

文章编号:1673-9469(2022)04-0012-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.002

养护方式对再生混凝土抗碳化性能的影响

蒋建华,陈思安,赵克寒,余亚兵,朱照钰

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210024)

摘要: 通过实验室加速碳化试验,研究了养护方式和再生粗骨料取代率对混凝土抗碳化性能的影响。结果表明,在其他条件不变的情况下,养护剂养护下混凝土的碳化深度最小,洒水养护和覆膜养护下混凝土的碳化深度依次增大。混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率的增加而增大,与普通骨料混凝土相比,再生粗骨料取代率为50%的混凝土部分碳化区尺寸和碳化前沿深度分别增大了7.5%和23.7%,而再生粗骨料取代率为100%的混凝土两者分别增大了21.3%和55.3%。通过吸水特性试验分析了养护方式及再生骨料取代率对混凝土抗碳化性能的影响机理,结果表明,养护剂养护下的混凝土毛细吸水系数最小,洒水养护和覆膜养护下混凝土的毛细吸水系数依次增大;混凝土毛细吸水系数随再生粗骨料取代率的增加近似呈线性增大。

关键词: 再生混凝土;养护方式;碳化深度;吸水特性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Effect of Curing Method on Carbonation Resistance of Recycled Concrete

JIANG Jianhua, CHEN Sian, ZHAO Kehan, YU Yabing, ZHU Zhaoyu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Through the accelerated carbonization test in laboratory, the effects of curing method and the replacement rate of recycled coarse aggregate (RCA) on the carbonation resistance of concrete were studied. The results show that the carbonization depth of concrete with curing agent is the smallest under other conditions unchanged, followed by water spray curing and film curing. The carbonation depth of concrete increases with the increase of the replacement rate of RCA. Compared with the ordinary aggregate concrete, the size of the partial carbonization zone and the depth of the carbonization front of concrete with 50% replacement rate of RCA are increased by 7.5% and 23.7%, respectively, while the increase rates are 21.3% and 55.3% for the concrete with 100% replacement rate of RCA, respectively. The influence mechanism of the curing method and the replacement rate of RCA on the carbonation resistance of concrete is analyzed through the water absorption characteristics test. The results show that the capillary water absorption coefficient of concrete cured with curing agent is the smallest, which that cured with sprinkler and film increases in turn. The capillary water absorption coefficient of concrete increases approximately linearly with the increase of the replacement rate of RCA.

Key words: recycled concrete; curing method; carbonation depth; water absorption characteristics

混凝土的耐久性决定混凝土结构使用寿命的关键因素之一。再生混凝土由于再生骨料的孔隙率大,内部界面的多重性和复杂性,其耐久性能通常低于普通混凝土^[1]。而碳化又是混凝土结构普遍存在的耐久性问题,尤其在在我国南方地区,高热高湿的环境加快了混凝土的碳化,大大降低了

混凝土工程的使用年限。目前,国内外学者对再生混凝土碳化性能进行了多方面的研究。Liang等^[2]研究了二氧化碳养护再生骨料混凝土在初始裂缝、冻融环境条件下的碳化行为;Leemann和Loser^[3]研究了再生骨料取代率、含湿状态及水泥品种对再生混凝土抗碳化性能的影响;丁亚红等

收稿日期:2022-03-01

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。

人^[4-6]分别研究了玄武岩纤维、粉煤灰、氧化石墨烯等掺合料对再生混凝土抗碳化性能的影响;Tang和Mi等人^[7-8]研究了荷载作用下的再生骨料混凝土碳化行为;Zhang等^[9-13]开展了再生混凝土碳化深度的预测方法和模型研究。混凝土的养护条件对其抗碳化性能也具有显著影响。张文之和刘敏^[14]的研究表明,经标准养护后的粉煤灰混凝土的抗碳化能力大于经自然养护后的粉煤灰混凝土;王申等^[15]研究了早期自然养护和蒸汽养护对镍铁渣混凝土抗碳化性能的影响;崔正龙等^[16]研究了水中不同养护温度、龄期条件下粉煤灰混凝土的抗碳化性能,结果表明相对较高温度养护对提高混凝土抗碳化性能非常有利。

