

文章编号: 1004-6410 (2000) 02-0060-05

60-64

## 聚丙烯纤维混凝土的力学性能研究

朱江, 苏健波, 李士恩

(广东工业大学 土木系, 广东 广州 510090)

**摘要:** 通过七家实验室的试验数据, 对聚丙烯纤维增强混凝土 (简称 PFRC) 的力学性能进行数值分析, 建立以普通混凝土的立方体抗压强度为基础的力学公式, 并提出 PFRC 的强度标准和设计值, 以使这种混凝土能与现行国家混凝土规范并轨。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 聚丙烯纤维增强混凝土 (PFRC); 高性能混凝土

**中图分类号:** TU528.572

**文献标识码:** A

力学性能

## 0 引言

现代混凝土的应用向着高抗压、高抗拉、大流动度方向发展, 同时要求建筑物在建造时容易施工, 并能长期保持高强、高韧性、高抗渗性等性能, 这就导致了高性能混凝土的产生, 而高性能混凝土的主要发展方向包括了改性混凝土的内容。在三大改性混凝土中以纤维混凝土为代表, 纤维混凝土把普通混凝土的脆性有效地改变过来, 在强度上主要是改善混凝土的抗拉强度, 同时提高其抗开裂性和韧性, 其中发展最为迅速的是钢纤维混凝土, 但钢纤维的造价较高, 施工中使钢纤维均匀分布在混凝土中会遇到一定的麻烦。近几年来应用化学纤维掺于混凝土以提高混凝土的抗裂、韧性和抗疲劳等性能, 已引起工程界的关注, 化学纤维中又以质优、价廉的聚丙烯纤维应用最为广泛。聚丙烯纤维能够均匀分散在混凝土中, 化学性质稳定, 施工简单, 在国际上已得到广泛的应用, 在国内的混凝土工程中也逐渐为人们接受, 并已成功应用于桥梁、路面、停车场的地坪和修补混凝土、高层建筑的特大型转换大梁及地下室地板、大型混凝土防水屋面结构以及各类水泥制品和预制构件。然而如何使聚丙烯纤维混凝土 (简称 PFRC) 的结构设计达到合理性和安全性, 已成为人们迫切关心的问题。本文以美国希尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维 (Durafibre) 为例, 根据美国<sup>[1]</sup>、日本、韩国<sup>[2,3]</sup>和中国<sup>[4]</sup>等七家试验室对 PFRC 的力学试验数据 80 个和弹性模量试验数据 14 个进行数值误差分析, 按舍弃准则进行舍弃, 建立力学性能计算式, 并按我国混凝土规范所建立的变异系数原则修正力学关系式, 从而使 PFRC 的力学性能设计指标能与现行国家混凝土规范并轨。

## 1 聚丙烯纤维混凝土的强度

## 1.1 立方体抗压强度

我国混凝土立方体抗压强度的试件标准尺寸是 15cm×15cm×15cm, 若用非此尺寸所测的试件则要考虑尺寸修正。美国的 SDSM&T 试验室所用的试件为圆柱体, 尺寸为  $\Phi 152.4\text{mm} \times 304.8\text{mm}$ , 其测得的抗压强度若要符合中国的强度标准则要考虑尺寸修正, PFRC 立方体试件与 PFRC 圆柱体试件间的尺寸修正方法与普通混凝土一样<sup>[5]</sup>。当混凝土标号  $f_{cu} \geq C20$  时, 可通过下式进行尺寸修正。

$$f_{cuP} = 5 + f'_{cuP} \quad (1)$$

式中,  $f_{cuP}$  为 PFRC 15cm×15cm×15cm 立方体抗压强度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $f'_{cuP}$  为 PFRC  $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$  圆柱体的抗压强度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )。当试件的测试抗压强度为统一标准尺寸的强度后, 可建立 PFRC 的抗压强度与普

