

钢纤维混凝土准静态单轴受压力学性能*

焦楚杰¹, 孙伟², 周云¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广州 510405; 2. 东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096)

摘要:采用 WAW-2000 型微机控制电液伺服万能试验机对钢纤维体积率(V_f)为 0%~3%、基体强度为 C50 的钢纤维混凝土(SFRC)进行了准静态三种应变率单轴压缩试验,测出了基体混凝土和 SFRC 应力-应变全曲线,试验结果表明:随 V_f 的增加,SFRC 抗压强度仅有小幅度增长,韧性则增长幅度较大;随着应变率增大,SFRC 强度提高,韧性呈现下降趋势,但 V_f 越大,韧性下降幅度越小;SFRC 的弹性模量和泊松比均是不敏感的材料参数,随 V_f 的提高而分别微增与微减;还推荐了适合于 SFRC 应力-应变曲线的数学表达式。

关键词:SFRC; 准静态; 单轴压缩; 弹性模量; 泊松比; 应力-应变曲线

中图分类号:TU377 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)02-0056-03

Quasi-static Mechanical Properties of SFRC under Uni-axial Compression

JIAO Chu-jie¹, SUN Wei², ZHOU Yun¹

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, P. R. China; 2. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: Using WAW-2000 a multifunction servo-controlled testing machine, uniaxial quasi-static compression experiments for the steel fiber reinforced concrete (SFRC) were conducted with three strain rates. The volume fraction (V_f) of SFRC ranged from 0% to 3%, and the matrix was C50 concrete. The whole stress-strain curves of matrix and SFRC were obtained, and the results showed that with the increase of V_f , the compressive strength increased slowly, while the toughness increase quickly. With the increase of the strain rate, the strength of SFRC increased, but the toughness decreased, and the more the V_f , the less decreasing of the toughness. The results also showed that the elastic modulus and Poisson's ratio of SFRC were not sensitive material parameters, and with the increase of V_f , the former raised slightly and the latter decreased a little, respectively. A well suited numerical expression of the compressive stress-strain curve applicable to SFRC was put forward.

Keywords: SFRC; quasi-static; uniaxial compression; elastic modulus; Poisson's ratio; stress-strain curve

钢纤维混凝土(SFRC)具有优良的物理力学性能,可以满足工程中的高拉应力、复杂受力、高耐久性、抗裂、阻裂和增韧等普通混凝土难以达到的性能要求,从而被广泛地应用于土木、水利、交通、军事工程领域^[1,2]。当荷载作用下的应变率介于 $10^{-4}/s$ 与 $10^{-1}/s$ 之间时,材料处于准静态^[3],此时单轴压缩条件下的强度与变形特性是材料基本的、也是最常用的力学性能,对结构计算、分析与数值模拟等研究非常重要,也就是关系到 SFRC 工程结构设计的安全性及经济性。本文采用电液伺服万能试验机,对钢纤维体积率 V_f 为

0、1%、2%、3% 的 SFRC 进行 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$ 三种应变率单轴压缩试验研究。

1 试验概况

原材料为 42.5P·II 硅酸盐水泥、优质粉煤灰、硅粉、钢丝切断型哑铃形钢纤维、普通天然砂、玄武岩碎石、高效减水剂、自来水。SFRC 配合比如表 1 所示。表中材料编号含义为:C50V0 表示 C50 级基体混凝土;C50V₁ 表示基体混凝土为 C50, V_f 为 1% 的 SFRC;其它编号含义依此类推。

* 收稿日期:2005-11-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(59938170)

作者简介:焦楚杰(1974-),男,湖南浏阳人,副教授,博士,主要从事高强与超高强混凝土动力性能研究。

试件尺寸为 $\varphi 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 每种 V_f 试件均为 9 个, 在试验机上采用等应变率控制加载。

表 1 SFRC 配合比/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

编号	水泥	砂	石	钢纤维	外加剂	水
C50V ₀	440	749	1 079	0	3.52	175
C50V ₁	445	804	988	78	3.56	178
C50V ₂	450	860	897	156	3.60	180
C50V ₃	460	880	844	234	3.68	185

