

聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究

李北星¹, 陈明祥², 舒恒², 刘路平³, 成方³(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

[摘要] 试验研究了聚丙烯纤维混凝土的抗压强度、抗剪强度、抗冲磨强度及弯曲性能, 并与钢纤维混凝土进行了对比。结果表明: 在混凝土基体不变情况下, 低掺量聚丙烯纤维(掺量为 $0.91\text{kg}/\text{m}^3$)略微降低混凝土的抗压强度和抗剪强度, 少许提高混凝土的抗弯强度, 显著提高混凝土的弯曲韧性和断裂能, 从而起到阻裂和增韧作用, 而对混凝土的抗冲磨性能几乎没有改善。另外, 网状聚丙烯纤维对混凝土抗弯强度和韧性的改善优于聚丙烯单丝纤维, 但它们较钢纤维的增强增韧效果还有一定差距。

[关键词] 聚丙烯纤维; 钢纤维; 混凝土; 力学性能

[中图分类号] TU528.572

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-3550(2003)11-0021-04

Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete

LI Bei-xing¹, CHEN Ming-xiang², SHU Heng², LIU Lu-ping³, CHENG Fang³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China;

2. College of Civil Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China;

3. Survey and Design Institute of Middle South of China, Changsha Hunan 410014, China)

Abstract: The results of an experimental investigation on the compressive, shear strengths and abrasion-erosion resistance as well as flexural properties of two polypropylene fiber reinforced concretes and the comparison with a steel fiber reinforced concrete were reported in this paper. The test results show that a low content of polypropylene fiber ($0.91\text{kg}/\text{m}^3$ of concrete) slightly decreased the compressive and shear strengths, and appreciably increased the flexural strength, but markedly enhance the toughness index and fracture energy for the concrete with the same mix proportion, consequently it plays a role of anti-cracking and improving toughness in concrete. Moreover, the polypropylene mesh fiber is superior to the polypropylene monofilament fiber in improving flexural strength and toughness of concrete, but the two types of polypropylene fibers are not good as steel fiber. All the polypropylene and steel fibers had no great beneficial effect on the abrasion-erosion resistance of concrete.

Key words: polypropylene fiber; steel fiber; concrete; mechanical properties.

1 前言

混凝土作为一种抗压强度高、成本低廉的应用最为广泛的建筑材料, 存在的固有弱点——抗拉强度低(约为抗压强度的1/10)、抗裂性差、韧性小等, 却限制着它的优势的充分发挥。因此, 人们长期以来致力于探索改善混凝土性能(主要是提高抗拉强度、增强韧性和延性)的各种方法和途径。其中, 采用纤维增强混凝土就是近年来研究和应用最为广泛的重要途径之一。各式各样的纤维, 包括钢纤维、合成纤维和天然纤维已被应用到混凝土中。近年来, 聚丙烯纤维在混凝土中的应用取得很大进展。聚丙烯纤维与钢纤维相比具有密度小、单丝直径小和弹性模量低等特性, 因而低掺率的聚丙烯纤维既可在混凝土中起到明显的阻裂与增韧作用^[1-4], 而且具有价格较低、抗拉强度高, 耐酸碱等优势, 因而成为混凝土抗裂的首选纤维。本

文主要研究了聚丙烯纤维对混凝土抗压、抗剪、抗冲磨强度及弯曲韧性、断裂韧性的影响, 并与钢纤维混凝土进行了对比。

2 试验

2.1 试验原材料

水泥采用贵州水泥厂生产的42.5普通硅酸盐水泥, 实测28d抗压强度56.6MPa(ISO法)。粉煤灰为贵州凯里发电厂的I级粉煤灰。粗骨料为二级配石灰石碎石, 细骨料为人工中粗砂。外加剂为SK-3型引气减水剂。聚丙烯纤维分别为国内某厂家的聚丙烯单丝纤维(代号PP_f)和美国纤维网公司的网状聚丙烯纤维(代号PP_m), 它们的物理力学性能见表1。钢纤维为上海哈瑞克斯金属制品有限公司的铣削型钢纤维(代号SF), 尺寸为32mm×0.4mm×4mm。

