

[文章编号] 1003—4684(2020)05-0097-05

钢纤维对混凝土轴压性能影响的试验研究

陈升平, 倪 亮, 卢应发, 田 肖

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 使用计算机控制的电液伺服压力机,对 63 个钢纤维混凝土圆柱体试件进行单轴压缩试验,研究钢纤维类型、掺入率与混凝土强度等级对钢纤维混凝土单轴受压性能的影响。结果表明:掺入一定量的钢纤维可以有效提升混凝土的抗压强度,但提升幅度随着混凝土强度等级的增大而减小。在 CF50 强度等级时,多锚固点型钢纤维对混凝土抗压强度的影响明显高于剪切型钢纤维,但韧性指数低于剪切型钢纤维;CF30 和 CF40 强度等级下,两种钢纤维对混凝土抗压强度的影响相似,多锚固点型钢纤维对混凝土的增韧效果较剪切型钢纤维要好。根据试验结果修正了不同类型钢纤维混凝土抗压强度的计算公式,通过与试验结果对比验证了其合理性。

[关键词] 钢纤维;单轴压缩;抗压强度;韧性

[中图分类号] TU513 [文献标识码] A

近年来,随着中国经济的迅猛发展,现代化工程对混凝土提出了更高的要求。显然,脆性大的普通混凝土已经无法满足现代工程的需要。因此,国内外相关学者对纤维增强混凝土这种复合材料的力学性能展开了大量研究^[1-6]。其中,钢纤维混凝土成本低,制造方式简易,增韧效果好,应用最广泛。赵顺波^[7]通过对 0%~1.6% 钢纤维掺入率的全轻混凝土进行轴压试验,提出了两类混凝土单轴受压应力—应变曲线统一计算模型及其特征点计算公式。黄彪^[8]等人认为:随着钢纤维体积掺量和长径比增加,混凝土峰值应力和峰值应变明显提高,其韧性和延性得到显著改善。Mingshuang Zhao^[9]设计了钢纤维体积分数分别为 0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 的钢纤维混凝土。进行单轴压缩试验并得出了应力—应变曲线。结果表明,随着钢纤维体积分数的增加,应力—应变曲线峰值应力处的压应变增大,而应力—应变曲线下降部分的斜率减小。杨克荣^[10]试验结果表明:试验机的加载速率与混凝土的抗压强度呈正比,钢纤维对于强度的影响较小,对混凝土的影响主要是使其韧性提高。

在混凝土中掺入一定体积率的钢纤维,可以显著改善混凝土的抗裂能力,改变其破坏形态。因此,这里将通过三个变量的正交试验,分析钢纤维对混凝土轴压力学性能的影响,能为钢纤维在工程中的应用提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验用料分别采用钢丝冷拉和钢板剪切工艺制作而成的剪切型和多锚固点型钢纤维,强度 P.O42.5 水泥、5~20 mm 瓜米石、中粗普通河砂、高效粉末减水剂、城市生活用水等。为了降低粗骨料中的泥灰杂质,瓜米石需要经过冲洗、晾干后使用。钢纤维参数及类型见表 1、图 1。

表 1 钢纤维参数

	钢纤维类型	
	多锚固点型	剪切型
直径/mm	0.55	0.8
长度/mm	30	32
长径比	55	40
抗拉强度/MPa	700—1100	400—650
生产工艺	钢丝冷拉	钢板剪切



(a) 剪切型钢纤维

(b) 多锚固点型

图 1 钢纤维类型

[收稿日期] 2020—02—05

[基金项目] 国家重点主任基金(41641027)

[第一作者] 陈升平(1965—),男,湖南醴陵人,湖北工业大学教授,研究方向为高性能纤维增强混凝土

[通信作者] 倪 亮(1995—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为高性能水泥基复合材料

1.2 试验设计

合计浇筑 21 组圆柱体及相同数量的立方体试件,每组数量 3 个,尺寸分别为 150 mm×300 mm 和 150 mm×150 mm×150 mm,其中设置 3 组普通混凝土作为对比项。以钢纤维掺量及类型为变化量研究对不同强度混凝土的影响,并进行了相对应的正交设计(表 2)。X₁~X₃ 表示混凝土强度等级,Y₁~Y₃、Z₁~Z₂ 则表示为钢纤维含量及类型。

