

聚丙烯纤维对混凝土抗拉强度的影响

姚 武¹, 李 杰², 周钟鸣¹

(1. 同济大学混凝土材料研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘 要] 本文研究了低掺量聚丙烯纤维(体积掺量为0.2%)对普通混凝土和高性能混凝土抗拉强度长期性能的影响。研究表明, 尽管在标准龄期范围内, 低弹模的聚丙烯纤维对混凝土强度有负面影响, 但随着龄期的增长, 聚丙烯纤维对混凝土有显著的补强效应, 抑制了混凝土内部微裂纹的生成和发展, 提高了混凝土的连续性和完整性, 有利于混凝土材料后期抗拉强度的增长和混凝土结构的安全性和耐久性。

[关键词] 聚丙烯纤维; 混凝土; 抗拉强度; 补强效应

[中图分类号] TU528.01 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3550(2001)10-0040-04

1 引言

混凝土是低抗拉强度和低抗拉应变的复合材料。在混凝土硬化过程中, 伴随着各种收缩(如化学收缩、温度收缩、塑性收缩、干缩和自收缩等)的增大, 导致混凝土产生许多微裂纹。由于混凝土抗压强度受微裂纹的影响较小, 因此标准龄期后, 混凝土的抗压强度持续缓慢增加, 而抗拉强度却几乎不再增长, 有时甚至出现抗拉强度倒缩现象。拉压比随混凝土龄期的增长而下降必然导致混凝土的脆性的进一步加剧, 增加了混凝土结构潜在的无征兆破坏的危险性。

促进混凝土抗拉强度的增长, 必须减少混凝土内部的微裂纹并有效地抑制微裂纹的扩展。近年来, 国内外大量研究^[1-5]表明, 低掺量聚丙烯纤维能显著地改善混凝土早期塑性收缩开裂, 而且聚丙烯纤维还可明显减少塑性混凝土的表面析水量与骨料的沉降, 有效地阻止了沉降裂缝的产生, 同时聚丙烯纤维还有助于降低硬化混凝土的干缩。聚丙烯纤维混凝土在限制收缩条件下的平均裂缝宽度值随纤维体积掺量的增加而显著下降。掺有低掺量聚丙烯纤维的混凝土与素混凝土相比, 不仅裂缝数量减少, 而且微裂缝的尺度也明显降低。

掺入聚丙烯纤维后混凝土的初始缺陷, 尤其是微裂纹数量与尺度的降低, 有助于改善混凝土的抗拉性能。为此本文研究了掺入体积含量为0.2%的聚丙烯纤维后普通混凝土和高性能混凝土的抗拉强度在早期、标准龄期和长期的增长趋势。讨论了低掺量纤维对混凝土微观结构、界面特性的影响, 分析了聚丙烯纤维的阻裂机制及其对混凝土抗拉性能的补强效应。

2 实验

2.1 试验原材料

普通硅酸盐水泥(425[#]和525[#])、磨细矿渣(比表面积为500m²/kg)、中砂(细度模数为2.8)、碎石(最大粒径为10mm)、聚丙烯单丝纤维(基本物理性能见表1)、高效减水剂。

表1 聚丙烯单丝纤维的基本物理性能

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 /%
15	45	0.91	8.0	400	165	8.2

2.2 试验配合比

研究普通混凝土和高性能混凝土各四个系列对试件的抗拉强度的增长趋势, 具体配合比见表2和表3。适当调整减水剂的用量以保证混凝土的坍落度控制在150mm。

表2 普通混凝土的配合比

系列	水胶比	水泥 ^①	磨细矿渣	粗骨料	中砂	聚丙烯纤维 ^②	高效减水剂
C1	0.44	1.0	—	2.27	1.51	—	适量
C2		0.6	0.4			—	
C3		1.0	—			0.2%	
C4		0.6	0.4			0.2%	

注①425[#]普通硅酸盐水泥; ②混凝土体积掺量。

表3 高性能混凝土的配合比

系列	水胶比	水泥 ^①	磨细矿渣	粗骨料	中砂	聚丙烯纤维 ^②	高效减水剂
HPC1	0.36	1.0	—	2.0	1.32	—	适量
HPC2		0.5	0.5			—	
HPC3		1.0	—			0.2%	
HPC4		0.5	0.5			0.2%	

注①525[#]普通硅酸盐水泥; ②混凝土体积掺量。

2.3 试验方法

[收稿日期] 2001-08-19

[基金项目] 教育部高等学校骨干教师基金资助项目

混凝土抗压和抗拉强度测试参照 GBJ81-85 规定。其中,混凝土抗拉强度通过劈拉试验来测定。为了获得稳定的劈拉荷载一位移全曲线,试验采用 INSTRON8501 电液伺服万能试验机,控制模式采用等应变控制。夹式引伸仪安装在试件的中部,量测标距为 50 毫米,见图 1 所示。荷载和位移值分别由荷载传感器和夹式引伸仪同步量测,由计算机控制和记录并实时输出荷载一位移曲线。

