

文章编号: 1002-0268 (2005) 07-0045-04

# 聚丙烯纤维混凝土直接拉伸性能的试验研究

邓宗才<sup>1</sup>, 李建辉<sup>1</sup>, 傅智<sup>2</sup>, 刘景园<sup>1</sup>, 王齐<sup>3</sup>(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022; 2. 交通部公路科学研究所, 北京 100088;  
3. 武汉恒律公司, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 重点研究聚丙烯纤维增强混凝土在单轴直接拉伸荷载下的力学性能和纤维混凝土的单轴拉伸应力-变形全曲线。提出单轴拉伸相对应力-裂缝宽度曲线的理论方程式。由单轴拉伸全曲线得到了纤维混凝土的应力-裂缝宽度曲线、断裂能及特征长度等。试验发现: 当纤维体积掺量为0.14%时, 纤维混凝土的轴心抗拉强度比基准混凝土提高20%, 极限拉伸应变提高49%, 断裂能提高68%, 临界断裂时的最大裂缝宽度增加55%。聚丙烯纤维具有良好的阻裂性能, 增强了硬化混凝土的能量吸收能力。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 轴拉伸; 裂缝; 纤维混凝土; 应力-变形全曲线; 断裂能

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

## The Uniaxial Tension Test of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

DENG Zong-cai<sup>1</sup>, LI Jian-hui<sup>1</sup>, FU zhi<sup>2</sup>, LIU Jing-yuan<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>3</sup>(1. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;  
2. Research Institute of Highway, Ministry of Communication, Beijing 100088, China;  
3. Many Rang Development LTD. Hubei Wuhan 430034, China)

**Abstract:** Uniaxial tension test of polypropylene fiber reinforced concrete was presented in this paper. The complete stress-strain responses in tension were acquired through a systematic experimental program. Theoretical models for normalized axial stress versus normalized maximum crack width curve in uniaxial tension were proposed. The axial stress-crack width curves, fracture energy and brittleness of concrete with fiber were also obtained based on the complete stress-deformation curves. It was found that the tensile strengths of fiber reinforced concrete is about 20% higher than that of benchmark concrete when fiber volume fraction is 0.14% with extreme strain increased by 49%, the fracture energy increased by 68% and maximum crack width increased by about 55%. Polypropylene fiber reinforced concrete possesses good ductility and energy absorbability.

**Key words:** Polypropylene fiber; Uniaxial tension; Crack; Fiber reinforced concrete; Complete stress-deformation curve; Fracture energy

纤维混凝土的抗裂性能好与差的重要力学指标是极限拉应变值, 但目前尚缺少用直接拉伸实验测得的纤维混凝土的极限拉应变, 这给设计和编写规程造成困难。用直接拉伸实验测得的弹性模量是计算混凝土温度应力和收缩等引起的变形量时需要的力学指标。

测定混凝土抗拉强度、断裂能有3种方法: 直接拉伸、弯拉试验和劈裂试验。弯拉试验、劈裂试验测得的强度和断裂能离散性大。国外用狗腰形试件或用带切口试件的直接拉伸试验测定混凝土的抗拉强度、极限拉应变及断裂能。采用这两种形式试件的缺点

收稿日期: 2004-05-25

作者简介: 邓宗才 (1961-), 男, 陕西扶风人, 博士, 教授, 主要研究方向为纤维混凝土及智能结构。(dengzc@bjpu.edu.cn)

是：试件的破坏不是从试件的随机弱面发生破坏，而是在人为设计的弱面发生破坏（在试件的最小截面处或切口处），故所测得的数据不能真实反映混凝土的拉伸断裂性能。对于在试件中部预留切口的试件，由于有切口，还存在应力集中的问题。理想的方法是对等截面的棱柱体试件进行直接拉伸试验，测定拉伸性能。

纤维混凝土直接拉伸试验的目的是：（1）测定纤维混凝土抗拉强度、弹性模量、极限拉应变、断裂能、特征长度、最大裂缝宽度等基本力学指标，研究纤维掺量对拉伸力学性能的影响规律；（2）测得纤维混凝土直接拉伸软化曲线；（3）建立纤维混凝土单轴拉伸应力-裂缝张开位移的理论模型。

