

聚丙烯长纤维高性能混凝土性能研究

丁一宁^{*1}, 曹继锋^{1,2}

(1.大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2.大连市建设工程质量监督站, 辽宁 大连 116012)

摘要: 根据国际标准对两种长径比的新型聚丙烯长纤维增强高性能混凝土的工作度、含气量、强度及弯曲韧性进行了试验研究. 其中对这两种纤维混凝土的弯曲韧性按照国际材料与结构联合会 (RILEM) 标准进行了深入的研究, 得出了不同组纤维混凝土的能量吸收值和等效抗弯强度. 试验表明, 聚丙烯长纤维具有良好的增韧效果, 长径比大及单位质量根数较多的纤维增韧效果更为显著.

关键词: 高性能混凝土; 聚丙烯长纤维; 弯曲韧性

中图分类号: TU377.94 **文献标识码:** A

0 引言

传统的合成短纤维 (micro-fiber) 对阻止混凝土的早期塑性开裂十分有效, 但由于短纤维的掺量一般较少, 对于硬化后混凝土的韧性和抗裂性的改善很小. 高性能混凝土不仅要有良好的强度与工作性能, 还应有优异的耐久性能和较好的韧性, 以满足不同的工程需要, 普通混凝土材料的脆性大、抗冲击性差是影响其实际应用的一个重要因素^[1]. 钢纤维可以显著提高混凝土的抗裂、抗折、抗冲击、抗疲劳等性能, 其理论研究正不断走向成熟, 工程应用领域也在不断扩大, 但成本较高. 以往用钢纤维阻止硬化混凝土开裂, 提高混凝土韧性和抗冲击性能, 但钢纤维 (尤其是部分国产钢纤维) 在特殊环境存在锈蚀问题, 且掺量高, 施工中有时有结团现象.

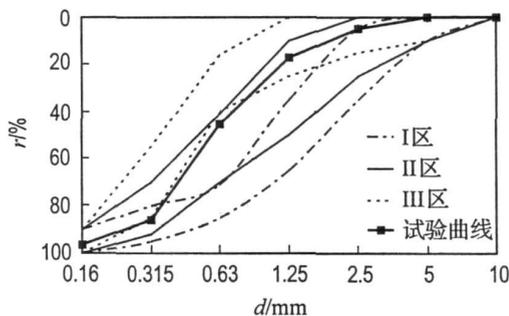
随着复合材料技术的发展, 长纤维 (macro-fiber) 开始用于混凝土工程, 长纤维一般指长度大于 30 mm 的纤维. 目前在市场上的长纤维有像剪切钢纤维一样的单丝纤维, 有相互缠绕的纤维束等, 这种纤维束在混凝土中将分散为单丝长纤维. 长合成纤维是一种新型增强增韧材料, 将在一些环境恶劣工程中部分代替钢纤维或钢丝网, 提高混凝土结构的抗裂性和韧性, 抵抗温度应力, 用于喷射混凝土、混凝土路面、桥面及工业地坪、机场跑道、装卸码头、停机坪和停车场等,

特别在钢纤维易受腐蚀的环境中使用长合成纤维对于改善耐久性更有意义.

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥采用大连小野田水泥有限公司生产的 P·II42.5R 普通硅酸盐水泥; 细骨料为优质河砂, 细度模数为 2.5, 属于中砂, 级配曲线见图 1; 粗骨料为碎石, 粒径 5~10 mm, 粉煤灰为大连热电厂二级袋装粉煤灰; 减水剂为第三代聚羧酸盐高效减水剂; 新型聚丙烯长纤维为北京中纺纤建科技有限公司生产的 CTA 仿钢丝聚丙烯长纤维, 共有 A、B 两种类型 (图 2、3), 其性能参数分别见表 1、2. 可以看出, 两种纤维长径比分别为 50 和 80, 单位质量的根数差别较大.



注: r 为累计筛余百分数, d 为筛孔尺寸

图 1 砂子级配曲线

Fig. 1 Grading curves of the sand

收稿日期: 2006-01-05; 修回日期: 2007-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50278013).

作者简介: 丁一宁^{*} (1962-), 男, 教授, 博士生导师.

