

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.043



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



再生粗骨料品质对混凝土抗溶蚀性能的影响

刘惠, 王震, 郝亚利, 朱平华, 王新杰, 陈春红

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:基于硝酸加速溶蚀试验方法, 分别对 100% 取代率下不同品质(I类、II类和III类)再生粗骨料混凝土和天然粗骨料混凝土的抗溶蚀耐久性进行对比研究, 并从宏观力学性能退化及内部微观结构损伤方面进一步揭示混凝土抗溶蚀性能经时劣化规律和损伤机理。研究表明: 高品质再生骨料制备的混凝土抗压强度较高, 与骨料物理性能具有良好的对应关系。在溶蚀环境下, 再生粗骨料混凝土的抗压强度损失率、质量损失率、溶蚀深度随溶蚀龄期的增长而逐渐增大, 但随着粗骨料品质的降低, 却并不一定严格增大, 会出现阶段性差异。由 SEM 图像可知, 溶蚀前后, 低品质骨料混凝土界面过渡区差异明显。由溶蚀深度与溶蚀时间的拟合公式可知, 3 类品质骨料制备的混凝土均满足软水环境中的水工结构使用要求, 低品质(III类)再生粗骨料混凝土可用于一代服役 50 a 的水利工程结构。

关键词:再生粗骨料; 再生混凝土; 抗溶蚀性能; 耐久性

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0187-07

Effect of quality of recycled coarse aggregate on the corrosion resistance of concrete

LIU Hui, WANG Zhen, HAO Yali, ZHU Pinghua, WANG Xinjie, CHEN Chunhong

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Based on the method of nitric acid accelerated dissolution test, the comparative study on the corrosion resistance durability of natural aggregate concrete (NAC) and recycled aggregate concrete (RAC) prepared using 100% of recycled coarse aggregate (RCA) with different qualities (class I, class II and class III) is performed. The degradation law and damage mechanism of corrosion resistance of RAC are further revealed from the aspects of macroscopic mechanical property degradation and internal microstructure damage. The results show that the compressive strength of recycled concrete prepared by high-quality aggregate with better physical

收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51278073, 51878081, 52078068); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金(SYSJJ2020-14); 常州市重点研发计划(应用基础研究)项目(CJ20200079)

作者简介: 刘惠(1989-), 女, 博士, 主要从事再生混凝土结构耐久性研究, E-mail: liuhui@cczu.edu.cn。

朱平华(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: zph@cczu.edu.cn。

Received: 2021-01-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51278073, 51878081, 52078068); Open Fund of State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures (Wuhan University of Technology) (No. SYSJJ2020-14); Changzhou Key R & D Program (Applied Basic Research) (No. CJ20200079)

Author brief: LIU Hui (1989-), PhD, main research interest: durability of recycled concrete structure, E-mail: liuhui@cczu.edu.cn.

ZHU Pinghua (corresponding author), PhD, professor, E-mail: zph@cczu.edu.cn.

properties is higher, and there is a good correlation between them. In the corrosion environment, the compressive strength loss rate, mass loss rate and corrosion depth of recycled coarse aggregate concrete gradually increase with the increase of corrosion age, but not strictly increase with the decrease of coarse aggregate quality, and there are periodic differences in different periods. The SEM images show that the interfacial transition zone of low-quality aggregate concrete is obviously different before and after corrosion. According to the fitting formula of corrosion depth and corrosion time, the concrete prepared by three kinds of quality aggregate can meet the requirements of hydraulic structure in soft water environment, and the recycled coarse aggregate concrete with low quality (class III) can be used for the hydraulic engineering structure with 50 years of service.

Keywords: recycled coarse aggregate; recycled concrete; corrosion resistance performance; durability

混凝土长期与水接触,碱性水化产物不断溶解,钙离子浸出,其宏观力学性能与微观孔隙结构都会遭到破坏,此现象称为溶蚀。在当前水利工程中,混凝土溶蚀问题日益突出,直接关系到建筑物的安全性和使用寿命,在某些情况下,混凝土的溶蚀甚至对周边环境水质也有一定影响^[1]。因此,研究混凝土溶蚀经时变化规律及微观劣化机理可为水工结构的安全设计提供理论支撑。