收稿日期: 2000-01-20; 修订日期: 2000-02-22

作者简介: 朱江 (1965-), 女 (汉), 广东广州人, 广东工业大学讲师, 博士生。

普通混凝土抗压强度的关系式:

$$f_{cnp} = \eta_c f_{cn} \quad (2)$$

式中,  $f_{cn}$  为普通混凝土立方体抗压强度,  $\eta_c$  为立方体抗压强度比例系数。

现以 15. D 的聚丙烯单丝纤维为代表, 其纤维长度 19.05mm, 体积掺率  $\rho_f = 0 \sim 1.2\%$  的 40 个立方体抗压强度试验数据经舍弃原则, 弃去可疑值后可得比值  $\eta_c$  的平均值见下表 1。

表 1  $\eta_c$  平均值

$\rho_f$	0	0.5	0.67	0.75	0.78	1.0	1.2
权 $i$	11	5	4	8	1	10	1
$\eta_c$	1.000	1.041	1.066	1.034	1.061	1.068	1.040

注:  $\rho_f$  的取值为‰。

从表 1 中的  $\eta_c$  值中取  $0.5 \leq 1000 \rho_f \leq 1.0$  范围的抗压强度比值的加权平均为:  $\eta_c = 1.053$ 。由此可建立  $f_{cnp} \sim f_{cn}$  两者的关系如下:

$$f_{cnp} = \frac{\sum i \eta_c}{\sum i} f_{cn} = 1.053 f_{cn} \quad (3)$$

可见当聚丙烯纤维的体积掺率  $\rho_f$  在  $0.5 \sim 1.0\%$  范围时, PFRC 抗压强度的影响只增大了 5.3%, 因此在结构设计时, 当选用掺率  $\rho_f \leq 1\%$ , 可直接取普通混凝土的抗压强度为其设计强度。但当  $\rho_f > 1\%$  时, 则注意抗压强度在逐渐下降。

### 1.2 轴心抗压强度

轴心抗压强度在实际工程中应用得比较多, 这是因为在房屋建造中的柱子、屋架(上弦杆和腹杆), 其高度尺寸比截面尺寸要大得多, 故此用轴心抗压强度比立方体抗压强度更能反映实际的抗压情况。同时考虑到 PFRC 与普通混凝土的立方体抗压强度相差不大, PFRC 的轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系可直接用类似普通混凝土的关系式, 则 PFRC 的轴心抗压强度  $f_{cp}$  可表达为:

$$f_{cp} = 0.76 f_{cnp} \quad (4)$$

把 (3) 代入 (4) 式, 则可得 PFRC 的轴心抗压强度  $f_{cp}$  与混凝土立方体抗压强度  $f_{cn}$  的关系为:

$$f_{cp} = 0.76 \times 1.053 f_{cn} = 0.8 f_{cn} \quad (5)$$

### 1.3 弯曲抗压强度

当混凝土构件受弯和偏心受压时, 截面上的压应力分布是不均匀的。这种混凝土在非均匀受压下的强度即弯曲抗压强度。弯曲抗压强度的数值不能由试验直接测出, 参照<sup>[6]</sup>的 (2.1-10) 可建立 PFRC 的弯曲抗压  $f_{cmp}$  与轴心抗压  $f_{cp}$  的关系式:

$$f_{cmp} = 1.1 f_{cp} \quad (6)$$

把 (5) 代入 (6) 式可得 PFRC 弯曲抗压  $f_{cmp}$  与混凝土立方体抗压  $f_{cn}$  的关系:

$$f_{cmp} = 1.1 \times 0.8 f_{cn} = 0.88 f_{cn} \quad (7)$$

### 1.4 轴心抗拉强度

对于了解 PFRC 构件的受力性能, 对抗裂验算、扭矩计算、收缩应力及钢筋粘结力等的验算, 都与轴心抗拉强度有关。在混凝土工程中, 为了防止或者减少裂缝的产生, 应用聚丙烯纤维来提高抗裂性, 这是一条重要途径。