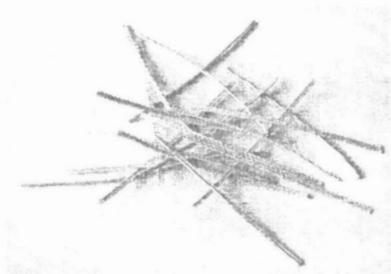


图 2 A 型聚丙烯长纤维

Fig. 2 Type A macro-polypropylene fiber

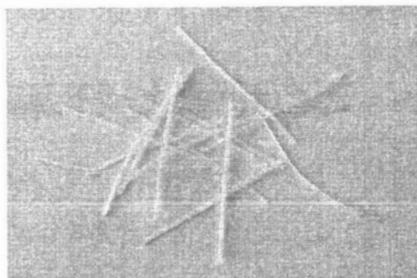


图 3 B 型聚丙烯长纤维

Fig. 3 Type B macro-polypropylene fiber

表 1 A 型聚丙烯长纤维性能参数

Tab. 1 The performance parameters of type A macro-polypropylene fiber

L/mm	$d/\mu m$	d/r	$d/(g \cdot cm^{-3})$	f_t/MPa	E/GPa	$W/\%$	单位质量根数 根 $\cdot kg^{-1}$
50	984	50	0.91	490	8	10.7	28 500

表 2 B 型聚丙烯长纤维性能参数

Tab. 2 The performance parameters of type B macro-polypropylene fiber

L/mm	$d/\mu m$	d/r	$d/(g \cdot cm^{-3})$	f_t/MPa	E/GPa	$W/\%$	单位质量根数 根 $\cdot kg^{-1}$
40	500	80	0.91	490	8	10.7	118 500

1.2 试验方案

普通混凝土强度等级设计为 C50, 基准配合比见表 3, 试验中聚丙烯长纤维 (A B 两种类型) 的掺量分别为 2.4 6 kg/m³. 试验共 7 组, 对每一组混凝土拌合物按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13 1989)^[2] 进行含气量、立方体抗压强度 (1.7 28 d) 试验; 按照德国工业标准测定混凝土拌合物的坍落流动度; 按照 RILEM 标准进

行混凝土梁的弯曲韧性试验^[3]. 在弯曲韧性试验中, 梁的尺寸为 150 mm × 150 mm × 550 mm, 梁的跨度为 500 mm, 下部有 25 mm 深的开口, 使用 1 000 kN 液压伺服试验机, 等速位移控制, 跨中位移速率为 0.2 mm/min. 梁的两侧用位移传感器 (LVDT) 测定梁的跨中挠度, 梁的底部用夹式引伸仪测定梁底面裂缝口扩展宽度 (CMOD), 如图 4 5 所示. 根据试验得出荷载-挠度曲线, 由曲线

表 3 普通混凝土配合比

Tab. 3 The mixture ratio of plain concrete

水泥	粉煤灰	$d/(kg \cdot m^{-3})$				减水剂	砂率 /%	水胶比
		砂子	石子	水				
420	180	669	818	210	4.2	45	0.35	

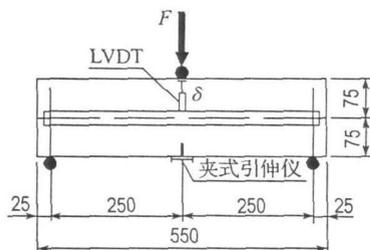


图 4 RILEM 标准梁弯曲韧性试验示意图

Fig. 4 The schematic plan of flexural toughness of the RILEM guideline

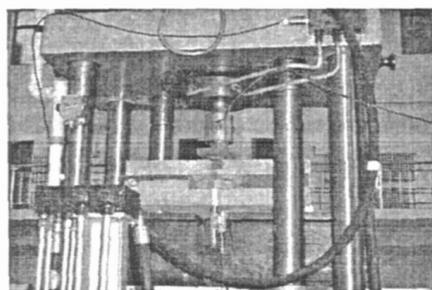


图 5 RILEM 标准梁弯曲韧性试验装置

Fig. 5 The test apparatus of flexural toughness of the RILEM guideline

可以求出梁的抗弯强度和不同跨中挠度处纤维混凝土的能量吸收值,由能量吸收值进一步求出相应的等效抗弯强度^[3 4].

2 试验结果及分析

2.1 工作度、含气量

对比各组混凝土拌合物的坍落流动度、含气量,并观察混凝土拌合物的工作性能,试验结果见表 4 和图 6 7. 从表中数据和坍落流动度的照片可以看出,聚丙烯长纤维的掺入对混凝土的工作性能有一定的影响;随着纤维掺量的增加,拌合物的坍落流动度减小,含气量增大;拌合物中加入了水泥质量 % 的 Sika 高效减水剂,在不降低混凝土强度的情况下得到了较好的流动性;混凝土拌合物在加入纤维以及水灰比较小的情况下,仍然呈现出较好的匀质性、稳定性,没有发生离析、泌水等现象,这些都保证了聚丙烯长纤维混凝土良好的工作性能.