表 2 试件的参数及编号

Z_1		多锚固点 型编号	Z_2	剪切型编号	
X_1	Y_1	$X_1Y_1Z_1$	CF30-D1.0	$X_1Y_1Z_2$	CF30-B1.0
	Y_2	$X_1Y_2Z_1$	CF30-D1.3	$X_1Y_2Z_2$	CF30-B1.3
	Y_3	$X_1Y_3Z_1$	CF30-D1.6	$X_1Y_3Z_2$	CF30-B1.6
X_2	Y_1	$X_2Y_1Z_1$	CF40-D1.0	$X_2Y_1Z_2$	CF40-B1.0
	Y_2	$X_2Y_2Z_1$	CF40-D1.3	$X_2Y_2Z_2$	CF40-B1.3
	Y_3	$X_2Y_3Z_1$	CF40-D1.6	$X_2Y_3Z_2$	CF40-B1.6
X_3	Y_1	$X_3Y_1Z_1$	CF50-D1.0	$X_3Y_1Z_2$	CF50-B1.0
	Y_2	$X_3Y_2Z_1$	CF50-D1.3	$X_3Y_2Z_2$	CF50-B1.3
	Y_3	$X_3Y_3Z_1$	CF50-D1.6	$X_3Y_3Z_2$	CF50-B1.6

编号中 B 和 D 为不同的钢纤维类型,剪切型为 B,多锚固点型为 D。例如在 C40 强度混凝土加入 1.0% 比例的剪切型钢纤维,则试件编号为 CF40-B1.0

1.3 加载装置

试验加载装置如图 2 所示,位移控制加载,位移计间距 100 mm,轴向位移的测试由位移传感器实现,并在试件的中部对称竖向粘贴两个应变片,并使用应变采集仪 DH3816 及配套电脑软件进行数据采集。

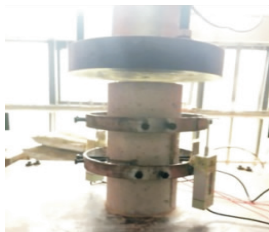


图 2 试验加载装置

2 试验结果与分析

各组试验结果的平均值如表 2 所示,其中 f_{cu} 为立方体试件抗压强度, f_c 为圆柱体轴心抗压强度, ϵ_0 为混凝土峰值应变、 ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变, f_r 为压应变 0.01 时的残余应力。

2.1 破坏特征

由于使用位移控制加载,位移缓缓提升的过程中,机器传给试件表面的压力不断增大,当压力接近试件的极限抗压能力,试件中部及上下两个表面边缘出现可用肉眼观测的较小裂纹,并不断从两端至

表 3 主要试验结果

编号	$f_c /$ MPa	$f_{cu} /$ MPa	$\epsilon_0 /$ 10^{-6}	$\epsilon_{cu} /$ 10^{-6}	$\frac{f_{cu}}{f_c}$	$f_r /$ MPa
C30-0	26.26	33.35	0.00183	0.00400	1.27	—
CF30-D1.0	33.2	41.58	0.00265	0.01324	1.25	16.12
CF30-D1.3	35.99	44.36	0.00281	0.01194	1.23	13.59
CF30-D1.6	36.3	46.13	0.00305	0.01473	1.27	22.52
CF30-B1.0	31.2	39.17	0.00285	0.01262	1.26	12.8
CF30-B1.3	32.63	40.91	0.00306	0.00982	1.25	—
CF30-B1.6	35.41	44.65	0.00277	0.01387	1.26	20.08
C40-0	37.5	44.66	0.00182	0.00251	1.19	—
CF40-D1.0	40.8	49.50	0.00267	0.01043	1.21	14.53
CF40-D1.3	43.86	51.92	0.00273	0.01215	1.18	17.5
CF40-D1.6	46	53.4	0.00276	0.01348	1.16	25.34
CF40-B1.0	39.52	48.51	0.00256	0.00892	1.23	—
CF40-B1.3	41.28	50.33	0.00271	0.01153	1.22	17.34
CF40-B1.6	44.56	52.75	0.00267	0.01218	1.18	20.18
C50-0	44.69	56.02	0.00158	0.00202	1.25	—
CF50-D1.0	47.58	58.26	0.00223	0.00612	1.22	—
CF50-D1.3	49.33	61.31	0.00238	0.00713	1.24	—
CF50-D1.6	50.8	63.21	0.00248	0.00889	1.24	—
CF50-B1.0	43.5	58.10	0.00202	0.00567	1.34	—
CF50-B1.3	47.49	59.00	0.00235	0.00968	1.24	—
CF50-B1.6	47.35	58.40	0.00235	0.00744	1.23	—

