

文章编号: 1671-5314(2002)03-0085-05

# 聚丙烯纤维对混凝土性能影响的试验研究

陈宇峰, 陆晓燕

(南通工学院 建筑工程系, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 文章研究了经过膨化和未经膨化的聚丙烯纤维对混凝土的掺杂效应。通过对掺入混凝土的聚丙烯纤维进行物理、化学、力学等方面的性能测试, 分析了聚丙烯纤维掺入混凝土的可行性; 通过对掺杂聚丙烯纤维混凝土进行力学性能的测试, 研究了掺入纤维后混凝土性能的改变情况及其原因, 进而结合试验结果分析影响掺杂效果的主要因素, 提出聚丙烯纤维掺量的临界值。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 膨化; 纤维掺杂混凝土

**中图分类号:** TU528

**文献标识码:** A

## Experimental Studies on the Effect of Polypropylene Fiber on the Performance of Concrete

CHEN Yu - feng, LU Xiao - yan

(Nantong Institute of Technology, Nantong 226007, China)

**Abstract:** The article synthetically researches the intermingle impact of expanded polypropylene fiber and unexpanded polypropylene fiber. By the physical, chemical, and mechanical performance testing of polypropylene fiber, the feasibility of fiber concrete is researched. By the mechanical performance's testing of polypropylene - fiber - reinforced - concrete, the concrete performance's alterant instance and its reasons after fiber mingling are researched. Then by combing experimental results, the paper analyzes the main factors that affect mingling and brings forward the critical value of fiber mingling quantity.

**Key words:** polypropylene fiber; expansion; fiber mingling concrete

## 0 引言

混凝土自问世以来, 以其低廉的价格、优良的力学性能及耐久性能已经成为用量最大的一种建筑材料, 但由于混凝土存在着比强度小及抗劈裂、抗拉强度较差等缺点, 故其使用范围受到了较大的限制。上世纪八十年代以来, 纤维掺杂混凝土在国外得到了广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。纤维掺杂混凝土是一种新兴的建筑材料, 它是通过将低模量、大变形的柔性纤维掺入混凝土中, 较大程度地改善混凝土的收缩性、耐久性以及抗冲击、抗疲劳性能。目前我国关于合成纤维混凝土的研究和应用相对较小, 通过对纤维表面进行特殊处理, 可以改善混凝土和纤维的粘接效果, 这种材料在大连地区多项立交桥路面工程的使用过程中, 均取得了较好的效果。

### 1 聚丙烯纤维的材料特性

我们采用的聚丙烯纤维长度为 16 mm, 长径比为 25.6。纤维的材料性能如表 1 所示。

### 2 聚丙烯混凝土的性能

**基金项目:** 南通工学院自然科学基金项目(98011)

**作者简介:** 陈宇峰(1974-), 男, 江苏通州人, 南通工学院建筑工程系助教, 在读硕士。

表1 聚丙烯纤维的性能特征参数

密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.85	熔点( $^{\circ}\text{C}$ )	163
颜色	淡黄色	弹性模量(GPa)	4.15
直径( $\mu\text{m}$ )	62.5	着火点( $^{\circ}\text{C}$ )	590
抗拉强度(MPa)	600	耐酸碱性	很好
断裂应变	70%	分散性	很好

## 2.1 原材料

- 1) 聚丙烯纤维: 江苏南通市合成纤维厂, 试验体积含量在 0~1.4% 之间, 形态分为膨化和不膨化两种。
- 2) 水泥: 华新牌 425# 硅酸盐水泥, 密度  $3.08 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 南通市华新水泥厂。
- 3) 河砂: 含泥量 3% 以下、含水率 2.5% 以下的中砂, 细度模数  $\mu_f = 2.71$ 。
- 4) 碎石: 最大粒径  $D_{\max} = 20 \text{ mm}$ 。

