煤灰掺量为10%、20%时,自密实再生混凝土孔隙结构细化,抗溶蚀性能提升,而当粉煤灰掺量为30%时,自密实再生混凝土孔隙结构劣化,抗溶蚀性能下降。

关键词: 自密实混凝土;钙溶蚀;再生粗骨料取代率;粉煤灰掺量

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Study on the Micro-properties of Self-compacting Recycled Concrete Under Calcium Dissolution Environment

JIANG Jianhua, ZHANG Wei, ZHAO Kehan, MA Fuliang

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: To explore the mechanism of the influence of calcium dissolution on the micro properties of self-compacting recycled concrete (SCRC), considering the effects of the replacement rate of recycled coarse aggregate (RCA) and the dosage of fly ash (FA), an experimental study was conducted on the micro properties of SCRC under accelerated calcium dissolution conditions using ammonium chloride solution. The experimental results show that as the dissolution age increases, the ultrasonic velocity of SCRC decreases, and the proportion of most probable and large capillary pores increases. The porosity of ordinary SCRC continues to increase, while the porosity of SCRC mixed with FA first decreases and then increases. Within the same dissolution age, as the replacement rate of RCA increases, the ultrasonic velocity of SCRC, and the internal pH value and size of the dissolution transition zone decrease; With the increase of FA content, the ultrasonic velocity of SCRC first increases and then decreases, and the internal pH value and the size of the dissolution transition zone increase. During the dissolution process, when the FA content is 10% or 20%, the pore structure of SCRC is refined and its resistance to dissolution is improved. However, when the FA content is 30%, the pore structure of SCRC deteriorates and its resistance to dissolution decreases.

Key words: self-compacting concrete; calcium dissolution; replacement rate of RCA; content of FA

收稿日期:2023-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408192);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202232)

作者简介:蒋建华(1982-),男,重庆人,博士,副教授,从事混凝土耐久性方面的研究。

建筑物拆除后产生的废弃混凝土常采用填埋、堆放的方式处理,浪费土地资源,易对环境造成二次污染。废弃混凝土经过清除杂质、破碎处理后,可作为再生骨料制备再生混凝土。再生混凝土存在孔隙率高、内部界面过渡区薄弱、离散性大等不足,其力学性能和耐久性相对较差^[1-2]。与普通混凝土相比,自密实混凝土具有更为致密的微观结构和孔隙网络,抗渗透性能更好,被认为是再生骨料的良好载体^[3-4]。为提高建筑废料的资源化利用率,可用再生骨料替换部分天然骨料,制备自密实再生混凝土。在实际工程中,混凝土结构的长期耐久性日益受到重视,溶蚀是涉水混凝土结构面临的主要耐久性问题。混凝土长期与水接触,内部钙流失严重,孔隙孔径增大,力学性能下降,工程承载力降低^[5]。

自密实再生混凝土由于其特殊的微观结构和组分,溶蚀时与普通混凝土对比,在反应速率、破坏形态、性能劣化等方面存在诸多差异。与天然骨料相比,再生骨料对于溶蚀更为敏感,自密实再生混凝土的溶蚀深度随再生粗骨料取代率的增大而增加^[6]。为降低再生骨料对混凝土抗溶蚀性能的负面影响,可以掺入粉煤灰、硅灰和磨碎的高炉矿渣等辅助胶凝材料以取代水泥,间接减少混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,改善孔隙结构,但粉煤灰掺量过高会导致混凝土早期强度降低^[7-9]。Yehia 等^[10]通过调整骨料级配,提高再生骨料堆积密度以增强再生混凝土抗溶蚀性能;Phung 等^[11]研究了水灰比和石灰石掺合料取代率对混凝土抗溶蚀性能的影响,发现水灰比对溶蚀损伤的影响更为显著;王宗熙等^[12]研究了纳米 SiO_2 对混凝土抗溶蚀性能的影响,结果表明纳米 SiO_2 可有效改善混凝土孔隙结构,延长混凝土溶蚀寿命。环境条件对混凝土溶蚀损伤亦具有显著影响。Yang 等^[13]研究发现,干湿交替的环境会加剧混凝土钙溶蚀,溶蚀深度随干湿循环次数的增加而增加;Larrard 等^[14]研究发现,环境温度会影响混凝土溶蚀速率,35℃溶蚀环境下混凝土的溶蚀深度是5℃溶蚀环境下的2.3倍左右;Tang 等^[15]开展了钙溶蚀和氯