实际工程中,由于施工技术等限制,使得我国建筑施工中对于混凝土养护的重视程度不够,关于养护方式对混凝土耐久性能的影响研究也不够完善。因此,本文根据工程实际情况,重点研究不同养护方式下再生混凝土的抗碳化性能,以期为工程实际中再生混凝土的正确养护提供借鉴和理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料及试件设计

试验选用边长为100 mm的立方体试块,混凝土水灰比为0.40,考虑再生粗骨料取代率分别为0%(NC)、50%(RAC-50)、100%(RAC-100),具体配合比见表1所示。水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥;普通粗骨料采用碎石,粒径5~15 mm,骨料压碎值为16%;再生粗骨料由废弃建筑物混凝土破碎制成,粒径5~15 mm,骨料压碎值为21%;细骨料采用河砂(中砂),细度模数为2.7;拌合水为普通自来水。

表1 混凝土试件配合比 (单位:kg/m³)

Tab.1 Mixture ratios of concrete specimens

组别	水	水泥	再生粗骨料	普通粗骨料	细骨料
NC	180	450	0	1 165.0	655
RAC-50	180	450	582.5	582.5	655
RAC-100	180	450	1 165.0	0	655

1.2 试件制作与养护

混凝土试件的制作采用普通塑料模具进行,混凝土浇筑24 h后脱模,然后将试件置于温度(20±2)℃,采用工程实际中最普遍的三种养护方式对试块进行养护,分别为洒水养护、覆膜养护和

养护剂养护。洒水养护采取每隔24 h进行一次洒水作业;覆膜养护采用的是工程混凝土养护膜,LL-DPE透明材质;养护剂养护采用工程混凝土成膜养护剂,一种新型高分子制剂,主要成分为硅酸钠,其水溶液俗称水玻璃,混凝土试件脱模后,将养护剂用喷壶均匀喷涂于混凝土试件表面,当水分蒸发到一定程度,能迅速形成一层无色、不透水的薄膜,可阻止混凝土试件中的水分蒸发,从而达到养护混凝土的目的。

1.3 试验方法

1.3.1 加速碳化试验

混凝土试件的加速碳化试验利用全自动混凝土碳化试验箱完成。碳化环境条件设定为温度(20±2)℃、相对湿度(70±5)%、CO₂浓度(20±3)%,碳化龄期设定为7、14、21和28 d。混凝土碳化深度的测试采用化学试剂法,将碳化后试件在万能压力试验机上劈裂破型,清除试件断面上的粉末,喷浓度为1%的酚酞酒精溶液,约30 s后,按原先标划的每10 mm一个测量点用钢尺测出各点碳化深度;将某试件不同点位的碳化深度平均值作为该试件的碳化深度测量值,最后取三个试件碳化深度测量值的平均值作为该组试件的碳化深度代表值。

1.3.2 吸水特性试验

混凝土渗透性与微观结构密切相关,通过吸水特性试验得到的毛细吸水系数可以反映混凝土渗透性差异,进一步对比不同养护方式下再生混凝土的微观孔隙结构。混凝土的吸水特性试验采用测重法,以各时刻试件吸水前后的质量差作为计算指标。首先将养护完成后的立方体试件放入干燥箱(105℃)烘至恒重,除底面外的其余面使用铝箔胶带进行密封处理,测量记录各试件的初始质量 M_0 ;然后将处理好的试件进行持续吸水,开始每间隔1 h测试一次试件质量 $M(t)$,连续测试7 h后,改为每间隔1 d称重一次,直至7 d测试龄期结束。最后,根据测量数据计算混凝土试件的单位面积累积吸水量 $I(t)$,进而利用 $I(t)$ 与吸水时间的关系曲线确定毛细吸水系数 S ,具体的关系式如公式(1)和(2)所示。

$$I(t) = \frac{M(t) - M_0}{A} \quad (1)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} \quad (2)$$