### 1 试验方法

混凝土配合比为：水  $170\text{kg}/\text{m}^3$ ，水泥  $360\text{kg}/\text{m}^3$ ，砂  $647\text{kg}/\text{m}^3$ ，石灰岩碎石（粒径  $5 \sim 20\text{mm}$ ） $1100\text{kg}/\text{m}^3$ 。水泥为 PO32.5 硅酸盐水泥。

聚丙烯杜拉纤维长度  $19\text{mm}$ 、直径  $48\mu\text{m}$ 。纤维掺量分别为  $0$ 、 $0.5$ 、 $0.9$ 、 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

拉伸试验模具内部尺寸为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。先将纤维、砂、石和水泥在强制式搅拌机搅拌均匀，再倒入水进行搅拌。24h 后拆模，放入标准养护室养护。拉伸试件在浇注后约 54h 用圆盘切石机切割试件的两个端部，试件两个端部各切掉约  $35\text{mm}$ 。缓慢切割，以减少试件损伤。试件切割后在标准养护室养护。在试验前 28h 将试件从养护室取出，待试件表面干燥后，用磨石机磨光端部，用丙酮擦干净。试件的两端用建筑胶粘结在实验机钢板上。

拉伸试验装置如图 1 所示。其最大荷载为  $3000\text{kN}$ 。加载按照恒位移控制，加载速率为  $2\mu\text{m}/\text{min}$ 。4 个变形引伸仪分别安置在试件的四周。数据采集及加载控制均采用计算机进行。一边加载一边观察裂缝的发生与扩展。

### 2 纤维混凝土的开裂与破坏过程

（1）试验后发现 多数纤维被拉断，表明纤维与混凝土间粘结性能良好。由于粗骨料、纤维在混凝土中分布的随机性，混凝土中初始裂缝及孔隙等原始缺陷分布的随机性，试件每一截面的实际承载力和应力分布各不相同。裂缝首先发生在最薄弱截面的最薄弱位置。随着变形的发展，大多数试件一个主裂缝的两端不断向前扩展。极少数试件的一个侧面先发生开裂，随后另一侧面产生新生裂缝，形成两个开裂面，

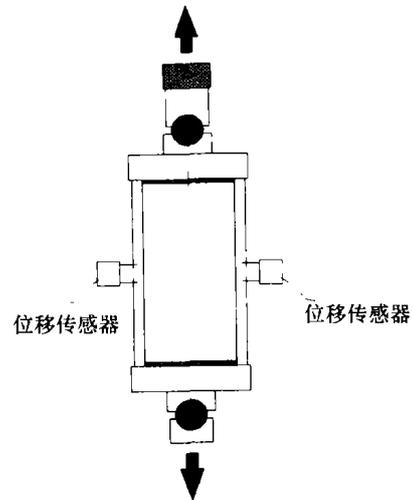


图 1 纤维混凝土轴心拉伸试验装置

各自向前扩展。试件开裂后，其几何形心与作用力不再重合，出现偏心受拉。这时裂缝的扩展过程减缓。

（2）试件的破坏位置 ①沿轴线方向：大多数破坏截面靠近试件的中部，在随机的最薄弱截面首先发生开裂破坏，如图 2 所示。有些弱面发生在离粘结钢板  $110 \sim 140\text{mm}$  的截面。②沿横截面的方向：大多数试件为先沿 1 个周边开裂，然后裂缝再向其它 3 个周边扩展。

（3）断口形态 纤维掺量少时，断口呈现高低起伏、不平整，多数骨料沿界面脱离粘结；纤维掺量高时，断口稍微变得平整，有部分粗骨料被拉断，如图 2 示。这是由于纤维掺量增加后，纤维混凝土中粗骨料与砂浆间界面粘结力明显增强造成的。