将废弃混凝土回收加工为再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate, RCA),制备结构用绿色再生粗骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC),以可再生的废弃混凝土取代不可再生的天然砂石骨料资源被认为是解决传统混凝土行业资源与环境危机、实现循环经济的有效途径^[2-3]。Galvin等^[4]评价了取代率对RAC物理性能的影响,并分析了作为污染程度指标的浸出行为。从钙溶蚀角度来看,RCA经过适当设计,可以对环境产生积极影响。Cheng等^[5]发现,向混凝土中加入矿物掺合料可进一步形成溶解度相对较低的硅酸钙,有效抑制钙离子的浸出。Phung等^[6]分别研究了水灰比和取代率对钙离子浸出的影响,发现水灰比对溶蚀损伤的影响更为明显。加速钙离子浸出的过程显著改变了水泥浆体的微观结构,使其具有更高的比表面积,增大了总孔隙率。综上可知,关于RCA对再生混凝土溶蚀影响的研究仍不够深入,RCA品质对水利工程结构用再生混凝土耐久性的影响缺乏系统研究。

随着RCA的推广普及,其向水工结构的发展应用是必然趋势。钙溶蚀不仅引发水工结构耐久性退化,更易造成结构破坏区水域环境污染,RAC抗溶蚀性能决定了其能否应用于水工结构。笔者从RCA品质特征参数(吸水率、压碎指标、表观密度及粘附砂浆含量)入手,深入研究不同品质RCA混

凝土抗溶蚀性能经时变化规律。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用玄武岩碎石天然粗骨料(Natural Coarse Aggregate, NCA)为对照组。RCA共分3类:一类是由试验室制备的,将强度等级为C60的高强混凝土在室内加速劣化,达到相当于自然环境下使用50 a寿命的程度后,破碎制备而成,记作RCA₁。另外两类均是由江苏绿和环境科技有限公司提供的单一来源再生粗骨料,分别来源于建(构)筑物和机场跑道拆除,记作RCA₂和RCA₃。粗骨料粒径均为5~20 mm。

RCA₁模拟制备的原理基于室内加速劣化与自然环境下劣化程度相同的原则。对于以碳化为耐久性主要影响因素的常遇大气环境(即中国规范GB/T 50746—2019^[7]中划分的I类环境),可以表述为:室内加速的碳化深度与自然环境下的碳化深度相等,见式(1)。

$$C_{\text{natural}}^a(T^a, R^a, \sigma^d, K_{\text{CO}_2} \dots) = C_{\text{accelerated}}^d(T^d, R^d, \sigma^d, K_{\text{CO}_2} \dots) \quad (1)$$

式中: C_{natural}^a 、 $C_{\text{accelerated}}^d$ 分别为自然环境下与室内加速环境下的碳化深度; T 、 R 、 σ 、 K_{CO_2} 分别为影响碳化深度的因素:温度、相对湿度、荷载类型与水平、 CO_2 浓度等;上标 a 与 d 分别为自然环境下的年数与加速环境下的天数。

肖建庄等^[8]基于28组试验数据回归得到了RAC碳化深度数学模型,如式(2)所示。

$$C = K_{\text{CO}_2} K_{\text{K1}} K_{\text{KS}} T^{0.25} R^{1.5} (1 - R) \left(\frac{230}{f_{\text{cu}}^{\text{RAC}}} + 2.5 \right) \sqrt{t} \quad (2)$$

式中各参数的含义见文献[8]。

根据式(1)、式(2)可知,使两种环境下的碳化

深度相等,则可以得到在室内加速环境下的天数与自然环境下的年数之间的关系,结果如式(3)所示。

$$t_{\text{accelerated}}^d = \left[\frac{K_{\text{CO}_2}^a T_a^{0.25} R_a^{1.5} (1 - R_a) (230/f_{\text{cu}}^a + 2.5)}{K_{\text{CO}_2}^d T_d^{0.25} R_d^{1.5} (1 - R_d) (230/f_{\text{cu}}^d + 2.5)} \right]^2 t_{\text{natural}}^a \quad (3)$$

将两类环境下的参数代入式(3)(其中,自然环境条件以南京为例,室内加速环境条件依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[9]的规定取值)可以得到,在本研究条件下,混凝土在室内快速碳化17 d约相当于在I类环境(即《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50486—2019)^[7]中的一般环境)下自然碳化50 a。