式中: $M(t)$ 为 t 时刻的试件质量(kg); M_0 为试件

初始质量(kg); t 为时间(h); A 为与水接触的横截面面积(m^2); $I(t)$ 为吸水时间 t 时刻单位截面积上的累积吸水量(kg/m^2); S 为毛细吸水系数($kg/m^2/h^{0.5}$)。

2 碳化试验结果与分析

2.1 碳化深度

2.1.1 再生粗骨料取代率的影响

随着碳化龄期的增长,三种养护方式下混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率的变化如图1所示。

根据图1可以看出再生粗骨料取代率越大,再生混凝土碳化深度越大。RAC-100、RAC-50再生混凝土的28d碳化深度,在洒水养护条件下,分别为普通混凝土的1.24、1.15倍;覆膜养护条件下,分别为普通混凝土的1.26、1.17倍;养护剂养护条件下,分别为普通混凝土的1.28、1.09倍。同时也可以看出随着碳化龄期的增长,再生混凝土碳化深度的增长速率逐渐变慢。以养护剂养护为例,RAC-100再生混凝土14d的碳化深度较7d增长了32.90%;21d较14d增长了25.34%;28d较21d增长了14.30%。

2.1.2 养护方式的影响

随着碳化龄期的增长,不同再生粗骨料取代

率下三种养护方式对再生混凝土碳化深度的影响如图2所示。

图2表明在其他条件不变的情况下,养护剂养护下混凝土的碳化深度最小,洒水养护和覆膜养护下混凝土的碳化深度依次增大。NC在养护剂养护条件下28d碳化深度分别为洒水养护和覆膜养护的87.49%和86.66%;RAC-50在养护剂养护条件下28d碳化深度分别为洒水养护和覆膜养护的91.98%和87.37%;RAC-100在养护剂养护条件下28d碳化深度分别为洒水养护和覆膜养护的93.68%和92.20%。

2.1.3 再生混凝土碳化深度拟合模型

基于上述试验结果的分析,针对不同养护方式,确立考虑再生骨料取代率及碳化龄期影响的再生混凝土碳化深度拟合模型基本形式如公式(3)所示。

$$d_c = (A\delta + B)\sqrt{t} \quad (3)$$

式中: d_c 为再生混凝土碳化深度(mm); δ 为再生粗骨料取代率(%); t 为碳化龄期(d); A 与 B 均为试验常数。

利用基本公式(3)对三种养护方式下的再生混凝土碳化深度试验数据进行拟合,得到不同养护方式下的再生混凝土碳化深度拟合模型,见公式(4)。

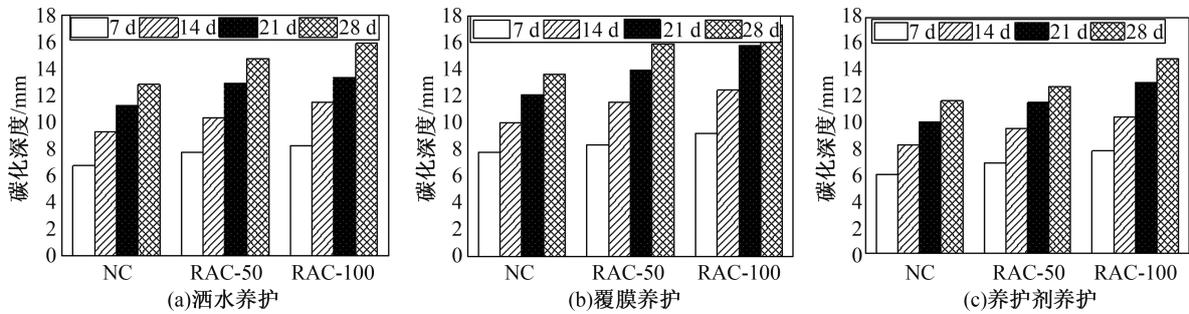


图1 混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率的变化

Fig. 1 Change of carbonation depth of concrete with the replacement rate of recycled coarse aggregate

