

文章编号: 1673-2049(2008)01-0043-06

添加不同纤维的高性能混凝土力学性能试验

高向玲, 李 杰

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:通过试验研究了弹性模量具有明显差异的 3 种纤维对于混凝土的力学性能改善所起的作用, 以及钢纤维、碳纤维和聚丙烯纤维单掺或复掺对于混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的影响。结果表明: 添加 0.5% 高弹性模量的钢纤维对于混凝土的强度和弹性模量均有提高作用, 复掺 0.3% 钢纤维和 0.2% 碳纤维的混凝土抗拉强度的提高大于抗压强度; 添加 0.5% 钢纤维的混凝土 HPC-2 的弹性模量最大, 比基准混凝土提高 6.5%; 添加 0.2% 聚丙烯纤维的混凝土 HPC-3 的弹性模量最小, 且小于基准混凝土; 此外, 混凝土抗压强度的影响程度与纤维的弹性模量的关系更为直接, 混凝土劈裂抗拉强度的改善与纤维的抗拉强度的关系更为直接, 纤维的弹性模量与基体弹性模量的比值, 对复合材料的弹性模量有直接的影响。

关键词:纤维; 高性能混凝土; 抗压强度; 抗拉强度; 弹性模量; 力学性能

中图分类号: TU502.6 **文献标志码:** A

Experiment on Mechanical Properties of High-performance Concrete with Different Fibers

GAO Xiang-ling, LI Jie

(Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The effect of three obvious different kinds of fibers on the mechanical properties of high-performance concrete was studied by the test. The compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of the concrete were tested when steel, polypropylene and hybrid steel fiber were added to concrete respectively. The results indicate that the high elastic modulus of steel fibers with 0.5% volume fraction will raise the strength and elastic modulus of concrete. When 0.3% carbon-steel fibers and 0.2% carbon fibers are added to concrete, the incremental range of the tensile strength is bigger than that of the compressive strength. For the improvement of the concrete elastic modulus, the effect of 0.5% steel fibers of HPC-2 concrete is the most obvious, which is increased 6.5% than basic concrete. The elastic modulus of HPC-3 concrete by adding 0.2% polypropylene fiber is the least, which is smaller than basic concrete. Moreover, the elastic modulus of fiber and tensile strength have direct effects on the compressive strength of concrete. The magnitude of ratio between the fiber elastic modulus and the concrete elastic modulus has direct effect on that of the fiber reinforced concrete.

Key words: fiber; high-performance concrete; compressive strength; tensile strength; elastic modulus; mechanical property

收稿日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062)

作者简介: 高向玲(1968-), 女, 山西临汾人, 副教授, 工学博士, E-mail: gaoxl@mail.tongji.edu.cn.

0 引言

在混凝土中添加不连续的延性纤维可以显著改善混凝土的脆性。近年来的工程实践表明:低掺量纤维的高性能混凝土,不仅具有经济价值,而且对于促进高性能混凝土的发展具有推动作用。随着高性能混凝土的发展,纤维增强混凝土的应用正日益普遍。目前在混凝土中添加各种纤维改善混凝土性能的研究发展迅速。文献[1]~[3]中研究了添加聚丙烯纤维对混凝土材性的影响,通过对混凝土微观结构的分析可知,这一措施可以显著改善混凝土的抗渗性能和抗火性能。文献[4]、[5]中主要研究添加碳纤维对于混凝土性能的改善。添加混杂纤维亦可改善混凝土性能,文献[6]~[9]中进行了这方面的研究。对于添加纤维的混凝土力学性能研究的重点主要是材料的抗裂性能、抗收缩、徐变的能力以及抗冲击性能;而对于材料的抗压、抗拉强度以及弹性模量的研究却非常少,材料的这些力学性能对于结构或构件承载力和变形的计算却是最基本的参数。

鉴于此,笔者进行了添加不同微量纤维的混凝土的力学性能试验研究,由于碳纤维具有密度小、强度高、弹性模量高和延伸率低等特性,而钢纤维具有密度大、强度高、弹性模量高和延伸率高等特性,由此可见,碳纤维和钢纤维材料在一些材料性能方面是可以互补的,因此,有必要在混凝土中进行碳纤维和钢纤维2种材料的混杂^[10]。此次试验的重点在于了解不同纤维种类对于混凝土的强度和弹性模量的影响,为结构设计和理论分析提供基础。