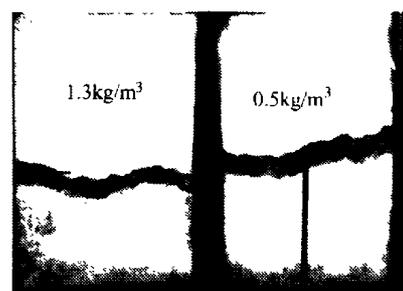


图 2 纤维混凝土轴心拉伸破坏形态图

### 3 试验结果

纤维混凝土 120d 时的抗压强度为  $36.8 \sim 42.0\text{MPa}$ 。典型的纤维混凝土轴心拉伸应力-变形全曲线如图 3 所示，轴心拉伸试验结果列于表 1。

表 1 中  $f_t$  为抗拉强度， $E_t$  为抗拉弹性模量， $G_f$  为断裂能， $w_f$  为最大裂缝宽度， $L_{ch}$  为特征长度。表 1 及图 3、图 6 中 C 代表素混凝土，D0.5、D0.9 和 D1.3 代表混凝土中纤维掺量分别为  $0.5$ 、 $0.9$ 、 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

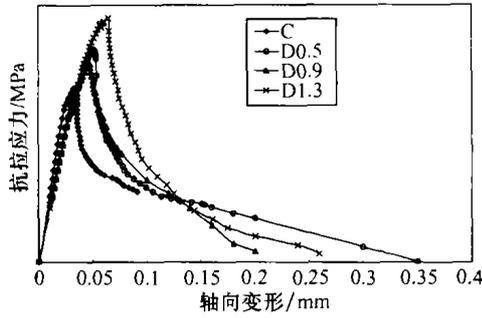


图 3 典型的纤维混凝土轴心拉伸应力-变形全曲线

表 1 聚丙烯纤维混凝土轴心拉伸性能

试件	$f_t'$ /MPa	$E_t$ /GPa	峰值应变/ $\mu\epsilon$	$W_f$ /mm	$G_F$ /N·m <sup>-1</sup>	$L_{ch}$ /mm
C-1	2.027	23.2	99	0.21	143.8	811.9
C-2	2.277	19.5	145	0.148	115	432.5
平均值	2.152	21.35	122	0.179	129.4	596.55
D0.5-1	2.323	18.7	190	0.198	121	419.3
D0.5-2	2.49	19.7	155.35	0.34	219	695.8
D0.5-3	2.46	24.1	156.9	0.21	177	704.9
平均值	2.42	20.8	167.4	0.25	172.3	611.9
D0.9-1	2.59	19.0	180.33	0.24	203.3	575.8
D0.9-2	2.32	20	144.6	0.189	170.0	631.7
D0.9-3	2.48	21	184.2	0.26	199	679.5
平均值	2.46	20	169.6	0.23	190.7	630.3
D1.3-1	2.26	23.8	160.4	0.329	226.7	1056.4
D1.3-2	2.85	20.0	196.7	0.2405	201.4	495.9
D1.3-3	2.71	21.5	189.4	0.26	224.6	535.2
平均值	2.59	21.8	182	0.277	217.3	706.1

表 2 聚丙烯纤维混凝土拉伸力学指标与基准混凝土比较

纤维掺量 /kg·m <sup>-3</sup>	抗拉强度 比值	弹模 比值	极限应 变比值	断裂能 比值	最大裂缝 宽度比值
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.5	1.1245	0.945	1.372	1.332	1.397
0.9	1.143	0.94	1.390	1.474	1.285
1.3	1.2035	1.019	1.4918	1.679	1.547

由表 2 看出, 当纤维掺量为 1.3kg/m<sup>3</sup> 时, 纤维混凝土的抗拉性能都有改善。抗拉强度比基准混凝土提高 20%, 极限拉伸应变提高 49%, 最大裂缝宽度提高 55%, 断裂能提高 68%。纤维混凝土的抗拉强度、极限拉应变、裂缝宽度和断裂能的提高, 证明聚丙烯纤维具有良好的阻裂性能, 提高了硬化混凝土的抗裂性能。纤维混凝土的特征长度比基准混凝土增加, 即纤维混凝土的脆性降低。

