

# 网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究

⑪  
35-38

TU528.572

戴建国 黄承逵  
(大连理工大学土木系 116023)

**摘要:** 介绍短切网状聚丙烯纤维混凝土的施工性能, 抗压、抗弯性能, 韧性, 抗渗性、热老化稳定性以及塑性收缩性的试验结果。

**关键词:** 聚丙烯纤维 力学特性 塑性收缩 抗渗性 混凝土

**Abstract:** It is introduced to properties of short net-typed polypropylene fiber reinforced concrete in this paper, such as workability, compressive and flexural strength, toughness, impermeability, earlyage plastic shrinkage and stability in high temperature.

**Key words:** Polypropylene fiber, Mechanical properties, Plastic shrinkage, Impermeability

## 0 引言

本世纪八十年代以来, 合成纤维混凝土在国外得到了广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。少量短切合成纤维加入混凝土后, 即可较大幅度改善混凝土的收缩性能、耐久性以及抗冲击、疲劳韧性。我国关于合成纤维混凝土研究和应用还相对较少, 合成纤维与混凝土的粘结力较低在一定程度上限制了合成纤维混凝土的应用。韩国 S.S 产业株式会社在引进美国 FIBERMESH 公司技术的基础上, 生产了短切的聚丙烯纤维网, 这种产品对纤维的表面进行了特殊处理, 提高了混凝土和纤维的粘结效果。这种材料近几年在大连地区十几个立交桥路面工程的使用过程中, 取得了良好的效果。本文介绍这种网状聚丙烯纤维混凝土特性的试验结果。

### 1 聚丙烯纤维网的材料特性

工程中常用的短切聚丙烯纤维网长度为 19mm (如图 1), 纤维的材料性能如表 1 所示。

表 1 聚丙烯纤维的材料特性

密度	0.9	熔点(℃)	162
颜色	无色	弹性模量(MPa)	3500
吸水率	0	耐酸碱性	很好
抗拉强度(MPa)	350~770	分散性	良好
着火点(℃)	590	安全性(对人体)	良好

注: 数据取自韩国 S.S. 产业株式会社的产品说明书。

### 2 聚丙烯纤维混凝土的性能



图 1 网状聚丙烯纤维束

#### 2.1 原材料及试件制作

大连第一水泥厂产普通 425 号硅酸盐水泥, 水灰比 0.48, 水泥: 砂: 石 = 420kg: 692kg: 1082kg; 聚丙烯纤维的试验体积含量在 0~1.0% 之间, 纤维长度为 19mm、30mm 两种, 形态为单丝、网型; 石子的最大粒径为 20mm, 采用含泥量 3% 以下、含水率 5% 的中砂。

搅拌方法如下:

①先加入骨料和 1/3 水于强制式搅拌机中搅拌 3 分钟左右;

②加入水泥和剩余的水, 搅拌 3 分钟以上, 便于纤维疏散;

③慢慢撒入纤维, 纤维不要撒在容器内壁上;

④纤维撒完后, 继续搅拌 3~5 分钟, 使纤维进一步疏散。

试件尺寸: 抗压强度为 10×10×10(cm); 弹性模量及抗韧性试验试件为 10×10×30(cm); 抗折强度及韧性试件尺寸为 10×10×40(cm); 塑性收缩试件为 90×60×4(cm); 抗渗试件为标准尺寸。