2 试验结果

按照现行规范《钢纤维混凝土试验方法》^[4], 测出各系列 SFRC 应力-应变曲线、轴心抗压强度、弹性模量、计算出压缩韧度指数 η_{c5} 、 η_{c10} 和 η_{c30} 。

泊松比在现行规范中无测试方法规定, 在试件侧面分别粘贴相对的 4 个 SZ120-60AA 型应变片(两个纵向, 两个环向), 连接到 YJ-31 静态电阻应变仪测量试件纵向应变与横向应变, 按照文献[4]测静力受压弹性模量的规定对试件进行至少 5 次的加、卸载操作, 泊松比 ν 定义为试件横向应变与轴向应变之比的绝对值^[5]。按下式计算:

$$\nu = |(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1)/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)|$$

式中: ε'_2 、 ε'_1 分别为最后一次从 F_i 到 F_{con} 时试件的横向应变, ε_2 、 ε_1 分别为最后一次从 F_i 到 F_{con} 时试件的轴向应变。 F_{con} : 应力为 40% 轴心抗压强度时的控制荷载(N); F_i : 应力为 0.5 MPa 时的初始荷载(N)。

表 2 轴心抗压强度、韧度指数、弹性模量、泊松比平均值和应力-应变曲线拟合参数

材料	应变率	轴心抗压强度/MPa	韧度指数			峰值应变/ 10^{-3}	弹性模量/GPa	泊松比	应力-应变曲线拟合参数			
			η_{c5}	η_{c10}	η_{c30}				A	A 的相关系数	B	B 的相关系数
C50V ₀	$10^{-2}/\text{s}$	48.5	3.68	4.05	4.05	1.833	38.9	0.238 8	1.408 6	0.990 1	0.224 7	0.915 8
	$10^{-3}/\text{s}$	46.2	3.75	4.59	4.59	1.821	38.1	0.239 1	1.457 3	0.994 3	0.246 1	0.951 6
	$10^{-4}/\text{s}$	44.4	4.13	5.43	5.95	1.800	37.7	0.239 1	1.495 4	0.992 7	0.251 3	0.945 3
C50V ₁	$10^{-2}/\text{s}$	51.9	4.45	5.25	5.28	1.857	40.3	0.232 4	1.415 7	0.993 6	0.333 4	0.924 7
	$10^{-3}/\text{s}$	49.2	4.66	5.91	6.37	1.833	39.5	0.232 7	1.490 6	0.995 7	0.360 2	0.936 1
	$10^{-4}/\text{s}$	46.8	4.72	6.07	6.74	1.821	39.0	0.233 1	1.520 4	0.991 8	0.384 8	0.944 2
C50V ₂	$10^{-2}/\text{s}$	55.0	5.02	6.03	7.09	2.020	41.2	0.231 4	1.549 5	0.993 4	0.365 8	0.961 7
	$10^{-3}/\text{s}$	52.1	5.18	6.11	7.57	2.011	40.9	0.231 5	1.582 7	0.996 8	0.391 8	0.963 3
	$10^{-4}/\text{s}$	48.5	5.24	6.23	8.51	2.005	40.5	0.232 0	1.652 1	0.991 9	0.410 5	0.968 9
C50V ₃	$10^{-2}/\text{s}$	57.5	5.69	7.03	9.16	2.243	42.6	0.224 1	1.660 1	0.992 0	0.488 3	0.972 2
	$10^{-3}/\text{s}$	53.8	5.71	7.43	9.38	2.198	41.5	0.224 6	1.708 4	0.998 7	0.511 7	0.979 1
	$10^{-4}/\text{s}$	50.1	5.76	7.91	10.73	2.153	41.2	0.224 8	1.753 2	0.996 1	0.535 8	0.989 4