1 试验材料

试验所用材料是基于C50高性能混凝土配制的,水、水泥、粗骨料、中砂、磨细矿渣的配比为188:260:1 024:684:260,试验所用水泥是安徽宁国水泥厂生产的525#水泥。磨细矿渣为上海水泥厂生产,细度为 $500\text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。粗骨料的最大粒径为15 mm。高效减水剂采用江苏镇江外加剂厂生产的FDN超塑化剂。高效减水剂的体积分数为0.2%~1.0%(试验时由坍落度指标控制)。试验所用纤维的种类及其物理性能指标见表1。

笔者共进行了4批添加不同纤维的高性能混凝土材料性能试验,以测定混凝土的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量,比较不同纤维对于混凝土力学性能的影响。根据是否添加纤维以及添加纤维种类的不同,将试验所用混凝土分为4类,见表2。

表1 3种纤维材料的物理性能指标

Tab.1 Physical Performance Indexes of Three Kinds of Fiber Materials

纤维种类	直径/ μm	长度/ mm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa
钢纤维	500	30	7 800	200.0	500~1 100
聚丙烯纤维	40	15~20	910	3.5~5.0	300~400
碳纤维	12	6	1 600	30.0~40.0	400~600

表2 试验时混凝土的类型

Tab.2 Types of Test Concretes

混凝土类型	纤维种类及添加量
HPC-1	
HPC-2	0.5%钢纤维
HPC-3	0.2%聚丙烯纤维
HPC-4	0.2%碳纤维和0.3%钢纤维

注:纤维添加量均为体积分数,下同。

2 力学性能试验

2.1 立方体抗压强度

混凝土材料性能试验是在同济大学建筑工程系结构实验室进行的。抗压强度试验采用量程为1 000 kN的液压试验机,加载速度 $0.5\text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$,当试件接近破坏而开始迅速变形时,停止调整液压试验机油门,直至试件破坏。

试验中采用的4批添加不同纤维的混凝土试件共计39个,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,试件均在常温下养护。试件的养护期均为28 d,前14 d每天早晚各浇水1次。实测混凝土立方体抗压强度见表3,表3中抗压强度为极限荷载除以受压面积得到的。

以HPC-1(未添加任何纤维)作为基准混凝土进行对比,根据试验结果可知:添加0.5%钢纤维的HPC-2的抗压强度最大,比HPC-1大12.4%;添加0.2%碳纤维和0.3%钢纤维的HPC-4的抗压强度次之,比HPC-1大7.7%;添加0.2%聚丙烯纤维的HPC-3的抗压强度比HPC-1大2.5%。

图1为HPC-2试件压坏后的状况,从图1中可以看出,由于有纤维的牵连,未出现周侧混凝土剥落的情况。

由以上分析可知,添加钢纤维对于提高混凝土的抗压强度是有利的。比较HPC-2和HPC-4可知,当用0.2%碳纤维替换0.2%的钢纤维后,混凝土的抗压强度下降4.1%,这表明碳纤维对于混凝土抗压强度的提高作用略小于钢纤维。添加聚丙烯纤维的作用并不明显。比较上述3种纤维的不同点可

表 3 混凝土立方体抗压强度

Tab. 3 Cubic Compression Strengths of Concretes

混凝土类型	试件个数	试验批次	立方体抗压强度/MPa			抗压强度平均值/MPa	抗压强度均方差/MPa	变异系数
			a组	b组	c组			
HPC-1	12	1	49.8	51.0	54.6	51.8	2.96	0.057
		2	57.0	56.2	53.8			
		4	50.8	51.6	49.6			
			47.0	49.8	51.0			
HPC-2	9	2	54.2	57.2	55.4	58.2	3.28	0.056
		4	58.5	60.0	60.6			
			62.5	53.8	62.0			
HPC-3	3	2	54.6	51.6	53.2	53.1	1.50	0.028
HPC-4	15	3	49.2	43.7	44.4	55.8	5.83	0.104
		4	61.4	63.8	57.0			
			59.2	61.6	50.4			
			57.8	63.6	58.2			
			52.8	56.6	57.4			