表1 聚丙烯纤维的物理力学性能

纤维	长度/mm	直径/ μm	密度/ (g/cm^3)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	断裂延伸率/%
PP _f	12~14	20	0.91	3.7	684	165	14
PP _m	12~15	100	0.91	3.5	560~770	160~170	-

2.2 试验配合比

混凝土设计为 C30, 为了对比纤维的作用效果, 避开其它因素的影响, 配合比设计采取了保持混凝土各材料用量不变的原则, 仅仅是改变纤维掺入品种与数量。混凝土配合比见表 2。

表 2 试验用 C30 混凝土配合比及拌合物性能

试样	纤维 /(kg/m ³)	配合比/(kg/m ³)							坍落度 /mm
		水泥	粉煤灰	水	砂	小石	中石	减水剂	
1	—	319	56	137	713	697	571	2.25	73
2	PP _f =0.91	319	56	137	713	697	571	2.25	55
3	PP _m =0.91	319	56	137	713	697	571	2.25	45
4	SF=60	319	56	137	713	697	571	2.25	30

注: (1) 混凝土所用小石、中石以饱和面干状态为基准, 饱和面干吸水率分别为 0.20%、0.14%, 砂以干料为基准; (2) 减水剂溶于拌和水后加入。

2.3 试验方法

混凝土抗压强度试验采用尺寸 150mm×150mm×150mm 混凝土试件, 按照 GBJ81-85 进行。

混凝土抗剪强度试验采用双面直接剪切法, 根据 CECS13:89 钢纤维混凝土试验方法进行^[5], 混凝土试件为 100mm×100mm×400mm 的梁式试件。

混凝土抗冲磨强度试验采用气流挟砂法, 试件为 150mm×150mm×150mm 的立方体。试验中, 混凝土试件固定在匀速往返运行的活动台架上, 高压气、水、砂混合流均匀冲击磨损其表面。试验风压 0.3MPa, 冲角 30°, 砂流量 180kg/h, 磨料砂为粒径小于 3mm 的天然河砂。抗冲磨强度指混凝土磨损 1cm 深度所需时间。

混凝土弯曲韧性试验采用 150mm×150mm×550mm 小梁试件, 在 Instron1346 伺服式试验机上根据 ASTM C1018 方法进行, 采用四点加荷法, 跨距 450mm。在试样的跨中底部安装一位移传感器, 一方面用于记录挠度, 一方面通过接入 Instron1346 伺服式试验机的数字控制器, 以其挠度值作为反馈信号, 控制等挠度加载速率为 0.0001mm/sec。所有荷载和挠度数据以每秒钟 1 次的采样频率由计算机自动记录, 并实时输出荷载—挠度(P—δ)曲线。弯曲韧性试验装置见示意图 1。

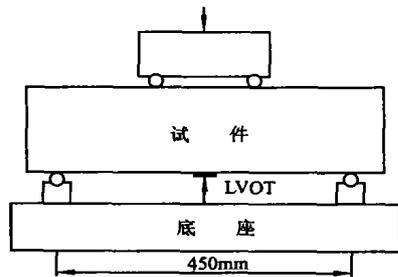


图 1 弯曲韧性试验装置示意图

混凝土断裂韧性试验采用的是尺寸为 100mm×100mm×400mm 的开切口梁式试件, 其切口深度与试件截面高度之比 $a/h=0.3$, 四点加荷跨距 300mm。加荷方式同弯曲韧性试验方法。