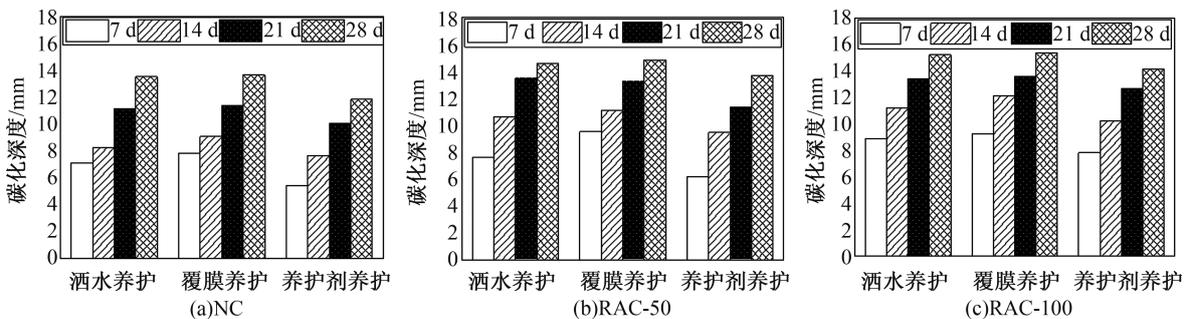


图2 混凝土碳化深度随养护方式的变化

Fig. 2 Change of carbonation depth of concrete with curing methods

洒水养护: $d_c = (5.828 \times 10^{-3}\delta + 2.488)\sqrt{t}$, $R^2 = 0.965$

覆膜养护: $d_c = (4.980 \times 10^{-3}\delta + 2.598)\sqrt{t}$, $R^2 = 0.871$

养护剂养护: $d_c = (5.796 \times 10^{-3}\delta + 2.183)\sqrt{t}$, $R^2 = 0.984$ (4)

然后在公式(4)的基础上,通过引入养护方式影响系数,建立考虑再生骨料取代率、养护方式以及碳化龄期影响的再生混凝土碳化深度统一模型,如公式(5)所示。

$$d_c = (5.534 \times 10^{-3}\delta + 2.423)\xi_c\sqrt{t} \quad (5)$$

式中: ξ_c 为养护方式影响系数,洒水养护、覆膜养护和养护剂养护条件下的取值分别为 1.14、1.16 和 1.01,其余符号含义同前。

公式(5)即为本文得到的考虑再生骨料取代率、养护方式以及碳化龄期影响的,水灰比 0.40、环境温度 20 ℃、CO₂ 浓度 20% 条件下的再生混凝土碳化深度拟合模型。经模型计算值与实测值对比,误差基本都在 15% 以内,平均误差为 9.48%,模型拟合度较好。

2.2 碳化反应区

Lu 等人^[17-18]的研究表明普通骨料混凝土碳化后存在完全碳化区、部分碳化区(pH 值变化区)和未碳化区(向内 pH 值较高的稳定区)。本试验采用 pH 计测定再生混凝土碳化后横断面不同深度位置砂浆粉末试样水溶液 pH 值,根据 pH 值随深度的变化划分再生混凝土碳化区。

