

文章编号:1004-4574(2012)02-0194-06

# 不同应力状态下混凝土碳化耐久性试验研究

罗小勇, 邹洪波, 施清亮

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**旨在研究混凝土在应力和碳化共同作用下的损伤机理。试验采用无应力、拉应力、压应力3种试件进行了快速碳化试验。测量了受力在0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75倍拉/压设计强度下的混凝土的碳化深度。实验结果表明, 拉、压应力分别加快和减缓了混凝土碳化速率, 且应力越大, 对混凝土碳化的影响也越大。说明应力对混凝土碳化耐久性的影响是显著的。与此同时, 在考虑应力影响系数的情况下, 结合使用条件建立了大气环境中应力状态下混凝土碳化深度的预测模型。通过计算值和实验值的计算对比, 证明了该模型的有效性。

**关键词:**应力状态; 混凝土碳化; 耐久性; 预测模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

## Experimental study on durability of concrete carbonation at different stress states

LUO Xiaoyong, ZOU Hongbo, SHI Qingliang

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** This paper studied the concrete damage mechanisms under both stress and carbonation at the same time. High-speed carbonation experiments were performed on specimens without stress, with tensile stress and with compressive stress. Carbonation depths of the concrete were measured for stress level of 0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 times of tensile / compressive design strength. The results show that tensile stress and compressive stress can accelerate or decelerate the concrete carbonation, and carbonation increases with compressive stress. The fact indicates that stress has great impact on concrete carbonation durability. A model forecasting the concrete carbonation depth under atmospheric environment was established considering the actual condition and stress influence coefficients. Comparison of the calculations with test results validated the model's efficacy.

**Key words:** stress state; concrete carbonation; durability; forecasting model

在一般大气环境条件下, 混凝土碳化是钢筋锈蚀的重要前提。钢筋不断地锈蚀促使混凝土保护层开裂, 产生沿筋裂缝, 使得粘结力减小, 钢筋受力面积减小, 导致结构耐久性和承载力降低等一系列不良后果, 甚至引起安全事故。而目前, 空气中的二氧化碳浓度为0.03%, 随着工业的发展, 汽车使用量的增多, 二氧化碳的含量也会加速增长, 所以混凝土的碳化是一个比较严重的问题<sup>[1]</sup>。目前国内外对混凝土碳化的研究有的基于扩散理论<sup>[2-3]</sup>, 有的基于碳化试验<sup>[4-5]</sup>, 也有的基于扩散理论与试验一起进行的研究<sup>[6]</sup>。这些研究大多

收稿日期: 2011-05-07; 修回日期: 2011-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178470)

作者简介: 罗小勇(1968-), 男, 教授, 主要从事混凝土耐久性研究. E-mail: tudou0522@163.com

通讯作者: 邹洪波, 博士研究生. E-mail: 976330072@tom.com

数都是没有考虑应力因素的影响,即使有也将应力影响的参数定为不变量。实际上应力对混凝土碳化影响并非如此,相反应力对混凝土碳化的影响是显著的。少数单位如东南大学、同济大学做了预应力混凝土的碳化实验<sup>[7-8]</sup>,但他们采用的实验工况较少,实验数据离散性较大。因此考虑多种工况,进行应力状态下混凝土碳化实验研究有利于完善此方面的研究,对于了解应力状态对混凝土碳化的影响十分必要。

## 1 试验设计

### 1.1 试件制作

#### (1) 压应力试件

试件在浇筑时预先在其正中心预留直径为 30 mm 的孔道,标准养护 28 d 后,在预留孔道中放入直径为 22 mm 的螺杆,螺杆的制作是一端用螺帽固定并焊接死,另一端通过拧螺帽来使试件产生预期的压应力。设计压荷载为 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 倍混凝土设计抗压强度,并测出实际值。

#### (2) 拉应力试件

试件在浇筑时预先在其两侧距边缘 50 mm 处中心预留直径为 16 mm 小孔道,由于在实际工程结构中很少存在轴向受拉的情况,大部分结构都是弯曲受拉,而且由于轴向受拉所需的空间较大,碳化箱的本身空间有限无法满足其要求,所以本试验采用弯曲受拉代替轴向受拉。设计荷载为 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 倍混凝土设计抗拉强度,并测出实际值。