离子侵蚀耦合作用下的水泥砂浆加速腐蚀试验,量化钙溶蚀对水泥砂浆中氯离子扩散的加速效应。目前,国内外针对混凝土溶蚀的研究主要集中在溶蚀深度、强度退化等宏观性能方面,而对于混凝土溶蚀后的微观性能研究相对不足。

基于此,本文重点考虑再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量的影响,从超声波速、内部 pH 值以及孔隙结构 3 个角度,研究钙溶蚀对自密实再生混凝土微观性能的影响,期望为自密实再生混凝土的工程应用和抗溶蚀性能的提升提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

水泥采用 P·O 42.5 硅酸盐水泥,粉煤灰为 II 级 F 类。天然粗骨料(Natural Coarse Aggregate, NCA)采用粒径 5~16 mm 的碎石;再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate, RCA)由废弃混凝土破碎制得,粒径为 5~16 mm;细骨料(Natural Fine Aggregate, NFA)为河砂(中砂),细度模数为 2.9。参照《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)、《建设用砂》(GB/T 14684—2022)测量粗、细骨料的物理性能,结果如表 1 所示。外加剂为聚羧酸高效减水剂;拌合水和配置氯化铵溶液(NH_4Cl)的溶剂均为普通自来水。

1.2 试件设计与制备

试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,混凝土水胶比为 0.45。立方体试件用于测量溶蚀后自密实再生混凝土超声波速和内部 pH 值。为探究再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量对自密实再生混凝土抗溶蚀性能的影响,考虑 0%、25%、50% 3 种再生粗骨料取代率,且当再生粗骨料取代率为 50% 时,粉煤灰掺量分别为 10%、20%、30%^[16-17]。试件配合比如表 2 所示,SR0 为基准组,设计强度等级为 C30。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),混凝土试件每组制备 15 个,共 90 个。

表 1 粗、细骨料物理性能指标

Tab. 1 Physical property indicators of coarse and fine aggregates

类别	细度模数	吸水率/%	压碎指标/%	含泥量/%	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
细骨料	2.9	2.9	—	3.0	2 640	—
天然粗骨料	—	3.8	10.7	0.5	2 700	1 410
再生粗骨料	—	9.8	15.2	1.0	2 670	1 280

表2 自密实再生混凝土试件配合比 (单位:kg/m³)
Tab. 2 Mixture proportions of SCRC specimens (unit:kg/m³)

组别	水灰比	水	水泥	砂	再生粗骨料	天然粗骨料	粉煤灰	减水剂
SR0	0.45	225.0	500	833	0.0	770.0	0	0.65
SR25	0.45	225.0	500	833	192.5	577.5	0	0.85
SR50	0.45	225.0	500	833	385.0	385.0	0	1.10
SR50F10	0.45	202.5	450	833	385.0	385.0	50	0.96
SR50F20	0.45	180.0	400	833	385.0	385.0	100	0.87
SR50F30	0.45	157.5	350	833	385.0	385.0	150	0.72

为避免再生粗骨料因吸水率较高影响自密实再生混凝土的工作性能,对再生粗骨料进行预湿处理,即再生粗骨料在水中浸泡24 h后,捞出晾至饱和面干状态,校正吸水率^[18]。混凝土拌合物采用强制式混凝土搅拌机制备,混凝土拌合物工作性能的测量过程如图1所示,测量结果如表3所示。本试验中的自密实再生混凝土试件工作性能均满足《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)中一般钢筋混凝土结构的要求,且不离析、不泌水。不同工况试件均同时同地一次浇筑完成,并在室内静置24 h后脱模。试件脱模后放入温度为(20±2)℃,相对湿度在95%以上的标准养护室中养护28 d。