从目前大量的混凝土轴心抗拉试验表明, 直接轴心抗拉试验还没有一种较科学的方法求得混凝土的真实抗拉强度。目前由于混凝土的劈裂试验的抗拉强度已被认为可行, PFRC 也用劈裂试验值作为测定 PFRC 的轴心抗拉强度。现把收集到的 PFRC 劈裂试验的抗拉强度进行数值分析, 以便找出 PFRC 的劈裂抗拉强度与普通混凝土抗压强度的关系。

根据掺率为  $\rho_f = 0.67\% \sim 1.0\%$  的 PFRC 的劈裂试验, 其测出的劈裂强度  $f_{cp}$  与对照的普通混凝土立方体抗压强度  $f_{cn}$  数值, 经回归分析可得关系式为:

$$f_{cp} = 0.423 f_{cn}^{0.586} \quad (8)$$

## 2 聚丙烯纤维混凝土的弹性模量和疲劳变形模量

### 2.1 弹性模量

根据<sup>[1]</sup>的14种PFRC的弹性模量试验数值,选取了纤维掺率 $\rho_f = 0.67\% \sim 1.0\%$ 范围弹性模量 $E_{cP}$ 试验值,由于其抗压强度及静态弹性模量的试件尺寸都是用 $\Phi 152.4 \times 304.8\text{mm}$ ,参照中国的标准试件尺寸用(1)式进行尺寸修正。PFRC的 $E_{cP}$ 可参照普通混凝土弹性模量的计算公式写为:

$$E_{cP} = \frac{10^5}{2.2 + \frac{k_{EP}}{f_{cuP}}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (9)$$

当纤维掺率 $\rho_f \leq 1\%$ 时,根据(3)式转换值 $f_{cu}$ 代入(9)可得:

$$k_{EP} = f_{cu} \left( \frac{10^5}{E_{cP}} - 2.2 \right) \quad (10)$$

把试件测得的 $f_{cu}$ 、 $E_{cP}$ 值计算出 $k_{EP}$ 值,按舍弃原则舍去可疑值,取算术平均值,可求得 $k_{EP} = 38.3$ ,代入(9)式得:

$$E_{cP} = \frac{10^5}{2.2 + \frac{38.3}{f_{cu}}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (11)$$

把(11)式绘制于图1上,可见 $E_{cP} \sim f_{cu}$ 曲线略低于普通混凝土。

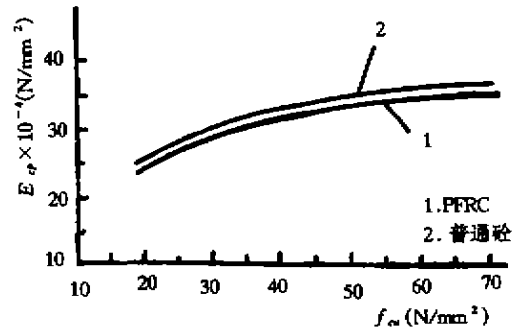


图1  $E_{cP} \sim f_{cu}$  曲线

### 2.2 疲劳变形模量

混凝土的疲劳变形模量一般用于吊车荷载作用下承载梁的结构设计中,疲劳变形模量数值约为混凝土弹性模量的43%~47%。应用PFRC进行抗弯疲劳强度试验,试样尺寸与静态弯曲试验的小梁相同,小梁抗弯疲劳试验经受200万个循环,由于该试验的工作量大,仅对 $\rho_f \leq 1\%$ 的掺量作了疲劳强度试验,根据试验资料<sup>[1]</sup>分析可得:

$$E_{cP}^f = k_f^f E_c^f \quad (12)$$

式中, $E_{cP}^f$ 为PFRC的疲劳变形模量( $\text{N/mm}^2$ ), $E_c^f$ 为普通混凝土的疲劳变形模量( $\text{N/mm}^2$ ), $k_f^f$ 为根据聚丙烯纤维体积率定的疲劳变形系数(见表2)。

表2 疲劳变形系数 $k_f^f$

$\rho_f \%$	0.5	0.67	0.70	0.8	0.9	1.0
$k_f^f$	1.045	1.062	1.070	1.090	1.120	1.154

