

# 多因素作用下钢纤维自密实混凝土的中性化研究

王建华<sup>1,2</sup> 姜弘道<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 南京, 210098; 2. 浙江同济科技职业学院, 杭州, 311231)

**摘要:**通过对承载钢纤维自密实混凝土在 CO<sub>2</sub>、酸雨、CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用下的中性化试验,研究分析了钢纤维自密实混凝土所承受的应力水平和钢纤维掺量对中性化的影响规律。试验研究表明,弯曲拉应力加速了钢纤维自密实混凝土的中性化,应力水平越高,加速作用越明显;而弯曲压应力对钢纤维自密实混凝土的中性化有减缓作用;在一定范围内,钢纤维掺量越大,自密实混凝土中性化深度越小;CO<sub>2</sub>与酸雨的共同作用对钢纤维自密实混凝土中性化存在着一定的耦合效应,但应力水平和钢纤维掺量对耦合效应均无显著影响。

**关键词:**钢纤维自密实混凝土;荷载;碳化;酸雨;中性化

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)02-0260-06

## Study of Neutralization of Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete in Action of Various Factors

Wang Jianhua<sup>1,2</sup>, Jiang hongdao<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

2. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou, 311231, China)

**Abstract:** The neutralization of steel fiber reinforced self-compacting concrete under loads subjected to the simultaneous attack of carbonization, acid rain, acid rain and carbonization working together is investigated by laboratory test. The influence of stress level and steel fiber content on neutralization of steel fiber reinforced self-compacting concrete is analyzed. It is found that the bending tensile stress accelerated the neutralization. The higher the stress level, the more serious the concrete corrosion. In contrast, the bending compressive stress slows down the neutralization. The results indicate that the neutralization depth of steel fiber reinforced self-compacting concrete decreases as the steel fiber content increases in a certain range. From the test data, it can be concluded that the coupling effect of carbonization and acid rain working together on the neutralization of steel fiber reinforced self-compacting concrete is produced, but the stress level and the steel fiber content on coupling effect have no significant influence.

**Key words:** steel fiber reinforced self-compacting concrete; load; carbonization; acid rain; neutralization

钢纤维自密实混凝土(Steel fiber reinforced self-compacting concrete, SFRSCC)是一种性能优良的新型复合材料,综合了自密实混凝土和钢纤维混凝土的优点。与普通混凝土相比,钢纤维自密实混凝土具有高耐久性的特点,同时具备优良的力学性能<sup>[1-2]</sup>,可广泛应用于机场跑道、国防公路等路面

工程,能够显著提高路面结构的使用性能和使用寿命。

近年来,国内外许多学者对钢纤维自密实混凝土进行了研究。研究主要集中在钢纤维自密实混凝土的配合比、工作性能和力学性能等方面<sup>[3-4]</sup>,而对钢纤维自密实混凝土的耐久性研究报道较少,

Corinaldesi 等<sup>[5]</sup>对钢纤维自密实混凝土的耐久性和抗裂性能进行了一系列的试验研究,包括碳化试验、氯离子渗透试验、冻融试验、干缩试验等。研究表明,钢纤维自密实混凝土具有优良的耐久性能与抗裂性能。El-Dieb<sup>[6]</sup>研究了海湾地区钢纤维自密实混凝土的耐久性,进行了冻融与碳化试验研究。试验结果显示,钢纤维自密实混凝土的耐久性能明显优于其他建筑材料。在一般的大气环境中,工程结构将遭受碳化、酸雨引起的混凝土中性化,此外,实际工程中混凝土结构总是在承载状态下运行的。因此,在 CO<sub>2</sub>、酸雨等大气环境和应力状态下对钢纤维自密实混凝土的耐久性研究具有实际意义,为钢纤维自密实混凝土在一般大气环境下的耐久性评估提供依据。本文将开展承载钢纤维自密实混凝土在 CO<sub>2</sub>、酸雨、CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用下的中性化试验研究,揭示承载钢纤维自密实混凝土的中性化规律。