(a) 坍落扩展度

(b) J环扩展度

图1 自密实再生混凝土工作性能测试

Fig. 1 Test for the working properties of SCRC

1.3 试验方法

1.3.1 加速钙溶蚀试验

采用化学试剂加速法模拟混凝土加速钙溶蚀试验,即将自密实再生混凝土试件浸泡于NH₄Cl溶液中^[6]。NH₄Cl溶液浓度为4 mol/L,pH值为

5.17,温度为25℃。将立方体试件间隔放置在塑料箱中并注入NH₄Cl溶液,直到没过试件顶部。为避免溶液中Ca²⁺饱和导致溶蚀速率下降,每隔14 d更换一次溶液。溶蚀龄期 t 设为14、28、42和56 d。

1.3.2 超声波速测试

本试验通过测量自密实再生混凝土试件的超声波速来间接量化其内部的溶蚀程度。当试件达到设定的溶蚀龄期后,从NH₄Cl溶液中取出,并用清水冲洗。试件表面擦干后,将超声波发射器与接收器置于试件两相对面中心处,利用对测法测得溶蚀后自密实再生混凝土的超声声时,依据试件棱长计算超声波速。

1.3.3 混凝土内部pH值测试

测量超声波速后,劈裂试件,沿溶蚀方向每隔4 mm(0~4 mm、4~8 mm、8~12 mm以此类推)通过钻孔收集试件劈裂面上不同深度处的混凝土粉末。取样时,同一深度处多点钻孔取粉,各深度位置均取样5 g。最后分别用15 g水溶解不同深度处的混凝土粉末试样,使用pH计测量悬浊液的pH值。

1.3.4 微观孔结构分析

本试验利用低场核磁共振技术采集自密实再生混凝土试样内部横向弛豫时间(Transverse Relaxation Time, T_2)的信号量,利用 T_2 信号表征混凝土的孔结构和孔径分布^[19-20]。图2所示为整套设备,该设备配置场强为0.42 T的磁场,频率设为

表3 自密实再生混凝土工作性能参数

Tab. 3 Working properties of SCRC

组别	坍落扩展度/mm	J环扩展度/mm	坍落扩展度与J环扩展度差值/mm	扩展时间 T_{500} /s	离析率/%
SR0	684	666	18	3.4	5.2
SR25	670	655	15	3.6	6.6
SR50	662	650	12	3.9	8.1
SR50F10	680	667	13	3.9	7.5
SR50F20	694	680	14	3.8	7.1
SR50F30	700	685	15	3.6	6.8



图2 低场核磁共振分析仪

Fig. 2 Low-field nuclear magnetic resonance analyzer

18 MHz, 磁体温度控制在 $(32 \pm 0.02)^\circ\text{C}$, 试验室温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。当试件达到设定的溶蚀龄期时, 将试件从 NH_4Cl 溶液中取出, 每个工况取 3 个试样。试样真空饱水 24 h 后, 采用核磁共振分析仪中提前设置的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 序列依次测定不同工况试样的孔隙率和 T_2 信号衰减曲线^[21]。将测得的 T_2 信号衰减曲线通过联合迭代重建反演算法反演后得到 T_2 信号量关于混凝土试样内部横向弛豫时间 T_2 的分布图, 从而得到混凝土试样各孔径孔隙体积及其占比。

2 试验结果与分析

2.1 超声波速

不同工况下自密实再生混凝土超声波速随溶蚀龄期的变化如图 3 所示。溶蚀过程中, 由于混凝土内部 Ca^{2+} 不断析出, 混凝土孔隙率增加, 超声波传播路程增大, 传播声时增加, 声速降低^[22]。溶蚀中后期, 混凝土内部 Ca^{2+} 析出速率由于内外 Ca^{2+} 浓度差减小而逐渐降低, 混凝土内部孔隙率增长放缓, 因而超声波速的下降速率先快后慢。由图 3 (a) 可知, 未溶蚀(养护 28 d)时, 自密实再生混凝土的超声波速随着再生粗骨料取代率的增加而下降, SR25、SR50 的超声波速较 SR0 分别下降了 5.13%、8.58%。这是因为再生骨料相较于天然骨料具有更高的孔隙率, 混凝土内部孔隙随再生粗骨料取代率的增加而增多。当溶蚀龄期从 0 d 增加至 56 d 时, SR0、SR25、SR50 的超声波速分别下降了 14.99%、12.74%、14.52%。