## 3 聚丙烯纤维混凝土强度标准值与设计值

### 3.1 PFRC强度标准值

PFRC强度标准是以普通混凝土的强度标准为依据,以建立的立方体抗压强度标准值即混凝土强度等级为标准。参考混凝土强度标准<sup>[6]</sup>,考虑到PFRC结构在制造、养护及其它客观因素的影响,以及结构强度与试件强度之间的差异,试件的强度修正系数取为0.88,则当 $\rho_f \leq 1\%$ 时PFRC结构中的轴心抗压强度平均值 $f_{cP}$ 和轴心抗拉强度 $f_{tP}$ 分别取(5)式和(8)式进行修正:

$$f_{cP} = 0.88 \times 0.8 f_{cu} = 0.7 f_{cu} \quad (13)$$

$$f_{tP} = 0.88 \times 0.423 f_{cu}^{0.586} = 0.372 f_{cu}^{0.586} \quad (14)$$

考虑到PFRC的轴心抗压强度的变异系数 $\delta_{f_{cP}}$ 、轴心抗拉强度的变异系数 $\delta_{f_{tP}}$ 与混凝土立方体抗压强度的变异系数 $\delta_{f_{cu}}$ 相等,则PFRC轴心抗压强度标准值 $f_{cPk}$ 和轴心抗拉强度标准值 $f_{tPk}$ 可表达为:

$$f_{cPK} = f_{cP}(1 - 1.645\delta_{f_{cP}}) = 0.7f_{cu}(1 - 1.645\delta_{f_{cP}}) = 0.7 \frac{f_{cuK}}{(1 - 1.645\delta_{f_{cu}})}(1 - 1.645\delta_{f_{cP}})$$

$$f_{f_{cPK}} = f_{f_{cP}}(1 - 1.645\delta_{f_{f_{cP}}}) = 0.372f_{cu}^{0.586}(1 - 1.645\delta_{f_{f_{cP}}}) = 0.372 \left( \frac{f_{cuK}}{1 - 1.645\delta_{f_{cu}}} \right)^{0.586}(1 - 1.645\delta_{f_{f_{cP}}})$$

令  $\delta_{f_{cP}} = \delta_{f_{f_{cP}}} = \delta_{f_{cu}}$ , 则以上两式最后表示为:

$$f_{cPK} = 0.7f_{cuK} \quad (15)$$

$$f_{f_{cPK}} = 0.372f_{cuK}^{0.586}(1 - 1.645\delta_{f_{cu}})^{0.414} \quad (16)$$

式中,  $f_{cuK}$  为混凝土立方体抗压强度标准值 ( $N/mm^2$ )。

此外, PFRC 弯曲抗压强度标准值  $f_{cmPK} = 0.88f_{cuK}$ , 按以上方法所得的 PFRC 强度标准值见表 3。

### 3.2 PFRC 强度设计值

PFRC 的强度设计值参照普通混凝土强度设计值确定方法, 即将强度标准值除以材料分项系数  $\gamma_c = 1.35$ 。PFRC 强度设计值见表 3。

### 3.3 PFRC 的弹性模量

根据(11)式所求得的 PFRC 弹性模量与混凝土强度等级建立关系, 并取整数后可得设计用的 PFRC 弹性模量  $E_{c,P}$  值, 见表 4。

### 3.4 PFRC 疲劳变形模量设计值

PFRC 疲劳变形模量设计值随着聚丙烯纤维的掺率不同而产生较大的变化, 因而可根据不同的纤维掺率  $\rho_f$  用(12)式及表 2 的数值计算得到相应的 PFRC 疲劳变形模量  $E_{c,P}^f$  设计值。现把具有代表性的纤维掺率计得的疲劳变形模量列于表 5。

表 3 PFRC 强度标准值和设计值 ( $N/mm^2$ )

