

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.03-01

复杂环境作用下粉煤灰混凝土碳化性能试验研究

武允超

(安徽省水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘 要: 为了探究粉煤灰混凝土在多种因素共同影响下的碳化性能,对 0%、10%、20%、30% 四种粉煤灰掺量下的混凝土分别进行单一冻融循环、单一干湿循环以及冻融-干湿循环作用下的碳化试验。研究表明:随着循环次数的增加,碳化深度呈幂函数增长;相同环境下,粉煤灰掺量越大,碳化深度也越大;随着碳化龄期的增加,碳化深度呈逐渐增大趋势;相同碳化龄期(7d、14d、21d、28d)和粉煤灰掺量(0%、10%、20%、30%)情况下,冻融-干湿-碳化深度>冻融-碳化深度>干湿-碳化深度;根据试验结果,建立了粉煤灰混凝土碳化模型,可较好模拟不同环境、粉煤灰掺量以及碳化时间下的碳化深度,可为工程实践提供帮助。

关键词: 冻融循环;干湿循环;冻融-干湿循环;粉煤灰混凝土;碳化性能;模型

中图分类号: TU311.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2019)03-0157-06

0 引 言

粉煤灰混凝土可以在一定程度上提高混凝土的强度、改善孔隙结构特征、减少水泥用量、节约工程造价,被广泛应用于各类型工程建设当中,但是其耐久性损伤并不是由单一因素作用形成,而是由多种因素共同作用形成的,特别是在经历冻融-干湿循环作用后,其碳化情况更加明显。我国大部分地区均是夏季多雨而冬季多雪气候,因此有必要对复杂环境下的粉煤灰混凝土碳化性能进行系统的分析^[1-3]。

在短期或者长期荷载作用下,粉煤灰混凝土的碳化深度均呈现先减小后增大的变化趋势,长期荷载作用更有利于混凝土抗碳化性能的提升^[4-5];此外,养护条件也是影响粉煤灰混凝土抗碳化性能的一大因素,经标准养护的混凝土抗碳化性能强于自然养护^[6];不同矿物种类和掺量情况下,混凝土的抗碳化及其它性能均会有所不同^[7-9];郑薇薇等对高掺量粉煤灰混凝土在干湿循环-碳化作用下的耐久性进行了初步研究,认为多

因素影响下加剧了混凝土的损伤发展^[10];乔宏霞等对粉煤灰混凝土在自然浸泡、冻融循环以及硫酸盐溶液侵蚀 3 种环境下的耐久性进行了对比分析^[11]。

目前,针对单一因素影响下的混凝土抗碳化性能的研究较多,而针对复杂环境中多因素耦合作用下的碳化性能研究还比较少见,基于此,本文开展了不同粉煤灰掺量下,冻融-干湿耦合循环作用下的碳化性能研究,可为粉煤灰混凝土在工程当中的应用提供借鉴。

1 试验概况

本文水泥取自蚌埠市中联公司,粉煤灰取自元一有限公司。采用等量替换原则,设置 4 组不同粉煤灰掺量的混凝土配比,粉煤灰添加量分别为 0%、10%、20%、30%,见表 1。将不同配比下的混凝土制成边长为 10cm 的正方体试件,在 FHBS 型标准养护室全自动控温控湿设备中标准养护 28d,采用全自动混凝土快速冻融试验箱对各组试件进行冻融循环和干湿循环(循环次数分别为 100 次和 80 次),然后将耦合作用

收稿日期:2019-04-11

作者简介:武允超(1983-),男,大学本科,工程师。

表1 粉煤灰混凝土配合比情况

试验组	水泥/kg	粉煤灰/kg	水/kg	砂/kg	石/kg	减水剂/%	引气剂/%
1	350	0	163.2	703	1 146	0.30	0.03
2	315	35	163.2	696	1 134	0.39	0.08
3	280	70	163.2	693	1 129	0.41	0.11
4	245	105	163.2	682	1 112	0.45	0.16