#### (3) 无应力试件

无应力试件为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体。所有试件放置于碳化箱内进行 3 d, 7 d, 14 d, 28 d 碳化测定。另外还制作了一组 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试件用于测试混凝土的抗压强度。

### 1.2 试验材料及试验方法

本试验材料中,水泥采用 42.5 强度等级普通硅酸盐水泥;细骨料采用河沙;细度模数为 2.6 (中砂),级配 II 区;粗骨料采用最大粒径为 15 mm 的石灰岩碎石。不掺外加剂,试件的设计配合比及混凝土强度等级见表 1 所示。

试验在中南大学土木工程安全科学实验室进行。采用将试件置于混凝土碳化箱进行快速碳化的方法,时间定为 28 d (每组试件),试验参照《GB/T11974-1997 加气混凝土碳化试验方法》进行,碳化箱内环境设置情况为:温度控制在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $(70 \pm 5)\%$ 、二氧化碳浓度为  $(20 \pm 3)\%$ 。并且在整个试验过程中,碳化箱内的环境全程自动控制,保证整个过程箱内恒温、恒湿以及二氧化碳浓度恒定。

压应力试件是当碳化到了 3 d, 7 d, 14 d, 28 d 时,各取出试件在压力机上进行劈裂,每个试件劈裂成 100 mm × 100 mm 的小试块,然后将所得的试件每个断面刮去断面上残余的粉末,随即喷上 1% 浓度的无色酚酞乙醇指示剂,用游标卡尺分别测出试件边缘到变色分界线各点的距离,每个断面在中间测量 2 个点共 8 个点,以算术平均值作为其碳化深度,4 个断面的碳化深度的平均值作为一个试件的碳化深度。拉应力试件碳化深度测定是当碳化到达 28 d 龄期后取出,在拉应力试件中间劈裂,共 2 个断面,每个断面测量 8 个点取平均值作为 28 d 的碳化深度,取两个断面的碳化深度的平均值作为拉应力试件的平均碳化深度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力状态对混凝土碳化深度变化的影响分析

拉压应力状态下混凝土 28 d 碳化深度变化见图 1。从图 1 可以看到施加压应力后,混凝土 28 d 碳化深度逐渐减小,而且随着压应力的增大,混凝土碳化深度越来越小。无应力状态下 28 d 混凝土碳化深度为 14.72 mm, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 倍荷载比 (试验荷载/设计强度) 下混凝土的碳化深度为无应力下的 92.1%, 86.3%, 78.8%, 70.6%, 53.7%。可见压应力可以减缓混凝土的碳化速率,压应力越大,碳化速率越

表 1 混凝土配合比

Table 1 Proportioning of concrete

水灰比	水泥	水	砂	碎石	设计强度等级	实测强度
0.4	450	180	670	1 095	C40	C41

注:水泥、水、砂、碎石的单位均为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

小。而且压应力增大到一定程度混凝土碳化速率急剧降低,本试验中荷载比为 0.75 时混凝土的碳化深度为无应力下的 53.7%,可见压应力大小对混凝土碳化影响十分显著。

与此相反,拉应力可以加快混凝土的碳化速率,而且拉应力越大,碳化速率越大。0.15,0.3,0.45,0.6,0.75 倍荷载比下混凝土的碳化深度为无应力下的 1.026,1.075,1.139,1.216,1.298 倍。可见增大拉应力能增加混凝土碳化速率。拉应力大小对混凝土碳化影响明显。

### 2.2 碳化时间对混凝土试件碳化深度的影响分析

将应力固定不变研究碳化深度随时间的关系。本试验设计在 3 d,7 d,14 d,28 d 分别取出同种应力试件来测定。同种应力试件为  $0.6f_c$  的 4 组样品。混凝土碳化深度随时间变化的关系见图 2。从图 2 可以看到混凝土碳化深度随着时间的增长而加厚,前 7 d 混凝土碳化深度急剧增加,其后混凝土碳化速率趋缓,压力下的混凝土随时间的碳化变化曲线较无应力下的稍平缓,再次证明了压力能显著改善混凝土的抗碳化能力。