3 试验结果与分析

3.1 抗压、抗折和抗剪强度

混凝土 28d 龄期抗压、抗折和抗剪强度试验结果见表 3。由该表可知, 用聚丙烯纤维进行增强, 其混凝土抗折强度是增

大的, 而抗压和抗剪强度下降。具体而言, 掺入 0.91kg/m³ 单丝或网状聚丙烯纤维, 抗折强度平均增加 10.4%, 抗压强度平均下降 2.1%, 抗剪强度平均下降 9.0%。钢纤维增强混凝土与聚丙烯纤维增强混凝土的力学性能变化不一样, 钢纤维混凝土的抗压、抗折和抗剪强度均有较大的增长趋势。

表 3 混凝土 28d 龄期力学强度与抗冲磨强度

试样	纤维 /(kg/m ³)	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	抗冲磨 强度 /(h/cm)	相对抗冲 磨强度 /%
1	0	38.2	4.8	9.6	2.91	100
2	PP _f =0.91	37.6	5.2	8.2	2.95	101.4
3	PP _m =0.91	37.2	5.4	9.0	3.02	103.8
4	SF=60	40.9	6.1	12.3	3.12	107.2

3.2 抗冲磨强度

由表 3 的混凝土 28d 龄期抗冲磨试验结果可知, 在不改变混凝土基体配合比情况下, 无论是掺聚丙烯纤维还是钢纤维, 混凝土的抗冲磨强度提高幅度很小, 几乎没有效果, 其影响可以忽略不计(考虑试验结果误差)。这点与有关该方面已有研究的报道结论不同, 李光伟、杨元慧^[6]利用“混凝土抗含砂水流冲刷试验”方法, 得出掺 0.6kg/m³ 聚丙烯纤维的混凝土抗冲磨强度可以提高 37%~40%。卢安琪、李克亮等^[7]采用“仿 ASTM C10138-89 水下钢球冲磨法”, 得出掺 0.6kg/m³、0.9kg/m³、1.2kg/m³ 聚丙烯纤维的混凝土抗冲磨强度分别提高 33%、49% 和 58%, 并认为抗冲磨强度提高的原因是由于聚丙烯纤维阻碍了由于冲击或磨损发生的裂缝发展, 牵制了混凝土碎块从基体中剥落, 同时提高了混凝土的抗冲击性能。我们认为, 这只是聚丙烯纤维对提高混凝土抗冲磨强度有利的一面。由于聚丙烯纤维的不亲水性, 纤维周围会形成一层较厚的水膜, 使得纤维周围的水泥浆体往往具有比本体更高的水灰比, 这将造成聚丙烯纤维—基材呈弱界面效应, 对混凝土强度不利。钢纤维混凝土也同样存在这样一个弱的纤维—基材界面问题^[8,9]。因此, 欲发挥聚丙烯纤维或钢纤维对混凝土抗冲磨性能的有效作用, 掺入硅粉或粉煤灰掺合料和高效减水剂, 以改善纤维—基材的界面性能是非常必要的^[10]。

3.3 弯曲韧性

弯曲韧性指数按 ASTM C1018 方法进行计算^[2], 它是利用理想弹塑性体作为材料韧性的参考标准, 选用初裂点挠度(δ)的倍数作为终点挠度, 即 3 倍(3δ)、5.5 倍(5.5δ)、15.5 倍(15.5δ)。由此定义的三个韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 分别为 3δ、5.5δ、15.5δ 挠度下对应的荷载—挠度曲线面积与初裂点挠度 δ 时曲线下的面积之比, 如图 2 所示。 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 表示为

$$I_5 = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \quad (1)$$

$$I_{10} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{A_1} \quad (2)$$

$$I_{30} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{A_1} \quad (3)$$

表 4 是混凝土 28d 龄期的弯曲韧性试验结果, 其对应的典型荷载—挠度曲线如图 3 所示。对于理想弹塑性材料, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 值分别为 5、10、30, 本质上韧性指数越小, 韧性越差。同时韧性指数的比值, 如 I_{10}/I_5 、 I_{30}/I_{10} , 也是用来评价韧性好坏的一个重要指标。很明显, 材料在理想弹塑性条件下,

