

# 聚丙烯纤维对混凝土动力学特性的影响研究

13

03-45

曹 诚 (天津市市政工程研究院)

刘家彬 (东南大学土木工程系)

TU528.572

**【摘要】** 测试了聚丙烯纤维混凝土的抗冲击和疲劳特性。通过和普通混凝土对比后得出结论:较低掺量的聚丙烯纤维能有效提高混凝土的冲击韧性和抗疲劳性能,改善混凝土的抗动载能力。对产生上述结果的机理文中也给予了分析。

**【关键词】** 聚丙烯纤维混凝土 冲击韧性 疲劳寿命 疲劳损伤

聚丙烯纤维 抗疲劳

## 1 前 言

聚丙烯纤维是一种新型的混凝土增强纤维。该纤维的特点是:直径小( $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ )、数量多、易分散,但弹性模量较低( $3.5\text{GPa}\sim 3.8\text{GPa}$ )。在混凝土中的通常用法是以较低的掺量(纤维体积率  $V_f$  一般不大于 0.2%)直接投入混凝土拌合物中,依靠拌合物自身的摩擦和揉搓作用使纤维分散。由于聚丙烯纤维具有直径小、数量多、纤维间距小等特点,因而能减小混凝土因失水、温差、自干燥等作用因素引起的原生裂隙尺度,增强混凝土的抗塑裂能力。通常把聚丙烯纤维当作混凝土的防裂纤维或“次要增强筋”使用。聚丙烯纤维的这种功能使其很适用于路面、桥面工程,对提高面

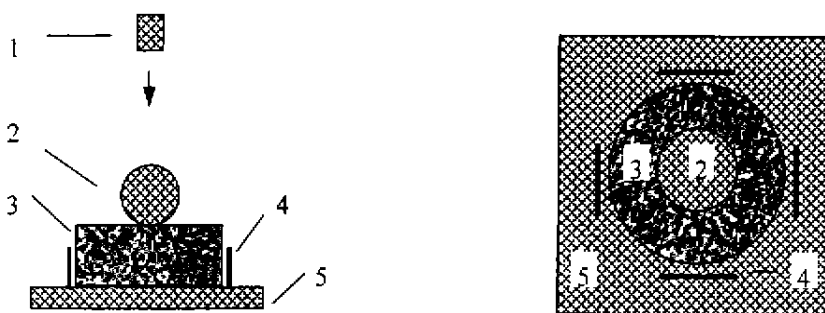
板的整体性、改善使用功能有利。

作为路用材料使用,应测试聚丙烯纤维对混凝土抗冲击、抗疲劳等抗动载能力的影响。由于微细的聚丙烯纤维对混凝土性能的改善是通过减小裂隙尺度、改善混凝土的内在品质实现的,该种纤维应对混凝土的抗动载能力有提高作用。本文测试了聚丙烯纤维掺入后对混凝土的冲击韧性、疲劳寿命和疲劳损伤过程的影响,并对作用机理进行了分析。

## 2 聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能

### 2.1 试验介绍

冲击试验按 ACI(美国混凝土协会)544 委员会推荐的方法进行,试验方法见图 1。其中:



1. 冲击锤 2. 传力球 3. 抗冲击试件 4. 测试挡板 5. 刚性底板

图 1 混凝土的抗冲击试验示意图

(1)按标准方法成型试件,尺寸  $\phi 150 \times 64\text{mm}$ 。标准养护 28 天;

(2)冲击锤重 4.5kg,下落高度  $h = 457\text{mm}$ 。传力球直径 64mm,测试挡板和试件间距 5mm;

(3)传力球和试件同心,并在冲击锤的中线上。测试时,冲击锤自由落下;

该试验方法通过以下几项指标评价或比较混凝土

的抗冲击能力:①出现第一条裂缝(初裂)的冲击次数  $n_1$ ;②初裂后,试件体积膨胀,当试件和 4 块挡板中任意 3 块接触时的冲击次数  $n_2$ 。 $n_2$  被定为试件破坏次数;③试件初裂和破坏时冲击次数的差值( $n_2 - n_1$ );④冲击韧性  $W$  和  $\Delta W$ ,即试件破坏过程吸收的全部冲击能量和初裂后能继续吸收的冲击能量。计算式如下:

$$W = n \cdot mgh$$

其中:  $h$ ——冲击锤下落高度(457mm),

$g$ ——重力加速度  $9.81\text{m/s}^2$ 。

试验原材料为:19mm 长聚丙烯纤维(fibermesh),物性指标见表1;425# 普通硅酸盐水泥;5~20 连续级配石灰石; $M_x = 2.8$  河砂。基准试验配比见表2。

表1 聚丙烯纤维物性指标

密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	抗拉强度 (MPa)	纤维直径 ( $\mu\text{m}$ )	抗拉弹性模量 (GPa)
0.91	560~770	100	3.5

表2 抗冲击(抗折)试验基准混凝土配比( $\text{kg/m}^3$ )