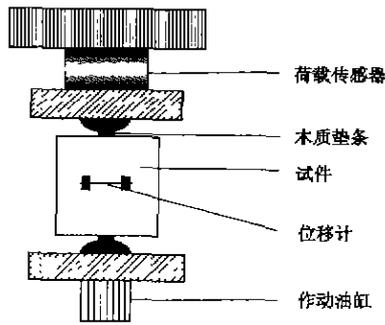


图 1 劈拉试验装置图

考虑到劈拉试验中存在着两种破坏机制^[6,7],如图 2 所示,尤其对于纤维混凝土,劈拉荷载一位移曲线的第二峰值往往大于第一峰值,因此,为了试验数据的有效性,在计算抗拉强度时我们统一取第一峰值对应的荷载,而非最大荷载。

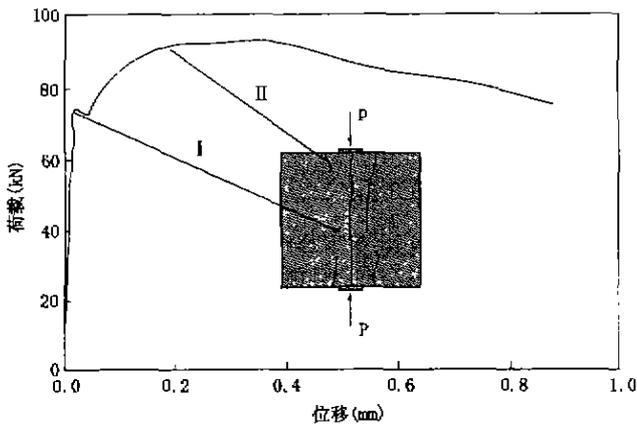


图 2 混凝土劈拉荷载一位移曲线及两种破坏机制

3 结果与讨论

表 4 和表 5 分别为普通混凝土和高性能混凝土抗压和抗拉强度试验结果。从表中可以看出,所有系列混凝土的抗压强度都随着龄期的增长而增长。其中,

表 4 普通混凝土抗压和抗拉强度测试结果

系列	抗压强度/mm				抗拉强度/mm			
	7d	28d	60d	100d	7d	28d	60d	100d
C1	23.4	37.8	45.7	51.3	2.53	3.62	3.58	3.71
C2	29.0	42.9	49.5	53.5	2.95	3.98	3.85	3.71
C3	22.1	32.8	42.1	48.0	2.31	3.23	3.79	4.03
C4	24.9	39.4	46.6	49.5	2.36	3.90	4.40	4.62

掺有磨细矿渣的系列 C2 和 HPC2 在各龄期的抗压强度值为各组中最大,而仅掺有纤维不含矿渣的系列 C3 和 HPC3 则为最小。

表 5 高性能混凝土抗压和抗拉强度测试结果

系列	抗压强度/MPa				抗拉强度/MPa			
	7d	28d	60d	100d	7d	28d	60d	100d
HPC1	33.6	54.8	66.0	73.2	3.26	4.06	4.01	3.95
HPC2	42.0	63.5	72.1	77.5	3.52	4.76	4.52	4.40
HPC3	31.7	46.9	61.0	69.5	2.81	3.86	4.25	4.82
HPC4	36.1	56.9	67.2	71.8	2.82	4.54	5.26	5.98

然而无论是普通混凝土还是高性能混凝土各系列的抗拉强度随龄期的发展趋势却大相径庭。一个明显的区别发生在标准龄期 28 天前。虽然在 7 天和 28 天龄期时普通混凝土中的系列 C2 和高性能混凝土的系列 HPC2 的抗拉强度值为最大,而 C3 和 HPC3 为最小,但是 28 天龄期后,不掺纤维的 C1 和 C2 系列、HPC1 和 HPC2 系列的抗拉强度都有不同程度的下降,而掺有纤维的 C3 和 C4 系列、HPC3 和 HPC4 系列的抗拉强度则持续增长,并且同时掺有纤维和磨细矿渣的 C4 和 HPC4 系列的抗拉强度值为各组中最大。

混凝土的拉压比是反映混凝土脆性的指标之一。图 3 为各系列混凝土拉压比随龄期增长的发展趋势。图中显示不掺纤维的混凝土拉压比下降幅度较大,而掺有纤维的混凝土则下降幅度较小,其中高性能混凝土中的系列 HPC4 的拉压比随龄期的延长呈现小幅增长的趋势。