由图 3 (b) 可知, 未溶蚀(养护 28 d)时, 自密实再生混凝土的超声波速随着粉煤灰掺量的增加而下降, SR50F10、SR50F20、SR50F30 的超声波速较 SR50 分别下降了 2.87%、4.96%、7.60%。这是因为早龄期时粉煤灰水化不充分, 试件内部孔隙或微裂缝随粉煤灰掺量的增加而增多^[23]。溶蚀中后期, 粉煤灰掺量较低的自密实再生混凝土密实度有所提高, 超声波速下降相对缓慢。以溶蚀龄期 56 d 为例, SR50F10、SR50F20、SR50F30 的超声

波速分别为 SR50 的 1.01 倍、1.02 倍、0.98 倍。随着溶蚀龄期的增长, 粉煤灰与水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应, 生成胶凝性较好的 C-S-H 凝胶, 填充水化初期形成的孔隙。当溶蚀龄期从 0 d 增加至 56 d 时, SR50、SR50F10、SR50F20、SR50F30 的超声波速分别下降了 14.52%、10.95%、8.03%、8.91%。当粉煤灰掺量为 20% 时, 溶蚀 56 d 的自密实再生混凝土超声波速变化最小, 这表明适当掺入粉煤灰可减缓自密实再生混凝土溶蚀劣化速率。若粉煤灰掺量过多, 混凝土内部没有足够的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体与之水化, 内部界面则变得疏松多孔, 超声波速进一步下降。

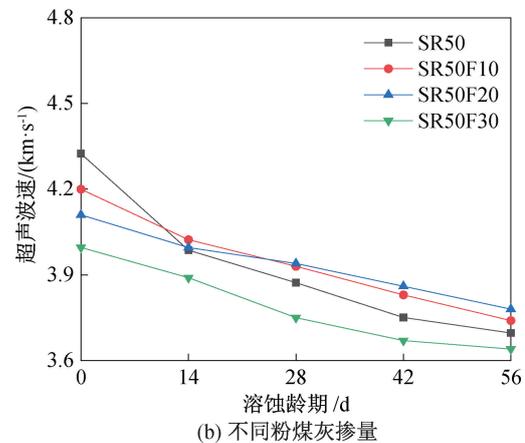
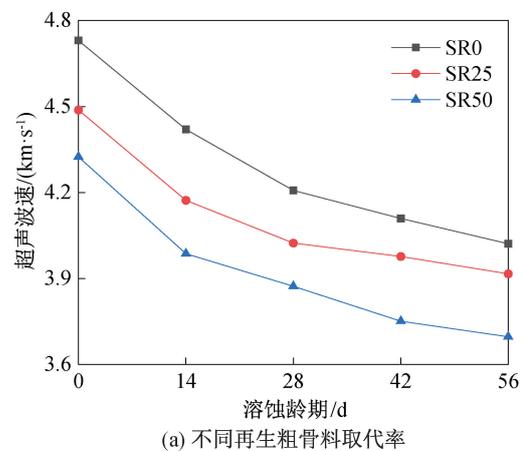