试验编号	纤维	水泥	水	河砂	碎石
CCon.	0	435	200	580	1230

掺入纤维后不改变基准配比。不同掺量的试验编号分别为:CFM1 纤维掺量  $0.9\text{kg/m}^3$ (体积率 0.1%), CFM2 纤维掺量  $1.8\text{kg/m}^3$ (体积率 0.2%)。标准抗压试件和抗冲击试件同时制作和养护至 28 天测试。

## 2.2 测试结果及分析

按 ACI 544 委员会推荐的方法进行测试和评价,聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能测试和计算的结果见表3。表3示出:

表3 聚丙烯纤维混凝土的抗冲击试验结果

试验编号	抗压强度 (MPa)	$n_1$	$n_2$	$\Delta n = n_2 - n_1$	$W$ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	$\Delta W$ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )
CCon.	43.8	52	57	5	1150	101
CFM1	44.0	293	306	13	6173	262
CFM2	48.0	283	302	19	6092	383

(1)较低掺量的聚丙烯纤维对混凝土的静态抗压强度无显著影响。以混凝土的冲击韧性  $W$  为指标进行评价可见,掺入 0.1%~0.2% 的聚丙烯纤维能使混凝土的抗冲击能力提高 5 倍以上。

(2)以初裂后的  $\Delta W$  进行评价可知,聚丙烯纤维体积率为 0.1% 和 0.2% 时,能使混凝土的裂后抗冲击能力分别提高 2.62 倍和 3.83 倍。

(3)聚丙烯纤维掺量较高的 CFM2 并未显示出比掺量较低的 CFM1 更高的冲击韧性,但在初裂后继续吸收冲击能量的能力  $\Delta W$  明显提高。

聚丙烯纤维对混凝土的抗压强度无明显影响是因为掺量小,体积率低。纤维改善混凝土的抗冲击性的机理则主要体现在以下几个方面:①聚丙烯纤维虽然刚度较低,传递荷载的能力差,但能有效减小裂隙尺度,增强材料介质连续性,减小了冲击波被阻断引起的局部应力集中现象;②低模量的有机材料能吸收冲击能量;③纤维能有效约束裂缝的扩展。

本试验中,CFM2 未显示出比 CFM1 更高的冲击

韧性似可解释为在室内理想的环境条件下,0.1% 体积率的聚丙烯纤维已足于消除试件内裂隙的产生。但较高的纤维掺量显然对裂缝扩展的约束力更强,使 CFM2 比 CFM1 裂后的冲击韧性更高。

同文献[1]有关钢纤维混凝土的抗冲击试验结果相比较可知,同在常用的掺量下(聚丙烯纤维体积率为 0.1%~0.2%,钢纤维体积率为 0.7%~1.2%),两者对混凝土的抗冲击能力的提高效率相当(4~6 倍),但因钢纤维的弹性模量较高,对提高混凝土裂后的冲击韧性更有效。

## 3 聚丙烯纤维混凝土的抗折疲劳特性

### 3.1 试验介绍

使用 MTS810 型试验机采用三分点加荷的方式,测试混凝土小梁在不同应力比下的疲劳寿命,同时记录不同疲劳寿命下梁底的变形。试验方法见图 2。

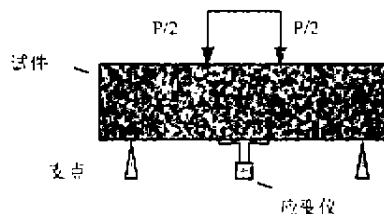


图2 抗折疲劳试验示意图

试验参数为:正弦波加载,频率为 8Hz;疲劳特征值(最小荷载和最大荷载的比值) $P = 0.1$ ;试件尺寸为  $100 \times 100 \times 400$  (mm)。原材料为:19mm 长聚丙烯纤维,425# 普通硅酸盐水泥,5mm~31.5mm 连续级配碎石,  $M_x = 2.54$  河砂。试验基准混凝土配比亦见表2。掺入纤维后不改变基准混凝土配比,试验编号 PFM1 的纤维掺量为  $0.9\text{kg/m}^3$ (体积率 0.1%)。

### 3.2 试验结果及分析

#### 3.2.1 疲劳寿命

聚丙烯纤维混凝土的疲劳曲线见图3。图3示出:在同样的应力比下,聚丙烯纤维混凝土的疲劳寿命明显高于普通混凝土,或者说达到同样的疲劳寿命,聚丙烯纤维混凝土的疲劳强度更高。如以  $10^6$  次疲劳寿命所对应的应力比作为疲劳极限应力比  $f$ ,通过回归经验式可计算出:

$$f_{P_{com}} = 0.603, f_{PFM1} = 0.615.$$

#### 3.2.2 疲劳损伤过程

通过采集在最大疲劳循环应力  $R_{max}$  和最小循环应力  $R_{min}$  下对应的梁底应变  $S_{max}$  和  $S_{min}$ ,由下式可计算出疲劳过程某一时刻的试件弹性模量:  $E = (R_{max} - R_{min}) / (S_{max} - S_{min})$ 。不同疲劳寿命率(某时刻疲劳循

