

文章编号:1671-6833(2006)02-0001-04

# 钢纤维自密实混凝土抗压性能试验研究

高丹盈, 蔡怀森, 袁媛, 周道传, 李志敬

(郑州大学新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过立方体试块的抗压试验,研究了钢纤维体积率、钢纤维类型、浇筑方式、粉煤灰置换率对自密实混凝土抗压强度的影响.结果表明,钢纤维提高了自密实混凝土的抗压强度;在钢纤维体积率的一定范围内,振捣改善了钢纤维对自密实混凝土抗压强度的增强效果;自密实混凝土的抗压强度随着粉煤灰置换率的增加而降低,随着龄期的增长而逐渐提高.在试验研究的基础上,给出了粉煤灰置换率为20%,30%的自密实混凝土立方抗压强度随龄期变化的计算公式.

**关键词:**自密实混凝土;钢纤维;抗压性能

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着对自密实混凝土研究的深入,自密实混凝土优良的工作性能和硬化性能已逐步得到科研界和工程界的认可,并在工程中得到越来越多的应用.但是,与普通混凝土一样,自密实混凝土硬化后也具有脆性大的特性,并且强度越高脆性越大.另外,由于自密实混凝土要满足一定的工作性能,一般胶凝材料的用量较大,随之混凝土在硬化过程中的干缩也就比较大.因此,可以通过加入纤维或膨胀剂部分抑制或抵消硬化过程中的干缩,同时加入纤维还可以改善混凝土的力学性能.在国内外已有的钢纤维自密实混凝土的研究中<sup>[1~5]</sup>,采用的钢纤维体积率一般在0.5%左右,比普通钢纤维混凝土的体积率要小很多,钢纤维的加入对混凝土力学性能的改善不是十分明显.作者通过调整配合比,加大了钢纤维在自密实混凝土中的体积率至1.2%,以企通过增加钢纤维体积率,进一步改善自密实混凝土的力学性能.由于篇幅所限,作者只对钢纤维自密实混凝土的抗压性能的研究结果进行分析探讨.

## 1 试件设计与试验方法

试验采用42.5#普通硅酸盐水泥,I级粉煤灰,级配良好的河砂,细度模数2.91.石子为碎

石,针片状含量少,最大粒径20 mm.FDN高效减水剂,减水率25%.试验共研究了5个变化参数的影响,具体情况如下:

(1) 钢纤维类型:试验中使用了3种类型的钢纤维,分别为铣削型、切断弓型、剪切波纹型,其中铣削型钢纤维为主导纤维.

(2) 钢纤维体积率:分别为0,0.6%,0.9%,1.2%.各类钢纤维的特征参数见表1.

表1 不同类型钢纤维的特征参数

Tab.1 The characteristic parameter of different steel fibers

钢纤维类型	平均长度	等效直径	长径比
	$l_f/\text{mm}$	$d_f/\text{mm}$	$l_f/d_f$
铣削型	32.08	0.841	38.16
切断弓型	30.37	0.506	60.02
剪切波纹型	30.03	0.903	33.24

(3) 粉煤灰置换率:用粉煤灰等量置换水泥,置换率分别为20%,30%,40%.

(4) 试件尺寸:立方体抗压性能试验采用150 mm×150 mm×150 mm的标准试件,同时浇筑100 mm×100 mm×100 mm的非标准试件,研究自密实混凝土抗压强度随龄期的变化.轴心抗压和弹性模量的试件尺寸为150 mm×150 mm×300 mm.

(5) 成型方式:自密实成型、机械振捣成型.试验采用水胶比为0.33,其配合比设计主要考虑

收稿日期:2006-02-14;修订日期:2006-03-18

基金项目:国家重大基础研究前期研究专项项目(2004CCA04100)

作者简介:高丹盈(1962-),男,河南三门峡人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事新型建筑复合材料及其结构性能方面的研究.

万方数据

了钢纤维体积率的影响.以粉煤灰置换率为 20% 的自密实混凝土为例,其配合比设计见表 2 所示.表中 SC00-20 表示粉煤灰置换率为 20% 的自密实混凝土, MF06-20 表示钢纤维体积率为 0.6%、粉煤灰置换率为 20% 的钢纤维自密实混凝土,其它钢纤维自密实混凝土表示方法相同.为消除混凝土基体的影响,在浇筑钢纤维自密实混凝土的同时,浇筑了对应的基体自密实混凝土,如与 MF06-20 对应的基体自密实混凝土代号为 SC06-20,其它相同.