## 1 试验材料

### 1.1 原材料

采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,粒径 5~20 mm 连续级配碎石,细度模数为 2.6 的中砂,Ⅰ级粉煤灰,HLC 聚羧酸系高性能减水剂,剪切型钢纤维,其长度为 25 mm,长径比 50。

### 1.2 混凝土配合比

以自密实混凝土的配合比为基准,分别调整钢纤维掺量和相应减水剂用量,得到钢纤维自密实混凝土配合比,其中钢纤维掺量分别为 20, 40, 80 kg/m<sup>3</sup>,相对应减水剂用量分别调整为 7.6, 9.4 和 12.3 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 工作性能和强度

制备的 4 组钢纤维自密实混凝土拌合物的坍落扩展度和 V 形漏斗试验结果均满足《自密实混凝土应用技术规程》的要求。抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验采用立方体试件,试件采用钢模成形,所有试件均不施加任何振捣,在 24 h 后拆模,然后放入标准养护室内养护至 28 d,测得的强度值均达到要求。

## 2 试验方法

### 2.1 试验加载方式

为了模拟弯曲应力、酸雨和碳化的共同作用,即试件加载后进行多循环的酸雨浸泡、烘干和碳化试验,本试验试件尺寸采用 100 mm×100 mm×550 mm。通过在浇筑试件时预留孔道,然后用拉

杆施加受拉荷载,试件产生弯曲应力,试验加载方式<sup>[7-8]</sup>见图 1。弯曲应力水平分别为 0.2, 0.4, 0.6 倍的试件弯折强度,用精确度为 0.1 N·m 的扭矩应力扳手控制应力水平。

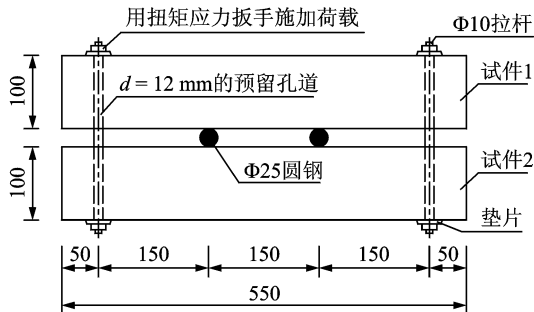


图 1 试验加载方式图

### 2.2 模拟酸雨溶液配制

中国降水中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以及部分游离的 H<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 形成的物质是降水酸度的主导因素。本次试验的酸雨溶液用硫酸氨和硝酸混合溶液进行模拟,其中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的浓度用硫酸氨控制,溶液的 pH 值由硝酸调节<sup>[9]</sup>。本次试验酸雨溶液的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子浓度水平为 0.15 mol/L, pH 值采用 4.0。

### 2.3 试验设计

#### 2.3.1 承载钢纤维自密实混凝土碳化试验

钢纤维自密实混凝土分成 4 个组别为 SCC(无钢纤维), SFRSCC1(钢纤维体积掺量 0.25%), SFRSCC2(钢纤维体积掺量 0.5%) 和 SFRSCC3(钢纤维体积掺量 1.0%), 分别在非加载和加载两种情况下按照《普通混凝土长期耐久性能与耐久性试验方法》(GBJ82—85) 进行碳化试验,碳化龄期为 7, 14 和 28 d。根据前述设计配合比制作试件,采用钢模成形,所有试件均不施加任何振捣。加载试件尺寸为 100 mm×100 mm×550 mm,按规定时间养护并烘干后,两个一组采用前述试验加载方式加载。而非加载试件尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm。

#### 2.3.2 承载钢纤维自密实混凝土酸雨侵蚀试验

钢纤维自密实混凝土的 4 个组别分别在非加载和加载两种情况下进行酸雨侵蚀试验,试件制作和加载方法与前述相同。试验采用试件浸泡于模拟酸雨溶液的周期浸泡法,循环 1 次 48 h 时为 1 个周期(先浸泡 36 h,再晾干 1 h,然后在 60 °C 烘箱中烘干 10 h,最后冷却 1 h)。混凝土中性化深度分别在循环 10(20 d), 20(40 d) 和 40 次(80 d) 后进行测试。模拟酸雨溶液的 pH 值每 12 h 测量一