## 2.2 配合比

混凝土配合比, 水泥用量  $C = 335 \text{ Kg}$ , 掺入纤维后混凝土配合比如表 2 所示。

## 2.3 试件成型方式

由于聚丙烯纤维比表面积比较大, 因此如果按照普通混凝土的成型步骤操作, 极易造成纤维聚集成团, 从而导致纤维混凝土的整体性较差, 影响混凝土的力学性能和耐久性能。

经过实际操作, 将拌和顺序调整为:

- a) 将纤维与砂拌合 2~3 min;
- b) 加入约一半的水拌合 2~3 min;
- c) 加入水泥拌合约 2 min;
- d) 加入碎石拌合均匀后加入剩余的水, 拌合 3~5 min 后入模。
- e) 震捣时将捣棒由四周逐渐向中央震捣 50~60 次, 手工震动试模 15 次后抹平成型。

表2 混凝土配合比

混凝土种类	试件编号	配合比(C:S:C:W)	PP掺量(%)	WP掺量(%)
素混凝土	S-1	1:1.95:3.52:0.49	0	0
纤维混凝土	P-1	1:1.95:3.52:0.49	0.4	0
	P-2	1:1.95:3.52:0.49	0.6	0
	P-3	1:1.95:3.52:0.49	0.8	0
	P-5	1:1.95:3.52:0.49	1.2	0
	P-6	1:1.95:3.52:0.49	1.4	0
	W-1	1:1.95:3.52:0.49	0	0.4
	W-2	1:1.95:3.52:0.49	0	0.6
	W-3	1:1.95:3.52:0.49	0	0.8
	W-4	1:1.95:3.52:0.49	0	1.0
	W-5	1:1.95:3.52:0.49	0	1.2
	W-6	1:1.95:3.52:0.49	0	1.4

表中:C指水泥用量;S指砂的用量;C指石子的用量;W指水的用量;S-1中的S表示素混凝土;PP指膨化后的聚丙烯纤维;WP指未膨化的聚丙烯纤维。

## 2.4 试件的尺寸及养护

每种试件制成 1 组 3 块, 将制成试件置于  $20^{\circ}\text{C}$  的水中养护 24 h 后脱模, 再置于沸煮箱中以  $80^{\circ}\text{C}$  保持 12 h, 室温冷却 1 h 后进行性能测试。采用加温的方法能加速水泥的水化过程, 从而使混凝土能更快达到它的评定强度。抗压试件和劈裂抗拉试件均采用  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的立方体试模; 弹性模量试验的试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ; 按现行国家标准规定的方式进行力学性能检测。

## 2.5 聚丙烯纤维混凝土的和易性

图1为不同体积含量聚丙烯纤维混凝土的和易性变化曲线。可以看出,纤维体积分量的增加可明显导致混凝土流动性的下降;当纤维掺入量为0.8%以下时,不同纤维含量混凝土的和易性和纤维的分散性较好,混凝土中没有纤维成束或成团现象,纤维在搅拌过程中自动均匀分布于混凝土中。当纤维掺入量超过0.8%时,混凝土中纤维没有出现成团现象,但混凝土中较多的纤维会出现成束现象,且搅拌器具上会出现大量纤维,这将不利于施工质量的有效控制以及后期混凝土强度、耐久性的保证。

纤维体积率较低时,尽管混凝土坍落度变小,但在强制震动的条件下,纤维混凝土的流动性能与素混凝土相当。这说明聚丙烯纤维混凝土对震动的反应较为灵敏,实际施工中可忽略由于掺入纤维而造成的混凝土少量坍落度下降的不利影响或可掺入少量减水剂进行调整。