后的试件放入碳化箱,如此往复4次,碳化时间分别为7d、14d、21d、28d,最后测定不同情况下的动弹性模量和碳化深度。

2 试验结果分析

2.1 冻融-碳化循环试验结果

冻融-碳化循环下粉煤灰混凝土的动弹性模量和碳化深度变化情况见图1。随着冻融-碳化循环次数的增加,混凝土的动弹性模量不断减小,相同循环次数下,20%粉煤灰掺量下的动弹性模量最大,当粉煤灰掺量达到30%后,混凝土的动弹性模量反而比不掺粉煤灰时小,表明粉煤灰的最佳掺合量为20%左右,否则将对混凝土力学性质产生不利影响;随着粉煤灰掺量的增加,碳化深度逐渐加大,表明粉煤灰对于混凝土的抗碳化性能会产生不利影响,随着循环次数的增加,碳化深度呈幂函数增长,这是因为粉煤灰的掺入改变了混凝土的理化性质,同时由于冻融损伤作用,使得混凝土内部产生大量的微裂纹,为CO₂的侵入创造了有利条件,

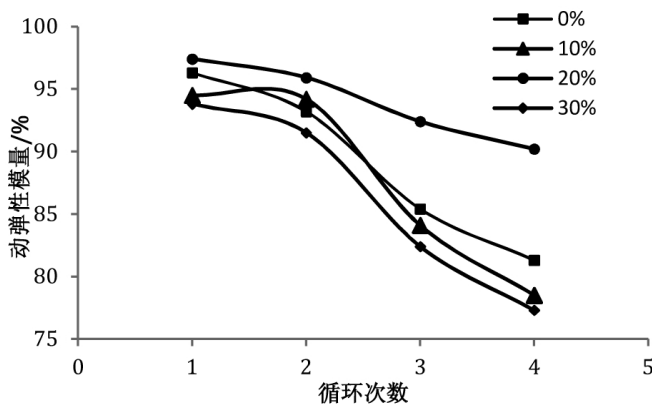
故而碳化深度增加,抗碳化性能降低。

2.2 干湿-碳化循环试验结果

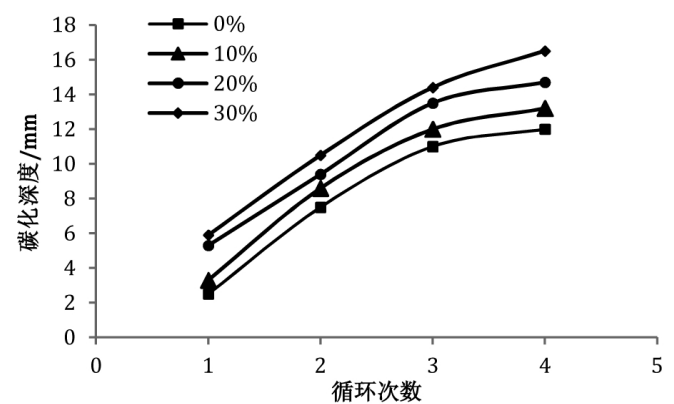
干湿-碳化循环下粉煤灰混凝土的动弹性模量和碳化深度变化情况见图2。从图2中可以看到:干湿-碳化循环作用下,混凝土的动弹性模量变化趋势与冻融-碳化循环时类似,随循环次数逐渐减小,且20%粉煤灰掺量时,动弹性模量最大,30%掺量时动弹性模量最小;相对于冻融-碳化循环,干湿-碳化循环下的动弹性模量更小,表明干湿循环对混凝土造成的损伤更严重;碳化深度和循环次数、粉煤灰掺量的变化关系与冻融-碳化循环情况下类似,随循环次数增加而降低,随粉煤灰掺量增加而增大。