根据试验结果, 回归得抗拉强度、极限拉伸应变和断裂能与纤维掺量之间的数量关系。

纤维混凝土抗拉强度与纤维掺量的关系如图 4 示, 且有

$$f_t = -0.151\rho_f^2 + 0.514\rho_f + 2.1625 \quad (R_2 = 0.964) \quad (1)$$

纤维混凝土极限拉伸应变与纤维掺量的关系如图

5 示, 且有

$$\epsilon_t = -32.72\rho_f^2 + 86.98\rho_f + 122.76 \quad (R_2 = 0.978) \quad (2)$$

式中,  $\rho_f$  为纤维质量掺量, kg/m<sup>3</sup>;  $f_t$  为抗拉强度, MPa,  $\epsilon_t$  为极限拉应变,  $\mu\epsilon$ 。

纤维混凝土抗拉弹性模量与纤维掺量的关系, 经过回归发现相关性较差, 故未列出相应的回归公式。也就是说弹性模量与纤维掺量的关系需进一步研究。初步试验研究表明纤维混凝土的弹性模量比基准混凝土稍微降低, 只有掺量为 1.3kg/m<sup>3</sup> 时, 纤维混凝土弹性模量与基准混凝土相当。

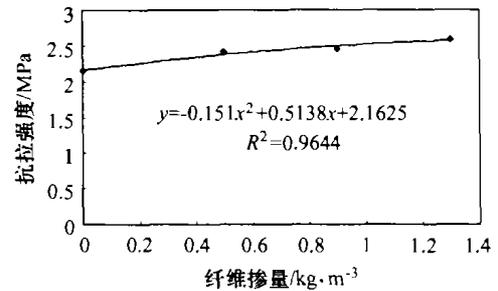


图 4 纤维混凝土抗拉强度与纤维掺量的关系

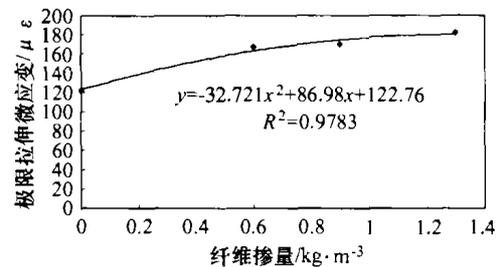


图 5 纤维混凝土极限拉伸应变与纤维掺量的关系

#### 4 纤维混凝土裂缝扩展规律的分析

纤维混凝土在拉伸过程中的总变形量  $\delta$  为

$$\delta = \delta_e + \delta_0 + w \quad (3)$$

式中,  $w$  是裂缝扩展宽度,  $\delta_e$  及  $\delta_0$  分别为变形曲线上的断裂区以外的弹性变形及剩余变形, 且有

$$\delta_e = \frac{\sigma_p l}{E_t} \quad (4)$$

$$\delta_0 = \delta_p - \delta_e \quad (5)$$

式中,  $\sigma_p$  是峰值应力;  $\delta_p$  是峰值应力对应的变形;  $E_t$  是弹性模量;  $l$  是试件长度。裂缝扩展宽度  $w$  与试件长度无关, 在最大荷载值以前无宏观裂缝。由式 (3) 求得裂缝扩展宽度为

$$w = \delta - \delta_e - \delta_0 \quad (6)$$

用式 (6) 可求得裂缝宽度, 裂缝宽度与最大裂缝宽度的比值与其相对应力的试验曲线如图 6 所示。用回归方法得到的相对应力与相对裂缝宽度关系曲线的经验公式为

$$\sigma = f'_t \left\{ 1 - \varphi \exp \left[ - \left( \frac{\lambda}{w} \right)^n \right] \right\} \quad (7)$$

式中,  $w_f$  为最大裂缝宽度;  $\lambda$ ,  $n$  及  $\varphi$  是材料参数, 与纤维掺量及混凝土组份有关。当  $\lambda = 0.105$ ,  $n = 0.687$ ,  $\varphi = 1.13$ , 用最小二乘法得理论值与试验值的相关系数为  $R^2 = 0.94$ 。可见, 理论值与试验值吻合良好。