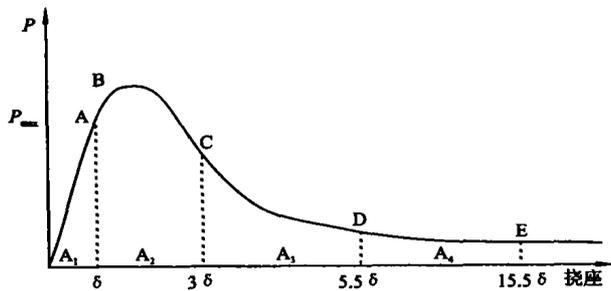
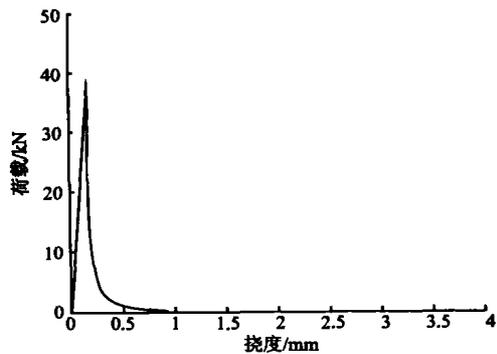
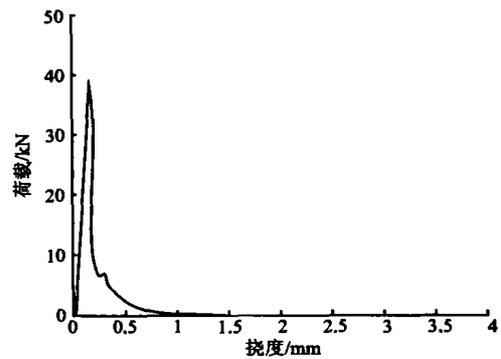


图2 ASTM C1018定义的韧性指数

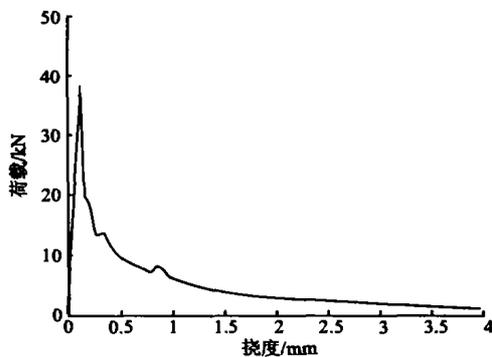
I_{10}/I_5 值等于 2, I_{30}/I_{10} 值等于 3, 韧性指数比值越小, 韧性越差。这样, 从表 3 的韧性指数值和韧性指数之间的比值大小很容易判断, 增韧效果大小依次是: 钢纤维 > 网状聚丙烯纤维 > 聚丙烯单丝纤维。另外, 按 JCI 方法计算的韧度值也体现了上述增韧大小的规律。有关低弹模聚丙烯纤维在混凝土中的增韧作用机制, 文献[7]曾给予了定性解释。另外, 网状聚丙烯纤维增强效果特别是增韧效果明显优于聚丙烯单丝纤维, 其原因可能与其长径比、抗拉强度、杨氏模量及其和混凝土的粘结性能等纤维本身的特性有关。