2.2.1 不同再生粗骨料取代率工况

以洒水养护方式为例,不同再生粗骨料取代率混凝土碳化 28 d 后砂浆溶液的 pH 值测试结果,如图 3 所示。

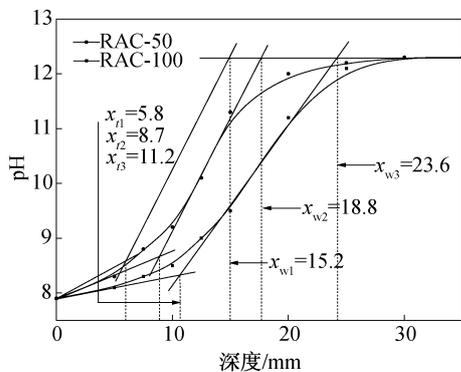


图 3 不同再生粗骨料取代率混凝土横断面 pH 值分布
Fig. 3 Distributions of pH of concrete with different replacement rates of recycled coarse aggregate

由图 3 可知,对于洒水养护方式下的普通混凝土(NC),距离碳化表面 0~5.8 mm 深度范围,pH 值基本稳定在 8.3 左右,该区域为完全碳化区深度;5.8~15.2 mm 深度范围,pH 有一个较大的上升幅度(由 8.3 升至 12.3),该区域为部分碳化区;深度大于 15.2 mm 时,pH 基本稳定在 12.3 左右,该区域为未碳化区。不同再生粗骨料取代率条件下洒水养护混凝土的各碳化区尺寸如表 2 所示。

表 2 基于 pH 值的混凝土碳化区划分(不同取代率工况)

Tab. 2 Division of concrete carbonization zone based on pH value (different replacement rate conditions)

混凝土类别	各碳化区对应的深度范围 / mm			
	完全碳化区	部分碳化区	未碳化区	部分碳化区尺寸
NC	0~5.8	5.8~15.2	15.2~50.0	9.4
RAC-50	0~8.7	8.7~18.8	18.8~50.0	10.1
RAC-100	0~11.2	11.2~23.6	23.6~50.0	12.4

从表 2 可以看出随着再生粗骨料取代率的上升,混凝土部分碳化区尺寸逐渐增大,同时其碳化前沿深度也不断增加。与 NC 相比,RAC-50 的部分碳化区尺寸和碳化前沿深度相对增幅分别为 7.5% 和 23.7%,RAC-100 的部分碳化区尺寸和碳化前沿深度相对增幅分别为 21.3% 和 55.3%。这表明再生骨料取代率对混凝土抗碳化性能影响显著,再生骨料取代率越高,混凝土抗碳化能力越弱。

2.2.2 不同养护方式工况

不同养护方式下,RAC-100 混凝土碳化 28 d 后不同深度区间的砂浆溶液 pH 值测试结果如图 4,对应的混凝土各碳化区尺寸划分如表 3 所示。

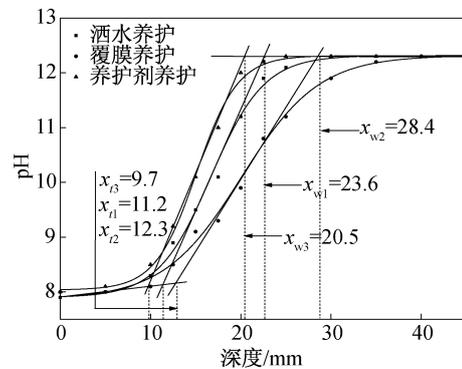


图 4 不同养护方式混凝土横断面 pH 值分布
Fig. 4 Distributions of pH of concrete with different curing methods

表3 基于 pH 值的混凝土碳化区划分(不同养护方式工况)

Tab.3 Division of concrete carbonization zone based on pH value (different curing methods conditions)

养护方式	各碳化区对应的深度范围 / mm			
	完全碳化区	部分碳化区	未碳化区	部分碳化区尺寸
洒水养护	0~11.2	11.2~23.6	23.6~50.0	12.4
覆膜养护	0~12.3	12.3~25.4	25.4~50.0	13.1
养护剂养护	0~9.7	9.7~20.5	20.5~50.0	10.8