图 1 受压破坏的试件

Fig. 1 Specimens of Compression Failure

以看出,钢纤维的弹性模量远远大于混凝土,因而对于改善混凝土的抗压强度起作用。由于聚丙烯纤维弹性模量小于混凝土,碳纤维的弹性模量与混凝土接近,因而这 2 种纤维对于抗压强度的提高作用并不显著,甚至不起作用。纤维弹性模量的大小对于混凝土抗压强度的提高有直接的关系。

2.2 立方体劈裂抗拉强度

混凝土立方体劈裂抗拉强度试验采用量程为 100 kN 的液压试验机加载,加载速度 $0.05 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 加载装置见图 2。当试件接近破坏时,停止调整试验机油门,直至试件破坏。试件破坏后的情况见图 3。根据试验得到的破坏荷载和计算得出的混凝土劈裂抗拉强度值见表 4。

计算劈裂抗拉强度时,采用的表达式为

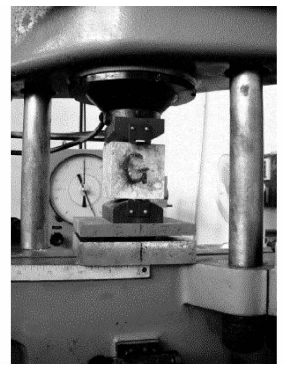
$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: f_{ts} 为混凝土劈裂抗拉强度; P 为破坏荷载; A

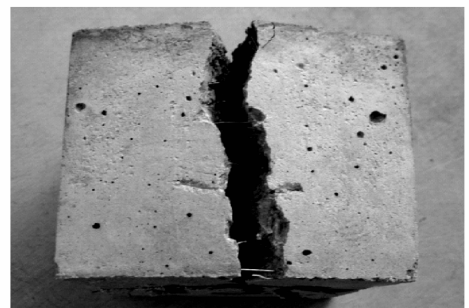
为试件劈裂面面积。

以 HPC-1 作为基准混凝土进行对比,根据试验结果可知:添加 0.5% 钢纤维的 HPC-2 的抗拉强度同样是最大的,比 HPC-1 大 17.1%; 添加 0.2% 碳纤维和 0.3% 钢纤维的 HPC-4 的抗拉强度与 HPC-2 相同。这一现象表明碳纤维对于混凝土的抗拉强度的提高优于其对混凝土抗压强度的提高。添加 0.2% 聚丙烯纤维的 HPC-3 的抗拉强度比 HPC-1 大 9.8%。从图 3 中可以看到,由于有纤维的牵连,试件虽然劈为两半,但并未完全分开,裂缝中可清晰看到纤维。从添加纤维对混凝土劈裂抗拉强度的提高作用可以看出,上述 3 种纤维的抗拉强度均远远大于混凝土的抗拉强度,因而添加 3 种纤维均提高了混凝土的抗拉强度。至于 HPC-3 的抗拉强度提高的幅度较小,其主要原因是聚丙烯的弹性模量小于混凝土的弹性模量。

表 5 为各类混凝土的抗压强度与抗拉强度的比值。从表 5 中可以看出,所有添加纤维的混凝土抗

图 2 劈裂试验加载装置
Fig. 2 Loading Equipment of Splitting Test

(a) 劈裂破坏



(b) 裂缝中的纤维

图 3 劈裂破坏的试件

Fig. 3 Specimens of Splitting Failure

表4 混凝土劈裂抗拉强度

Tab. 4 Splitting Tensile Strengths of Concretes

混凝土类型	试件个数	试验批次	立方体抗压强度/MPa			抗拉强度平均值/MPa	抗拉强度均方差/MPa	变异系数
			a组	b组	c组			
HPC-1	12	1	3.41	3.55	4.36	4.1	0.29	0.071
		2	4.08	4.36	4.33			
		4	4.43	4.11	4.24			
			4.24	3.85	4.11			
HPC-2	9	2	5.26	5.16	5.35	4.8	0.33	0.070
		4	4.30	4.43	5.03			
			4.36	4.78	4.27			
HPC-3	3	2	4.59	4.52	4.40	4.5	0.04	0.008
HPC-4	15	3	4.08	4.11	3.79	4.8	0.45	0.094
			4.81	5.26	5.14			
		4	5.16	5.35	5.05			
			4.65	4.52	5.16			
			5.22	4.46	4.78			