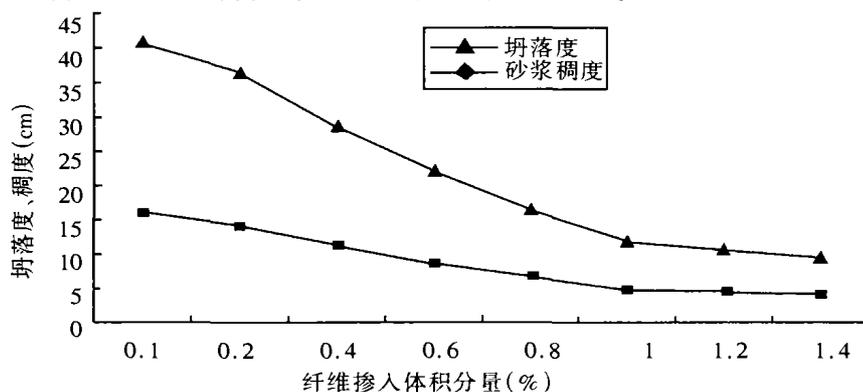


图1 混凝土和易性随纤维掺量变化

## 2.6 聚丙烯纤维混凝土的力学性能

表3、表4给出了聚丙烯纤维含量对混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量以及泊松比的试验结果,表中数据均为试块试验值乘以相应的系数后的平均值。

表3 纤维增强混凝土强度试验结果

试样编号	$f_c$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	试样编号	$f_c$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	试样编号	$f_c$ (MPa)	$f_m$ (MPa)
P-1-1	29.3	2.40	P-5-2	28.2	3.15	W-2-3	31.0	2.55
P-1-2	29.2	2.42	P-5-3	29.0	3.20	W-3-1	32.5	2.70
P-1-3	28.9	2.33	P-6-1	27.4	3.25	W-3-2	33.1	2.68
P-2-1	31.0	2.48	P-6-2	27.5	3.38	W-3-3	32.5	2.68
P-2-2	30.6	2.50	P-6-3	27.5	3.25	W-4-1	31.2	2.85
P-2-3	31.1	2.55	S-1-1	27.3	2.15	W-4-2	30.6	2.86
P-3-1	32.0	2.71	S-1-2	26.9	2.20	W-4-3	31.0	2.80
P-3-2	32.3	2.69	S-1-3	27.5	2.11	W-5-1	29.4	3.20
P-3-3	32.2	2.77	W-1-1	29.1	2.40	W-5-2	29.0	3.18
P-4-1	30.5	2.94	W-1-2	30.0	2.41	W-5-3	28.6	3.25
P-4-2	29.7	2.89	W-1-3	29.1	2.35	W-6-1	25.6	3.42
P-4-3	29.8	2.86	W-2-1	31.0	2.51	W-6-2	26.1	3.50
P-5-1	28.8	3.11	W-2-2	31.0	2.55	W-6-3	25.7	3.46

表4 聚丙烯纤维混凝土的弹性模量和泊松比

纤维掺入量 (%)		0	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
弹性模量 ( $10^4$ MPa)	本文	3.73	3.34	3.25	3.14	3.00	2.85	2.60
	文献[3]	2.84	2.56	2.36	-	1.52	-	-
泊松比		0.164	0.192	0.192	0.194	0.198	0.198	0.199

图 2 表明,随着纤维掺入量的不断增加,混凝土的抗压强度呈现出明显的先升后降的趋势,在纤维掺入量为 0.8% 时达到最高点,此时抗压强度比素混凝土提高 18.12% ~ 20.12%。当纤维掺入量超过 0.8% 时,混凝土有较明显的强度下降,从其曲线的变化趋势来看,当纤维掺入量超过 1.4% 后,其抗压强度会低于素混凝土。

表 4 说明,纤维混凝土的弹性模量  $E_c$  随纤维掺入量增加而下降,泊松比随纤维掺入量增加而增加。其中文献[1]的数据为 C20 的混凝土(纤维长度 35 mm,潮湿环境养护),显然基体强度越低,纤维掺入量对混凝土复合材料的弹性模量  $E_c$  影响越显著。泊松比的变化则表明,相同荷载作用下,纤维掺入量增大时混凝土体积变形能力增加,这对混凝土的耗能能力的提高是有利的。