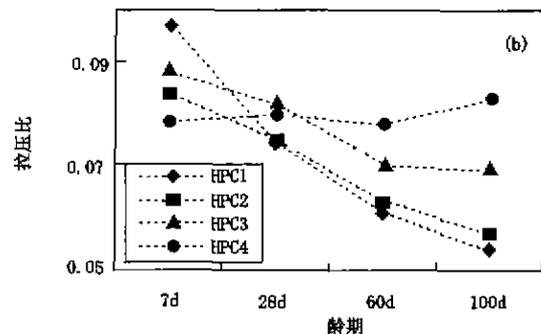
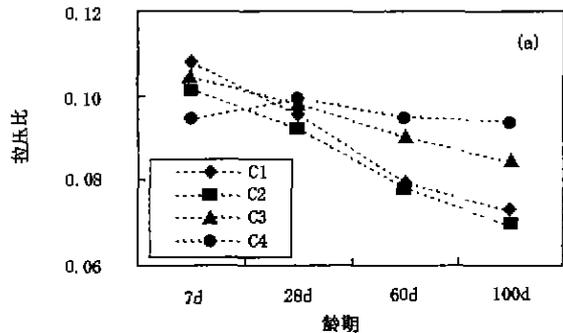


图 3 普通混凝土(a)和高性能混凝土(b)拉压比随龄期的发展趋势

众所周知,在水泥基材料中存在两类独立的缺陷:一类为无长度但有体积的开放孔;另一类为无体积但有长度的封闭孔。前者影响混凝土的抗压强度和弹性模量,而后者则决定断裂应力,如抗拉强度或弯曲强度。随着龄期的增长,混凝土内部的开放孔的数量和体积率大幅度减少,抗压强度逐渐提高,尤其是高性能混凝土采用了较小的水胶比并掺入比表面积更大的活性掺合料,形成了更加致密的复合胶凝体系,使抗压强度得到显著提高。但随着龄期的延长混凝土收缩裂纹增多,封闭孔的数量急剧增加,导致抗拉强度呈现下降的趋势。

掺入少量的聚丙烯纤维后,在混凝土内部形成三维交错的支撑网络。虽然聚丙烯纤维的比表面积大,且使混凝土的含气量增大,导致抗压强度略有下降(如C3和HPC3的抗压强度分别低于C1和HPC1;C4和HPC4的抗压强度分别低于C2和HPC2),但由于聚丙烯纤维的弹性模量高于早期塑性的水泥基材,并且由于聚丙烯纤维的直径较细,纤维间距较小,因此具有明显的阻裂效应,有效地抑制了混凝土的塑性收缩开裂。

同时掺入聚丙烯纤维和磨细矿渣,可提高纤维与基材的界面粘结力。我们知道聚丙烯纤维具有不亲水性,纤维与基材界面的水灰比往往高于基材本身,形成弱界面效应,不利于混凝土的强度。加入磨细矿渣后,增加了纤维与基材的接触面积,改善了界面特性,提高了纤维的界面脱粘强度。表6为通过单根纤维拔出试验测定的纤维脱粘强度(纤维埋入长度为10mm,水胶比为0.36)。

表6 聚丙烯单丝纤维的脱粘强度

试验龄期 /d	水泥净浆 /MPa	含50%磨细矿渣的水泥净浆 /MPa
3	0.07	0.08
7	0.12	0.19
14	0.15	0.21
28	0.22	0.28

需指出的是,掺入少量低弹模聚丙烯纤维促进了混凝土抗拉性能后期强度的持续增长,这是一种纤维的补强效应而非增强效应。因为聚丙烯纤维的弹性模量只有硬化混凝土的1/4,根据复合材料理论,与普通混凝土相比,聚丙烯纤维混凝土的强度将有所损失^[4,5]。从表4和表5的结果中我们也可以发现,在28天前,掺有聚丙烯纤维的混凝土其强度均低于对应组无纤维混凝土的强度,但是28天后,由于无纤维混

凝土的收缩增大,微缺陷的增加,使得对微裂纹敏感的抗拉强度有所下降。然而,对于掺有纤维的混凝土,由于聚丙烯纤维的阻裂效应,减少了微裂纹产生和发展的几率,混凝土得以保持较好的完整性,使得抗拉强度与抗压强度一样伴随混凝土的水化进程逐渐提高。

4 结论

随着龄期的增长,混凝土的拉压比逐渐减小,脆性不断增加。掺入低体积率的微细聚丙烯纤维,不仅不影响混凝土的搅拌工艺,反而有助于提高混凝土的粘聚性和抗泌水性。聚丙烯纤维和磨细矿渣共同掺入改善了混凝土的界面特性,增强了纤维与水泥基材的粘结力,大幅度提高了混凝土的阻裂效应和补强效应,降低了混凝土的脆性,提高了混凝土材料的连续性和完整性,有利于混凝土材料后期抗拉强度的增长和混凝土结构的安全性和耐久性。