2.3 冻融-干湿-碳化循环试验结果

冻融-干湿-碳化循环作用下粉煤灰混凝土的动弹性模量和碳化深度变化情况见图3。在冻融-干湿-碳化循环作用下,动弹性模量随循环次数增加逐渐降低,随掺量变化情况为:20%>10%>0%>30%;碳化深度变化和循环次数、粉煤灰掺量的变化关系与冻融-碳化、干湿-碳化循环情况下类似,且随着粉煤灰掺量的增加碳

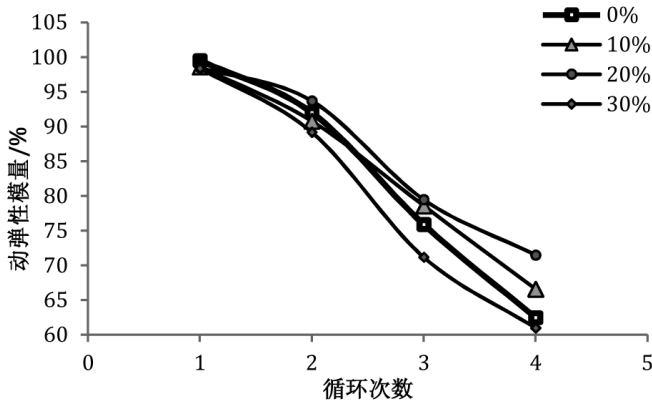


(a) 动弹性模量

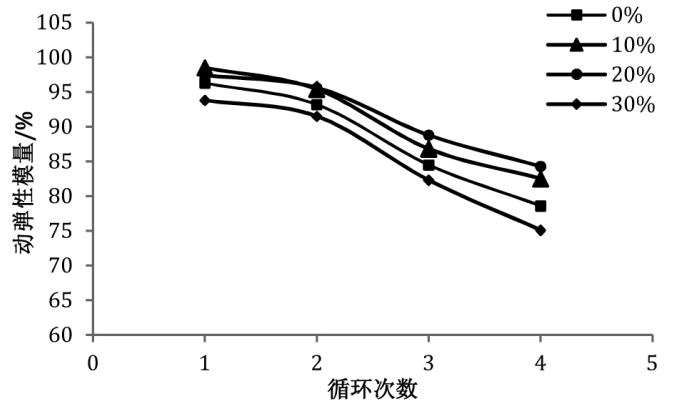


(b) 碳化深度

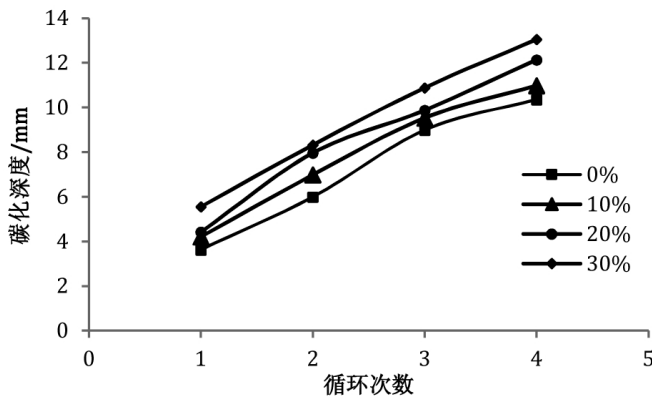
图1 冻融-碳化循环试验结果



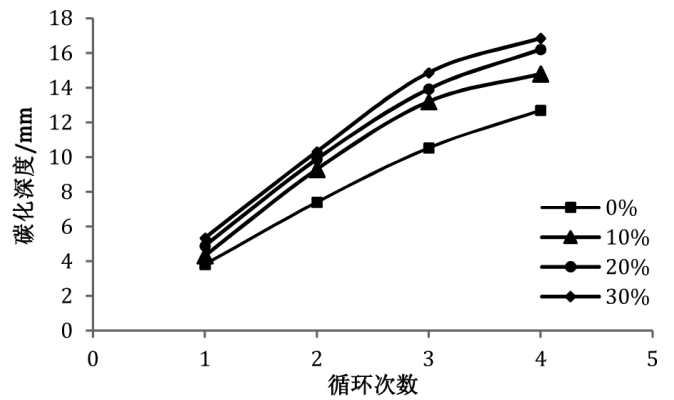
(a) 动弹性模量



(a) 动弹性模量



(b) 碳化深度



(b) 碳化深度

图 2 干湿-碳化循环试验结果

图 3 冻融-干湿-碳化循环试验结果

化深度的差值越来越小。

2.4 碳化深度对比分析

分析得到了不同碳化天数下碳化深度的变化情况,见图 4。从图 4 中可以看到:随着碳化时间的增加,混凝土的碳化深度逐渐增长;相同碳化时间和粉煤灰掺量下,冻融-干湿-碳化循环情况的深度最大,其次为冻融-碳化循环,最小的为干湿-碳化情况,表明冻融作用对于粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响大于干湿作用对抗碳化性能的影响。