#### 2.2 聚丙烯纤维混凝土的施工性能

图 2 为不同体积含量聚丙烯纤维混凝土的坍落度

变化曲线,可以看出,纤维体积分含量的增加导致混凝土流动性下降;相同纤维体积分含量下,30mm的聚丙烯纤维混凝土流动性比19mm的低;而相同含量的单丝、网型纤维混凝土流动性则差别不大。当纤维体积分含量为0.2%以下时,不同纤维含量混凝土的和易性和纤维的分散性均较好,混凝土中没有纤维成束和成团的现象,纤维在强制搅拌过程中自动均匀分布于混凝土中。网型纤维经搅拌后自动分散成两头带钩形的单丝型纤维,图3为纤维体积分含量0.1%时,硬化混凝土中纤维的分布形态<sup>[2]</sup>。从照片中可以看出:纤维两端呈半S型弯曲,增加了与混凝土的粘结力,这种分布形态是由纤维直径决定的,纤维太粗则不易弯曲,纤维太细则自身容易弯曲成团,不易分散。当纤维体积分含量为0.2%以上时,虽然混凝土中纤维没有成团现象,但是较多的纤维会吸附在搅拌叶片上,人工搅拌时纤维很难均匀分布,经常出现成束现象。

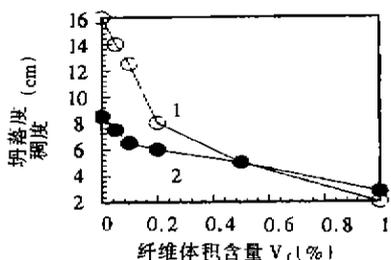


图2 混凝土坍落度随纤维含量的变化  
1—混凝土坍落度; 2—砂浆稠度(锥入度)

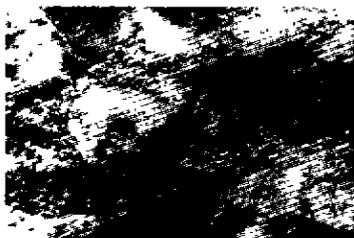


图3 硬化混凝土中的聚丙烯纤维

纤维体积分率较低时,尽管混凝土坍落度变小,但振动条件下,纤维混凝土的流动性和素混凝土相当。这说明聚丙烯纤维混合物对振动的反应十分灵敏,实际施工中可忽略纤维造成混凝土少量坍落度下降的不利影响。

### 2.3 聚丙烯纤维混凝土的塑性收缩

由于纤维弹性模量较低,不能起到类似钢纤维的骨架作用,聚丙烯纤维对混凝土的自由收缩特性影响并不明显。本文用周边具有约束的板型试件来模拟混

凝土的实际工程环境,在风扇进行强干燥的情况下,研究了0~0.2%纤维体积分含量的混凝土的塑性收缩性能,试验结果如图4、图5所示。

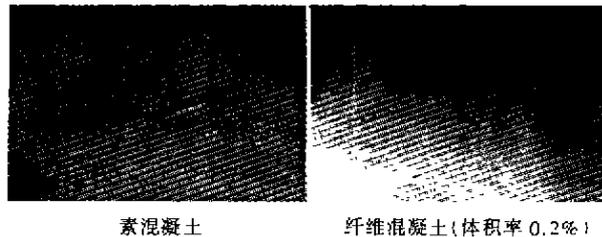


图4 素混凝土和聚丙烯纤维混凝土的早期塑性收缩裂缝对比

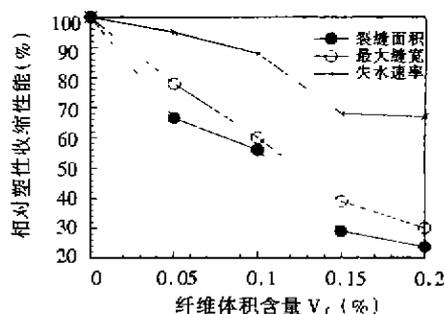


图5 纤维体积分含量对混凝土塑性收缩裂缝面积最大缝宽、失水速率的影响

试验结果表明:较低含量的聚丙烯纤维由于分布均匀,起到了类似筛网的作用,减缓了粗粒料的快速下沉和游离水的上升,降低了混凝土失水速率,防止混凝土快速失水产生裂缝,延缓了第一条塑性收缩裂缝出现的时间;同时,在混凝土开裂后,纤维的抗拉作用阻止了裂缝的进一步发展,使裂缝变成多而窄的多发形态。体积分含量相同时,纤维长度和纤维形态对混凝土的塑性收缩性能影响较小。