根据表3可知,与洒水养护试件相比,覆膜养护试件的部分碳化区尺寸增加了5.6%,碳化前沿深度增加了7.6%;而养护剂养护试件的部分碳化区尺寸减小了12.9%,碳化前沿深度减小了12.3%。这表明养护方式对混凝土抗碳化能力也具有显著影响,本文研究的三种养护方式中,养护剂养护对再生混凝土的抗碳化能力提升效果最明显,洒水养护次之,覆膜养护的提升效果最小。

3 养护方式及再生骨料取代率的影响机理分析

混凝土的吸水速率与其内部孔隙率、孔径大小、孔隙连通性等密切相关,通过吸水特性试验可

以对比不同养护方式及再生粗骨料取代率下的混凝土试件内部孔隙结构差异,进而分析两者对再生混凝土抗碳化性能的影响机理。

3.1 养护方式的影响

再生骨料取代率一定的条件下,对不同养护方式养护28d混凝土进行吸水试验,三种取代率工况混凝土单位面积吸水量与时间的平方根关系及毛细吸水系数如图5—图7所示。

不同再生粗骨料取代率混凝土单位面积吸水量与时间的平方根之前近似呈现出两阶段线性关系,取曲线前期的线性段斜率计算得到混凝土毛细吸水系数,可以定量化反映表层混凝土吸水速率的快慢。在再生粗骨料取代率相同的条件下,养护剂养护下的混凝土毛细吸水系数最小,洒水养护和覆膜养护下混凝土的毛细吸水系数依次增大。NC在养护剂养护条件下毛细吸水系数分别为洒水养护和覆膜养护的85.32%和81.50%;RAC-50在养护剂养护条件下毛细吸水系数分别为洒水养护和覆膜养护的85.19%和72.93%;RAC-100在养护剂养护条件下毛细吸水系数分别为洒水养护和覆膜养护的81.51%和78.57%。这