[参考文献]

- [1] P Soroushian, A Khan, J W Hsu. Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers[J]. ACI Materials Journal. 1992, 89(2): 535-540.
- [2] V M Malhotra, G G Garette, A Bilodeau. Mechanical properties and durability of polypropylene fiber reinforced high-volume fly ash concrete for shotcrete applications[J]. ACI Materials Journal. 1994, 91(5): 478-486.
- [3] B Barr, P D Newman. Toughness of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Composites. 1985, 16(1): 48-53.
- [4] Wu Yao, Keru Wu. Study of mechanical properties on polypropylene fiber reinforced concrete. In: Peiming Wang ed., Proceedings of the 3rd Asian Symposium on Polymers in Concrete, Tongji University Press, Shanghai China 2000. 293-298.
- [5] 姚武, 马一平, 吴科如. 聚丙烯纤维水泥基复合材料物理力学性能研究(II)——力学性能[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(3): 235-239.
- [6] C Rocco, G Guinea, J Planas, M Elces M. Experimental analysis of repture mechanisms in the Brazilian test. In: Mihashi et al. eds., Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, Germany, 1998. 121-130.
- [7] 姚武, 李杰, 赵碧华. 混凝土劈拉破坏机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(接受待发表)

[作者简介] 姚武(1966-),男,博士,同济大学副教授;李杰(1957-),男,同济大学特聘教授,博士生导师。

[单位地址] 上海市四平路1239号(200092)

[联系电话] 021-65980527 13501684153

(下转第36页)

强度呈直线下降趋势；

(4)用界面处理剂 YY-0 及增韧型界面处理剂 YY-3 处理水泥砂浆基底表面,可使粘结强度分别提高 30% 和 60%。

【参考文献】

- [1]Xue Xi-liang et al. Application of resin coating on hydraulic construction. The 6th ICPC shanghai, 1990. 634.
 [2]YANG Dian-wen, Zhu Hequan. Development of a polymer concrete railway bridge sleeper, proceedings of the first east asia symposium on polymers in concrete, chuncheon, korea, p. 337 - 343.
 [3]Sun Jiaying, Zhang Yu. The resezrch of polymer concrete and its application in the emergent repair of highway. Proceedings of the third asia symposium on Polymers in concrete, shanghai, 2000. 365 - 372.
 [4]ACI, Vol. 90, No. 5

- [5]M. H. Fiebrich, Influence of the surface roughness on adhesion between concrete and gunite mortar overlays, Adherence of Young-to-old concrete, 1994. 107.
 [6]R. P. 谢尔顿. 聚合物基复合材料[M]. 轻工出版社.
 [7]Yang Qianrong, Chen Ziyuan. Study on bondign properties between up mortar and cement mortar. Proceedings of the third asia symposium on polymers in concrete, shanghai, 2000. 256 - 262.
 [8]孙勤良, 等. 环氧树脂入门[M]. 《热固性树脂》编辑部出版.
 [9]吕润生. 同济大学硕士学位论文.

【作者简介】 杨钱荣(1965-),男,硕士,工程师,混凝土专业。
 【单位地址】 上海市四平路 1239 号同济大学材料学院 (200092)
 【联系电话】 021-65901281

Study on bondign properties between up mortar and cement mortar

YANG Qian-rong, SHENG Hui-fang, CHEN Zhi-yuan

(School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the analysis of the factors which affect the bonding between UPM and cement mortar and numerous experiments. The author figured out the main factors which influence the cohesive strength between the UPM and substrate are the fluidity of UPM to substrate and the shrinkage ratio of UPM. The solid substrate and rough and dry surface of substrate is propitious to get a high cohesive strength between the UPM and substrate. When the interface is modified by finishing agents, the cohesive strength can increase greatly. The authors also take a tentative approach to the mechanism between he UPM and substrate.

Key words: UP mortar; cement mortar substrate; bonding; cohesive strength; shrinkage; shrinkage

(上接第 42 页)

Influence of polypropylene fiber on the tensile strength of concrete

YAO Wu¹, LI Jie², ZHOU Zhong-ming¹

(1. State Key Laboratory of Concrete Materials Research, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Influence of low volume fraction (0.2%) of polypropylene (PP) fibers on the long term tensile properties of normal and high performance concretes was studied in this paper. Test results indicated that adding PP fibers with low elastic modulus in concrete led to reduction in strength during the standard age. However, beyond 28 days, there exist a notable supplement effect due to PP fibers restraining the formation and growth of microcracks in concrete, which improved the continuity and integrality of concrete. Thus, low volume fraction of PP fibers are beneficial in enhancing long term tensile strength of concrete materials and improving safety and durability of concrete structures.

Key words: polypropylene fiber; concrete; tensile strength; supplement effect