### 2.4 聚丙烯纤维混凝土的力学性能

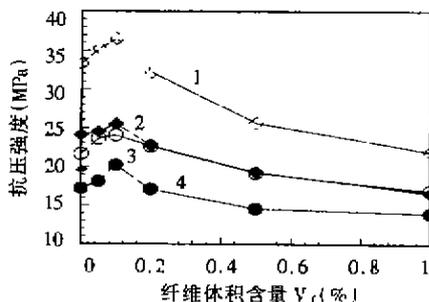


图6 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度

1—混凝土 28d 强度; 2—混凝土 7d 强度;  
3—砂浆 28d 强度; 4—砂浆 7d 强度

## 2.4.1 抗压强度及弹性模量

图6、图7给出了聚丙烯纤维含量对混凝土抗压强度和压缩韧性的影响,表2为聚丙烯纤维混凝土弹性模量和泊松比的试验结果。

表2 聚丙烯纤维混凝土的弹性模量和泊松比

纤维体积含量 $V_f$ (%)		0	0.1	0.2	0.5	0.6	1.0
弹模 ( $10^4$ MPa)	本文	3.73	3.72	3.43	3.36	-	3.01
	文献[3]	2.84	-	2.56	-	2.36	1.52
泊松比		0.165	0.181	0.197	0.196	-	0.199

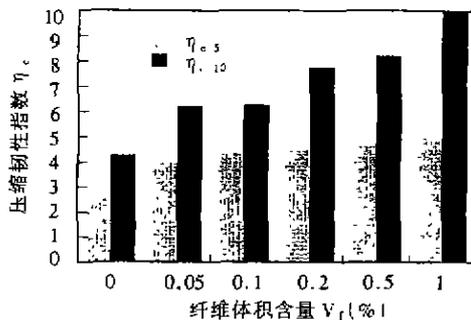


图7 聚丙烯纤维混凝土的抗压韧性

图6表明,  $V_f$  为0.1%时, 纤维混凝土抗压强度  $\sigma_c$  (峰值强度) 较素混凝土强度  $\sigma_m$  提高了15%左右, 而随  $V_f$  继续增加,  $\sigma_c$  呈下降趋势,  $V_f$  较高(0.5%)时,  $\sigma_c < \sigma_m$ 。图7则说明纤维混凝土的抗压韧性随  $V_f$  增加而一直呈上升趋势。比较聚丙烯纤维混凝土和砂浆的28天和7天强度还可以发现, 随纤维含量的增高, 纤维混凝土的7天强度和28天强度的差值逐渐减小, 该趋势和文献[3]中“高含量(2%体积率以上)的聚丙烯纤维混凝土28天强度略低于7天强度”的结论相符。

表2说明: 纤维混凝土的弹性模量  $E_c$  随  $V_f$  增加而下降, 泊松比随  $V_f$  增加而增加。其中文献[3]的一组数据为C20级混凝土(纤维长度35mm, 潮湿环境养护), 显然, 基体的强度越低, 纤维含量对混凝土复合材料的弹性模量影响越显著。泊松比值的变化则表明, 相同外压荷载作用下, 聚丙烯加入混凝土后使体积变形能力增加, 这对混凝土结构的耗能能力提高是有利的。

试验研究了当  $V_f$  为0.05%、0.1%、0.5%时, 纤维形状和长度对抗压性能的影响, 结果表明网型纤维混凝土的抗压强度和韧性均略高于单丝型纤维, 而纤维

长度由19mm增加到30mm则导致纤维混凝土抗压强度下降10%左右。

根据复合材料混合定律<sup>[4]</sup>, 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度和弹性模量表达式为:

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

$$E_c = kE_f V_f + E_m (1 - kV_f) \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为抗压强度,  $E$  为弹性模量,  $V_f$  为纤维体积含量,  $k$  为纤维分布方向因子(当纤维在混凝土中三维乱向分布, 可取值为  $1/6$ <sup>[6]</sup>), 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  $E_f = 3.5\text{GPa}$ ,  $E_m = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $k = 1/6$  代入上式, 可以得知: 当纤维体积含量在0.1%~1%范围时,  $kV_f \rightarrow 0$ ,  $E_c \approx E_m$ 。即理论上讲, 聚丙烯纤维混凝土和混凝土基体的抗压强度和弹性模量差异很小, 而且纤维的加入将对混凝土的强度起略微降低的作用。但是实际试验结果表明: 少量短切聚丙烯纤维网加入混凝土后, 可改善混凝土的微观结构, 减少混凝土的初始裂缝, 从而稍稍提高混凝土的抗压强度; 当聚丙烯纤维体积含量较高时, 纤维对混凝土的致密性会产生不利影响, 可使混凝土强度和弹模都出现明显下降。所以实际工程中使用的体积含量应限制在0.2%以下, 这和钢纤维的通常使用含量(1%~2%)是有很大差异的。高体积含量的聚丙烯纤维一般是以长纤维形式用来制作复合材料波形瓦的。

## 2.4.2 弯曲强度及韧性

试验测得了网状聚丙烯纤维混凝土的弯曲荷载-变形全曲线, 并得到抗弯强度、劈拉强度和弯曲韧性随  $V_f$  的变化关系图(图8和图9)。

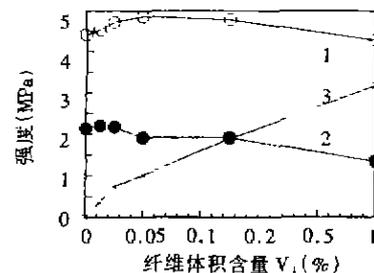


图8 聚丙烯纤维混凝土的抗弯强度和劈拉强度

1—混凝土抗折强度; 2—混凝土劈裂抗拉强度;  
3—混凝土剩余弯曲强度

可以看出, 聚丙烯纤维混凝土的抗折强度随纤维含量  $V_f$  增加而变化的规律和劈拉强度类似, 呈先增长后下降的趋势, 但是抗折强度的增加幅度比劈拉强度

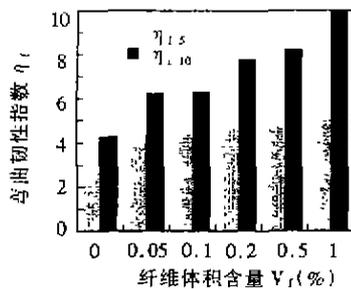


图9 聚丙烯纤维混凝土的弯曲韧性变化

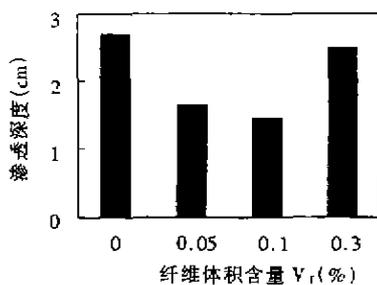


图10 聚丙烯纤维混凝土的渗透性能

大,主要是由于混凝土抗折试验时,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则一直随  $V_f$  增高而增高,说明少量纤维对混凝土的延性有一定的改善作用。图8还可以看出,随纤维含量的继续增高 ( $V_f > 1\%$ ),纤维混凝土的抗弯峰值强度下降,剩余弯曲强度上升,在纤维体积含量超过某值时,纤维混凝土的剩余弯曲强度会超过初裂强度。作者曾按混凝土的最小配筋率方法推导出聚丙烯纤维混凝土的临界抗弯体积含量  $V_{fc}$  公式如下:

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

式中,  $V_{fc}$  为纤维抗弯临界体积含量,  $\tau$  为纤维与基体的粘结滑移强度,  $l/d$  为纤维的长径比。若纤维长度为 19 mm, 纤维直径取 106  $\mu\text{m}$ ,  $\tau$  取 1.4 MPa<sup>[4]</sup>,  $f_n$  近似取为试验实测的混凝土基体抗弯强度, 根据此公式计算的临界纤维体积含量约为 1.4% 左右, 和试验曲线推测的值较为吻合。

试验结果还表明: 长度为 30 mm 的聚丙烯纤维混凝土比 19 mm 的抗弯强度高, 但弯曲韧性前者高于后者, 单丝型纤维的混凝土比网型纤维的抗弯强度高, 但前者的弯曲韧性低于后者。

### 2.5 聚丙烯纤维混凝土的耐久性

对三种体积含量 (0.05%、0.1%、0.3%) 的聚丙烯

纤维混凝土和素混凝土的抗渗性能进行了试验, 经 24 小时 1.3 MPa 水压作用, 所有抗渗试件均未渗漏, 劈开试件对水的渗透深度进行了量测, 结果 (图 10) 表明: 少量短切聚丙烯纤维混凝土的加入增加了混凝土的致密性, 0.05%、0.1% 体积率的聚丙烯纤维混凝土抗渗能力分别比素混凝土提高 40% 和 48%。对素混凝土 4 小时 300 次的快速冻融试验, 发现其弹性模量降低了 87%, 而相同条件下 0.05% 以及 0.1% 体积含量的单丝型聚丙烯纤维混凝土的弹模分别降低了 36.3% 和 16.8%<sup>[5]</sup>。聚丙烯纤维钢筋混凝土在模拟海洋环境下进行的渗透腐蚀试验<sup>[5]</sup>表明, 含有 0.05% 和 0.1% 体积的聚丙烯纤维混凝土中的钢筋比普通混凝土中钢筋分别迟 9 天和 11 天锈蚀。这些试验结果都表明适量短切聚丙烯纤维加入混凝土后可增加混凝土的致密性, 提高结构的耐久性和使用年限。

把不同体积含量 (0.05%、0.1%、0.3%) 的网状聚丙烯纤维混凝土放在 180℃ 的烘箱中烘烤 8 小时后再进行了抗渗试验, 结果表明: 0.05% 以及 0.1% 体积含量的纤维混凝土试件先于素混凝土发生渗漏; 而 0.3% 体积含量的纤维混凝土试件还出现可以看见的小孔。说明在较高温度下, 聚丙烯纤维即使分散于混凝土基体中, 对热老化也还是比较敏感的。

### 3 结论

3.1 少量聚丙烯纤维网加入混凝土, 除不适宜采用人工搅拌外, 无需对施工过程提出特殊要求。

3.2 少量聚丙烯纤维网加入混凝土后, 对混凝土的强度影响不大且略有提高。

3.3 少量聚丙烯纤维加入混凝土后, 可明显改善混凝土的早期塑性收缩以及提高其抗渗性能, 从而提高耐久性。

3.4 聚丙烯纤维混凝土存在长期热稳定性问题, 应作进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] Fibermesh Engineering Data, Fibermesh Company Job Report, 1987
- [2] A. L. Landau and T. E. Webster, Four Year Study, Effects of Polypropylene Fibers in Reducing Corrosion of Rebar in Concrete. A Summary of a Report presented at the ACI Conference, Honkong, Dec. 5, 1991
- [3] J. 达达尔, 在聚丙烯纤维混凝土力学性能研究中作出的一点贡献, 法国预制混凝土制品研究中心, RILEM Symposium 1975.
- [4] [英] D. J. 汉南特, 《纤维水泥与纤维混凝土》, 建筑工业出版社, 陆建业译
- [5] Rongxi Shen etc, Crack - arresting Effect of Polypropylene Monofilament Fibre at Small Dosage in Concrete, Proceedings of the international Conference on Fiber Reinforced Concrete, Edited by shien Li etc. Guangzhou, 1997