制备再生粗骨料混凝土的主要原材料包括:P·O 42.5R水泥(表观密度2 963 kg/m³)、硅灰(表观密度2 759 kg/m³)、粉煤灰(表观密度2 500 kg/m³)及矿渣(表观密度2 800 kg/m³)、聚羧酸(JK-PCA)高效减水剂和聚丙烯纤维。试验所用细骨料采用表观密度为2 650 kg/m³、细度模数为2.4的天然河砂。

1.2 试验方案

基于不同来源RCA的品质特征参数,再生混凝土采用“全计算法”^[10]设计配合比,目标强度和目标

坍落度值分别为C40和120 mm。具体配合比如表1所示。其中,RCA取代率为100%(体积取代),RAC的附加用水量按照30 min吸水率计算。所有混凝土均采用两阶段混配工艺^[11]进行搅拌,用50 mm×50 mm×50 mm的模具成型,在振动台上振动15 s,以减少试块中的气泡,静置24 h后脱模,置于标准养护条件(温度为(20±2)℃、相对湿度≥95%)下养护28 d。

混凝土溶蚀试验采用0.5 mol/L的硝酸溶液作为加速溶蚀剂进行室内模拟,溶蚀试验过程中及时补充硝酸以保持溶液浓度不变。试验前,用石蜡将试块的上下表面进行密封处理,保证硝酸溶液只能从试件的四周进行一维渗透。溶蚀试验箱四周采用薄膜密封,以防混凝土试件发生碳化而影响溶蚀效果。溶蚀龄期为7、14、45、70 d,溶蚀龄期结束后取出试样,测试其抗压强度、溶蚀深度及质量损失,每组试件为3个,取平均值为最终结果。

溶蚀前后混凝土的力学性能依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[12]进行测试,溶蚀深度采用酚酞指示剂法测定。最后,采用扫描电子显微镜(SEM)对溶蚀前后混凝土内部的微观结构进行表征。

表1 混凝土试件配合比

Table 1 Mix proportion of concrete specimens

混凝土类别	配合比/(kg·m ⁻³)									总用水量
	天然粗骨料	再生粗骨料	天然细骨料	水泥	粉煤灰	矿渣	硅灰	减水剂	纤维	
NAC	1 005		714	271	83	42	21	3.3	0.42	191
RAC ₁		978	714	271	83	42	21	3.3	0.42	220
RAC ₂		866	714	271	83	42	21	3.3	0.42	232
RAC ₃		843	714	271	83	42	21	3.3	0.42	244

2 试验结果与讨论

2.1 再生粗骨料物理性能

RCA是母体混凝土经破碎、筛分等处理后得到的粒径大于5 mm的固体颗粒。RCA与NCA的本质区别在于RCA表面粘附了一定量的老砂浆^[13](见图1),加之其在服役与破碎过程中产生的众多内部微裂纹与累积损伤,导致RCA的品质一般劣于NCA。如表2所示,3类RCA的物理力学性能均劣于NCA。根据《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[14],按照吸水率、压碎值和表观密度指标划分RCA₁、RCA₂和RCA₃的等级,其分别属于准I类、II类和III类骨料,即3类骨料分别属于高品质、



图1 天然及不同品质再生粗骨料外观形貌图

Fig. 1 Appearance morphology of NCA and RCA with different qualities

表 2 粗骨料基本物理性能

Table 2 Basic physical properties of the coarse aggregate

骨料类型	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	30 min吸水率/%	压碎值/%	吸附砂浆含量/%
NCA	2 640	1 509	1.7	4.8	
RCA ₁	2 512	1 458	3.0	12.9	40.6
RCA ₂	2 500	1 344	4.8	15.3	33.9
RCA ₃	2 380	1 298	6.4	15.6	39.1

中品质和低品质骨料。所有再生粗骨料的各项物理力学性能指标均满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[14]规范要求,表明其均可用于结构混凝土的制备。