次,酸度值由硝酸进行调节,当试验循环10次后必须重新更换溶液。

### 2.3.3 承载钢纤维自密实混凝土 $\text{CO}_2$ 和酸雨共同作用试验

钢纤维自密实混凝土的4个组别分别在非加载和加载两种情况下进行  $\text{CO}_2$  和酸雨共同作用的试验,试件制作、加载和试验方法与前述相同,采用循环试验方式,1个大循环为27 d(先碳化试验7 d,再酸雨试验10次,即20 d)。混凝土中性化深度分别在1个大循环(27 d)、2个大循环(54 d)和4个大循环(108 d)后进行测试。

## 3 结果与分析

### 3.1 弯曲荷载对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响

通过对 SFRSCC2(钢纤维体积掺量 0.5%)研究弯曲荷载对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响。分别在  $\text{CO}_2$  作用、酸雨作用、 $\text{CO}_2$  和酸雨共同作用下,钢纤维自密实混凝土中性化深度与弯曲应力水平的关系如图2~4所示。

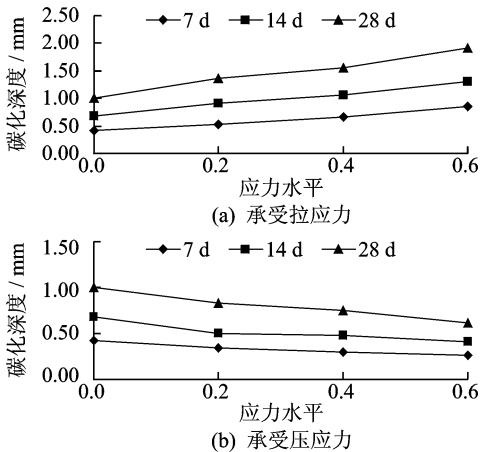


图2  $\text{CO}_2$ 作用下弯曲应力水平与碳化深度的关系

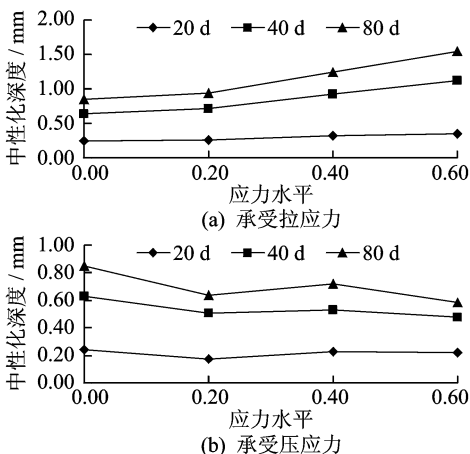


图3 酸雨作用下弯曲应力水平与中性化深度的关系

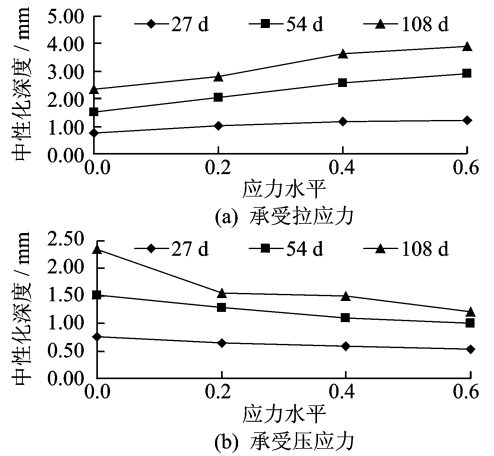


图4  $\text{CO}_2$ 和酸雨共同作用下弯曲应力水平与中性化深度的关系

由图可知,无论在何种作用下,钢纤维自密实混凝土在承受弯曲拉应力时的中性化深度均大于无应力状态时的中性化深度;并随着拉应力水平的增加,钢纤维自密实混凝土中性化深度逐渐增加,即弯曲拉应力加速了钢纤维自密实混凝土的中性化。例如在  $\text{CO}_2$  作用下,如图2所示,钢纤维自密实混凝土碳化28 d之后,与无应力状态下的试件相比,弯曲拉应力水平0.2,0.4和0.6下的碳化深度分别增加了36%,55%和91%。主要原因是钢纤维自密实混凝土随着所承受拉应力的增加,内在的微裂缝等缺陷逐步扩展或增多,使  $\text{CO}_2$  扩散、 $\text{H}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  渗透更容易,引起混凝土碳化和中性化速度的加快,其中性化深度也随之增大。

同样,无论在何种作用下,钢纤维自密实混凝土在承受弯曲压应力时的中性化深度均小于无应力状态时的中性化深度;并随着压应力水平的增加,钢纤维自密实混凝土中性化深度逐渐减小。弯曲压应力使钢纤维自密实混凝土的抗中性化能力有所增强,使内在缺陷(微裂缝、气孔、孔隙等)闭合或宽度减小,  $\text{CO}_2$  扩散、 $\text{H}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  渗透减小,降低了混凝土的中性化速度。

### 3.2 钢纤维掺量对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响

#### 3.2.1 相同应力水平下钢纤维掺量对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响

研究相同应力水平下钢纤维掺量对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响是通过试件施加应力水平0.4的弯曲荷载来进行试验。分别在  $\text{CO}_2$  作用、酸雨作用、 $\text{CO}_2$  和酸雨共同作用下,钢纤维自密实混凝土钢纤维掺量与碳化深度的关系如图5~7所示。

