

# 粉煤灰混凝土早期碳化规律研究

胡晓鹏, 牛荻涛, 张永利

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**选取粉煤灰掺量为 0、10%、20% 和 30%, 混凝土强度为 C30、C40 和 C50 的粉煤灰混凝土为研究对象, 通过试验得到了粉煤灰混凝土浇筑后 300 天内自然条件下的碳化发展规律, 分析研究了养护时间及不同浇筑面早期碳化发展的差异, 建立了粉煤灰混凝土早期碳化深度的计算模型. 结果表明: 粉煤灰混凝土的早期碳化深度增长随养护时间的延长而减慢, 碳化深度随粉煤灰掺量的增加而增大; 浇筑顶面的碳化深度最大而底面的碳化深度最小.

**关键词:**粉煤灰混凝土; 养护时间; 早期碳化; 浇筑面

**中图分类号:** TU528.01

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)06-0805-06

混凝土的早期性能直接影响混凝土结构的承载能力和耐久性, 其重要性越来越受到关注. 对于混凝土结构来说, 碳化会降低混凝土的碱性, 一旦碳化到钢筋表面, 钢筋钝化膜遭到破坏, 钢筋失去混凝土的保护作用, 结构的承载能力和耐久性会明显降低<sup>[1]</sup>. 诸多快速碳化试验和实际工程检测的研究成果表明<sup>[2-4]</sup>: 与普通混凝土相比, 粉煤灰混凝土早期碳化速度更快, 混凝土的抗碳化性能随粉煤灰掺量的增加而减弱; 粉煤灰混凝土在施工期内即会产生一定的碳化深度. 目前, 学者对掺合料混凝土早期碳化极快的原因认识尚不一致, 认为造成碳化极快的原因有: 水泥颗粒过细、水泥中掺合料的掺入、混凝土中掺合料的掺入、混凝土外加剂的使用、酸性脱模剂的使用、混凝土养护时间不足等. 文献[5-6]对粉煤灰混凝土早龄期的碳化发展规律进行了快速碳化实验研究, 但将快速碳化试验用于早龄期粉煤灰混凝土的研究是不可取的. 通过现场暴露试验研究粉煤灰混凝土早期碳化的发展规律, 对于提高粉煤灰混凝土的早期性能及施工控制水平、确保结构的承载能力及耐久性具有重要的现实意义和工程应用价值.

本文通过现场暴露试验建立粉煤灰混凝土浇筑后 300 天内的碳化发展规律, 分析养护时间对其发展规律的影响及不同浇筑面早期碳化深度发展的差异.

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥: 陕西秦岭 42.5R 级普通硅酸盐水泥, 其品质符合 GB175—2007 标准;

粉煤灰: 陕西渭河电厂生产的 II 级粉煤灰, 其细度模数、烧失量、需水比分别为 0.18、5%、95%;

细骨料: 灞河中砂, 细度模数为 2.9, 堆积密度为 1 450 kg/m<sup>3</sup>;

粗骨料: 粒径为 5~16 mm 的碎石, 压碎指标为 12%, 堆积密度 1 400~1 700 kg/m<sup>3</sup>;

高效减水剂: RD-N 型高效减水剂, 减水效果在 20% 左右, 1 h 内无塌落度损失, 掺入量为胶凝材料质量的 1%.

### 1.2 混凝土配合比

粉煤灰掺量(粉煤灰占胶凝材料质量比, 超量代掺系数为 1.1)分别为 0、10%、20% 和 30% 的混凝土配合比见表 1.

收稿日期: 2012-03-31 修改稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAJ03A02-03); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ7020)

作者简介: 胡晓鹏(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性研究.