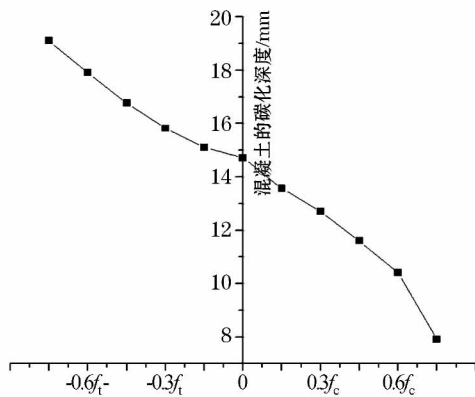


图 1 不同应力状态下 28 d 混凝土试件的碳化深度  
Fig.1 Carbonation depth of concrete specimen on 28th day under different stress

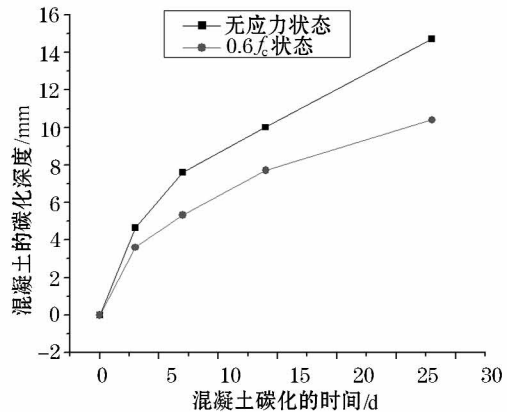


图 2 无应力和  $0.6f_c$  下的混凝土碳化深度随时间的变化曲线  
Fig.2 Change of carbonation depth with time for concrete specimens without and with  $0.6f_c$  pressure stress

## 3 应力状态下混凝土碳化深度的预测模型

### 3.1 模型来源

建立应力状态下混凝土碳化深度的预测模型首先必须考虑其他因素的影响,所以必须尽可能的考虑到影响混凝土碳化的各种因素。目前考虑比较全面的就是牛荻涛建立的碳化模型。因此本文在他提出的模型基础上把应力影响参数作为变量建立了应力状态下混凝土碳化深度预测模型。

### 3.2 模型的修正

综合影响混凝土碳化的各种因素,本文在文献[9]的基础上,考虑应力因素的影响,对文献[9]提出的模型进行修正,得到了混凝土在应力状态下的碳化深度数学预测模型,具体表达式如下:

$$X = K_c \sqrt{t} = h_{mc} k_c k_r k_b k_j k_{w/c} k_{CO_2} k_e k_t k_s \sqrt{t}. \tag{1}$$

式中: $X$ ——混凝土自然碳化深度(mm);

$K_c$ ——混凝土碳化综合系数,综合反映大气环境条件、自身材料及受力状况等因素的影响( $mm/\sqrt{t}$ );

$t$ ——自然碳化时间(a);

$h_{mc}$ ——模型调节常数,采用无应力状态下的回归常数,取  $h_{mc} = 1.654$ ;

$k_c$ ——水泥用量影响系数,  $k_c = 253C^{-0.964}$ ;

$k_r$ ——水泥品种影响系数,普通硅酸盐水泥取 1.0,矿渣水泥取 1.35;

$k_b$ ——养护方法影响系数,标准养护取 1.0,蒸养取 1.85;

$k_j$ ——角部修正系数,角部取 1.4,非角部取 1.0;

$k_{w/c}$ ——水灰比影响系数,其取值按下式计算:

$$k_{w/c} = \sqrt{\frac{w/c}{0.3822}} \quad (2)$$

$k_{CO_2}$ ——CO<sub>2</sub>浓度影响系数,其取值按下式计算:

$$k_{CO_2} = \sqrt{\frac{C_{CO_2}}{0.03}} \quad (3)$$

$k_e$ ——环境温湿度影响系数,当以环境温度  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 、环境相对湿度  $RH = 50\%$  为标准环境温湿度时, $k_e$ 按下式计算:

$$k_e = 2.564\sqrt[4]{T}(1 - RH)RH, \quad (4)$$

其中  $T$  和  $RH$  分别为年平均温度和年平均湿度;

$k_f$ ——混凝土质量影响系数,其取值按下式计算:

$$k_f = \frac{57.94}{f_{cuk}} - 0.76, \quad (5)$$

$k_s$ ——混凝土应力水平影响系数,可通过实验数据回归得到,按式(6),(7)计算:

压应力时:

$$k_s = A + a_1 s_c + a_2 s_c^2 + a_3 s_c^3 + a_4 s_c^4, \quad (6)$$

拉应力时:

$$k_s = B + b_1 s_t + b_2 s_t^2 + b_3 s_t^3 + b_4 s_t^4. \quad (7)$$

根据实测试验数据,采用数学上广义逆的概念,计算系数矩阵的广义逆最终可以得到:

$$\begin{aligned} A &= 0.0134, \\ a_1 &= 2.3303, \\ a_2 &= -0.4934, \\ a_3 &= 0.0405, \\ a_4 &= -0.00116; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B &= 0.0149, \\ b_1 &= 27.7295, \\ b_2 &= -62.2241, \\ b_3 &= 57.4392, \\ b_4 &= -18.2246. \end{aligned} \quad (9)$$

将式(8)及(9)代入式(6),(7)即可以得到在拉压应力状态下混凝土碳化深度公式中应力影响系数的计算公式:

压应力时:

$$k_s = 0.0134 + 2.2203s_c - 0.4934s_c^2 + 0.0405s_c^3 - 0.00116s_c^4, \quad (10)$$

拉应力时:

$$k_s = 0.0149 + 27.729s_t - 62.2241s_t^2 + 57.4392s_t^3 - 18.2246s_t^4. \quad (11)$$

将混凝土的应力水平代入式(10),(11),可以得到应力影响系数值。再将式(2) - (7)中所有的影响系数值代入式(1)中,可以计算出其碳化深度预测值。

### 3.3 模型验证

利用式(1)计算碳化深度预测值,并与实测值(每个时间点的均值)比较,计算出的压、拉应力状态下的结果分别见图3,4,5,6。可以发现理论值与实测值的误差基本都在6%以下,说明此公式能很好的适用一般条件下混凝土在预应力状态下碳化深度的预测。

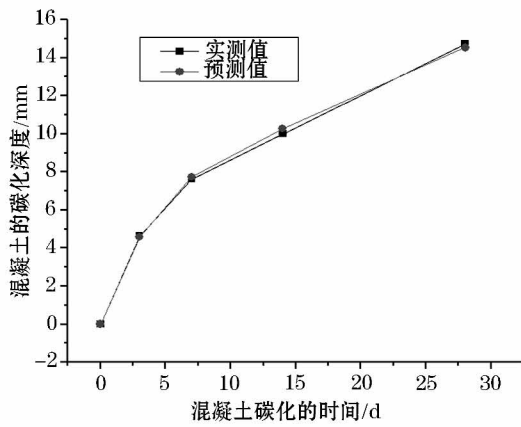


图 3 无应力状态下碳化深度变化曲线的对比  
Fig. 3 Comparison of carbonation depth change curves at no stress state

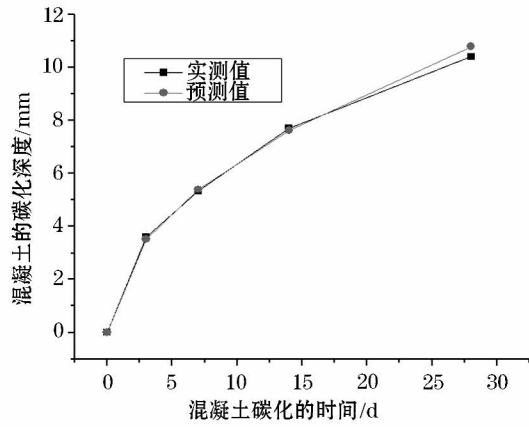


图 4  $0.6f_c$  下碳化深度变化曲线的对比  
Fig. 4 Comparison of carbonation depth change curves at  $0.6f_c$  pressure stress state

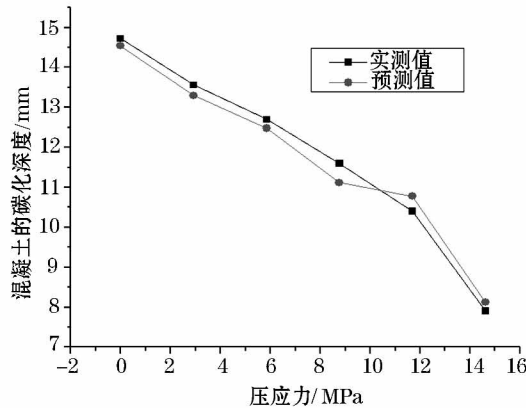


图 5 不同压应力状态下碳化深度变化曲线的对比  
Fig. 5 Comparison of carbonation depth change curves at the different pressure stress states