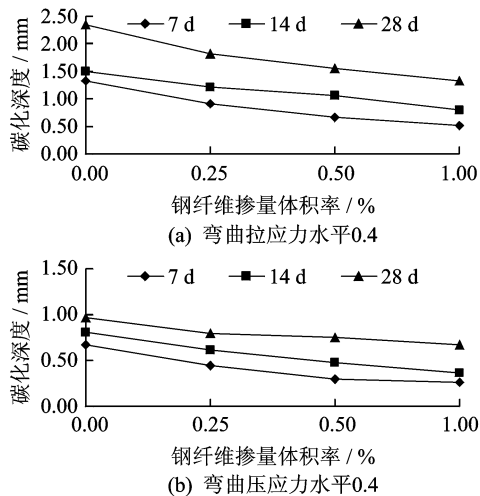


图 5 钢纤维掺量与碳化深度的关系

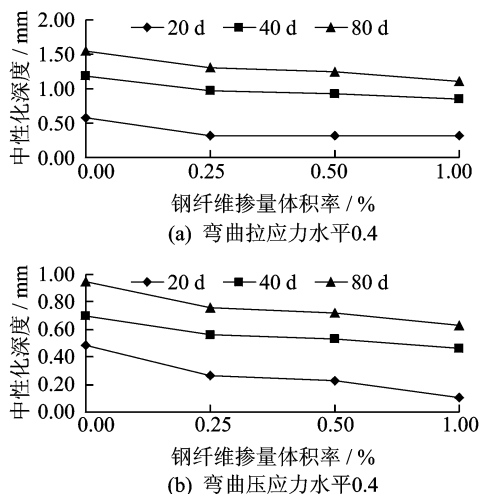


图 6 酸雨作用下钢纤维掺量与中性化深度的关系

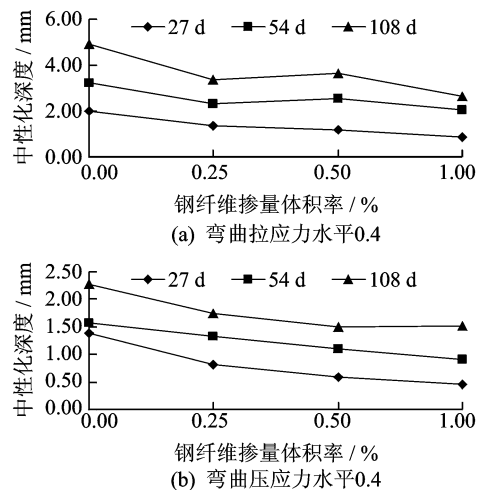


图 7 CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用下钢纤维掺量与中性化深度的关系

由图可见,无论是何种作用下,在相同应力水平时,承载弯曲拉应力或者压应力的各龄期钢纤维自密实混凝土的中性化深度都随钢纤维掺量增加而逐渐减小。例如在酸雨侵蚀 80 d(循环 40 次)后,如图 6 所示,钢纤维自密实混凝土与自密实混凝土的试件相比,承载弯曲拉应力时,当钢纤维掺量 0.25% 时中性化深度减小了 15%,当钢纤维掺量 0.5% 时中性化深度减小了 19%,当钢纤维掺量 1.00% 时中性化深度减小了 27%。这是因为自密实混凝土中掺入一定量的钢纤维,在不改变自密实工作性能的前提下,改善了混凝土的微观孔结构,使混凝土的内部结构更致密;更重要的是,钢纤维与自密实混凝土具有良好的黏结性,在弯曲拉应力作用下能承担部分的拉应力,有效阻止了自密实混凝土内部微裂缝的扩展与产生,减少了 H<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的渗透、CO<sub>2</sub> 的扩散,使钢纤维自密实混凝土的中性化速度变慢。

### 3.2.2 不同应力水平下钢纤维掺量对钢纤维自密实混凝土中性化深度的影响

研究不同应力作用下钢纤维掺量对混凝土中性化深度的影响是通过一定龄期的试件施加不同应力水平的弯曲荷载来进行试验。分别在 CO<sub>2</sub> 作用、酸雨作用、CO<sub>2</sub> 和酸雨共同作用下,钢纤维自密实混凝土钢纤维掺量与碳化深度的关系如图 8 ~10 所示。

由图可见,无论是何种作用下,承载各弯曲应力水平的钢纤维自密实混凝土中性化深度随钢纤维掺量增加而减小;当应力水平不同时,各掺量钢纤维自密实混凝土的中性化深度随着拉应力值增加均有所增大,相反随着压应力水平值增加均有所减小。例如钢纤维掺量为 0.50% 的钢纤维自密实混凝土在 CO<sub>2</sub> 和酸雨共同作用 108 d 后,如图 10