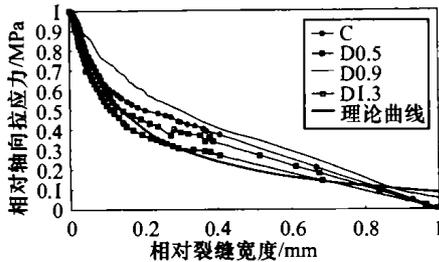


图 6 纤维混凝土相对拉应力与裂缝宽度的关系曲线

将应力为零时的裂缝宽度定义为最大裂缝宽度, 其结果列于表 1。纤维掺量增加, 最大裂缝宽度增大, 但二者间的统计相关性较差。

## 5 纤维混凝土断裂性能的分析

断裂能  $G_F$  是形成单位面积裂缝所消耗的能量, 即荷载-裂缝宽度曲线下的面积与试件横截面积的比值, 即

$$G_F = \int_0^{w_f} \sigma(w) dw \quad (8)$$

断裂能试验值列于表 1, 且绘于图 7 中。可见, 纤维掺量增加, 纤维混凝土断裂能在增加。断裂能与纤维掺量的关系为

$$G_F = -13.807\rho_f^2 + 83.79\rho_f + 130.36 \quad (R^2 = 0.993) \quad (9)$$

断裂能值充分地反映了混凝土在断裂损伤过程中消耗的能量。断裂能愈大, 纤维混凝土在断裂过程中消耗的能量愈大, 纤维的阻裂效果愈显著。当纤维掺量为  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$  时, 纤维混凝土断裂能比基准混凝土提高 68%。

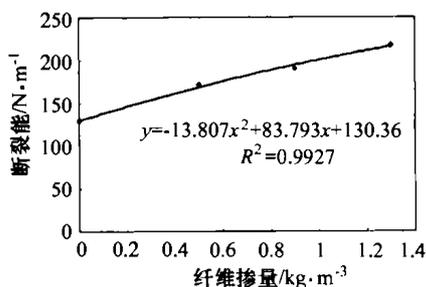


图 7 纤维混凝土断裂能与纤维掺量的关系

通常用 Hillerborg 提出的特征长度  $L_{ch}$  来表示混凝土的脆性, 且

$$L_{ch} = \frac{E_t G_F}{(f'_t)^2} \quad (10)$$

$L_{ch}$  愈小, 混凝土愈脆。特征长度列于表 1。纤维掺量增加, 混凝土的特征长度增加, 脆性降低, 韧性增加。如纤维掺量  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$  时, 纤维混凝土的特征长度比基准混凝土增加 18%, 即纤维混凝土脆性降低。

## 6 结论

(1) 试验测得了聚丙烯纤维混凝土的直接拉伸应力-变形全曲线。

(2) 纤维掺量增加, 抗拉强度及极限拉应变增加。纤维掺量为  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$  时, 纤维混凝土的抗拉强度比基准混凝土提高 20%, 极限拉应变提高 49%。纤维混凝土的抗拉强度、极限拉应变的提高, 证明聚丙烯纤维具有良好的阻裂性能, 提高了硬化混凝土的抗裂性能。

(3) 纤维掺量增加, 断裂能增大。当纤维掺量为  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$  时, 纤维混凝土的断裂能比基准混凝土提高 68%。

(4) 纤维掺量增加, 最大裂缝宽度增大。

(5) 当纤维掺量  $1.3\text{kg}/\text{m}^3$  时, 纤维混凝土的特征长度比基准混凝土增加约 18%, 纤维掺量增加, 纤维混凝土脆性降低。

## 参考文献:

- [1] Ansari, F. Stress-strain Response of Microcracked Concrete in Direct Tension [J]. ACI Material J., 1987, 84 (6): 481-490.
- [2] ASTM. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete [S]. ASTM C 78, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- [3] ASTM. Standard Test Method for Splitting Strength of Cylindrical Concrete [S]. ASTM C 496, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- [4] Wang Y J. Tensile Properties of Synthetic Fiber Reinforced Mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 1990, 12 (1): 29-40.
- [5] Valle Mariano. Behavior of Fiber Reinforced High-strength Concrete under Direct Shear [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90 (2): 127-133.
- [6] Li, Qingbin, Deng zongcai. Effect of Aggregate Type on Mechanical Behaviors of Dam Concrete [J]. ACI Materials Journal, in press. 2004, 101 (6): 483-492.