环次数和疲劳寿命的比值  $N/N_f$  下混凝土的弹性模量值见图 4。图 4 示出:

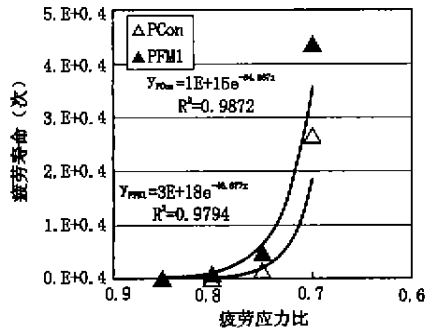


图 3 聚丙烯纤维混凝土疲劳曲线

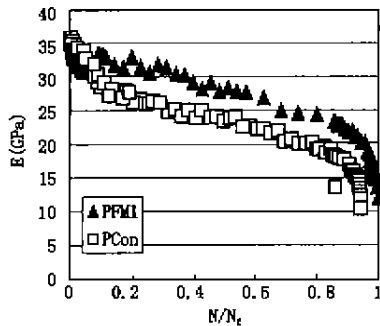


图 4 疲劳过程聚丙烯纤维混凝土弹性模量的衰减

(1) 随疲劳寿命率的增长, 混凝土的弹性模量衰减。当  $N/N_f \leq 0.9$  时, 弹模衰减相对缓慢, 此后衰减加速, 反映出混凝土结构内部的损伤积累在疲劳寿命达到 90% 时由量变演变为质变。

(2) 普通混凝土弹模的衰减速度快于聚丙烯纤维混凝土, 在疲劳初始阶段尤其明显。这意味着在疲劳应力作用下, 普通混凝土比聚丙烯纤维混凝土的损伤速度更快, 而聚丙烯纤维混凝土在疲劳荷载的作用下更能保持材料的刚度。

(3) 在达到疲劳寿命的 90% 左右时, 混凝土内的结构损伤加速。相对于此时的普通混凝土和聚丙烯纤维混凝土的弹性模量分别约为 15GPa 和 20GPa, 为初始弹模的 43% 和 61%。

材料的疲劳破坏过程实际上是内部裂纹引发、扩展、回复、再引发的过程, 也是结构损伤逐渐积累的过

程。每一次应力循环都将造成裂隙尺度上的增大, 对损伤的积累有所贡献, 即材料疲劳损伤的程度是疲劳寿命率 ( $N/N_f$ ) 的函数。材料损伤的外在表现为强度和弹性模量的衰减。因此, 换个角度理解疲劳现象, 可以认为在设定应力比下的材料疲劳过程实际上是一个伴随着疲劳过程材料强度的衰减, 真实应力比不断增大直至达到 100% 时材料发生疲劳破坏的过程。

聚丙烯纤维对混凝土疲劳性能的影响可从纤维对混凝土结构内原生裂纹尺度的细化效应增强了混凝土介质的连续性、有机材料对振动波的吸收和纤维约束裂纹扩展几方面理解。当原生裂纹的尺度得以细化后, 混凝土的疲劳寿命也因此得以延长。数量众多的聚丙烯纤维的荷载传递效应还有助于匀化混凝土结构内的应力场, 使材料损伤能在介质内扩散。这对增强混凝土的抗疲劳能力可能也是有益的。

#### 4 结 语

本文通过对试验结果的分析表明: 聚丙烯纤维能有效提高混凝土的冲击韧性、初裂后继续吸收冲击能的能力和延长混凝土的疲劳寿命、提高混凝土在疲劳过程中刚度的保持能力。这种特性使聚丙烯纤维混凝土适用于路面、桥面工程。

聚丙烯纤维对混凝土动载性能的提高作用是通过改善混凝土内在品质实现的, 这为实现混凝土材料的高性能化提供了一条新的途径。可以预测在环境因素、资源因素和技术因素都要求水泥混凝土高性能化的形势下, 作为一种纤维增强型水泥基复合材料, 以聚丙烯纤维为代表的微纤维增强混凝土的应用将越来越受到重视。

#### 参考文献

1. 《碳纤维混凝土路面性能设计与施工的研究》, 江苏省交通厅鉴定文件, 1990.10
2. 'Low-cycle Fatigue of Plain and Fiber Reinforced Concrete', ACI Materials Journal, July-Aug 1997
3. 'Damage Accumulation in Concrete with or without Fiber Reinforcement', ACI Materials Journal, Nov-Dec 1993

收稿日期 2000-01-11

地 址 天津市河西区平山道 39# (300074)

电 话 022-23537273

#### Study of Polypropylene Fiber Effect on Dynamic Properties of Concrete

Cao Cheng Liu Jiabin\*

[Abstract] The paper gives an experimental research investigation of impact resistance and fatigue properties of polypropylene fiber reinforced concrete. The experimental result shows that low-content polypropylene fiber can effectively improve the impact and fatigue resistance of concrete. Mechanism is also analyzed in the paper.

[Key words] polypropylene fiber concrete impact toughness fatigue-life damage