$$y = \frac{Ax - x^2}{1 + (A - 2)x} \quad (0 \leq x \leq 1);$$

$$y = \frac{Bx}{1 + (B - 2)x + x^2} \quad (x > 1)$$

4 分析

4.1 钢纤维体积率 V_f 对 SFRC 强度和韧度的影响

从图 2 的左图可看出, SFRC 抗压强度随 V_f 的增加而增大, 但增长幅度都不算大。当 V_f 从 1% 增到

各个系列 SFRC 不同应变率单轴压缩的典型应力-应变曲线如图 1 所示, SFRC 轴心抗压强度、韧度指数、曲线峰值应变、弹性模量和泊松比的平均值见表 2。

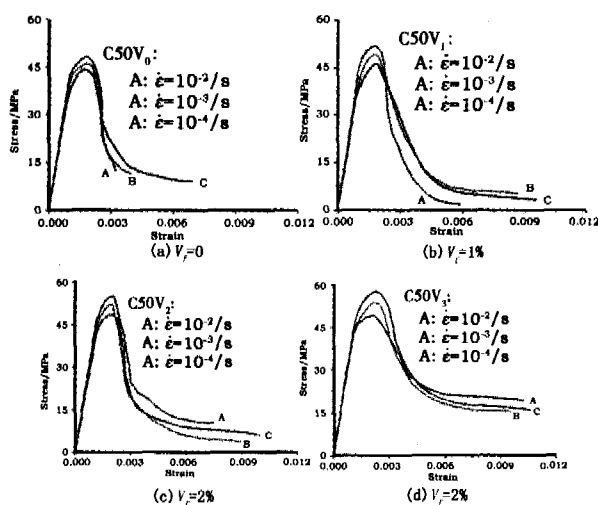


图 1 SFRC 应力-应变曲线

3 应力-应变全曲线的数值表达

对混凝土应力-应变全曲线的数学描述有很多种, 如多项式、有理分式、幂函数和指数形式等^[6]。针对 SFRC, 以下两式能较好地拟合其应力-应变全曲线(式中, $x = \varepsilon/\varepsilon_0$, $y = \sigma/f_c$, ε_0 为曲线峰值应变, f_c 为轴心抗压强度)^[7]。拟合参数见表 2。

3%, SFRC 轴心抗压强度较基体增长 5.41% ~ 18.56%, 受压试件的变形与损伤大致可分为四个阶段: (1) 微裂缝及气孔闭合; (2) 混凝土弹性响应; (3) 微裂缝稳态扩展; (4) 裂缝贯通与非稳态扩展。(1)和(2)阶段混凝土的应变很小, 在 $(0.05 \sim 0.5)\varepsilon_0$ 之间, 此阶段, 钢纤维所承担的应力很小, 混凝土基体起主要受力作用。到(3)阶段, 即 $(0.5 \sim 0.9)\varepsilon_0$ 时, 微裂缝稳态扩展, 钢纤维起到阻裂作用, 从图 1 中可看到应力-应变曲线上升段在接近峰值点时发生弯曲。

(3)阶段之末,宏观裂缝出现,试件承受压力达到峰值荷载,材料应力即为抗压强度。在峰值荷载之前的(1)至(3)阶段,微裂缝宽度小,扩展速度慢,钢纤维所起的阻裂增强作用并不十分明显,所以 SFRC 抗压强度随 V_f 的增加仅仅有着小幅度的增长。

从图2的右图可看出,与强度不同,韧性受 V_f 的影响较大,以应变率 $10^{-4}/s$ 为例, C50V₁、C50V₂、C50V₃ 的韧度指数 η_{c30} 分别比 C50V₀ 高出 13.28%、43.03%、80.34%。受压试件进入第(4)阶段,也就是应力-应变曲线的下降段,圆柱体试件径向膨胀,对于基体混凝土试件,往往是一条或数条裂缝迅速开展延伸导致试件脆性解体,尤其在应变率为 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 时,试件更快裂开或溃散,而钢纤维混凝土试件,因钢纤维的阻裂效应,跨越裂缝和靠近裂缝尖端的钢纤维将应力传递给裂缝的上下表面,裂缝尖端应力集中程度缓和甚至消失,裂缝扩展速度放慢,裂缝的数量增多^[8],试件承载力随应变的增长而相对缓慢降低,从而材料的韧度得以提高。