根据复合材料混合定律,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度和弹性模量表达式<sup>[2]</sup>为:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = l + KV_f \left( \frac{E_f}{E_m} - l \right) \quad (1)$$

$$E_c = k E_f V_f + E_m (l - k V_f) \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为抗压强度,  $l$  为纤维长度,  $E$  为弹性模量,  $V_f$  为纤维掺入量,  $k$  为纤维分布方向因子(当纤维在混凝土中三维乱向分布时,可取为 1/6),下标  $f$ 、 $m$ 、 $c$  分别表示纤维、混凝土基体、纤维混凝土复合材料。

将  $E_f = 4.15 \text{ GPa}$ ,  $E_m = 30 \text{ GPa}$ ,  $k = 1/6$  代入(2)式,可以得知,当纤维体积含量在 0.2% ~ 1.4% 范围时,  $kV_f \rightarrow 0$ ,  $\sigma_c \approx \sigma_m$ ,  $E_c \approx E_m$ ,即从理论上讲,聚丙烯纤维混凝土和混凝土的抗压强度和弹性模量差异很小,纤维的掺入将对混凝土的强度起略微降低的作用。当混凝土中加入少量的纤维时,可改善混凝土的微观结构,减少混凝土的初始裂缝,从而提高混凝土的抗压强度;当纤维含量过高时,纤维对混凝土的致密性产生不利影响,可使混凝土的抗压强度和弹性模量都出现下降。所以在实际使用过程中应控制纤维掺入量在 0.8% 以下。

同时我们发现,随着纤维掺入量的增加,混凝土的劈裂抗拉强度有不断提高的趋势(见图 3),在纤维掺入量为 1.4% 时,其抗拉强度比素混凝土提高了约 52.94% ~ 60.68%。这主要是由于混凝土抗拉实验时,受拉区混凝土在开裂过程中,纤维起到一定的延性作用;弯曲韧性和剩余弯曲强度一直随纤维掺入量增加而增高,这说明少量的纤维对混凝土的延性有一定的改善作用。按混凝土最小配筋率方法推导出聚丙烯纤维混凝土的临界抗弯纤维掺入量公式<sup>[2]</sup>为:

$$V_{fc} = 0.82 \frac{f_t}{\tau} \cdot \frac{l}{l/d} \quad (3)$$

式中:  $V_{fc}$  为纤维抗弯临界掺入量,  $\tau$  为纤维与基体的黏结滑移强度,  $l/d$  为纤维的长径比。纤维长度为 16 mm,纤维直径取  $62.5 \mu\text{m}$ ,  $\tau$  取 1.4 MPa,  $f_t$  近似取混凝土基体强度,根据此公式计算的纤维临界掺入量约为 0.8%,与实验曲线推测的值吻合。