图3 不同工况下自密实再生混凝土超声波速

Fig. 3 Ultrasonic velocity of SCRC under different conditions

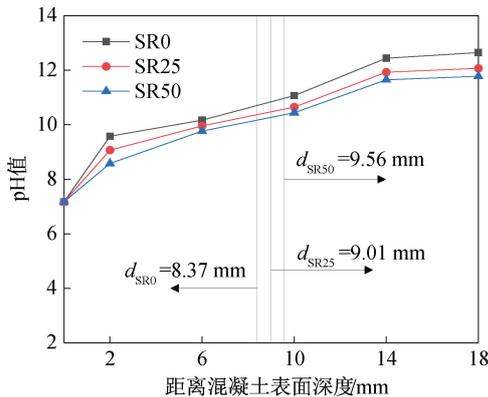
2.2 混凝土内部 pH 值

2.2.1 pH 值演变规律

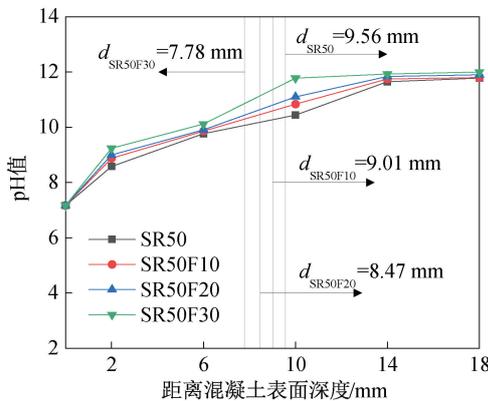
溶蚀龄期为 28 d 时, 不同工况下自密实再生混凝土内部 pH 值的变化如图 4 所示。 NH_4Cl 不断与混凝土内部的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 发生化学反应, 并逐渐扩散到混凝土内部更深处, 使混凝土内部孔隙液的 pH 值发生变化, 自密实再生混凝土内部 pH 值随深度的增加而逐渐增大。由图 4 (a) 可

知,自密实再生混凝土内部同一深度处的 pH 值随再生粗骨料取代率的增大而减小。距离混凝土表面 2 mm 处,SR25、SR50 的 pH 值分别比 SR0 减少了 6.73%、13.19%;距离混凝土表面 10 mm 处,SR25、SR50 的 pH 值分别比 SR0 减少了 4.63%、6.95%。随着再生粗骨料取代率增大,混凝土内部孔隙增多,Ca²⁺更容易析出,并与 NH₄Cl 发生化学反应。

由图 4(b)可知,自密实再生混凝土内部同一深度处的 pH 值随粉煤灰掺量的增大而增大。距离混凝土表面 2 mm 处,SR50F10、SR50F20、SR50F30 的 pH 值分别比 SR50 增加了 4.56%、6.38%、10.03%,距离混凝土表面 10 mm 处,SR50F10、SR50F20、SR50F30 的 pH 值分别比 SR50 增加了 4.74%、7.82%、15.88%。一方面,胶凝材料中 Ca²⁺含量随粉煤灰掺量的增大而下降,Ca(OH)₂与 NH₄Cl 的化学反应速率减缓^[24];另一方面,由粉煤灰二次水化生成的 C-S-H 凝胶填充混凝土内部孔隙,减少 Ca²⁺析出。



(a) 不同再生粗骨料取代率



(b) 不同粉煤灰掺量

图 4 不同工况下自密实再生混凝土溶蚀深度和横断面 pH 值分布

Fig. 4 Dissolution depths and distributions of pH of SCRC under different conditions

2.2.2 溶蚀反应区

目前在混凝土钙溶蚀研究中,常采用酚酞试剂法测量混凝土的溶蚀深度^[25]。本试验中,不同工况下试件溶蚀 28 d 时的溶蚀深度 d 如图 4 所示。为了更精确地表征混凝土内部的溶蚀损伤程度,本文基于所测得的溶蚀深度以及混凝土内部 pH 值的变化划分溶蚀区^[26-27]。以溶蚀龄期为 28 d 的 SR50F20 试件为例,混凝土溶蚀在 0 ~ 8.47 mm 深度范围定义为完全溶蚀区;8.47 ~ 14.00 mm 深度范围,pH 值上升幅度较大,该区域定义为溶蚀过渡区;深度大于 14.00 mm 时,pH 值基本稳定在 11.9 左右,该区域为未溶蚀区。不同工况下自密实再生混凝土溶蚀 28 d 后的各溶蚀区尺寸如表 4 所示。随着再生粗骨料取代率的增加,混凝土完全溶蚀区尺寸逐渐增大,溶蚀过渡区尺寸逐渐减小;而随着粉煤灰掺量的增加,混凝土完全溶蚀区尺寸减小,溶蚀过渡区尺寸增大。