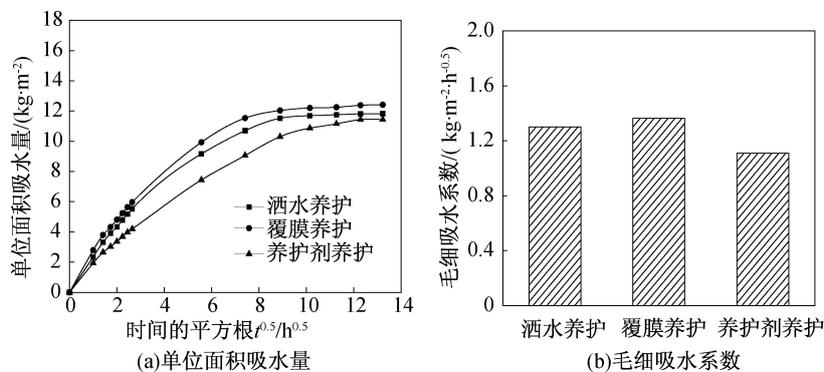


图5 NC混凝土毛细吸水特性

Fig. 5 Capillary water absorption characteristics of NC concrete

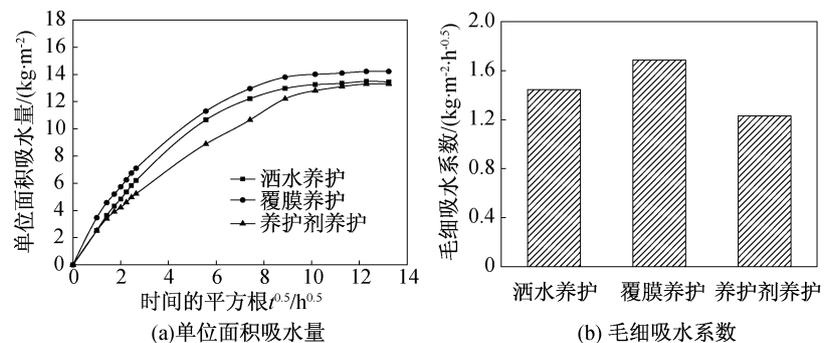


图6 RAC-50混凝土毛细吸水特性

Fig. 6 Capillary water absorption characteristics of RAC-50 concrete

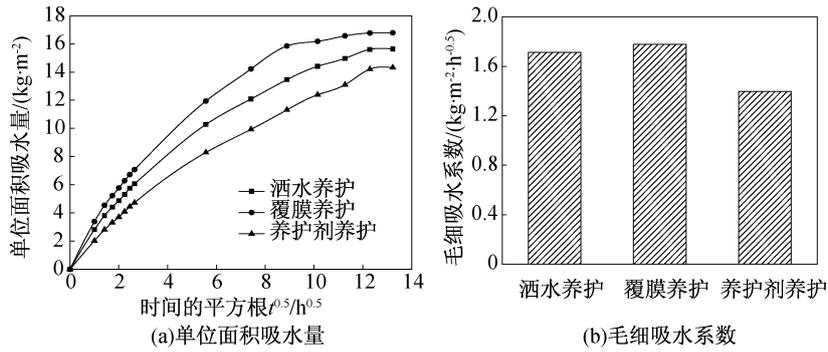


图 7 RAC-100 混凝土毛细吸水特性

Fig. 7 Capillary water absorption characteristics of RAC-100 concrete

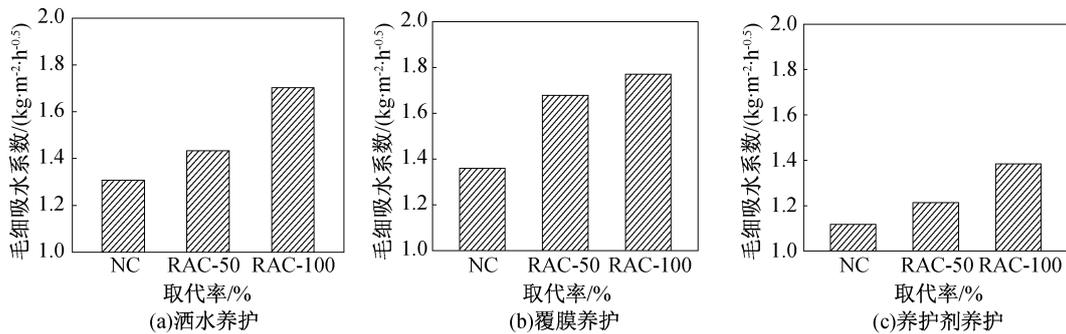


图 8 混凝土毛细吸水系数随再生粗骨料取代率的变化

Fig. 8 Change of capillary water absorption coefficient of concrete with the replacement rate of RCA

一规律与不同养护方式下混凝土碳化深度所反映出的混凝土微观结构差异保持一致。此外可以看出随着取代率增加,养护剂养护下的再生混凝土毛细吸水系数增长速率要小于洒水养护与覆膜养护下的情况。

3.2 再生粗骨料取代率的影响

三种养护方式下,混凝土养护 28 d 时的毛细吸水系数随再生粗骨料取代率变化如图 8 所示。

在本文研究的三种再生粗骨料取代率工况下,混凝土毛细吸水系数随再生粗骨料取代率的增加近似呈线性增大。RAC-100、RAC-50 的毛细吸水系数,在洒水养护条件下,分别为普通混凝土的 1.32、1.11 倍;覆膜养护条件下,分别为普通混凝土的 1.31、1.24 倍;养护剂养护条件下,分别为普通混凝土的 1.26、1.11 倍。这一规律与再生粗骨料取代率对混凝土碳化深度的影响规律基本一致。

4 结论

1) 混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率的增加而增大;在其他条件恒定的情况下,养护剂养护、洒水养护和覆膜养护下混凝土的碳化深度依次增大。