表 4 拌合物的坍落流动度及含气量

Tab. 4 The divergence and air content of the mix

编号	坍落流动度 /mm	含气量 %
NC	670	2.00
PPA2	590	2.35
PPA4	575	2.50
PPA6	445	2.65
PPB2	605	2.18
PPB4	590	2.35
PPB6	610	2.40

注:表中符号 NC 表示普通混凝土,PPA2 表示 A 型聚丙烯长纤维,掺量为 2 kg/m³, PPB2 表示 B 型聚丙烯长纤维,掺量为 2 kg/m³

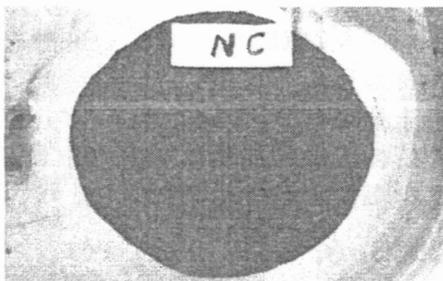


图 6 普通混凝土坍落流动度

Fig. 6 The slump flow of plain concrete

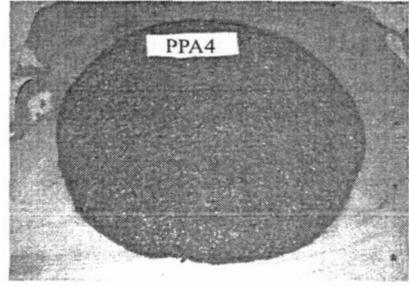


图 7 PPA4 混凝土坍落流动度

Fig. 7 The slump flow of PPA4

2.2 抗压强度

按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13-1989) 进行计算后,每组试件立方体抗压强度平均值如图 8 所示,可看出普通混凝土的 28 d 抗压强度超过 60 MPa,满足所设计混凝土等级要求;聚丙烯长纤维的掺入对混凝土 1 d 强度没有明显影响;对混凝土 7 d 强度有一定程度的提高;对混凝土的 28 d 强度略有降低,纤维的长径比对混凝土的抗压强度没有显著的影响.

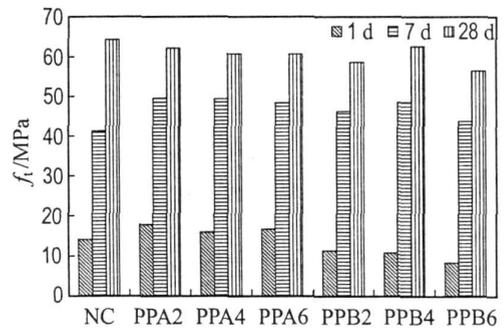


图 8 混凝土立方体抗压强度

Fig. 8 The cube compression strength of concrete

2.3 抗弯强度、弯曲韧性

按照 RILEM 标准进行混凝土梁的弯曲韧性试验,图 9 为不同类型及掺量的纤维混凝土梁的荷载-挠度曲线,并由此计算出抗弯强度、能量吸收值和等效抗弯强度,列于表 5.

(1) 从图 9(a)、(b) 及表 5 可看出:

与普通混凝土梁相比, A、B 两种聚丙烯长纤维的掺入均使混凝土梁的抗弯强度有较大幅度的提高;随着聚丙烯长纤维掺量的增加,混凝土梁的抗弯强度没有显著增强,但梁开裂后的承载力有较大的提高.

(2) 从图 9(c)、(d) 及表 5 可看出:

当纤维掺量同为 4 kg/m³ 时,与 A 型长纤维混凝土梁相比, B 型长纤维混凝土梁的极限承载力和抗弯强度均提高了 14%. 当跨中挠度为 (W

+ 0.65) 时,对应的能量吸收值 $D_{bz,2}^f$ 和等效抗弯强度 $f_{eq,2}$ 提高了 13%; 当跨中挠度为 ($W_0 + 2.65$)

时,对应的能量吸收值 $D_{bz,3}^f$ 和等效抗弯强度 $f_{eq,3}$ 提高了 18%.