中间缓慢延申,而后机器压力达到试件的抗压极限,裂缝宽度逐渐变大,压力机所显示的荷载出现一定程度的降低,而后裂缝延申速度加快,混凝土内部各类材料所共同形成的摩擦力、粘结力及残余抗压能力逐渐降低。该阶段延续的过程中,可听见混凝土碎末因受压剥离外表面、钢纤维被拔出的响声。维持一定时间后,应变采集仪配套电脑上显示的位移突然急剧增加,压力机所显示荷载的快速降低,此时的试件不再具备压缩变形能力,丧失稳定性及残余承载能力。破坏后的试件可观测到贯穿裂缝,倾角约为 45°(图 3)。得益于钢纤维在混凝土内部的随机分布,不仅抑制了混凝土外表面的剥离,而且还对裂纹宽度及数量有极其显著的限制作用,所以使得试件的完整性得到比较好的保留。



图 3 钢纤维混凝土圆柱体破坏形态

2.2 抗压强度

如图 4 所示,钢纤维明显增强了 C30、C40 混凝土立方体试件的抗压强度。如掺入 1.6% 的多锚固点型钢纤维,使得 C30 强度普通混凝土抗压强度提

高 11.3 MPa,增幅达 34.84%。

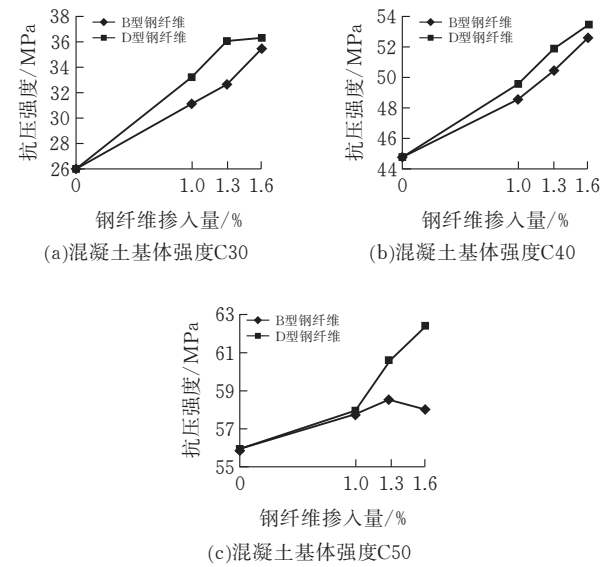


图 4 立方体抗压强度变化趋势

对于 C50 强度混凝土,钢纤维对强度提升的作用并不显著,在钢纤维掺入率 1.0%~1.6%情况下,抗压强度增长幅度至多为 12.8%,钢纤维对高强度混凝土抗压性能的改善效果没有 C30、C40 强度时显著。混凝土强度为 C50,通过改变剪切型钢纤维的掺量,使其含量从 0 提升至 1.3%,抗压强度呈线性增长,但将其含量从 1.3%提升至 1.6%,抗压强度降低了 0.6 MPa,因此剪切型钢纤维对于抗压强度具有双向作用,可能是增强或减弱。作为对比组,随多锚固点型钢纤维在混凝土中含量提升,从 0~1.6%,强度均呈增长趋势,其增长的强度至多达到 7.19 MPa,增益效果比剪切型钢纤维更加明显。