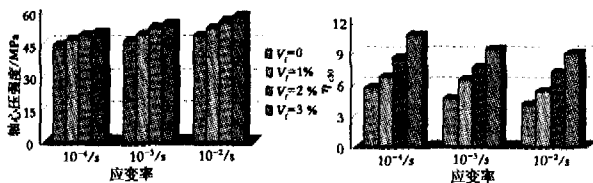


图2 SFRC 的轴心抗压强度和韧度指数 η_{c30}

4.2 加载应变率对 SFRC 的强度和韧度的影响

从试验结果看,随着应变率增大,曲线峰值应变增大,材料强度提高。应变率每增加 10 倍,抗压强度增加为 5% 左右,该结果与普通混凝土的相关研究结果基本一致^[9]。材料强度提高之原因在于:裂缝形成过程所需的能量远比裂缝发展所需的能量高,当加载速度较大,产生裂缝数量就多,而荷载作用于试件时间短,材料没有足够多的时间用于能量的积累,只能通过增加应力的办法来达到提供能量的目的,结果导致材料的破坏强度随应变率的增大而提高。

应变率越高,最大应变值越小,韧度越低。当应变率从 $10^{-4}/s$ 升至 $10^{-2}/s$ 时, C50V₀、C50V₁、C50V₂、C50V₃ 的韧度指数 η_{c30} 分别下降 46.91%、27.65%、20.03%、17.14%,总的来说, V_f 越大,应变率的变化对 SFRC 韧度的影响越小。这归根到底还是 V_f 越大,钢纤维越能缓冲材料快速受载时裂缝的急剧开展,延长了破坏过程,淡化了应变率的作用。

4.3 SFRC 的弹性模量与泊松比

随着 V_f 的提高,在轴心抗压强度缓慢增加的同时, SFRC 弹性模量亦稍微有所增加,应变率的提高使弹性模量也有微增,而泊松比几乎不变。众多文献表

明,混凝土的弹性模量随抗压强度的提高而缓慢增加^[10-12],泊松比随 V_f 变化较小^[13]。我国铁道科学院曾对强度为 102 MPa 的混凝土进行测试,得出其泊松比为 0.23^[14],本试验测出的 SFRC 泊松比与之相近。

4.4 SFRC 应力-应变曲线的拟合

表2中的 A、B 分别为曲线上升与下降段参数。A 的相关系数都大于 0.998, B 值离散性稍大,这主要是因为下降段受试验机刚度不够高的影响^[15],一致性相对较弱之缘故,但相关系数都大于 0.9,故总的来说,方程与试验得到的曲线具有良好的相关性。

5 结论

1) 随着 V_f 的提高, SFRC 轴心抗压强度缓慢递增,韧度有较大的提高。当 $V_f = 3\%$ 时,轴心抗压强度提高幅度不超过 20%,韧度指数 η_{c30} 提高幅度超过 80%。

2) 随着应变率升高, SFRC 抗压强度提高,韧性下降。应变率提高 10 倍时,抗压强度增长 5% 左右, V_f 越大, SFRC 韧度受应变率影响越小。

3) 随着纤维体积率的提高, SFRC 弹性模量稍有增大,泊松比稍有减小,应变率的提高使弹性模量亦有微增,而泊松比几乎不变。

4) SFRC 应力-应变曲线可用本文推荐的方程式来描述,曲线方程与试验结果相关性良好。

参考文献:

- [1] 林小松,杨果林. 钢纤维高强与超高强混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 焦楚杰. 高与超高性能钢纤维砼冲击与抗爆研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [3] P. H. Bischoff and S. H. Perry. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures, 1991, 24(144): 425-450.
- [4] CECS13:89, 钢纤维混凝土试验方法[S].
- [5] 钱济成,徐道远,刘丽丽,等. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [6] 徐积善. 强度理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [7] 焦楚杰,孙伟,秦鸿根等. 钢纤维高强混凝土单轴受压本构方程[J]. 东南大学学报, 2004, 34(3): 366-369.
- [8] 孙伟. 钢纤维混凝土对高强混凝土的增强、增韧与阻裂效应的研究[J]. 东南大学学报, 1991, 21(1): 50-57.
- [9] 过镇海. 混凝土的强度和变形, 试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