表 1 粉煤灰混凝土的配合比

Tab. 1 Mix ratio of fly ash concrete

编号	混凝土强度	粉煤灰掺量	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石/kg	粉煤灰/kg	减水剂/kg
A0	C30	0	25.88	13.13	60.29	98.40	0.00	0.25
A1	C30	10%	23.27	13.13	59.89	97.50	3.89	0.28
A2	C30	20%	20.69	13.13	59.30	96.76	7.75	0.28
A3	C30	30%	18.11	13.13	58.80	95.98	11.60	0.31
B	C40	20%	21.90	11.23	46.54	75.91	8.18	0.31
C	C50	20%	25.54	11.23	44.61	72.77	9.52	0.34

1.3 试件成型与养护

胶凝材料采用强制式搅拌机搅拌 2 min 后振捣成型. 采用 100 mm×100 mm×400 mm 的试件, 并预留标准试块以确定混凝土强度. 试件 24 h 后脱模, 在标准养护室内分别养护 3 d、5 d、7 d、9 d、12 d 和 14 d 后放置于室内自然环境. 按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GBT50082—2009)的技术要求, 在不同龄期进行碳化深度测试<sup>[7]</sup>.

1.4 粉煤灰混凝土抗压强度

龄期 28 d、90 d 粉煤灰混凝土的标准立方体抗压强度结果见表 2.

表 2 粉煤灰混凝土抗压强度

Tab. 2 Compressive strength of fly ash concrete

编号	A0	A1	A2	A3	B	C
28 d 抗压强度/MPa	35.1	33.4	31.7	29.5	42.3	56.2
90 d 抗压强度/MPa	53.5	52.3	51.1	48.9	60.7	71.8

2 粉煤灰混凝土早期碳化性能分析

2.1 粉煤灰混凝土早期碳化的发展规律

对各种编号的粉煤灰混凝土进行碳化深度测试, 测试结果见图 1.

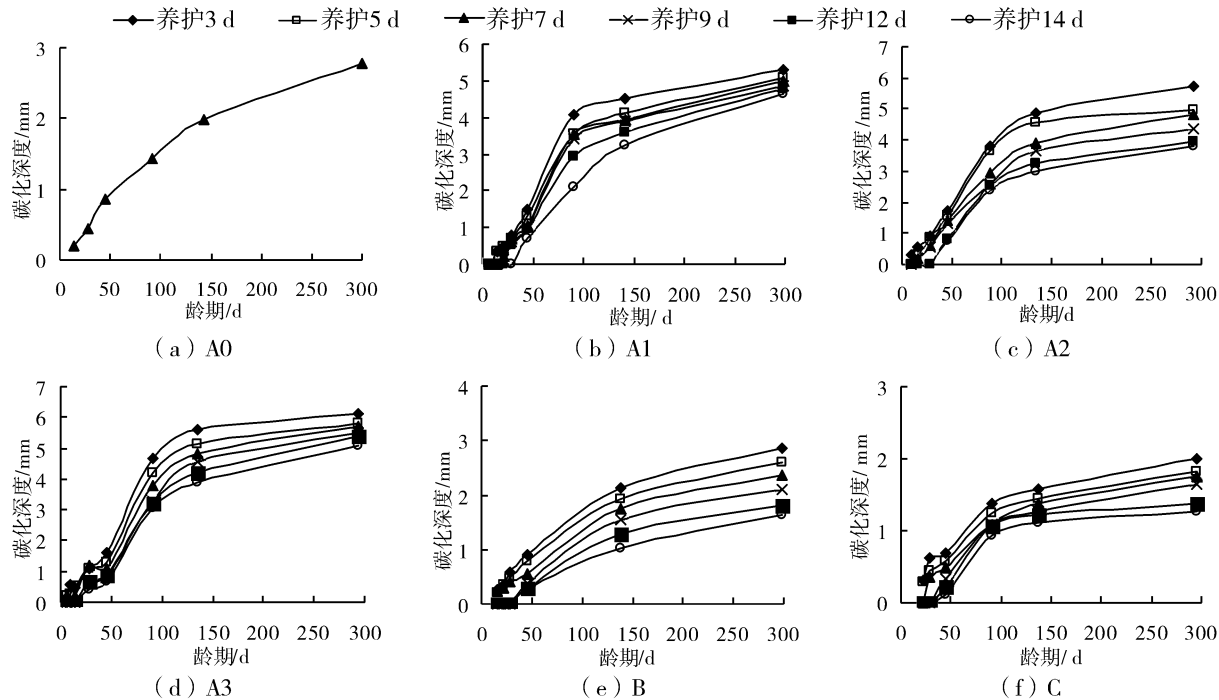


图 1 粉煤灰混凝土早期碳化的发展规律

Fig. 1 Early carbonation development law of fly ash concrete

从图 1 的结果可以看出:

- (1)粉煤灰混凝土的碳化深度 90 d 内发展极快, 90 d 时碳化深度达到 300 d 碳化深度的 70% 左右; 随着龄期的增长, 碳化速度逐渐变缓并趋于定值.
- (2)随着粉煤灰掺量的增加, 粉煤灰混凝土早期碳化深度增大. 在养护时间为 7 d、混凝土强度等级

为 C30 的情况下,不掺粉煤灰混凝土龄期 300 d 时的碳化深度仅有 2.7 mm,而掺 30% 粉煤灰的混凝土碳化深度达 5.7 mm.

(3)随着混凝土强度的提高,粉煤灰混凝土的早期碳化速度减慢.在养护时间为 7 d、粉煤灰掺量为 20% 的情况下,混凝土强度 C50 粉煤灰混凝土龄期 300 d 时碳化深度仅有 1.8 mm,而 C30 粉煤灰混凝土的碳化深度达 4.8 mm.

## 2.2 施工浇筑面对粉煤灰混凝土早期碳化性能的影响

混凝土的浇筑过程会造成不同浇筑面密实度的不同和水泥浆体的分布不均,加之不同浇筑面养护水分的供给差异,引起粉煤灰混凝土各个浇筑面的抗碳化能力有所差异.选取粉煤灰掺量为 20%、混凝土强度为 C30、龄期为 90 d 的粉煤灰混凝土试件,对各个浇筑面的碳化深度进行了测试,结果见图 2.从图 2 的结果可以看出:粉煤灰混凝土浇筑面的碳化深度最大而底面的碳化深度最小;浇筑面的碳化深度是侧面碳化深度的 1.03~1.17 倍,而底面碳化深度是侧面碳化深度的 0.84~0.98 倍.

## 2.3 粉煤灰掺量对粉煤灰混凝土早期碳化性能的影响

图 3 给出了混凝土强度 C30、养护时间 7 d、不同粉煤灰掺量粉煤灰混凝土碳化深度的测试结果.从图 3 的结果可以看出:随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰混凝土的早期碳化深度增大;掺 10%、20% 和 30% 粉煤灰的混凝土碳化深度约为不掺粉煤灰的 1.6、1.9、2.4 倍.

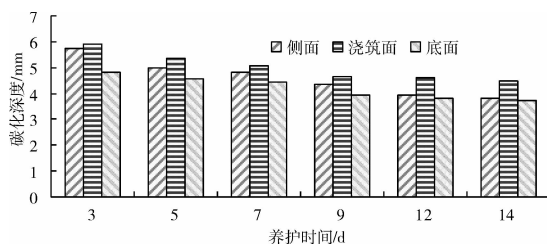


图 2 不同浇筑面的早期碳化深度

Fig. 2 Early carbonation depths of different surface

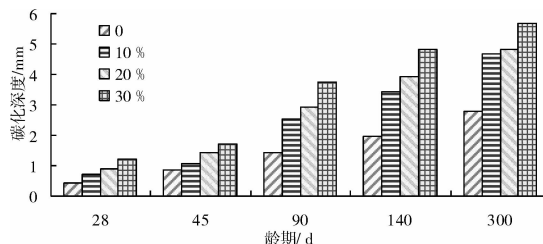


图 3 粉煤灰掺量对早期碳化深度的影响

Fig. 3 Early carbonation depths of different fly ash amount

## 2.4 养护时间对粉煤灰混凝土早期碳化性能的影响

粉煤灰混凝土的早期性能变化很大,养护条件是其中的一个重要因素<sup>[8]</sup>.由于养护时间的延长会造成后续施工的不便,加之竖向构件侧面和水平构件侧面、底面等结构表面养护的困难,构件的养护时间难以保证.图 4 给出了混凝土强度 C30、龄期 90 d 的粉煤灰混凝土碳化深度的测试结果.从图 4 的结果可以看出:随着养护时间的延长,粉煤灰混凝土早期碳化速度减慢;养护 3 d、5 d、7 d、9 d、12 d 和 14 d 粉煤灰混凝土的碳化深度约为养护 28 d 的 2.35、2.10、1.98、1.85、1.77、1.52 倍.