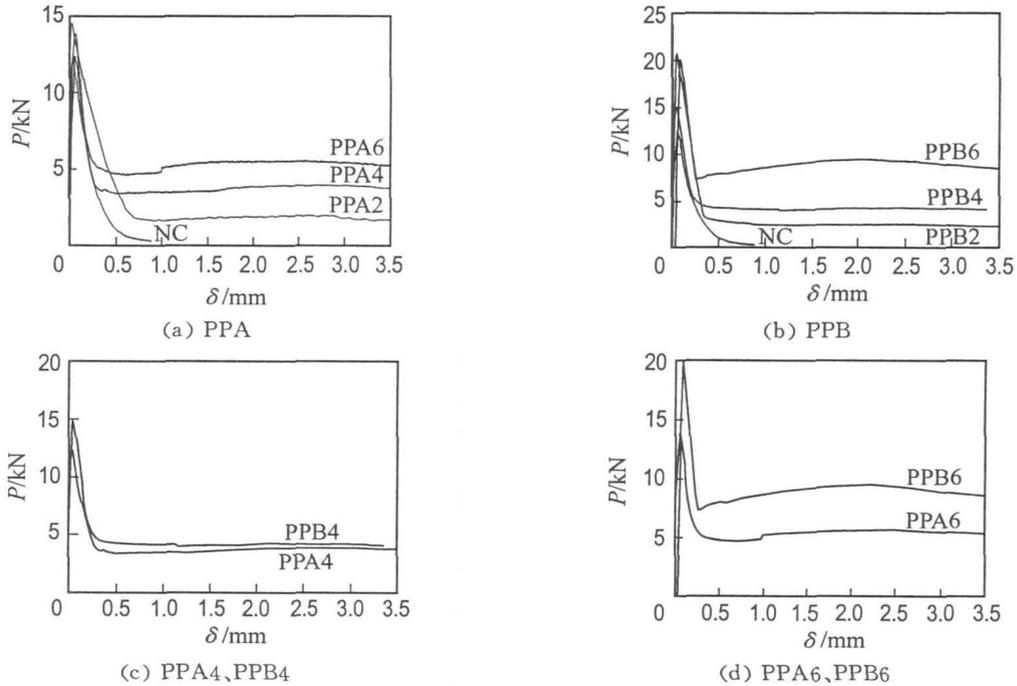


图 9 纤维混凝土梁荷载-挠度曲线

Fig. 9 The $P-W$ curves of fiber concrete

表 5 各组纤维混凝土梁弯曲韧性参数 (表中数据为平均值)

Tab. 5 The parameters of the flexural toughness of the beams (the data in the tab are average values)

编号	F_1 /kN	$D_{bz}^f / (N \cdot mm)$	$D_{bz,2}^f / (N \cdot mm)$	$D_{bz,3}^f / (N \cdot mm)$	$f_{fct,fl} / MPa$	$f_{eq,2} / MPa$	$f_{eq,3} / MPa$
NC	11.821	2 067.9	—	—	3.783	—	—
PPA2	14.536	2 326.9	1 751.6	7 281.3	4.651	1.121	0.932
PPA4	14.304	2 445.4	2 343.9	12 684.6	4.577	1.289	1.624
PPA6	15.368	2 917.2	2 014.6	11 740.3	4.918	1.340	1.639
PPB2	20.942	3 611.3	2 092.2	7 281.3	6.701	1.339	0.932
PPB4	16.287	2 559.4	2 284.9	11 682.3	5.239	1.462	1.916
PPB6	19.982	3 495.7	4 486.9	23 135.4	6.394	2.872	2.961

注: F_1 为试件跨中挠度在 0.05 mm 范围内的最大承载力 (kN), W_0 为与 F_1 对应的梁跨中挠度 (mm), D_{bz}^f 为普通混凝土能量吸收值 ($N \cdot mm$), $D_{bz,2}^f$ 为跨中挠度相应于 ($W_0 + 0.65$) 处纤维混凝土能量吸收值 ($N \cdot mm$), $D_{bz,3}^f$ 为跨中挠度相应于 ($W_0 + 2.65$) 处纤维混凝土能量吸收值 ($N \cdot mm$), $f_{fct,fl}$ 为与 F_1 相对应的抗弯强度 (MPa), $f_{eq,2}$ 为跨中挠度相应于 ($W_0 + 0.65$) 处的等效抗弯强度 (MPa), $f_{eq,3}$ 为跨中挠度相应于 ($W_0 + 2.65$) 处的等效抗弯强度 (MPa)