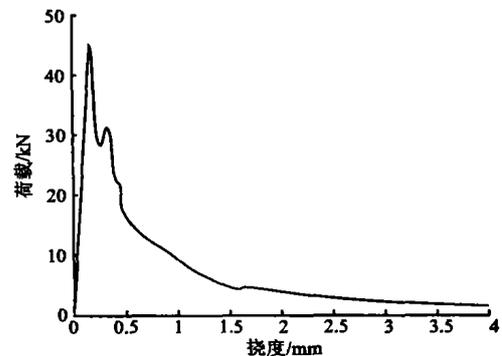
(a) 试样 1, 纤维 = 0kg/m³



(b) 试样 2, PP_f = 0.91kg/m³



(c) 试样 3, PP_m = 0.91kg/m³



(d) 试样 4, SF = 60kg/m³

图3 混凝土试件 28d 龄期典型荷载-挠度曲线

表4 混凝土 28d 龄期弯曲韧性

试样	纤维 /(kg/m ³)	初裂挠度 /mm	初裂强度 /MPa	JCI 韧度* /(N·m)	ASTM 韧性指数			比值	
					I_5	I_{10}	I_{30}	I_{10}/I_5	I_{30}/I_{10}
1	0	0.126	3.88	3.99	2.25	2.30	2.30	1.02	1.0
2	PP _f = 0.91	0.130	4.10	7.44	2.58	2.99	3.13	1.16	1.05
3	PP _m = 0.91	0.146	4.16	16.35	3.27	4.80	7.49	1.47	1.56
4	SF = 60	0.172	4.35	29.33	5.63	8.72	13.00	1.55	1.49

注: * 按 JCI 钢纤维混凝土委员会方法计算的韧度, 即给定挠度为 $l/150$, $P-\delta$ 曲线下面积的积分。

从图 3 可以看出, 基准混凝土(试样 1)一旦出现裂缝, 裂缝就很快失稳扩展, 并迅速导致试件脆断破坏, 因此, 破坏时产生的变形很小。聚丙烯纤维混凝土(试样 2 和 3), 当混凝土开裂后, 由于纤维跨越于裂缝两边, 虽承载能力下降, 但仍可以在一段时间内继续保持其承载能力, 这点与钢纤维混凝土(试样 4)有相似之处。但由于聚丙烯纤维弹性模量小、掺量低, 其荷载传递效应并不明显, 约束混凝土受荷时的裂缝扩展能力比钢纤维弱, 因此对混凝土韧性提高比钢纤维小, 混凝土裂后剩余

强度和刚度也相对较低。

3.4 断裂韧性

临界应力强度因子 K_{IC} 按下式计算^[11]:

$$K_{IC} = f \left(\frac{a}{h} \right) K_0 \quad (4)$$

式中 $K_0 = \frac{M}{bh^{3/2}}$, 其中 M 是裂缝失稳时对称面的弯矩, $M = \frac{1}{4} P_{max} l$;

P_{max} ——最大荷载, N;

l, b, h ——分别为试件跨距, 截面宽度和高度, mm;

a ——切口深度, mm。

$f\left(\frac{a}{h}\right)$ 函数值按下式计算:

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = 11.94 \left(\frac{a}{h}\right)^{1/2} - 14.82 \left(\frac{a}{h}\right)^{3/2} + 77.82 \left(\frac{a}{h}\right)^{5/2} - 139.02 \left(\frac{a}{h}\right)^{7/2} + 148.8 \left(\frac{a}{h}\right)^{9/2} \quad (5)$$

断裂能 G_F 近似通过开切口试件荷载—挠度全曲线面积除以弯曲试验断裂部分的横截面积表示^[12], 即为

$$G_F = 2\gamma = \frac{1}{b(h-a)} \int_0^{\delta_{max}} Pd\delta \quad (6)$$

式中 $P(\delta)$ ——荷载挠度曲线;

γ ——断裂表面能, J/m^2 。

表 5 是混凝土 28d 龄期的断裂性能参数试验结果。与基准混凝土比较, 在混凝土基体不变的情况下, 掺加聚丙烯单丝纤维、网状聚丙烯纤维、钢纤维, K_{IC} 值分别提高了 20.9%、9.6% 和 91.3%, G_F 值分别提高 0.96 倍、1.6 倍和 15 倍。这些结果也体现了聚丙烯纤维可以在一定程度上提高混凝土的断裂韧性, 有利于抵抗裂纹的扩展, 但效果不如钢纤维明显。纤维混凝土抵抗裂纹不稳定扩展能力的提高是由于基准混凝土的挠度一旦超过与之相对应的极限抗弯强度时就出现突然破坏, 而纤维混凝土即使在挠度超过基准混凝土断裂挠度时仍能继续承受相当大的荷载(单边切口梁混凝土试件荷载—挠度曲线与图 3 相似, 故此略)。