由于这里所采用的钢纤维属性存在差异,根据所参考的文献^[13],立方体试件抗压强度

$$f_{cu} = f_{cu,0}(1 + \alpha v_f l_f / d_f) \tag{1}$$

式中: $f_{cu,0}$ 为素混凝土的实测强度; α 为钢纤维影响系数; v_f 、 l_f/d_f 分别为钢纤维掺入比例及长径比。

对试验过程中所记录的数据通过相关软件进行分析计算,影响系数 α 如表 4 所示。

钢纤维类型	强度等级		
	CF30	CF40	CF50
剪切	0.501	0.271	0.077
多锚固点	0.443	0.223	0.141

如表 4 所示,混凝土强度等级越高,影响系数 α 则越小,式(1)中的 f_{cu} 与 α 成正比,因此钢纤维对立方体强度的影响会由其自身强度提高而降低。

表 5 为计算与试验值的比例关系,可以得出二者比值与 1 十分接近,所以基于钢纤维影响系数来计算立方体抗压强度是可行的。

表 5 抗压强度计算值和试验值对比				
混凝土强度及 钢纤维类型	掺入 率/%	计算值/ MPa	试验值/ MPa	计算值/ 试验值
CF30-剪切	1.0	40.03	39.17	1.02
	1.3	42.04	40.91	1.03
	1.6	44.04	44.65	0.99
CF40-剪切	1.0	49.5	48.51	1.02
	1.3	50.95	50.33	1.01
	1.6	52.4	52.75	0.99
CF50-剪切	1.0	57.75	58.10	0.99
	1.3	58.26	59.00	0.99
	1.6	58.78	58.40	1.01
CF30-多锚固点	1.0	41.47	41.58	1.00
	1.3	43.91	44.36	0.99
	1.6	46.35	46.13	1.00
CF40-多锚固点	1.0	50.13	49.50	1.01
	1.3	51.78	51.92	1.00
	1.6	53.42	53.4	1.00
CF50-多锚固点	1.0	60.36	58.26	1.04
	1.3	61.66	61.31	1.01
	1.6	62.97	63.21	1.00

2.3 应力-应变全曲线

基于所有组试件记录的试验数据,所绘制的应力-应变全曲线如图 5 所示。

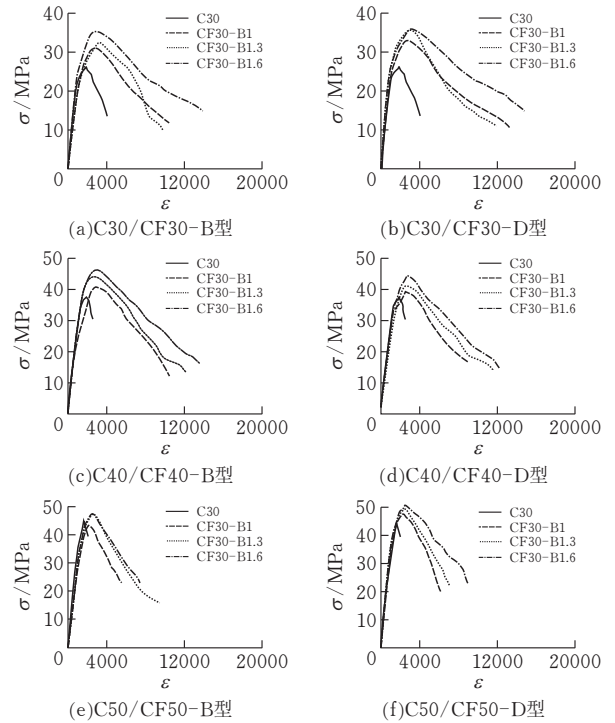


图 5 应力-应变试验曲线

2.4 峰值应力与峰值应变

峰值应力体现了试件的受压时的极限承载能力,峰值应变的大小则取决于峰值前对裂缝不规则扩展的限制能力。钢纤维对峰值应力的影响规律与立方体试件的抗压强度相类似,因此不再赘述。峰值应变增量如表 6 所示,钢纤维分别能为 C30、C40、

C50 强度等级的混凝土增加 45.04%~73.04%、40.52%~51.45%、和 27.91%~56.84% 的峰值应变。说明钢纤维对各个强度混凝土的阻裂能力均有积极作用,在低强度时尤为显著。

表 6 钢纤维混凝土较普通混凝土峰值应力、峰值应变增量

编号	钢纤维掺入率/%			峰值应力增比 η /%			峰值应变增比 ω /%		
	1.0	1.3	1.6	18.81	24.26	34.84	56.27	73.04	60.05
CF30-B	1.0	1.3	1.6	26.43	33.66	38.23	45.04	53.97	66.85
CF30-D	1.0	1.3	1.6	5.39	10.08	18.83	40.52	48.68	46.38
CF40-B	1.0	1.3	1.6	8.8	16.96	22.67	46.6	49.67	51.45
CF40-D	1.0	1.3	1.6	-2.66	6.94	5.95	27.91	34.4	48.61
CF50-B	1.0	1.3	1.6	6.47	10.38	13.67	40.95	50.51	56.84
CF50-D	1.0	1.3	1.6						