表 4 基于 pH 值和溶蚀深度的混凝土溶蚀区划分

Tab. 4 Division of concrete dissolution zone based on

pH values and dissolution depths

组别	各溶蚀区对应的深度范围/mm			
	完全溶蚀区	溶蚀过渡区	未溶蚀区	溶蚀过渡区尺寸
SR0	0~8.37	8.37~14.00	14.00~18.00	5.63
SR25	0~9.01	9.01~14.00	14.00~18.00	4.99
SR50	0~9.56	9.56~14.00	14.00~18.00	4.44
SR50F10	0~9.01	9.01~14.00	14.00~18.00	4.99
SR50F20	0~8.47	8.47~14.00	14.00~18.00	5.53
SR50F30	0~7.78	7.78~10.00	10.00~18.00	2.22

2.3 微观孔结构

2.3.1 孔径分布

从本试验超声波速的测试结果来看,低掺量粉煤灰在溶蚀中后期改善了自密实再生混凝土的孔隙结构。为进一步分析粉煤灰掺量对自密实再生混凝土孔隙结构的影响,使用低场核磁共振技术测量不同粉煤灰掺量混凝土试样的孔径分布和孔隙率。混凝土的孔隙依据孔径大小可分为凝胶孔、中毛细孔、大毛细孔和气孔 4 种;而最可几孔径是混凝土基体中最有可能出现的最大孔径,表示单位质量体积变化最大的孔隙所对应的孔径^[28]。各溶蚀龄期内,不同粉煤灰掺量自密实再生混凝土试样对应四级孔径区间内的孔隙体积占总孔隙体积的比例和最可几孔径如表 5 所示。其中,凝胶孔占总孔隙体积的比例随溶蚀龄期的增长呈下降趋势,中毛细孔所占比例变化不大,大毛细孔所占

表 5 不同粉煤灰掺量自密实再生混凝土在各溶蚀龄期的孔径分布数据

Tab. 5 Pore size distribution data of SCRC under different FA cotents at different ages

工况	龄期/d	凝胶孔 (<10 nm)/%	中毛细孔 ($10\sim 50$ nm)/%	大毛细孔 ($50\sim 1\ 000$ nm)/%	气孔 ($>1\ 000$ nm)/%	最可几 孔径/nm
SR50	0	12.43	38.03	36.60	12.94	38.08
	14	9.87	34.17	46.31	9.65	53.89
	28	10.07	33.42	44.53	11.97	50.27
	42	10.05	37.08	45.10	7.77	53.89
	56	11.20	38.94	43.85	6.00	50.27
SR50F10	0	9.95	36.19	43.76	10.10	50.27
	14	11.82	37.16	37.15	13.86	40.82
	28	8.62	27.70	41.35	22.33	50.27
	42	9.05	32.76	43.78	14.41	53.89
	56	8.75	32.75	48.00	10.50	57.76
SR50F20	0	10.39	36.77	43.38	9.46	53.89
	14	11.60	36.64	39.89	11.88	43.76
	28	10.10	34.04	45.22	10.65	50.27
	42	9.58	34.21	44.96	11.26	53.89
	56	9.09	32.21	46.64	12.07	53.89
SR50F30	0	9.94	35.17	47.46	7.43	53.89
	14	11.61	37.53	40.52	10.35	46.90
	28	7.99	29.48	48.66	13.86	61.91
	42	7.53	32.86	50.84	8.77	61.91
	56	7.13	33.65	53.66	5.56	66.37