3 碳化模型分析

牛荻涛^[12]根据相关实验数据,提出基于标准抗压强度以及碳化时间的混凝土碳化深度模型:

$$y=k\left(\frac{24.48}{\sqrt{p}}-2.47\right)\cdot\sqrt{t} \quad (1)$$

式中: y 表示碳化深度,mm; k 为与环境 and 养护时间相关的修正系数; p 表示标准立方体强度值,MPa; t 表示碳化时间,d。

利用(1)式对不同环境下碳化深度进行拟合,见表 2。从表 2 中可以看到,基于标准抗压强度以及碳化时间的混凝土碳化深度模型能在一定程度上预测碳化深度的发展状况,但精度并不理想, R^2 最高值仅为 0.75,这是因为该碳化模型没有综合考虑多种因素共同影响的情况,也没有将粉煤灰掺量的影响纳入考虑范围,根据试验成果,作者提出耦合损伤与粉煤灰掺量在不同碳化时间影响下的碳化深度预测模型:

$$y=a+bx_1+cx_1^2+dx_2+ex_2^2+fx_1x_2 \quad (2)$$

式中: a 为计算常数,与所处环境相关; b 、 c 为与碳化时间相关系数; d 、 e 表示与粉煤灰掺量相关系数; f 表示综合影响系数; x_1 、 x_2 分别表示碳化时间(d)和粉煤灰掺量(%)。