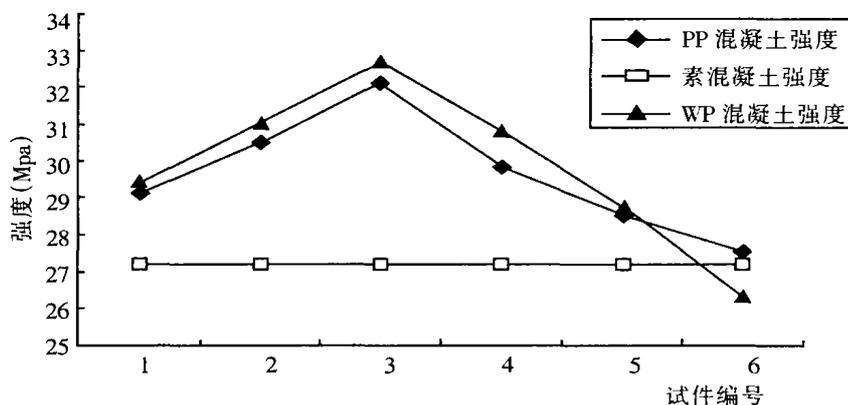


图 2 抗压强度

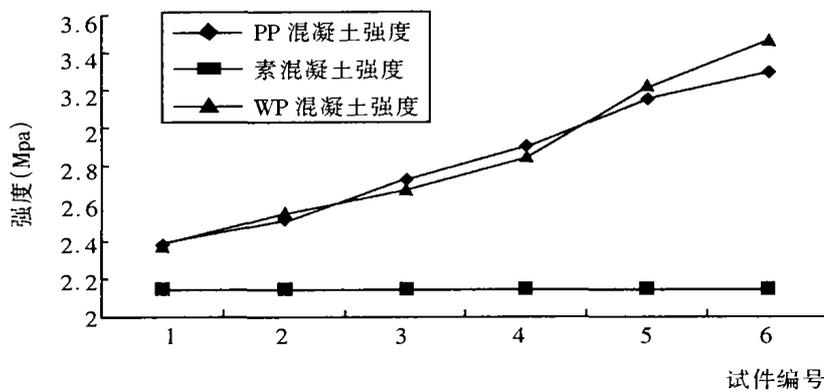


图3 抗拉强度

混凝土由于其抗拉强度仅为其抗压强度的十分之一,故单纯地通过掺加纤维来达到大幅度提高混凝土构件的抗拉强度,并将混凝土直接作为受拉构件承担轴向拉力的想法是不现实的;采用纤维掺杂混凝土的重要意义在于纤维改善了混凝土构件的抗弯强度,从而拓展了大跨度混凝土构件的使用范围。

### 3 影响纤维掺杂效果的主要因素

通过试验,我们发现影响纤维掺杂效果的主要因素有以下几方面:

- 1) 纤维表面特征:膨胀后的纤维表面积较大,与混凝土的黏接力较大,可提高混凝土的抗裂性能,但由于膨化后强度较低,影响混凝土的整体强度。
- 2) 施工情况:纤维的表面积较大,易于相互吸附成束、成团,影响其在混凝土中的均匀分布,进而影响混凝土的整体性、强度、耐久性,故在实际施工中应注意加强搅拌或加入表面活性剂以促使纤维分散。
- 3) 纤维的本身特性:聚合度较低的聚丙烯纤维强度较小,延性较好,能有效地提高混凝土的抗弯性能,但对混凝土的抗压强度损耗加大;聚合度较高的聚丙烯纤维强度较大,对混凝土的强度有较大的贡献。
- 4) 工作环境:在大体积混凝土中掺加聚丙烯纤维应注意水泥的水化热问题。由于聚丙烯纤维的熔点较低,在混凝土内部较高温度下易产生强度下降甚至软化等问题,从而影响掺杂效果。

### 4 结论

纤维掺杂混凝土具有比强度较高、抗拉强度较高的特点,有效地改善了混凝土的一些不足之处,可广泛地应用于大跨度混凝土结构、高强度混凝土结构等重要结构工程。

- 1) 少量的聚丙烯纤维加入混凝土,当纤维掺入量控制在 0.8% 以下时,无需对混凝土施工过程提出特殊要求。
- 2) 聚丙烯纤维在纤维掺入量控制在 0.8% 以下时,可在一定程度上改善混凝土的力学性能,特别对于混凝土的抗弯强度有较大的贡献。
- 3) 聚丙烯纤维存在着长期老化的问题,应作进一步的研究。
- 4) 掺杂聚丙烯纤维对混凝土的抗弯强度的影响应作进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 达达尔 J. 在聚丙烯纤维混凝土力学性能研究中做出的一点贡献[A]. 法国预制混凝土制品研究中心:RILEM Symposium [C], 1975.
- [2] 关掷铎,张中太,焦金生. 无机材料物理性能[M]. 北京:清华大学出版社,1992.