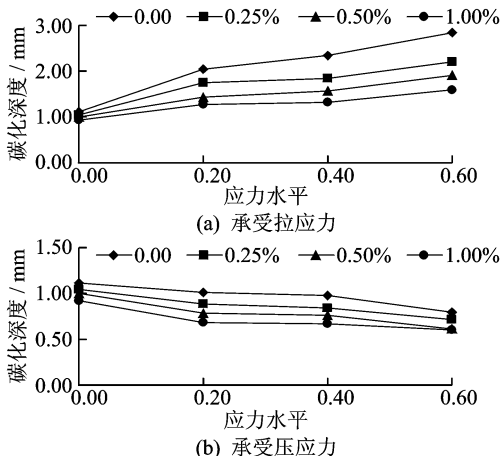


图 8 钢纤维掺量与 CO<sub>2</sub> 作用 28 d 的碳化深度的关系

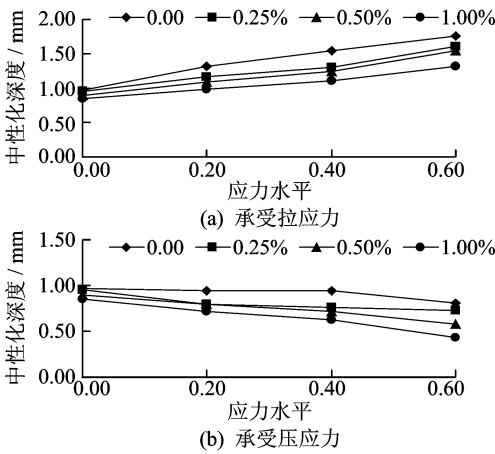


图9 钢纤维掺量与酸雨作用80 d的中性化深度的关系

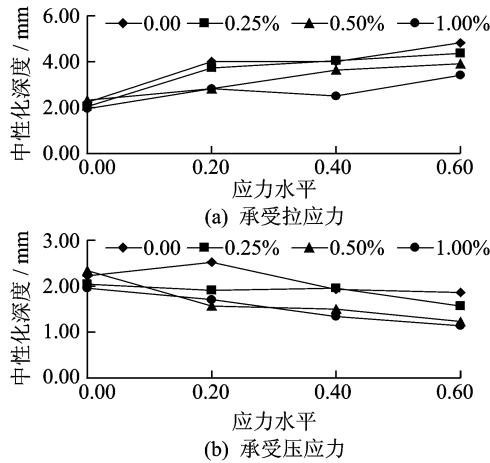


图10 钢纤维掺量与CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用108 d的中性化深度的关系

表1 钢纤维自密实混凝土中性化耦合系数

应力水平	钢纤维掺量/%	碳化与酸雨		单独碳化		单独酸雨		耦合系数 <i>k</i>			
		<i>x<sub>T+S</sub></i> /mm	<i>x<sub>T</sub></i> /mm	<i>x<sub>T</sub></i> /mm	<i>x<sub>S</sub></i> /mm	拉	压	拉	压		
0.2	0.25	3.73	1.91	1.74	0.89	1.17	0.80	1.28	1.13		
	0.50	2.81	1.56	1.43	0.78	1.09	0.80	1.12	1.22		
	1.00	2.84	1.71	1.27	0.68	0.99	0.72	1.25	1.22		
0.4	0.25	4.04	1.95	1.84	0.84	1.30	0.76	1.29	1.22		
	0.50	3.63	1.49	1.56	0.76	1.24	0.72	1.30	1.20		
	1.00	2.51	1.33	1.32	0.67	1.11	0.63	1.03	1.02		
0.6	0.25	4.38	1.57	2.21	0.72	1.61	0.73	1.15	1.08		
	0.50	3.92	1.22	1.91	0.61	1.54	0.58	1.14	1.15		
	1.00	3.39	1.14	1.60	0.60	1.32	0.43	1.16	1.11		