2.2 抗压强度

天然粗骨料混凝土(Natural Aggregate Concrete, NAC)和不同品质再生粗骨料所制备RAC的28 d抗压强度如图2所示。从图2可以看出,NAC的抗压强度为59.4 MPa,远高于RAC₁、RAC₂和RAC₃(49.6、48.6和46.1 MPa)。由此可见,再生骨料品质在一定程度上会制约混凝土的力学性能,韩帅^[15]在试验的基础上也得出了相似结论。而且,随着骨料品质的降低,RAC性能逐渐劣化,表现为孔隙率增大、强度降低,在外力作用下极易产生新裂纹。RAC力学性能劣化的主要原因在于骨料表面存在的粘附砂浆和生产过程产生的微裂缝导致RCA品质劣于NCA。除此之外,RCA中天然骨料与粘附砂浆之间的弱界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)亦是导致RAC性能降低的主要原因^[16]。尽管RAC的抗压强度劣于NAC,但所有混凝土试件均达到目标强度设计值。

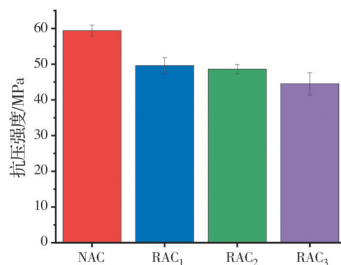


图 2 天然粗骨料及不同品质再生粗骨料混凝土 28 d 抗压强度

Fig. 2 28 d compressive strength with NAC and RAC of different qualities

2.3 抗溶蚀性能

2.3.1 抗压强度损失率 图3为不同品质再生骨料制备的混凝土抗压强度损失率随溶蚀时间的演化规律。由图3可知,混凝土的抗压强度损失率均随溶蚀时间的增长而逐渐增大,3组RAC的残余抗

压强度分别为9.9、6.5、2.3 MPa;抗压强度损失率随粗骨料品质的降低而逐渐增大,最高为95%。这是由于骨料表面粘附砂浆和微裂缝的存在,骨料品质越差,粘附砂浆越多,微裂缝越多,侵蚀离子越容易扩散至混凝土内部,加速溶蚀的发生。然而,从图3可以发现,高品质RCA制备混凝土的抗溶蚀性能甚至优于NAC,尤其在侵蚀龄后期。这归因于旧砂浆与硝酸反应生成的产物覆盖于混凝土表面形成钝化膜,一定程度上阻碍了混凝土内部钙离子的扩散^[17],降低了试件的溶蚀损伤程度,从而减缓了其抗压强度损失率的生长。

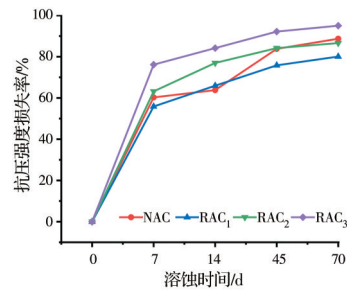


图 3 抗压强度损失率随溶蚀时间的演化规律

Fig. 3 Variation law of compressive strength loss rate with corrosion time

2.3.2 质量损失率 质量损失率是评价结构耐久性的一个重要参数^[18]。在软水或其他侵蚀介质环境中,水化产物中的钙源会不断溶解扩散,造成质量损失;同时,溶蚀破坏常会导致混凝土表层砂浆剥落,致使质量损失严重。图4显示了NAC和不同品质RAC溶蚀7、14、45、70 d的质量损失率。

由图4可知,4组混凝土的质量损失率均随溶蚀时间的增长而逐渐增大,NAC的质量损失率最低,而品质最差的RAC₃则最高,为17%。溶蚀初期,再生混凝土的质量损失率随着再生粗骨料品质的降低而逐渐增大,然而溶蚀龄期为10 d左右时出现反常,RAC₁的质量损失率超过RAC₂,造成这种现象的原因可能是用于制备RAC₁的骨料表面吸附砂浆含量相对较高,其制备的混凝土中存在大量质量较差的界面过渡区,加之二次水化产物在钙离子浓度

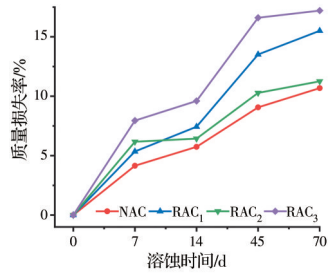


图 4 质量损失率随溶蚀时间的演化规律

Fig. 4 Variation law of mass loss rate with corrosion time

梯度下不断浸出,从而导致其质量损失率增大。

此外,在溶蚀初期,混凝土质量损失速率逐渐降低,这是由于初期主要是Ca(OH)₂脱钙溶解,其在浆体内的浓度逐渐降低,损失速率先高后低;溶蚀中期,混凝土质量损失速率增大,这是因为C-S-H凝胶开始脱钙^[19],质量损失率出现二次攀升,骨料品质越差,趋势越明显;溶蚀后期,浆体内部易溶于水的钙盐已基本脱钙完成,因此,混凝土的质量损失率趋于稳定。