## 2.5 水灰比对粉煤灰混凝土早期碳化性能的影响

将收集到的数据换算到同一条件(粉煤灰掺量为 0、养护时间为 28 d)进行分析,图 5 给出了水胶比影响系数  $k_w$  随水胶比  $W/C$  的变化规律.从图 5 的结果可以看出:混凝土碳化速度随水灰比增大而加速,两者近似呈线性关系.

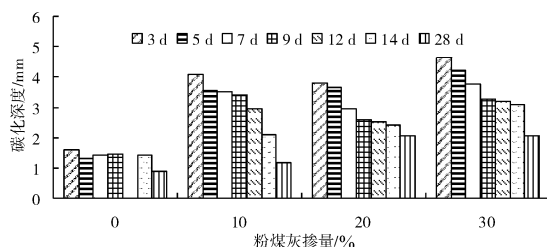


图 4 养护时间对早期碳化深度的影响

Fig. 4 Effect of curing time on early carbonation depth

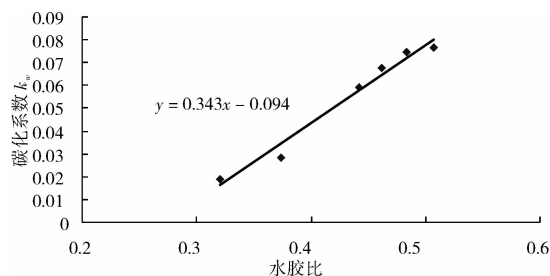


图 5 碳化速度与水胶比的关系

Fig. 5 Relation of carbonization rate and water-cement ratio

根据散点图的趋势,并参考文献[9],选择线性关系进行回归分析,回归结果为(相关系数为0.895):

$$k_w=0.343\times W/C-0.094$$

(1)

3 粉煤灰混凝土早期碳化深度的计算模型

考虑养护时间、碳化部位、粉煤灰掺量、水胶比对粉煤灰混凝土早期碳化深度的影响,从试验结果拟合得到粉煤灰混凝土早期碳化深度  $X(t)$  的计算公式:

$$X(t)=1.55k_fk_wk_{t0}k_pk_p\sqrt{t}$$

(2)

式中: $k_f$ 为粉煤灰掺量影响系数,粉煤灰掺量为0、10%、20%、30%时分别取1.0、1.6、1.9、2.4; $k_w$ 为水灰比影响系数,按式(1)取值; $k_{t0}$ 为养护时间影响系数,取值见表3; $k_p$ 为浇筑面影响系数,浇筑侧面取1.0,浇筑底面取0.9,浇筑面取1.1; $t$ 为粉煤灰混凝土的龄期,d.

表4给出了本文粉煤灰混凝土早期碳化深度计算模型与文献[10]、[11]试验值的对比结果.从表4可以看出:文献[10]试验值与计算值的比值为0.38~

1.79,比值的平均值、标准差、变异系数分别为0.982、0.386、0.393;文献[11]试验值与计算值的比值为0.27~2.21,比值的平均值、标准差、变异系数分别为0.937、0.416、0.443.计算结果误差较大是混凝土碳化发展及碳化深度的获取均存在较大的变异.