表 5 混凝土 28d 龄期断裂韧性

试样	纤维 /(kg/m^3)	$K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$G_F/(J \cdot m^{-2})$
1	0	1.15	89
2	PP _f = 0.91	1.39	174
3	PP _m = 0.91	1.26	234
4	SF = 60	2.20	1424

另外, 表 5 的网状聚丙烯纤维混凝土 K_{IC} 值较聚丙烯单丝纤维的低, 这与表 4 得出的韧性指数和表 5 的断裂能结果刚好相反, 即 K_{IC} 值并没有体现出网状聚丙烯较聚丙烯单丝纤维增韧效果好, 这可能是因为用 K_{IC} 值来表征纤维混凝土的断裂性能并不是很敏感的缘故。

4 结论

在不改变混凝土基体配合比条件下, 对比研究聚丙烯纤维和钢纤维对混凝土力学性能的影响, 得到如下结论:

(1) 聚丙烯纤维的掺入稍微提高了混凝土的抗弯强度, 但

同时轻微降低了混凝土的抗压强度和抗剪强度;

(2) 聚丙烯纤维显著提高了混凝土的延性、ASTM C1018 韧性指数及 K_{IC} 值、断裂能等韧性指标, 充分显示了低弹模聚丙烯纤维对混凝土具有较强的阻裂和增韧效应, 并且本试验条件下网状聚丙烯纤维的增韧效果明显好于聚丙烯单丝纤维, 但聚丙烯纤维对抗弯强度和对韧性的改善与钢纤维相比, 还有较大差距。

(3) 聚丙烯纤维与钢纤维一样, 对混凝土抗冲磨性能的改善效果并不明显, 有关聚丙烯纤维对混凝土抗冲磨性能的影响及其作用机理有待进一步探讨。

[参考文献]

- [1] V. M. Malhorta, G. G. Carette, A. Bilodeau. Mechanical properties and durability of polypropylene fiber reinforced high-volume fly ash concrete for shotcrete applications. *ACI Materials Journal*, 1994, 91(5): 478-486.
- [2] P. Soroushian, A. Khan, J. W. Hsu. Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers. *ACI Materials Journal*, 1992, 89(2): 535-540.
- [3] 沈荣焱. 低掺率合成纤维在混凝土中的作用机制. 阎培玉, 姚燕. 水泥基复合材料科学与技术[M]. 北京: 中国建材出版社, 1999, 12-15.
- [4] 曹诚, 王春阳. 低掺量聚丙烯纤维在混凝土中的效应分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2000, (增刊): 34-36.
- [5] 中国工程建设标准化协会. CECS 13: 89 钢纤维混凝土试验方法[M]. 北京: 中国计划出版社, 1996, 37-49.
- [6] 杨伟光, 杨元慧. 聚丙烯纤维混凝土性能的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(10): 14-16.
- [7] 卢安琪, 李克亮, 祝焯然, 胡智农. 聚丙烯纤维混凝土抗冲磨试验研究[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 37-39.
- [8] 储传英. 三峡工程混凝土原材料研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999, 240-241.
- [9] 蒋元驹, 韩素芳. 混凝土工程病害与修补加固[M]. 北京: 海洋出版社, 1996, 156-180.
- [10] 赵国藩, 彭少民, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999, 14: 131-132.
- [11] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [12] P. E. Petersson. Fracture energy of concrete: method of determination. *Cement and Concrete research*, 1980, 10(1): 78-90.

[作者简介] 李北星(1970-), 男, 博士, 副教授, 材料学专业, 主要从事水泥与混凝土材料研究。

[单位地址] 武汉市武昌珞珈山武汉大学水利水电学院建筑材料教研室(430072)

[联系电话] 027-87253140-8039; 13808694735