由表 6 可知, η 为钢纤维混凝土对照同强度普通混凝土峰值应力的增比, ω 为钢纤维混凝土对照同强度普通混凝土峰值应变的增比,与钢纤维掺入率一一对应,计算公式分别为

$$\eta = (\sigma_{\text{钢纤维混凝土}} / \sigma_{\text{普通混凝土}} - 1) \times 100\% \tag{2}$$

$$\omega = (\epsilon_{\text{钢纤维混凝土}} / \epsilon_{\text{普通混凝土}} - 1) \times 100\% \tag{3}$$

式(2)、(3)的下标限定条件为同强度等级。

2.5 极限压应变及残余应力

掺入 1.0%~1.6% 的剪切型钢纤维和多锚固点型钢纤维,分别能使混凝土的极限压应变达到规范^[14]值 0.0035 的 1.6~3.9 倍和 1.8~4.2 倍,极大增强了混凝土的变形能力,多锚固点型钢纤维由于它在同样掺入率下,有更多的数量,外加扁平的中连段及扁平的两末端的共同桥接作用,其对混凝土极限压应变的改善要略好于剪切型钢纤维。

残余压应力体现在当结构应力达到峰值水平后,经过一段塑性变形后所残留的承载能力。由表 2 可以得出,在 0.01 时的压应变残余强度与钢纤维掺入率呈正相关关系。当混凝土为 C30、C40 强度,多锚固点型钢纤维残余强度可达到极限强度的 35.6%~70%,在相同条件下其数值均高于剪切型钢纤维,多锚固点型钢纤维对混凝土残余应力的影响较剪切型好。

由于试验机自身刚度以及较高强度混凝土的脆性比较大,无法使 C50 强度混凝土压应变达到 0.01。因此想要对比不同钢纤维对 C50 强度混凝土韧性的影响,需要结合应力-应变曲线并采用相应模型,通过软件进行分析计算。

2.6 韧性指数

依据文献^[15]所给出的韧性计算模型如图 6, A 为峰点, C 为下降段一点, 值取峰值应力的 50%, 韧性指数为下降段 AC 与下轴线围成的面积 S_2 。同上升段 OA 与下轴线围成面积 S_1 的比值。计算所得到的结果如表 7 所示, 将钢纤维的掺入率从 1% 提

升至 1.6%, 各组试件韧性指数均有明显的增加, 钢纤维掺入率的提高能有效改善混凝土的韧性。

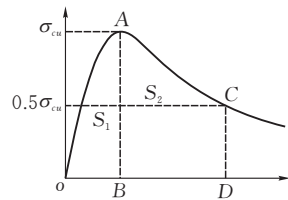


图 6 韧性计算模型

表 7 韧性指数实测结果

编号	试验结果	编号	试验结果
CF30-D1.0	2.54	CF30-B1.0	2.11
CF30-D1.3	1.89	CF30-B1.3	1.91
CF30-D1.6	3.33	CF30-B1.6	3.45
CF40-D1.0	2.79	CF40-B1.0	2.04
CF40-D1.3	2.56	CF40-B1.3	2.46
CF40-D1.6	3.14	CF40-B1.6	2.81
CF50-D1.0	1.91	CF50-B1.0	2.27
CF50-D1.3	1.99	CF50-B1.3	2.04
CF50-D1.6	2.37	CF50-B1.6	2.41

表 7 为各组试件韧性指数平均结果, 可见混凝土韧性会受到钢纤维类型、掺量及自身强度的影响。在 CF30 和 CF40 强度下, 多锚固点型钢纤维对混凝土的韧性有更好的影响结果, 在 CF50 强度下, 剪切型要比多锚固点型钢纤维更佳, 如图 7 所示。

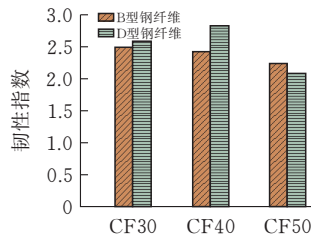


图 7 韧性指数平均值对比

3 结论

1) 钢纤维掺入率的提高能使结构韧性有所提升, 对比强度为 CF30 和 CF40 的混凝土的增韧效果, 多锚固点型钢纤维优于剪切型, 但在 CF50 混凝土强度下, 剪切型钢纤维的增韧效果更好。