拉应力作用下 <i>k</i> 标准差:0.037;压应力作用下 <i>k</i> 标准差:0.021								均值	1.19	均值	1.09

所示,与无应力状态下的试件相比,拉应力水平0.2,0.4和0.6时的中性化深度分别增大了20%,55%和67%;而压应力水平0.2,0.4和0.6时的中性化深度分别减小了33%,36%和47%。

### 3.3 酸雨和碳化共同作用下钢纤维自密实混凝土中性化深度耦合程度分析

承载钢纤维自密实混凝土在进行中性化试验时,虽然CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用的时间等于两者单独作用时间的累加,但是共同作用下的中性化深度值均要大于两者分别单独作用下中性化深度值的累加,如表1所示。说明承载钢纤维自密实混凝土在CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用时,两者之间有相互促进作用,存在一定的耦合效应,引入耦合系数 *k*<sup>[10]</sup> 来进行描述,定义如下

$$k = \frac{x_{T+S}}{x_T + x_S}$$

式中:*x<sub>T</sub>*为单独CO<sub>2</sub>作用下中性化深度值;*x<sub>S</sub>*为单独酸雨作用下中性化深度值;*x<sub>T+S</sub>*为CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用下的中性化深度值。

由表1可知,分别在拉、压应力作用下,CO<sub>2</sub>和酸雨共同作用引起的钢纤维自密实混凝土中性化深度为各单因素中性化深度之和的1.19倍和1.09倍。在不同拉、压应力水平下,耦合系数 *k* 的标准差分别是0.037和0.021,表明应力水平对钢纤维自密实混凝土碳化与酸雨耦合效应无显著影响。同理,在不同钢纤维掺量下,拉、压应力状态的耦合系数 *k* 标准差分别是0.045和0.073,表明钢