2) 混凝土部分碳化区尺寸及碳化前沿深度与再生粗骨料取代率正相关,洒水养护条件下,随着再生骨料取代率增大,再生混凝土部分碳化区尺寸和碳化前沿深度增加,且取代率越大增幅也越大。与洒水养护 RAC-100 试件相比,覆膜养护试件的部分碳化区尺寸和碳化前沿深度分别增大 5.6% 和 7.6%,而养护剂养护试件两者分别减小 12.9% 和 12.3%。

3) 混凝土的毛细吸水系数随取代率增加逐渐增大,这一规律与不同养护方式下混凝土碳化深度所反映出的混凝土微观结构差异保持一致;同一取代率下,养护剂养护下的混凝土毛细吸水系数最小、密实性最好,且随取代率增加,养护剂养护对再生混凝土毛细吸水系数增加的抑制作用要逐渐优于洒水养护与覆膜养护。

参考文献:

[1] 张少峰,齐红军. 再生混凝土耐久性能研究进展[J]. 混凝土, 2021(9):56-62.
 [2] LIANG C, LU N, MA H, et al. Carbonation Behavior of Recycled Concrete With CO₂-Curing Recycled Aggregate Under Various Environments[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2020, 39: 101185.

(下转第 25 页)

- 动态破坏的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 20-24+100.
- [14] 刘立平, 郑歆耀, 李骥天. 装配式结构数值模拟分析中半灌浆套筒钢筋连接本构关系研究[J]. 特种结构, 2018, 35(4): 1-7.
- [15] 刘锴鑫. 装配式钢筋混凝土梁柱节点抗冲击性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [16] 刘健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [17] 叶果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第17页)
- [3] LEEMANN A, LOSER R. Carbonation Resistance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 335-341.
- [4] 丁亚红, 郭书奇, 张向冈, 等. 玄武岩纤维对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1228-1238.
- [5] 董伟, 苏英, 林艳杰, 等. 粉煤灰对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 142-145.
- [6] DEVI S C, KHAN R A. Influence of Graphene Oxide on Sulfate Attack and Carbonation of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118883.
- [7] TANG J, WU J, ZOU Z, et al. Influence of Axial Loading and Carbonation Age on the Carbonation Resistance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 707-717.
- [8] MI R, LIEW K M, PAN G, et al. Carbonation Resistance Study and Inhomogeneity Evolution of Recycled Aggregate Concretes Under Loading Effects[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103916.
- [9] ZHANG K, XIAO J. Prediction Model of Carbonation Depth for Recycled Aggregate Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 86-99.
- [10] 王建超, 裘子铭, 陆佳韦, 等. 废弃纤维再生混凝土碳化深度预测模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(5): 1503-1510.
- [11] 余海玲, 郑建岚. 基于 Python 神经网络的再生混凝土碳化深度预测[J]. 混凝土, 2020(9): 52-55.
- [12] LIU K, ALAM M S, ZHU J, et al. Prediction of Carbonation Depth for Recycled Aggregate Concrete Using ANN Hybridized With Swarm Intelligence Algorithms[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124382.
- [13] NUNEZ I, NEHDI M L. Machine Learning Prediction of Carbonation Depth in Recycled Aggregate Concrete Incorporating SCMs[J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123027.
- [14] 张文之, 刘敏. 不同养护条件对大掺量粉煤灰混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2619-2624.
- [15] 王申, 李保亮, 潘子云, 等. 掺磨细镍铁渣混凝土的耐久性及其与孔结构和水化程度的关系[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(5): 1189-1199.
- [16] 崔正龙, 张雪虹, 唐博. 不同养护环境对粉煤灰混凝土强度及碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 65-69.
- [17] LU C, WANG W, LI Q, 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.
- [18] JI Y, WU M, DING B, et al. The Experimental Investigation of Width of Semi-carbonation Zone in Carbonated Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 67-75.
- (责任编辑 周雪梅)