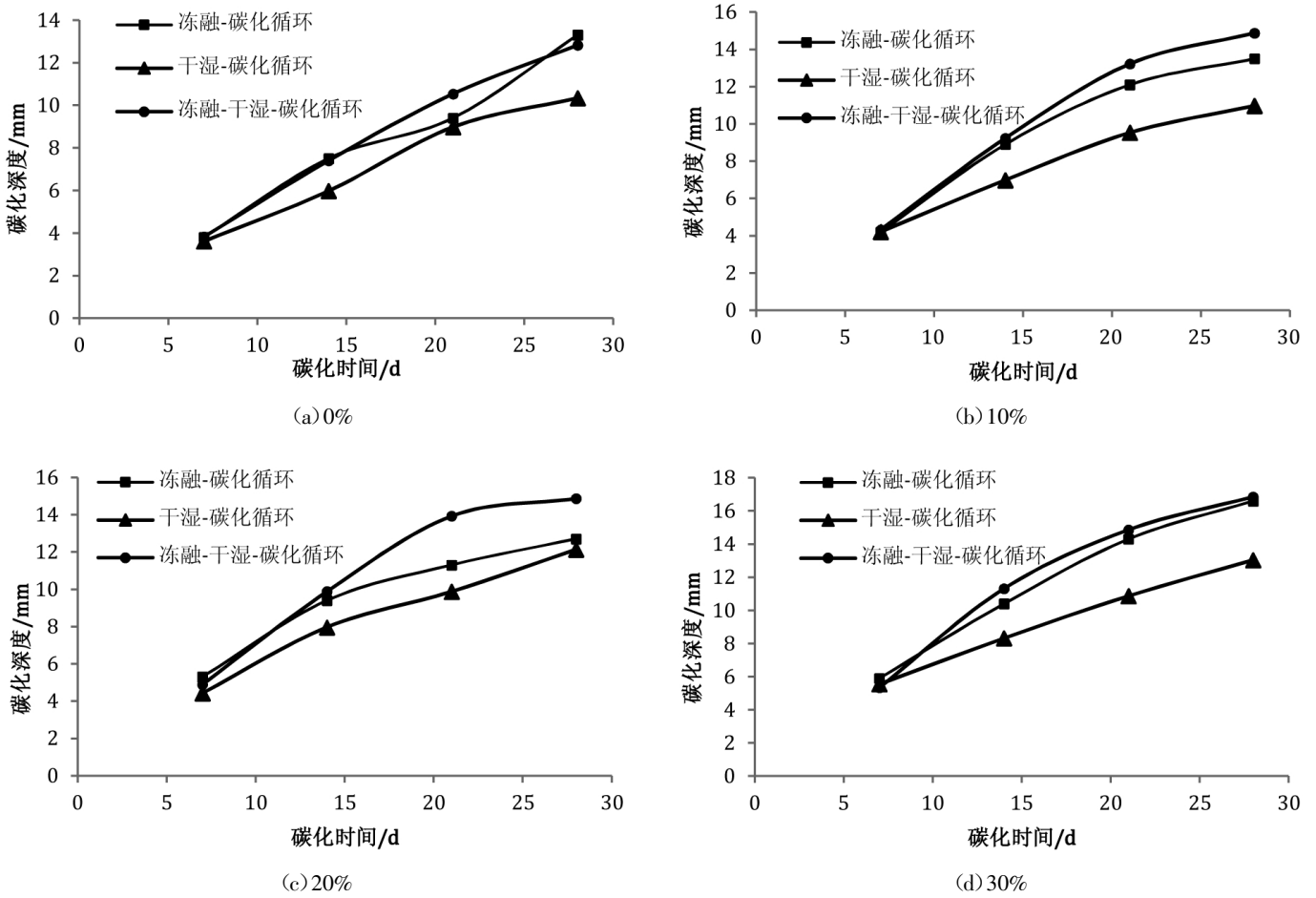


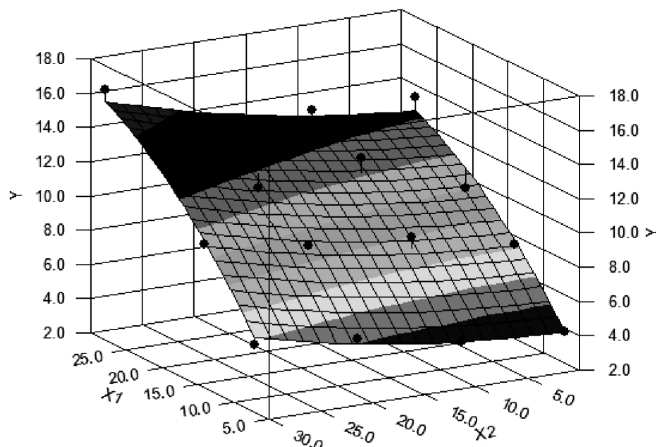
图4 不同粉煤灰掺量下碳化深度对比

表2 不同环境下碳化深度拟合情况

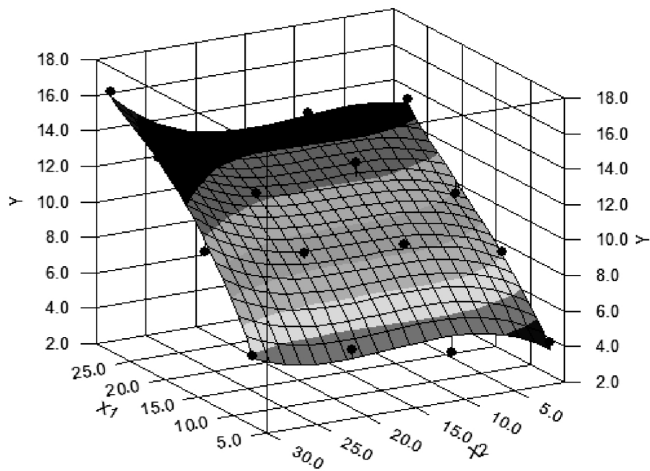
碳化时间	冻融-碳化循环				干湿-碳化循环				冻融-干湿-碳化循环			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
7	3.80	4.20	5.30	5.90	3.60	4.20	4.40	5.50	3.80	4.30	4.90	5.30
14	7.50	8.90	9.40	10.40	6.00	7.00	8.00	8.30	7.40	9.20	9.90	11.30
21	9.40	12.10	11.30	14.30	9.00	9.50	9.90	10.90	10.50	13.20	13.90	14.90
28	13.30	13.50	12.70	16.60	10.30	11.00	12.10	13.00	12.80	14.90	14.90	16.90
R ²	0.71	0.64	0.58	0.66	0.70	0.75	0.69	0.68	0.58	0.62	0.63	0.73