2.3.3 溶蚀深度 各混凝土试件溶蚀深度测试宏观图及溶蚀深度随溶蚀龄期的变化规律分别如图5、图6所示。由图5可知,在相同溶蚀时间内,各混凝土中心紫色区域面积大致随骨料品质的降低逐渐减小,RAC₃面积最小,代表其溶蚀深度最大,为12.29 mm。由溶蚀深度随溶蚀时间的变化关系(图6)可知,天然骨料混凝土的抗溶蚀性能最好,骨料品质对再生混凝土的影响显著,3种RAC的性能高低可表示为RAC₁ < RAC₂ < RAC₃,这与骨料品质密切相关。天然混凝土具有良好的抗溶蚀性能是由于其内部结构致密且损伤程度小,再生混凝土因为掺入了表观密度、堆积密度、吸水率和压碎值等品质指标值较低的RCA而表现出较差的抗溶蚀性能。再生骨料内部孔隙和微裂纹越多,其品质下降越严重,因此,制备的混凝土内部孔隙率及微裂纹也较多。而钙离子溶蚀又加剧了这种现象,并且随着溶蚀龄期的增加,混凝土内部孔隙及微裂纹的劣化程度进一步加大,形成连续通道,最终导致结构破坏,而这种连续的通道反过来又为钙离子的浸出提供了有利途径,从而促进了结构的溶蚀破坏。

混凝土的抗溶蚀性能指标(抗压强度损失率、质量损失率、溶蚀深度)随溶蚀时间变化的规律大致相似,但在不同阶段略有差异,实际工程中应以溶蚀深度为准。Pavlik^[20]揭示了混凝土溶蚀深度与溶蚀时间在硝酸加速溶蚀条件下的变化规律(式(4));Kamali等^[21]发现,混凝土试件在6 mol/L硝酸

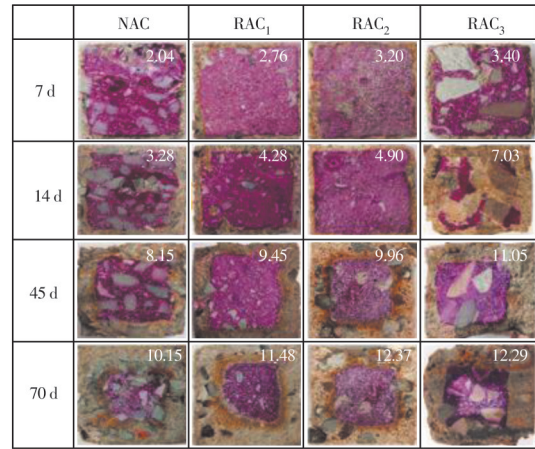


图 5 溶蚀深度宏观图(单位:mm)

Fig. 5 Macro-graph of corrosion depth (Unit: mm)

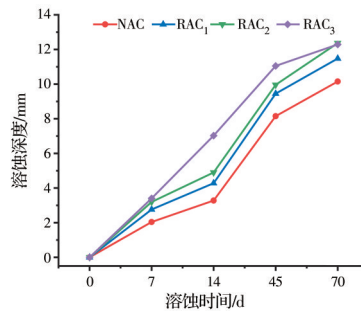


图 6 溶蚀深度随溶蚀时间的演化规律

Fig. 6 Variation law of corrosion depth with corrosion time

溶液下的溶蚀速率是矿物质水溶蚀的135倍。假设溶蚀时间一定(式(5)),可得到在0.5 mol/L硝酸溶液条件下其溶蚀深度是矿物质水(自然环境)溶蚀的23.70倍。