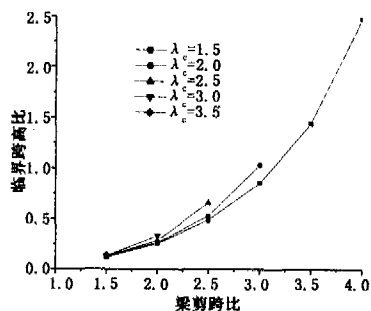


图2 临界跨高比($\gamma = 300$)

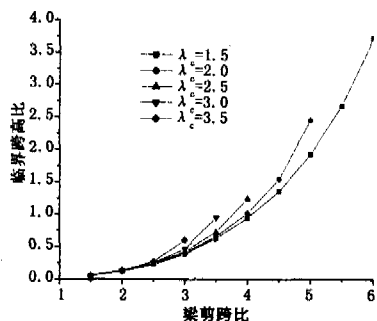


图3 临界跨高比($\gamma = 900$)

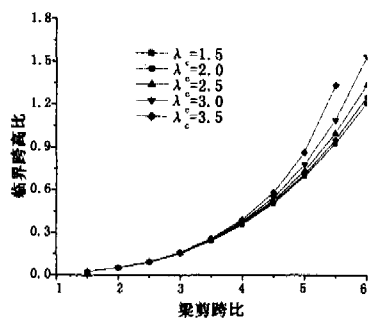


图4 临界跨高比($\gamma = 1500$)

推刚度愈小,结构临界跨高比愈小。

4.2 结构体系的判别步骤

1) 计算结构的抗推刚度 G 及系数 γ 。

2) 验算 γ 是否满足式(34), 不满足则为框筒结构, 满足则进行下一步。

3) 代入式(33)计算裙梁的临界跨高比 $[s/h]$ 。若裙梁的跨高比 $s/h \geq [s/h]$, 则可认为结构属于框架结构, 否则为框筒结构。

5 结论

1) 分别基于等效连续化法和 D 值法推导了框筒与框架结构的水平侧移曲线。

2) 通过令两种结构体系的水平侧移曲线相等的方法来寻求区分框筒与框架结构裙梁的临界跨高比, 当裙梁的跨高比超过该值时, 按框架结构计算较为合理; 当跨高比小于该值时, 可认为结构属于框筒结构。

3) 框筒中裙梁的最大跨高比是多变量的函数, 通过对各参数的分析, 得出了影响裙梁临界跨高比的各种因素。

参考文献:

- [1] Foutch D A, Chang P C. A Shear Lag Anomaly[J]. J. Struct. Div., ASCE, 1982, 108(7): 1 653 - 1 658.
- [2] 陈岳辉, 刘斌. 框筒结构中角柱刚度对结构内力分布影响的研究[J]. 结构工程师, 1998, 14(2): 14 - 18.
- [3] 沈蒲生. 高层建筑结构疑难释疑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] Kinh H Ha, Paul Fazio, Osama Moselhi. Orthotropic Membrane for Tall Building Analysis[J]. Journal of Structural Division, 1978, 104(9): 1 495 - 1 505.
- [5] 方鄂华. 多层及高层建筑结构设计[J]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [6] 曹希尧, 李家宝, 李存权. 框筒 T 型节点刚域长度的修正[J]. 建筑结构, 1998, 19(7): 14 - 16.

(上接第 58 页)

- [10] 中国土木工程学会高强混凝土委员会. 高强混凝土结构设计与施工指南(第二版)[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2001.
- [11] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范 GB50010-2002[S].
- [12] 吕德生, 汤骅. 高强混凝土弹性模量与抗压强度的相关性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2001, (6): 20 - 21.
- [13] 严少华, 钱七虎, 孙伟, 等. 碳纤维高强混凝土单轴压缩下应力-应变关系[J]. 东南大学学报, 2001, 31(2): 77

- 80.

- [14] 王志军, 蒲心诚. 超高强混凝土单轴受压性能及应力应变曲线的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, (80): 27 - 33.
- [15] Hudson J. A. Grouch S. L., Fairhurst C. Soft, stiff and Servo-controlled testing machine; a review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology, 1972, 6(2): 155 - 189.