采用 datafit 对试验数据进行非线性拟合，分别得到了在单一冻融循环、单一干湿循环以及冻融-干湿循环作用下的碳化深度拟合情况，见图5和表3。从图中可以看到：在不同的环境作用下，拟合得到的参数值相差较大，但本文所提出的碳化深度模型能很好地模拟

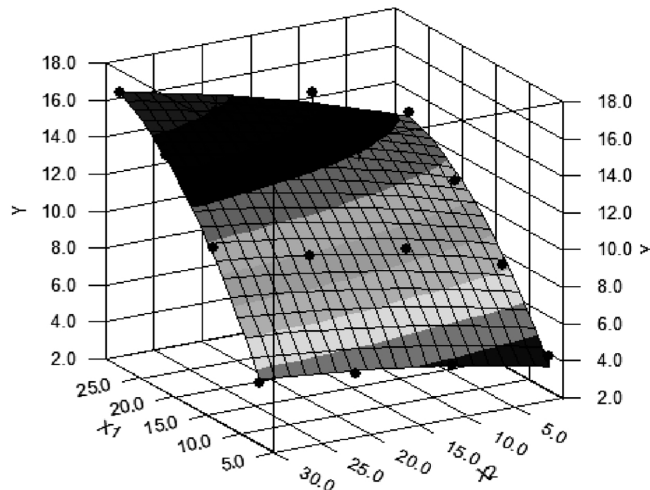
不同环境下的混凝土碳化情况，拟合相关系数 R² 大于 0.95，可见，文中提出的碳化模型能够在一定程度上很好地表达不同环境和粉煤灰掺量下混凝土随时间的碳化情况。



(a) 冻融-碳化循环



(b) 干湿-碳化循环



(c) 冻融-干湿-碳化循环

图 5 不同环境下模型拟合效果

表 3 不同环境下粉煤灰混凝土碳化模型拟合情况

环境	拟合模型	R ²
冻融-碳化循环	$y = -1.07 + 0.77x_1 - 1.02x_1^2 + 3.25x_2 + 2.37x_2^2 + 1.4x_1x_2$	0.95
干湿-碳化循环	$y = 0.21 + 0.51x_1 - 0.54x_1^2 + 4.19x_2 + 3.94x_2^2 + 1.11x_1x_2$	0.99
冻融-干湿-碳化循环	$y = -2.97 + 1.01x_1 + 9.57x_1^2 - 1.61x_2 - 1.43x_2^2 + 3.17x_1x_2$	0.98