$$L_d = 4.11 \times c^{0.7} \times t^{0.56} \quad (4)$$

$$L_d^{0.5} = k \times L_d^6 \quad (5)$$

式中: L_d 为溶蚀深度,mm; t 为溶蚀时间,d; c 为溶液浓度,mol/L; k 为不同硝酸溶液浓度下溶蚀速率转换系数。

将溶蚀深度与溶蚀时间之间的关系进行拟合(图7),拟合结果如式(6)~式(9)所示,拟合度较好。

$$Y = 1.15634 \sqrt{t}, R^2 = 0.98636 \quad (6)$$

$$Y = 1.34352 \sqrt{t}, R^2 = 0.99419 \quad (7)$$

$$Y = 1.44893 \sqrt{t}, R^2 = 0.99652 \quad (8)$$

$$Y = 1.56053 \sqrt{t}, R^2 = 0.98929 \quad (9)$$

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[22],以50 mm溶蚀深度作为界限值,发现NAC、RAC₁、RAC₂和RAC₃分别可在硝酸溶液下溶蚀1 870、1 404、1 190、1 026 d,相当于在自然软

水环境下使用至少100、90、70、60 a,表明低品质(Ⅲ类)再生粗骨料混凝土可用于一代服役50 a的水利工程结构。

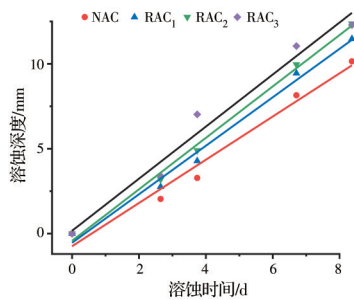


图7 溶蚀深度与溶蚀时间的拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of corrosion depth and corrosion time

2.4 再生混凝土抗溶蚀性能微观机理研究

混凝土力学性能退化可通过微观机理分析进行解释^[23],采用扫描电镜(SEM)表征溶蚀前后结构内部变化,以阐明RCA品质对混凝土溶蚀耐久性的影响机制。图8分别给出了NAC和RAC₃在溶蚀0、70 d时ITZ部位的微观形貌变化图。

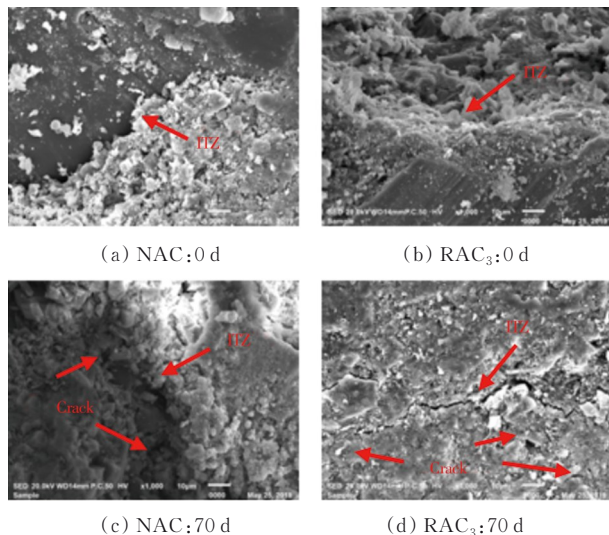


图8 混凝土溶蚀前后的SEM图

Fig. 8 SEM diagram of concrete before and after corrosion

从图8可以清晰地看出,钙离子浸出前后混凝土的微观结构有着明显区别。钙溶蚀前,混凝土水化产物在NAC内部的致密度较高,只有少量的微孔隙和微裂隙,ITZ处黏结程度较高。而且骨料表面附着一些微小颗粒,这可能是水泥水化产生的C-S-H及Ca(OH)₂物质。随着溶蚀反应的不断进行,骨料表面的微小颗粒在70 d溶蚀龄期下接近消失,骨料与砂浆之间的结合不再紧密,内部出现微裂缝和孔洞,混凝土孔隙率增大,但边界仍然可见。

RAC₃的溶蚀劣化机理与NAC相似,初始状态下的骨料微观结构较NAC差,这是因为RCA₃本身品质较低,其表面吸附砂浆松软所引起的。70 d溶蚀作用下RAC₃劣化程度更加明显,其内部产生大量的裂纹和孔洞,骨料与砂浆的界面模糊,较难分辨。