表 3 养护时间影响系数  $k_{t0}$

Tab.3 Curing time influence coefficient  $k_{t0}$

养护时间/d	3	5	7	9	12	14	28
养护时间影响系数 $k_{t0}$	2.35	2.10	1.98	1.85	1.77	1.52	1.00

表 4 计算模型与前人试验值的对比

Tab.4 Contrast between calculation values and precious experiment values

文献[10]						文献[11]					
水胶比	粉煤灰掺量 /%	养护时间 /d	龄期 /d	试验值 /mm	$\frac{X_{试验值}}{X_{计算值}}$	水胶比	粉煤灰掺量 /%	养护时间 /d	龄期 /d	试验值 /mm	$\frac{X_{试验值}}{X_{计算值}}$
0.5	0	3	14	1.3	1.27	0.37	20	3	56	3.5	2.12
0.5	10	3	14	1.8	1.10	0.37	20	3	180	0.9	0.30
0.5	20	3	14	1.9	0.98	0.37	20	3	360	2.6	0.62
0.5	30	3	14	2	0.82	0.37	20	3	540	2.5	0.49
0.5	0	3	28	2.5	1.73	0.37	20	3	720	5.7	0.96
0.5	10	3	28	3	1.30	0.37	20	3	1000	5.6	0.80
0.5	20	3	28	3.1	1.13	0.37	0	3	56	1.8	2.07
0.5	30	3	28	3.6	1.04	0.37	0	3	360	2.3	1.04
0.5	0	7	14	0.6	0.70	0.37	0	3	540	2	0.74
0.5	10	7	14	0.7	0.51	0.37	0	3	720	3.6	1.16
0.5	20	7	14	0.8	0.49	0.37	0	3	1000	2.9	0.79
0.5	30	7	14	0.8	0.39	0.4	0	3	180	0.9	0.44
0.5	0	7	28	1.6	1.31	0.4	0	3	360	2.7	0.93
0.4	0	7	28	0.7	1.03	0.4	0	3	540	2.4	0.68
0.4	10	7	28	0.8	0.74	0.4	0	3	720	5.1	1.25
0.4	20	7	28	0.9	0.70	0.4	0	3	1000	4	0.83
0.4	30	7	28	1.2	0.74	0.43	0	3	28	2.2	2.21
0.3	0	3	14	0.2	1.70	0.43	0	3	56	2.1	1.49
0.3	20	7	28	0.1	0.38	0.43	0	3	360	2.6	0.73
0.3	30	7	28	0.6	1.79	0.43	0	3	720	5.3	1.05
0.5	10	7	28	1.8	0.92	0.43	0	3	1000	5.9	0.99
0.5	20	7	28	2	0.86	0.37	20	7	56	2.9	2.09

续表 4

文献[10]						文献[11]					
水胶比	粉煤灰掺量 /%	养护时间 /d	龄期 /d	试验值 /mm	$\frac{X_{\text{试验值}}}{X_{\text{计算值}}}$	水胶比	粉煤灰掺量 /%	养护时间 /d	龄期 /d	试验值 /mm	$\frac{X_{\text{试验值}}}{X_{\text{计算值}}}$
0.5	30	7	28	2.6	0.89	0.37	20	7	360	2.2	0.62
0.4	10	3	14	1.1	1.21	0.37	20	7	540	1.8	0.42
0.4	20	3	14	1.6	1.48	0.37	20	7	720	4.3	0.86
0.4	30	3	14	1.6	1.17	0.37	20	7	1000	3.5	0.60
0.4	10	3	28	1.9	1.47	0.37	0	7	28	0.9	1.74
0.4	20	3	28	2.4	1.57	0.37	0	7	540	2	0.88
0.4	30	3	28	2.6	1.34	0.37	0	7	720	1.7	0.65
0.4	0	7	14	0.5	1.04	0.37	0	7	1000	2.1	0.68
0.4	10	7	14	0.5	0.65	0.4	0	7	56	1.1	1.15
0.4	20	7	14	0.6	0.66	0.4	0	7	540	1	0.34
0.4	30	7	14	0.8	0.69	0.4	0	7	720	2.7	0.78
0.3	20	3	14	0.3	1.35	0.43	0	7	56	1.5	1.26
0.3	10	3	28	0.2	0.75	0.43	0	7	360	1.8	0.60
0.3	10	7	14	0.1	0.63	0.43	0	7	540	1	0.27
0.3	20	7	14	0.1	0.53	0.43	0	7	720	3.4	0.80
0.3	10	7	28	0.1	0.45						

4 结 论

通过对粉煤灰混凝土进行早期自然暴露试验,得到了粉煤灰混凝土浇筑后 300 天内自然条件下的碳化发展规律,分析了养护时间对其发展规律的影响及不同浇筑面早期碳化发展的差异,建立了粉煤灰混凝土早期碳化深度的计算模型.取得了以下几点结论:

- (1)粉煤灰混凝土的碳化深度 90d 内发展极快,达到 300d 碳化深度的 70%左右;随着龄期的增长碳化速度逐渐变缓并趋于定值.
- (2)随着养护时间的延长,粉煤灰混凝土的早期碳化速度减慢;随粉煤灰掺量的增加,粉煤灰混凝土早期碳化深度增大;随混凝土强度等级的提高,粉煤灰混凝土的早期碳化速度减慢.
- (3)粉煤灰混凝土浇筑顶面的碳化深度最大,而浇筑底面碳化深度最小.

参考文献 References

[1] 杨 军. 混凝土的碳化性能与气渗性能研究[D]. 济南:山东科技大学,2004.  
YANG Jun. Carbonation performance and gas permeability properties of concrete[D]. Jinan:Shandong University of Technology, 2004.

[2] 朱蓓蓉,杨钱荣,杨全兵. 三峡工程高掺量粉煤灰混凝土碳化性能研究[J]. 粉煤灰综合运用,2004(1):3-5.  
ZHU Bei-rong, YANG Qian-rong, YANG Quan-bing. Study on the carbonization property of concrete with high addition fly ash in Sanxia project[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2004(1):3-5.

[3] 刘 斌. 大掺量粉煤灰混凝土的抗碳化性能[J]. 混凝土,2003(3):44-48.  
LIU Bin. Carbonation resistance property of the high fly-ash content concrete[J]. Concrete,2003(3):44-48.

[4] 朱艳芳,王培铭. 大掺量粉煤灰混凝土的抗碳化性能研究[J]. 建筑材料学报,1999(12):319-323.  
ZHU Yan-fang, WANG Pei-ming. Research on carbonation resistance of concrete containing large amount of fly ash [J]. Journal of Building Material,1999(12):319-323.

[5] 宋少民,李红辉,邢 峰. 大掺量粉煤灰混凝土抵抗碳化和钢筋锈蚀研究[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(8):38-42.  
SONG Shao-min, LI Hong-hui, XING Feng. Research on carbonation resistance and steel corrosion-resistance of

- high volume fly ash concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(8): 38-42.
- [6] 阿茹罕, 阎培渝. 不同粉煤灰掺量混凝土的碳化特性[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 7-12.  
A Ru-han, YAN Pei-yu. Carbonation characteristics of concrete with different fly - ash contents[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 7-12.
- [7] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S]. 2009.  
GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. 2009.
- [8] 邱洪林, 叶青. 早期标准养护时间对普通混凝土抗碳化能力的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(8): 436-440.  
QIU Hong-lin, YE Qing. Effect of standard curing time during early stage on anti-carbonization capability of normal concrete[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 36(8): 436-440.
- [9] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
NIU Di-tao. Durability and life prediction of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [10] 胡建军. 掺粉煤灰和矿渣粉混凝土的碳化行为及其影响因素的研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
HU Jian-jun. Studies on carbonation behavior of concrete mixed with fly ash and granulated blast furnace slag and its influencing factors[D]. Beijing: Tsinghua University. 2010.
- [11] 贾耀东. 大掺量矿物掺合料混凝土的碳化特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
JIA Yao-dong. Research on carbonation characteristics of high volume mineral admixtures concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

## Experimental analysis on early carbonization rule of fly ash concrete

HU Xiao-peng, NIU Di-tao, ZHANG Yong-li

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The fly ash concrete with fly ash mixing quantity being accurately 0, 10%, 20% and 30%, as well as concrete strength being C30, C40 and C50, as study object, the carbonization development law of fly ash concrete within 300 days under the natural condition is established through some experiments, and the early carbonization development differences among different curing time and construction surface are analyzed. The results show that: along with the extended curing time, the early carbonization depth growth speed of fly ash concretes reduces. Along with the increased mixing quantity of fly ash, the carbonized depth of concrete increases. The carbonized depth of construct top surface is the biggest while bottom surface is the smallest.

**Key words:** fly ash concrete; curing time; early carbonization; construction surface