4 结 论

(1) 动弹性模量随循环次数的增加逐渐减小, 相同环境和循环次数下, 20%粉煤灰掺量下的动弹性模量最大。

(2) 碳化深度随循环次数增加呈幂函数型增长; 相同碳化时间(7d、14d、21d、28d)内, 冻融-干湿-碳化循环的碳化深度最大, 其次为冻融-碳化循环, 最小为干湿-碳化循环; 冻融作用对于粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响大于干湿作用对抗碳化性能的影响。

(3) 建立起考虑环境和粉煤灰掺量的碳化模型, 该模型与试验数据拟合相关性 R² 均大于 0.95, 较常规混凝土碳化深度模型提高约 0.2, 能很好模拟不同环境、粉煤灰掺量和碳化时间情况下的碳化深度, 可为粉煤灰混凝土在工程中的设计应用提供帮助。

参考文献:

- [1] 景延会, 朱旭, 霍龙, 等. 浅谈粉煤灰及其在混凝土中的应用[J]. 价值工程, 2018, 37(26): 198~199.
- [2] 谭辉. 粉煤灰对轻质高强混凝土性能影响试验研究[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(04): 134~136+198.
- [3] 张豫川, 卢连长, 姚永国, 等. 掺粉煤灰混凝土碳化影响研究[J]. 施工技术, 2016(2): 526~529.
- [4] 郝潇航, 张伟聪, 刘燕. 轴压荷载下粉煤灰混凝土碳化性能实验研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(6): 104~108.
- [5] 李昌昊, 刘舒畅, 于瑞平, 等. 长期持载对粉煤灰混凝土碳化性能影响实验研究[J]. 江西建材, 2018(4): 9+11.
- [6] 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.
- [7] 黄琪, 石膏爽, 王清远, 等. 粉煤灰基地聚物混凝土的碳化性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(7): 121~125.

- [8] 陈锡容,王立华,刘佳. 矿渣和粉煤灰混凝土抗碳化性能的试验研究[J]. 广东水利水电,2012(6):36~39.
- [9] 杨华美,杨华全,王迎春,等. 掺粉煤灰混凝土的碳化及抗冻性能试验研究[J]. 粉煤灰,2010,22(2):11~13.
- [10] 郑薇薇,高建明,祁兵,等. 高掺量粉煤灰混凝土在干湿循环-碳化耦合作用下的耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(12):23~27.
- [11] 乔宏霞,胡宸瑞,路承功,等. 基于不同环境下掺粉煤灰混凝土耐久性试验研究[J]. 混凝土,2018(05):64~67+71.
- [12] 牛荻涛,石玉钗,雷怡生. 混凝土碳化的概率模型及碳化可靠性分析[J]. 西安建筑科技大学报,1995,27(3):252~256.

编辑:张绍付

Experimental study on carbonation behavior of fly ash concrete under complex environment

WU Yunchao

(Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to explore the carbonation performance of fly ash concrete under the influence of various factors, the carbonation tests of concrete with 0%, 10%, 20% and 30% fly ash were carried out under the action of single freeze-thaw cycle, single dry-wet cycle and freeze-thaw-dry-wet cycle respectively. The results show that the carbonization depth increases exponentially with the increase of cycle times; under the same environment, the higher the fly ash content, the greater the carbonization depth; with the increase of age, the carbonization depth increases gradually; under the same age (7d, 14d, 21d, 28d) and fly ash content (0%, 10%, 20%, 30%), the freeze-thaw-dry-wet-carbonization depth > freeze-thaw-carbonization depth. According to the test results, the carbonation model of fly ash concrete is established, which can simulate the carbonation depth of fly ash in different environments, fly ash content and carbonation time, and can provide help for engineering practice..

Key words: Freeze-thaw cycle; Dry-wet cycle; Freeze-thaw-dry-wet cycle; Fly ash concrete; Carbonization performance; Model

翻译:武允超