表 2 部分试验配合比

Tab.2 Partial mix proportion of the experiment  $\text{kg}/\text{m}^3$

试件代号	用水量	水泥	粉煤灰	砂	石子	减水剂	钢纤维
SC00-20	188	456	114	811	811	11.4	0
MF06-20	198	480	120	883	723	12.0	46.8
MF09-20	205	497	124	855	699	12.4	70.2
MF12-20	241	584	146	1123	262	7.3	93.6

自密实混凝土还没有其特有的实验方法,本次试验按《钢纤维混凝土试验方法》的规定进行.

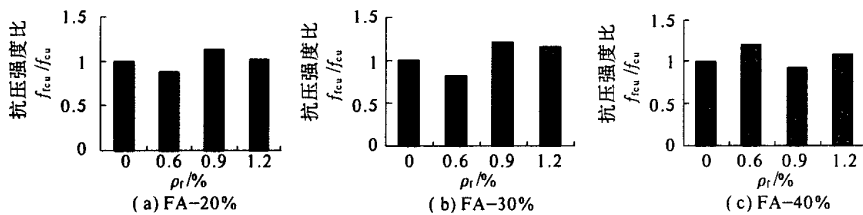


图 1 铣削型钢纤维体积率对抗压强度比的影响

Fig.1 Effects of volume fractions of milling steel fiber on ratio of compressive strength

## 2.2 钢纤维类型对抗压强度比的影响

采用边长 150 mm 的立方体试件,在钢纤维体积率为 0.9%、粉煤灰置换率为 20% 时,研究对比了 3 种类型的钢纤维对自密实混凝土抗压强度的影响.3 种钢纤维分别为铣削型(以 MF 表示)、切断弓型(以 BF 表示)、剪切波纹型(以 SF 表示).图 2 为不同类型的钢纤维对自密实混凝土抗压强度比的影响规律.

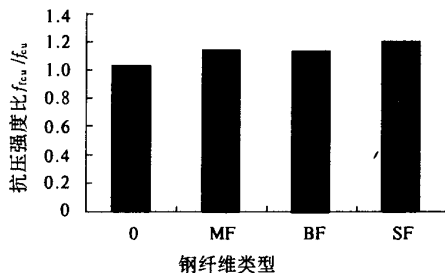


图 2 钢纤维类型对抗压强度比的影响

Fig.2 Effects of the type of steel fiber

万方数据 on ratio of compressive strength

试验在 2 000 kN 的压力试验机上进行,立方体抗压强度为极限荷载除以承压面积.

## 2 试验结果及分析

钢纤维、自密实混凝土基体以及二者之间的粘结性能是影响钢纤维自密实混凝土性能的主要因素.为了反映钢纤维对钢纤维自密实混凝土抗压强度的增强效果,引入抗压强度比,即钢纤维自密实混凝土的抗压强度与同配比但不掺入钢纤维的对应自密实混凝土抗压强度的比值.

### 2.1 纤维体积率对抗压强度比的影响

由图 1 可以看出,随钢纤维体积率的增大,铣削型钢纤维自密实混凝土试件抗压强度比在整体上均有增大的趋势,文献[5]的研究也表明了这一点.对铣削型钢纤维体积率为 0.6%~1.2% 的自密实混凝土,边长 150 mm 试件的强度比在 1~1.21 变化.有研究表明,钢纤维对普通钢纤维混凝土抗压强度的提高幅度较小,一般在 0~25%<sup>[1]</sup>.可以看出,钢纤维自密实混凝土有相同的规律.

由图 2 可以看出,不同类型的钢纤维对自密实混凝土都有一定的增强作用,增强幅度分别为:铣削型 13%、切断弓型 11%、剪切波纹型 19%,但是增强幅度差别不明显.对普通混凝土和高强混凝土的研究表明,钢纤维类型的影响不明显.文献[2]研究表明:在条件相同时,钢纤维类型对高强混凝土的立方抗压强度没有明显的影响.由此可以看出,这一规律对自密实混凝土同样适用.