2) 混凝土强度等级越低, 则钢纤维对抗压强度的提升越高, 二者之间呈现反比例关系, 强度达到 CF50 时, 随着剪切型钢纤维掺入率的增加, 抗压强度可能增减不定。

3) 通过对比可以看出, 基于钢纤维影响系数所提出的混凝土抗压强度计算方法与试验结果有较好的吻合。

[参 考 文 献]

[1] 梁宁慧, 杨鹏, 刘新荣, 等. 高应变率下多尺寸聚丙烯纤

维混凝土动态压缩力学性能研究[J].材料导报,2018,32(2):288-294.

[2] 樊俊江,於林锋,韩建军,等.不同种类粗纤维混凝土基本力学性能及弯曲韧性试验研究[J].施工技术,2018,47(20):1-5.

[3] 张玉武.UHMWPE 纤维混凝土静态力学性能研究[D].国防科学技术大学,2014

[4] Rui Jiang. Experimental study on improving super high-strength concrete toughness by high modulus PVA fiber[C].The Second International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement,2007:1163-1169

[5] Ngoc-Hieu Dinh ,Kyoung-Kyu Choi. Mechanical properties and modeling of amorphous metallic fiber-reinforced concrete in compression[J].International Journal of Concrete Structures and Materials,2016,10(2):221-236

[6] Xu SL.Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultra-high toughness cementitious composites [J]. Mater. Civ. Eng., 2010, 22(10):1067-1077

[7] 赵顺波,赵明爽,张晓燕,等.钢纤维轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线研究[J].建筑结构学报,2019,40(5):181-190.

[8] 黄彪,李彪.基于声发射技术的钢纤维混凝土受压损伤本构关系研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):201-208.

[9] Mingshuang Zhao, Bingxin Zhang, Pengran Shang, et al. Complete stress - strain curves of self-compacting steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete under uniaxial compression[J].Materials, 2019, 12(18):73-77.

[10] 杨克荣,彭刚,戚永乐,等.钢纤维混凝土抗压性能试验研究[J].人民黄河,2010,32(6):128-129,132.

[11] GB/T 50081—2002.普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[12] CECS38—2004,纤维混凝土结构技术规程[S].北京:中国计划出版社,2004.

[13] 牛建刚,冯雪磊,陈旭.塑钢纤维轻骨料混凝土轴压短柱正交试验研究[J].建筑科学,2019,35(1):95-100.

[14] ACI Committee(2008) ACI 318-08 building code requirements for structural concrete and commentary [S].American Concrete Institute,2008.

[15] Linzhu Sun, Qiang Hao, Junliang Zhao, et al,Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 349-360.

Experimental Research on Influence of Steel Fiber on Axial Compression Performance of Concrete

CHENG Shengping, NI Liang, LU Yingfa , TIAN Xiao

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: The uniaxial compressive experiment of steel fiber reinforced concrete cylinder was carried out by microcomputer controlled electro-hydraulic servo pressure testing machine, which studied the effects on types of steel fiber, fiber volume fraction and concrete strength grade to uniaxial compressive behavior of steel fiber reinforced concrete. The results show that steel fiber reinforced concrete can efficiently enhance the concrete compressive strength, but the range of concrete strength grade will decrease with the increase of concrete strength grade. In strength grade of CF50, the compressive strength of multi-anchor point fiber reinforced concrete is obviously higher than the compressive strength of shear type fiber reinforced concrete, but the toughness index of multi-anchor point fiber reinforced concrete is lower than the toughness index of shear type fiber reinforced concrete. In strength grade of CF30 and strength grade of CF40, there are similar effects on the two kinds of steel fibers to the concrete compressive strength, but the toughening effect on multi-anchor point fiber reinforced concrete is better than the toughening effect on shear type fiber reinforced concrete. According to the test results, the formulas for calculating the compressive strength of different types of steel fiber reinforced concrete (SFRC) are modified and their rationality is verified.

Keywords: steel fiber; uniaxial compressive experiment; compressive strength; toughness