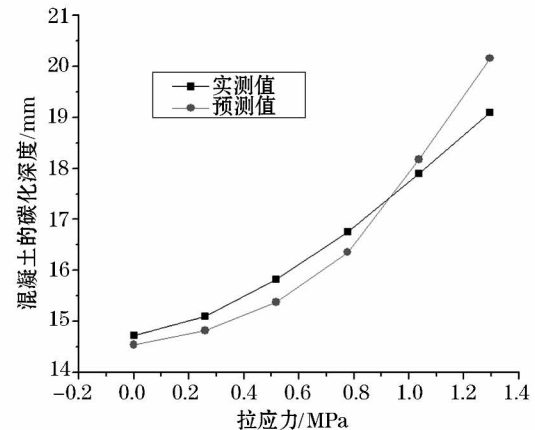


图 6 不同拉应力状态下碳化深度变化曲线的对比  
Fig. 6 Comparison of carbonation depth change curves at the different tensile stress states

## 4 结论

本文通过混凝土试件(C40)在无应力、压应力和拉应力状态下碳化试验,研究了混凝土试件在不同应力大小混凝土碳化深度的变化规律,研究主要结论如下:

(1)混凝土在受压的状态下比其在无应力状态时的碳化速率要迟缓,压应力可以减缓混凝土表面的碳化。而且压应力越大,减缓的速度也越大,而且压应力增大到一定程度混凝土碳化速率急剧降低,本试验中荷载比为 0.75 时混凝土的碳化深度为无应力下的 53.7%,可见压应力大小对混凝土碳化影响十分显著。

(2)混凝土在受拉的状态下比其在无应力状态时的碳化速率要迅速,拉应力可以加快混凝土表面的碳化。而且拉应力越大,加快的速度也越大,拉应力对混凝土碳化影响明显。

(3)混凝土碳化深度随着时间的增长而加厚,前 7 d 混凝土碳化深度急剧增加,其后混凝土碳化速率趋缓,压力下的混凝土随时间的碳化变化曲线较无应力下的稍平缓,再次证明了压力能显著改善混凝土的抗碳化能力。

(4)考虑应力影响系数,对试验数据进行分析拟合,提出混凝土在应力状态下的碳化深度的预测模型。通过计算对比,说明此公式能很好的适用一般条件下混凝土在预应力状态下碳化深度的预测,为评估建筑物的安全性提供了一定的帮助。

## 参考文献:

- [1] Schupack M, Suarez M G. Some Recent corrosion embitterment failures of prestressing systems in the United States[J]. PCI Journal, 1982, 23(3): 45-47.
- [2] Papadakis V G, Vayenas C G. Fundamental modeling and experimental investigation concrete carbonation[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 363-373.
- [3] 柳俊哲. 混凝土碳化研究与进展(1)——碳化机理及碳化程度评价[J]. 混凝土, 2005, 13(11): 10-13.  
LIU Junzhe. A review of carbonation in reinforced concrete(1): mechanism of carbonation and evaluative methods[J]. Concrete, 2005, 13(11): 10-13. (in Chinese)
- [4] 杨军. 混凝土的碳化性能与气渗性能研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2004: 34-48.  
YANG Jun. Study on the Carbonation and the Air Permeability of Concrete[D]. ShanDon: Shandong University of Science and Technology, 2004: 34-48. (in Chinese)
- [5] Lesage - de - Contnay C. Deteriorations and repair[J]. Bahrain Proc, 1995, 24(6): 16-19.
- [6] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16-19.  
ZHANG Yu, JIANG Lixue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. Industrial Construction, 1998, 28(1): 16-19. (in Chinese)
- [7] 涂永明, 吕志涛. 应力状态下混凝土的碳化试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(5): 573-576.  
TU Yongming, LU Zhitao. Experiment and research of prestressed concrete structure in carbonation corrosive environments [J]. Journal of South-east University: Natural Science Edition, 2003, 33(5): 573-576. (in Chinese)
- [8] 田浩, 李国平. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 200-205.  
TIAN Hao, LI Guoping. Experimental research on carbonation of forced concrete specimens [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 200-205. (in Chinese)
- [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: 158-163.  
NIU Ditao. Durability and Life Forecast of Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing: Science Press, 2003: 158-163. (in Chinese)