### 2.3 成型方式对抗压强度的影响

本次试验还对自密实成型、机械振捣成型两种成型方式的差别进行了对比.研究了成型方式对自密实混凝土和钢纤维自密实混凝土抗压强度的影响.粉煤灰置换率为 20% 的自密实混凝土与钢纤维自密实混凝土的对比试验结果见表 3,表中试件代号中的“V”代表成型方式为机械振捣,其余和对比组相同.从表中可以看出,振捣对钢纤维自密实混凝土的影响还是比较大的.对于自密实混凝土,机械振捣成型与自密实成型抗压比接近 1,基本没有

影响;对于钢纤维体积率为 0.6%,0.9% 的钢纤维自密实混凝土,机械振捣成型与自密实成型抗压比分别为 1.21 和 1.11,说明振捣能使砂浆充分包裹钢纤维,对提高强度有利.但是,当钢纤维体积率比较大时,振捣并不一定使砂浆充分包裹钢纤维,并使钢纤维能均匀分布,其对强度几乎没有什么影响.对钢纤维自密实混凝土来说,为了提高其密实度,需要适当增加其砂浆含量.

表 3 成型方式对抗压强度的影响  
Tab.3 Effects of the manner of casting on compressive strength

试件代号	抗压强度/MPa	强度比
SC00-20	50.5	1.03
SC00-20-V	52.2	
MF06-20	50.7	1.21
MF06-20-V	61.3	
MF09-20	56.5	1.11
MF09-20-V	62.9	
MF12-20	60.5	0.99
MF12-20-V	59.7	

2.4 粉煤灰置换率对抗压强度的影响

用粉煤灰置换部分水泥,不仅对自密实混凝土的工作性能有重要影响,对力学性能也有明显作用,同时还能有效利用废料,降低成本.本文只针对基体自密实混凝土研究粉煤灰对抗压强度的影响.图 3 为粉煤灰置换率对边长 150 mm 自密实混凝土试件 28 d 强度的影响.

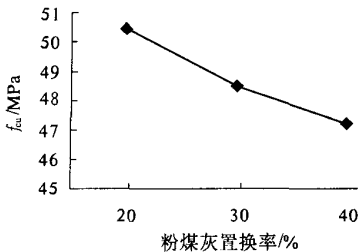


图 3 粉煤灰置换率对 28 d 强度的影响  
Fig.3 Effects of the ratio of replacement of cement by fly ash on 28 th strength

由图 3 可以看出,自密实混凝土的 28 d 强度随着粉煤灰置换率的增加而降低.文献[3]的研究也表明了这一点,并且粉煤灰置换率为 40% ~ 50% 时对强度的降低幅度更大.文献[4]表明,以粉煤灰置换一部分水泥后,混凝土的强度与基准混凝土相比,早期强度偏低,但长期强度增长较大.对混凝土长期强度的影响,与粉煤灰的质量、置换率、水泥品种、混凝土的水灰比以及养护条件等均有影响.掺入粉煤灰的自密实混凝土来说,

28 d 强度仍属于早期强度,随着龄期的增长,其强度还会有较大幅度的增加.

2.5 粉煤灰置换率对龄期强度的影响

我们通过边长 100 mm 立方体试件研究了自密实混凝土龄期强度与粉煤灰置换率之间的关系,龄期分别为 3 d、7 d、28 d、56 d 和 90 d,其关系如图 4 所示.

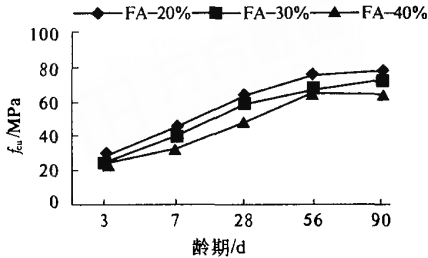


图 4 粉煤灰置换率与龄期强度的关系  
Fig.4 Relationship of the ratio of replacement of cement by fly ash with age strength

由图 4 可以看出,在各种粉煤灰置换率下,自密实混凝土的强度随龄期的增长逐步增大.粉煤灰置换率为 40% 的自密实混凝土,其强度在 7 d 到 56 d 之间增长幅度较大,但是 56 d 以后几乎没有增长.文献[4]表明,即使粉煤灰置换率达 50%,后期强度仍有较大提高,在龄期为 1 年时可以达到和基准混凝土以及其他粉煤灰置换率下的混凝土相同的强度等级.所以,本试验得到的粉煤灰置换率 40% 的自密实混凝土龄期强度是否具有一般性仍需进一步研究.

粉煤灰置换率为 20% 和 30% 的自密实混凝土,龄期强度和龄期基本呈现对数关系,如图 5 所示.

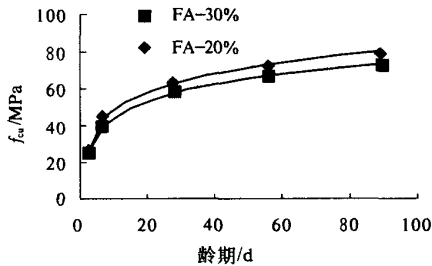


图 5 粉煤灰置换率与龄期强度的关系  
Fig.5 Relationship of the ratio of replacement of cement by fly ash with age strength

根据对本文试验数据的统计分析,粉煤灰置换率分别为 20%,30% 的自密实混凝土的龄期强度和龄期的关系公式如下.