3 结论

1)再生粗骨料的物理性能随骨料品质的降低而逐渐劣化,且与对应混凝土抗压强度之间具有良好的对应关系,3类品质再生粗骨料制备的混凝土抗压强度均能达到目标强度。

2)在硝酸侵蚀性水环境下,再生粗骨料混凝土的抗压强度损失率、质量损失率、溶蚀深度不一定随骨料品质的降低而严格增大,但随溶蚀龄期的增长而逐渐增大,说明骨料品质对混凝土抗溶蚀耐久性影响显著。溶蚀前后,品质最差的RAC₃界面过渡区劣化严重。

3)由溶蚀深度与溶蚀时间的拟合公式可知,3类品质再生粗骨料制备的混凝土均满足软水环境中的水工结构使用要求,低品质(Ⅲ类)再生粗骨料混凝土可用于一代服役50 a的水利工程结构。

参考文献

- [1] 马强,左晓宝,汤玉娟.环境水侵蚀下水泥净浆钙溶蚀的模拟与验证[J].水利水运工程学报,2017(3):107-115.
MA Q, ZUO X B, TANG Y J. Numerical simulation of calcium leaching process of hardened cement paste under action of environmental water [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 107-115. (in Chinese)
- [2] 周静海,吴迪,赵庭钰,等.废弃纤维再生混凝土受压徐变及预测模型[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):143-151.
ZHOU J H, WU D, ZHAO T Y, et al. Pressure and creep characteristics of waste fiber recycled concrete and estimation model [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 143-151. (in Chinese)
- [3] 韩帅,李秋义,张修勤,等.再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土抗冻性能影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(1):96-104.
HAN S, LI Q Y, ZHANG X Q, et al. Influence of quality and substitution rate of recycled coarse aggregate on anti-freeze performance of recycled concrete [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(1): 96-104. (in Chinese)
- [4] GALVÍN A P, AGRELA F, AYUSO J, et al. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse

- aggregate: Physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete [J]. *Waste Management*, 2014, 34(9): 1693-1704.
- [5] CHENG A, CHAO S J, LIN W T. Effects of leaching behavior of calcium ions on compression and durability of cement-based materials with mineral admixtures [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2013, 6(5): 1851-1872.
- [6] 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.
- [7] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for design of concrete structure durability: GB/T 50476-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [8] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2008, 25(3): 66-72.
XIAO J Z, LEI B. Carbonation model and structural durability design for recycled concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25(3): 66-72. (in Chinese)
- [9] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: 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)
- [10] 陈建奎, 王栋民. 高性能混凝土(HPC)配合比设计新法: 全计算法[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(2): 194-198.
CHEN J K, WANG D M. New mix design method for HPC: Overall calculation method [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000, 28(2): 194-198. (in Chinese)
- [11] TAM V W Y, GAO X F, TAM C M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1195-1203.
- [12] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [13] KIM Y, HANIF A, USMAN M, et al. Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics: Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212: 149-163.
- [14] 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [15] 韩帅. 再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土耐久性能的影响[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2015.
HAN S. Influence of quality and substitution rate of recycled coarse aggregate on durability of recycled concrete [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2015. (in Chinese)
- [16] ZHANG H R, JI T, LIU H. Performance evolution of the interfacial transition zone (ITZ) in recycled aggregate concrete under external sulfate attacks and dry-wet cycling [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116938.
- [17] 柳俊哲, 耿俊迪, 巴明芳, 等. 亚硝酸盐对含氯盐砂浆内钢筋钝化膜组成的影响[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4): 536-541.
LIU J Z, GENG J D, BA M F, et al. Effect of nitrite on passivation film composition of reinforcing bar in the mortar containing chloride [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(4): 536-541. (in Chinese)
- [18] OLANIKE A O. Experimental investigation into the freeze-thaw resistance of concrete using recycled concrete aggregates and admixtures [J]. *Civil Engineering and Architecture*, 2014, 2(4): 176-180.
- [19] SAITO H, DEGUCHI A. Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(11): 1815-1825.
- [20] PAVLÍK V. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids part I: Calculation of corrosion depth [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(3): 551-562.
- [21] KAMALI S, MORANVILLE M, LECLERCQ S. Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: Experiments and modelling [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(4): 575-585.
- [22] 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)
- [23] ZHANG W L, DE WANG S, ZHAO P Q, et al. Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 601-607.