纤维掺量对钢纤维自密实混凝土碳化与酸雨耦合效应也没有显著影响。

## 4 结 论

根据一般大气环境因素建立了承载钢纤维自

密实混凝土在CO<sub>2</sub>单独作用、酸雨单独作用、CO<sub>2</sub>和酸雨侵蚀共同作用的室内试验机制,通过试验研究了钢纤维自密实混凝土在不同环境作用下的中性化规律,并通过中性化深度分析了各因素的耦合效应,得出如下结论:

(1)钢纤维自密实混凝土在承受弯曲拉应力时的中性化深度均大于无应力状态时的中性化深度,并随着拉应力水平的增加,中性化深度逐渐增加;而承受弯曲压应力时的中性化深度均小于无应力状态时的中性化深度,随着压应力水平的增加,其中性化深度逐渐减小。

(2)在相同应力水平下,随着钢纤维掺量的增加,承载弯曲应力的各龄期钢纤维自密实混凝土的中性化深度都逐渐减小;在不同的应力水平下,随着拉应力水平增加,各掺量钢纤维混凝土的中性化深度均有所增大,相反,中性化深度随着压应力水平增加均有所减小。

(3)在 CO<sub>2</sub> 和酸雨共同作用下的承载钢纤维自密实混凝土,碳化与酸雨侵蚀存在一定的耦合效应,即两者共同作用下的中性化深度要大于两者单独作用之和;应力水平和钢纤维掺量对钢纤维自密实混凝土碳化与酸雨侵蚀的耦合效应均无显著影响。

#### 参考文献:

- [1] Sahmaran M, Ozgur Yaman I. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(1): 150-156.
- [2] Sahmaran M, Yurtseven A, Ozgur Yaman I. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(12): 1672-1677.
- [3] 丁一宁,王岳华,董香军,等. 纤维自密实高性能混凝土工作度的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 51-57.
- Ding Yining, Wang Yuehua, Dong Xiangjun, et al. An investigation on the workability of fiber reinforced self-compacting high performance concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(11): 51-57.
- [4] 高丹盈,蔡怀森,袁媛,等. 钢纤维自密实混凝土抗压性能试验研究[J]. *郑州大学学报:工学版*, 2006, 27(2): 1-4.
- Gao Danying, Cai Huaisen, Yuan yuan, et al. Experimental research on compressive properties of steel fi-

ber reinforced self-compacting concrete[J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2006, 27(2): 1-4.

- [5] Corinaldesi V, Moriconi G. Durable fiber reinforced self-compacting concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(2): 249-254.
- [6] El-Dieb A S. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(10): 4286-4292.
- [7] 袁承斌,张德峰,刘荣桂,等. 不同应力状态下混凝土抗氯离子侵蚀的研究[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2003, 31(1): 50-54.
- Yuan Chengbin, Zhang Defeng, Liu Ronggui, et al. Diffusivity of chloride in concrete in different stress states[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2003, 31(1): 50-54.
- [8] 冷发光,马孝轩,田冠飞. 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2006, 36(S(II)): 45-48.
- Leng Faguang, Ma Xiaoxuan, Tian Guanfei. Investigation of test methods of concrete under sulfate corrosion[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2006, 36(S(II)): 45-48.
- [9] 牛荻涛,周浩爽,牛建刚. 承载混凝土酸雨侵蚀中性化试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(3): 411-416.
- Niu Ditao, Zhou Haoshuang, Niu Jianguang. Investigation of neutralization of concrete under loads by accelerated acid rain test[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(3): 411-416.
- [10] 牛荻涛. 多因素耦合作用下混凝土结构耐久性研究[C]//吴智深,吴刚,缪昌文. 混凝土结构与材料新进展——第四届结构工程新进展国际会议论坛文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2010: 268-277.
- Niu Ditao. Durability research for concrete structure in the coupling action of various factors[C]//Wu Zhishen, Wu Gang, Miao Changwen. *Progress in Concrete Structures and Materials—The 4th International Forum on Advances in Structural Engineering*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 268-277.