粉煤灰置换率 20%:

$$f_{cu,n} = \frac{f_{cu,28} \times \ln(n)}{1.314 \times \ln(28)} + 15.115.$$

粉煤灰置换率 30%:

$$f_{cu,n} = \frac{f_{cu,56} \times \ln(n)}{1.204 \times \ln(56)} + 11.447.$$

式中:  $n$  为养护龄期,  $d$ ;  $f_{cu,n}$  为  $n$  龄期时对应的自密实混凝土抗压强度, MPa.

由上式所得的抗压强度计算值与试验值的对比列于表 4. 由表中的计算值和试验值比较可以得出, 粉煤灰置换率为 20% 时, 计算值与试验值的比值的平均值为 1.012, 均方差为 0.052, 离散系数为 0.051; 粉煤灰置换率为 30% 时, 计算值与试验值的比值的平均值为 1.002, 均方差为 0.034, 离散系数为 0.034. 符合程度良好.

表 4 龄期与抗压强度的关系

Tab.4 The relation between age and compressive strength

龄期 /d	FA - 20%			FA - 30%		
	$f_{cu,j}/$	$f_{cu,s}/$	$f_{cu,s}/$	$f_{cu,j}/$	$f_{cu,s}/$	$f_{cu,s}/$
	MPa	MPa	$f_{cu,j}$	MPa	MPa	$f_{cu,j}$
3	28.5	31.0	1.09	25.1	26.6	1.06
7	45.4	43.2	0.95	39.7	38.2	0.96
28	63.2	63.2	1.00	58.4	57.3	0.98
56	75.1	73.2	0.97	66.7	66.8	1.00
90	76.5	80.1	1.05	72.4	73.4	1.01

说明:  $f_{cu,j}$  表示拉压强度的计算值;  $f_{cu,s}$  表示抗压强度的实测值.

### 3 结论

(1) 钢纤维对自密实混凝土的增强效果与对普通混凝土的增强效果有相同的规律. 边长为 150 mm 的试件, 其抗压强度比在 1 ~ 1.21 之间.

钢纤维类型对自密实混凝土强度影响不明显.

(2) 振捣对钢纤维自密实混凝土立方体抗压强度有比较明显的影响. 为了提高钢纤维自密实混凝土的密实度, 需要足够的浆体含量.

(3) 自密实混凝土的 28 d 立方体抗压强度随着粉煤灰置换率的增加而降低. 粉煤灰置换率为 20%, 30%, 40% 的自密实混凝土的立方体抗压强度随着龄期的增长而逐渐提高.

(4) 粉煤灰置换率为 20%, 30% 的自密实混凝土立方抗压强度随龄期变化的计算公式与试验结果符合程度良好.

### 参考文献:

- [1] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [2] 赵顺波, 孙晓燕, 黄承逵. 钢纤维高强混凝土基本力学性能试验研究[J]. 水利学报, 2002, (增刊): 93 ~ 99.
- [3] LIU B J, XIE Y J. Influence of fly ash on properties of cement-based materials[A]. YU Z W, SHI C J, HENRI K K. 1st International Symposium On Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete [C]. France: Bagneux, 2005. 557 ~ 564.
- [4] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 高丹盈, 汤寄予, 朱海堂. 钢纤维高强混凝土的配合比及基本性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(3): 46 ~ 51.

## Experimental Research on Compressive Properties of Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete

GAO Dan - ying, CAI Huai - sen, YUAN yuan, ZHOU Dao - chuan, LI Zhi - jing

(Research Center of New Style Building Material and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Through the compressive experiment of cubic specimens, the effects of volume fractions of steel fiber, different types of steel fiber and ratio of replacement of cement by fly ash on compressive strength of self-compacting concrete were studied in this paper. The results indicate, steel fiber increased the compressive strength of self-compacting concrete, vibration could improve the effect of steel fiber on compressive strength. The compressive strength of self-compacting decreased with the increase of ratio of replacement of cement by fly ash, but it gradually increased with the increase of age. On the basis of experiment, when the ratios of replacement of cement by fly ash were 20% and 30%, the calculating formulas about relationship between cubic compressive strength of self-compacting concrete and age was put forward.

**Key words:** self-compacting concrete; steel fiber; compressive property