当纤维掺量同为 6 kg/m^3 时,与 A 型长纤维混凝土梁相比, B 型长纤维混凝土梁的极限承载力和抗弯强度均提高了 30%。当跨中挠度为 ($W_0 + 0.65$) 时,对应的能量吸收值 $D_{bz,2}^f$ 和等效抗弯强度 $f_{eq,2}$ 提高了 114%; 当跨中挠度为 ($W_0 + 2.65$) 时,对应的能量吸收值 $D_{bz,3}^f$ 和等效抗弯强度 $f_{eq,3}$ 提高了 8%。

由以上比较数据可见,单独掺入聚丙烯长纤维时,在 3 种掺量下, B 型长纤维混凝土梁的韧性高于 A 型长纤维混凝土梁的韧性,而且随着掺量

的增加更加明显,原因在于 B 型长纤维单位质量下的根数要远远多于 A 型长纤维,因此 B 型长纤维在混凝土梁内纤维的分布更加均匀,混凝土梁破坏时要消耗更多的能量来克服纤维自身的变形以及纤维与混凝土基体之间的摩擦。

3 截面分析

弯曲韧性试验结束后,将已部分裂开的梁放置在空气中,等到梁截面上裂缝扩展部分充分碳化后,将梁用千斤顶顶开分为两段,再将酚酞溶液

均匀喷洒在梁的断面上。弯曲韧性试验结束时梁开裂的部分由于碱在空气中已被中和,不显示任何颜色,但梁未开裂的核心部分仍为碱性,呈现红色,由此可观察裂缝走势,分析破坏形态。观察图 10 11 可知,梁破坏一般为弯、扭综合破坏,未开裂的核心部分纤维分布相对集中。

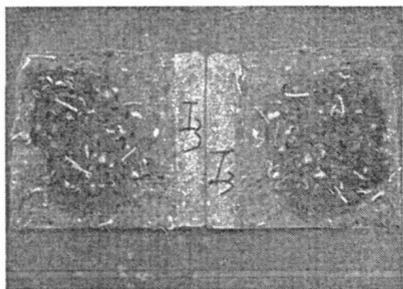


图 10 SF30PPA4 混凝土梁断面

Fig. 10 The fracture plan of the SF30PPA4

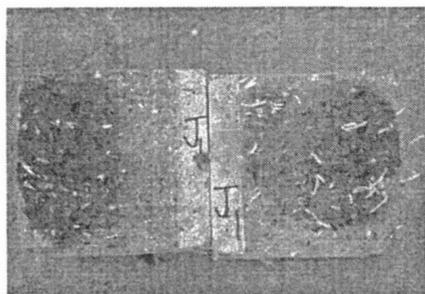


图 11 SF30PPA6 混凝土梁断面

Fig. 11 The fracture plan of the SF30PPA6

4 结论与展望

通过以上试验研究可看出,在水灰比较小时,高效减水剂的掺入可以在不降低混凝土强度的情况下提高纤维混凝土拌合物的流动性能;在混凝土中掺入一定量的聚丙烯长纤维后,在保证较好工作性能及抗压强度的前提下,聚丙烯长纤维可以明显地改善高性能混凝土的抗弯强度和弯曲韧性,因此聚丙烯长纤维的综合效益较好,具有广阔的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 黄承逵. 纤维混凝土结构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004 302-303
- [2] CECS 13: 1989. 中国工程建设标准化协会标准. 钢纤维混凝土试验方法 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1996
- [3] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete bending test [J]. *Mater and Struct*, 2002, **35** 579-582
- [4] RILEM TC 162-TDF. Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test Part 2—Approximation of W from the CMOD response [J]. *Mater and Struct*, 2003, **36** 621-630

Experimental study of behaviour of modified macro-polypropylene fiber reinforced high performance concrete

DING Yi ning^{* 1}, CAO Ji feng^{1,2}

(1.State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2.Dalian Constr. Eng. Qual. Stn., Dalian 116012, China)

Abstract The experimental results for workability, air content, compressive strength and flexural toughness of two kinds of modified macro-polypropylene fiber reinforced high performance concrete were given. The two types of fiber have different aspect ratios. The experiments were carried out according to different international guidelines. The flexural toughness was deeply analyzed according to RILEM guideline. The energy absorption capacity and equivalent flexural strength were calculated. The results show that the modified macro-polypropylene fiber can strongly enhance the flexural toughness of concrete and the fiber with large slenderness ratio and more fiber per kg presents a better performance of flexural toughness.

Key words high performance concrete; macro-polypropylene fiber; flexural toughness