项目	符号	混凝土强度等级										
		C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70
轴心抗压	$f_{cPK}$	14	17.5	21	24.5	28	31.3	35	38.5	42	45.5	49
	$f_{cPS}$	10.5	13	15.5	18	20.5	23	26	28.5	31	33.5	36
弯曲抗压	$f_{cmPK}$	17.5	22	26	30.5	35	39.5	44	48	52.5	57	61.5
	$f_{cmPS}$	13	16	19.5	23	26	29	32.5	36	39	42	45.5
抗拉	$f_{tPK}$	1.85	2.15	2.45	2.70	2.95	3.15	3.40	3.60	3.80	4.00	4.20
	$f_{tPS}$	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.35	2.50	2.65	2.80	2.95	3.10

注: 表 3 中的数值脚标为“K”的强度值指强度标准值, 脚标为“S”的强度值指强度设计值。

表 4 PFRC 的弹性模量  $E_{c,P}$  ( $N/mm^2$ )

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70
$E_{c,P} \times 10^{-4}$	2.45	2.70	2.90	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.50	3.55	3.60

表 5 PFRC 的疲劳变形模量  $E_{c,P}^f \times 10^{-4}$  ( $N/mm^2$ )

纤维掺率 $\rho_f$ (%)	混凝土强度等级										
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70
0.67	1.15	1.25	1.35	1.50	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90
0.8	1.20	1.30	1.40	1.55	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95
1.0	1.25	1.35	1.50	1.60	1.70	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.10

注: 用非表列的纤维掺率  $\rho_f$  时, 可用相邻两点表列数值按直线内插法求得。

## 4 结束语

(1) 当聚丙烯纤维掺率  $\rho_f \leq 1\%$  时, PFRC 的立方体抗压强度、弯曲抗压强度与钢纤维混凝土相类似, 没有明显提高, 劈裂抗拉强度提高也不大, 比钢纤维混凝土还要低些。当纤维掺率  $\rho_f > 1\%$  时, PFRC 比普通混凝土的力学性能还要低, 但钢纤维混凝土强度是随着纤维掺率增大而增大的。

(2) PFRC 的静力弹性模量低于普通混凝土, 当聚丙烯纤维掺率在  $0.5\% \leq \rho_f \leq 1\%$  范围时, 纤维掺量的变化对静力弹性模量没有太大的影响, 但对疲劳变形模量则随着掺率增大而增大, 说明对动力荷载作用下的结构物, 聚丙烯纤维能发挥更大的效果。弹性模量低、抗疲劳强度高的 PFRC 是一种优良的路面结构材料。

(3) 聚丙烯纤维在高性能混凝土中起到施工容易、增强、增韧、抗裂等作用, 但对抗拉强度的增强作用不够明显, 若能与钢纤维复合在混凝土中, 则可达到力学性能稳定、抗拉强度提高的重要作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Prasad Nunna, V. Ramakreshnan, Jim D. Speakman, " Performance Characteristics of Polypropylene (Monofilament) Fiber Reinforced Concrete" Paper presented at the Session No. 14, " Recent Developments in Fiber Reinforced Concrete, Part 1"
- [2] 戴建国等. 低弹性模量纤维混凝土剩余弯曲强度的力学意义 [J]. 混凝土与水泥制品, 1999, (1): 35~38.
- [3] 王立伍. 聚丙烯纤维对混凝土性能的影响和工程应用 [A]. 程庆国. 全国第七届纤维水泥与纤维混凝土学术会议论文集 [C]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. 14~19.
- [4] 国家建筑材料测试中心检测报告. 杜拉纤维对混凝土性能的影响 [R]. 1997.
- [5] JTJ 053-83. 公路工程水泥混凝土试验规程. (中华人民共和国交通部) [S]. 1990. 103.
- [6] 沈在康. 混凝土结构设计应用评讲 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1993

## A study of the mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete

ZHU Jiang, SU Jian-bo, LI Shi-en

(Dept. of Civil Engineering, GDUT, Guangdong Guangzhou 510090, China)

**Abstract:** In this paper, mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete (Abbr. PFRC) are analyzed according to the data of experiments given by seven labs. The mechanical formulas based on cube compressive strength of ordinary concrete are established. Finally, the strength standard and design values are presented.

**Key word:** polypropylene fiber; polypropylene fiber reinforced concrete (PFRC); high performance concrete