比例呈增加趋势。4种粉煤灰掺量自密实再生混凝土试样的最可几孔径均随溶蚀龄期的增长呈增大趋势。当溶蚀龄期从0 d增加至56 d时,试样SR50、SR50F10、SR50F20、SR50F30的凝胶孔所占比例分别减少了9.90%、12.06%、12.51%、28.27%;大毛细孔所占比例分别增加了19.81%、9.69%、7.51%、13.06%。这表明随着溶蚀龄期的增长,混凝土内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 逐渐溶解, Ca^{2+} 不断流失,内部孔隙更加疏松,而粉煤灰二次水化产物可以填充孔隙,提高混凝土密实度。

2.3.2 孔隙率

各溶蚀龄期内,不同粉煤灰掺量自密实再生混凝土试样的孔隙率如图5所示。未溶蚀(养护28 d)时,由于粉煤灰水化不充分,掺有粉煤灰的自密实再生混凝土孔隙率大于普通自密实再生混凝土。而随着溶蚀龄期的增长,普通自密实再生混凝土孔隙率持续增大,掺有粉煤灰的自密实再生混凝土孔隙率先减小后增大。当溶蚀龄期为14 d时,SR50F10、SR50F20、SR50F30的孔隙率分别较未溶蚀时减少了11.89%、13.02%、2.17%,SR50的孔隙率则增加了3.67%;当溶蚀龄期为56 d时,SR50、SR50F20、SR50F30的孔隙

率分别较未溶蚀时增加了33.19%、3.47%、28.34%,SR50F10的孔隙率则减少了7.49%,并且SR50F10、SR50F20、SR50F30的孔隙率分别是SR50的0.90倍、0.92倍、1.10倍。这表明在溶蚀过程中,由于粉煤灰二次水化产生的C-S-H凝胶填充了自密实再生混凝土的内部孔隙,混凝土试样的孔隙率减小。但若粉煤灰掺量过高,部分粉煤灰没有完全水化,混凝土内部孔隙结构反而更为疏松。

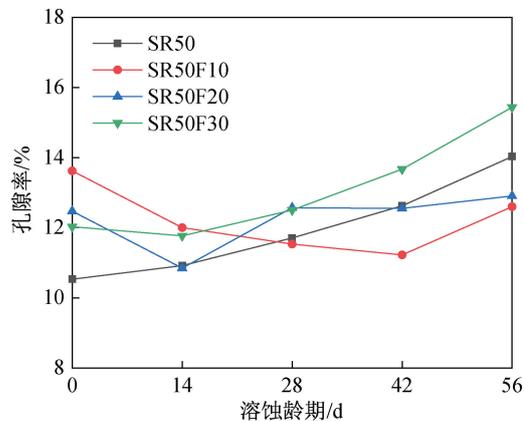


图5 不同粉煤灰掺量自密实再生混凝土的孔隙率
Fig. 5 Porosity of SCRC under different FA cotents

3 结论

1) 自密实再生混凝土的超声波速随溶蚀龄期的增长而减小。同一溶蚀龄期内,自密实再生混凝土的超声波速随再生粗骨料取代率的增加而减小;随粉煤灰掺量的增加先增大后减小。

2) 自密实再生混凝土内部同一深度处的 pH 值随再生粗骨料取代率的增加而减小,随粉煤灰掺量的增加而增大。自密实再生混凝土溶蚀过渡区尺寸与再生粗骨料取代率呈负相关,与粉煤灰掺量呈正相关,完全溶蚀区尺寸则相反。

3) 随着溶蚀龄期的增长,自密实再生混凝土的最可几孔径和大毛细孔占比增大,普通自密实再生混凝土孔隙率持续增大,掺有粉煤灰的自密实再生混凝土孔隙率先减小后增大。当粉煤灰掺量为 10%、20% 时,自密实再生混凝土孔隙结构细化,抗溶蚀性能提升,而当粉煤灰掺量为 30% 时,自密实再生混凝土孔隙结构劣化,抗溶蚀性能下降。

参考文献:

- [1] 安新正, 郭永民, 张龙娇, 等. 再生粗骨料取代率及粒径对混凝土抗压性能影响试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 30-35.
- [2] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 721-740.
- [3] KANELLOPOULOS A, PETROU M F, IOANNOU I. Durability performance of self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 320-325.
- [4] NAZARI A, RIAHI S. The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 528(2): 756-763.
- [5] BASTIDAS-ARTEAGA E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 1-13.
- [6] JIANG J H, ZHAO K H, CHEN S A, et al. Calcium dissolution behaviors of recycled coarse aggregate concrete with the initial stress damage[J]. Construction and Building Materials, 2022, 338: 127620.
- [7] 周欣竹, 陈翱翔, 郑建军, 等. 溶蚀粉煤灰混凝土抗压强度试验与理论预测[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 392-396.
- [8] 单俊鸿, 胡恒诚, 王荣荣, 等. 矿物掺合料对全机制砂灌浆料的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 28-35.
- [9] UYSAL M, SUMER M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11): 4112-4120.
- [10] YEHIA S, HELAL K, ABUSHARKH A, et al. Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, 9(2): 219-239.
- [11] PHUNG Q T, MAES N, JACQUES D, et al. Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached cement pastes accounting for mix composition[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79: 217-234.
- [12] 王宗熙, 姚占全, 何梁, 等. 纳米 SiO₂ 对混凝土耐蚀性能和溶蚀寿命的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 766-773.
- [13] YANG X L, FENG Y M, RONG H L, et al. The leaching-deterioration properties and leaching mechanism of cement mortar under dry-wet cycles[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132672.
- [14] LARRARD T, BENBOUDJEMA F, COLLIAT J B, et al. Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification[J]. Computational Materials Science, 2010, 49(1): 35-45.
- [15] TANG Y J, ZUO X B, YIN G J, et al. Influence of calcium leaching on chloride diffusivity in cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 310-319.
- [16] SINGH N, KUMAR P, GOYAL P. Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self compacting concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 100882.
- [17] LAVANYA R, MURTHI P, KARTHIKEYAN V. Environment sustainable construction materials for garden-fresh and mechanical properties of high strength self-compacting concrete mixes with diverse mineral admixtures and water binder ratios[J]. International Journal of Environment and Sustainable Development, 2018, 17(4): 379-389.
- [18] KOTWAL S, SINGH H, KUMAR R. Experimental investigation of steel fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 48: 1032-1037.

(下转第 39 页)

- [12] 交通运输部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [13] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [14] 张华, 傅大宝, 王本俊, 等. 不锈钢渣掺量对碱矿渣-不锈钢渣砂浆抗裂性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 71-76.
- [15] 王强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水化硬化过程中的作用[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [16] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(3): 180-186.

(责任编辑 张爱丽)

(上接第7页)

- [19] WYRZYKOWSKI M, MCDONALD P J, SCRIVENER K L, et al. Water redistribution within the microstructure of cementitious materials due to temperature changes studied with ^1H NMR [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(50): 27950-27962.
- [20] 黄维蓉, 晏茂豪, 仝赞, 等. 混合砂对混凝土力学性能及孔隙结构的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(8): 23-29.
- [21] ZHAO H T, XIANG Y, ZHAHNG B T, et al. Effects of temperature rising inhibitor and shrinkage reducing admixture on pore structure of early-age cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124896.
- [22] LIANG M T, WU J. Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(11): 1763-1769.
- [23] HEUKAMP F H, ULM F J, GERMAINE J T. Does calcium leaching increase ductility of cementitious materials? Evidence from direct tensile tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(3): 307-312.
- [24] WANG C Q, LIU K, HUANG D M, et al. Utilization of fly ash as building material admixture: Basic properties and heavy metal leaching[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01422.
- [25] HUANG B, QIAN C X. Characterization and stress-strain relationship of leached concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 87-91.
- [26] MADRASZEWSKI S, SIELAFF A M, STEPHAN D. Acid attack on concrete-damage zones of concrete and kinetics of damage in a simulating laboratory test method for wastewater systems [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130121.
- [27] LU C F, WAHG W, LI Q T, et al. Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 309-317.
- [28] 马超, 郑世龙, 阮波, 等. 不同养护温度下水泥改良风积沙核磁共振试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1270-1278.

(责任编辑 张爱丽)