抗压强度与抗拉强度的比值均小于未添加任何纤维的HPC-1,这一结果表明纤维对改善混凝土抗拉强度的作用优于抗压强度。此外,HPC-2抗压强度与抗拉强度的比值为12.21,HPC-4的该比值为11.70,由此可见,碳纤维对于混凝土抗拉强度的改善优于其对混凝土抗压强度的改善。比较HPC-2和HPC-1可知,钢纤维对于改善混凝土的抗压强度和抗拉强度的作用基本相同,HPC-3的比值较小,这也表明聚丙烯纤维对混凝土的抗拉强度改善所发挥的作用大于抗压强度。纤维抗拉强度的大小对混凝土抗拉强度的影响作用显著。由于这3种纤维的抗拉强度均远远大于混凝土的抗拉强度,因而混凝土的抗拉强度改善显著。

表5 抗压强度与劈裂抗拉强度的比值

Tab. 5 Ratios of Compressive Strengths and Splitting Tensile Strengths

混凝土类型	立方体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	抗压强度与抗拉强度的比值
HPC-1	51.85	4.09	12.68
HPC-2	58.24	4.77	12.21
HPC-3	53.13	4.50	11.80
HPC-4	55.81	4.77	11.70

2.3 弹性模量的测定

为了对上述添加不同纤维的高性能混凝土的材料性能有一个更加全面的了解,对上述4类混凝土的弹性模量(应力为轴心抗压强度40%时的加荷割线模量)进行了测定。

测定弹性模量的试件采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定的标准试件,试件为150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体,每种类型的高性能混凝土分别浇注6个试件,其中3个试件用以测定混凝土的轴心抗压强度(弹性模量时的加载量值),其余3个试件用以测定混凝土的弹性模量。试件浇注完成后,在实验室常温养护28 d,进行了轴心抗压强度试验和混凝土弹性模量的测定。

2.3.1 轴心抗压强度

混凝土的轴心抗压强度试验在同济大学混凝土材料实验室采用1 500 kN的液压试验机进行加载。试件的极限抗压承载力和根据极限抗压承载力计算的混凝土的轴心抗压强度见表6。

表6 混凝土极限承载力及轴心抗压强度

Tab. 6 Ultimate Bearing Capacities and Axial Compression Strengths of Concretes

混凝土类型	试验批次	抗压极限承载力/kN			抗压强度平均值/MPa
		a组	b组	c组	
HPC-1	5	1 080	1 180	1 130	50.2
HPC-2	5	1 251	1 321	1 341	57.9
HPC-3	5	1 080	1 010	1 199	48.7
HPC-4	5	1 230	1 195	1 199	53.7

2.3.2 混凝土弹性模量

混凝土弹性模量的测定试验采用上述1 500 kN的液压试验机进行加载,在试件的中部100 mm的范围内黏贴有电阻应变片,应变片分别黏贴在棱柱体试件2个对称的边上,每边各有1个。测定弹性模量的试验如图4所示。

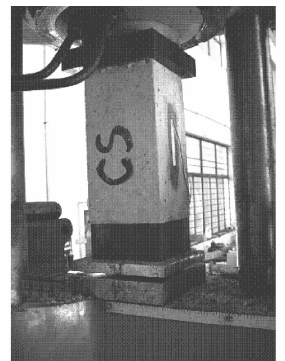


图4 弹性模量测定试验

对上述4种混凝土类型共12个试件的弹性模量进行测定所得的荷载-应变关系曲线如图5所示。每个试件测定完弹性模量后,将仪表卸除,并以同样的速度继续加载直到试件达极限承载力,测得的试件棱柱体的抗压极限承载力见表7。

对表7中测定弹性模量后的极限承载力与表6中同类混凝土用以决定试验控制荷载的轴心抗压强度值进行比较,可以发现两者的差值均未超过轴心

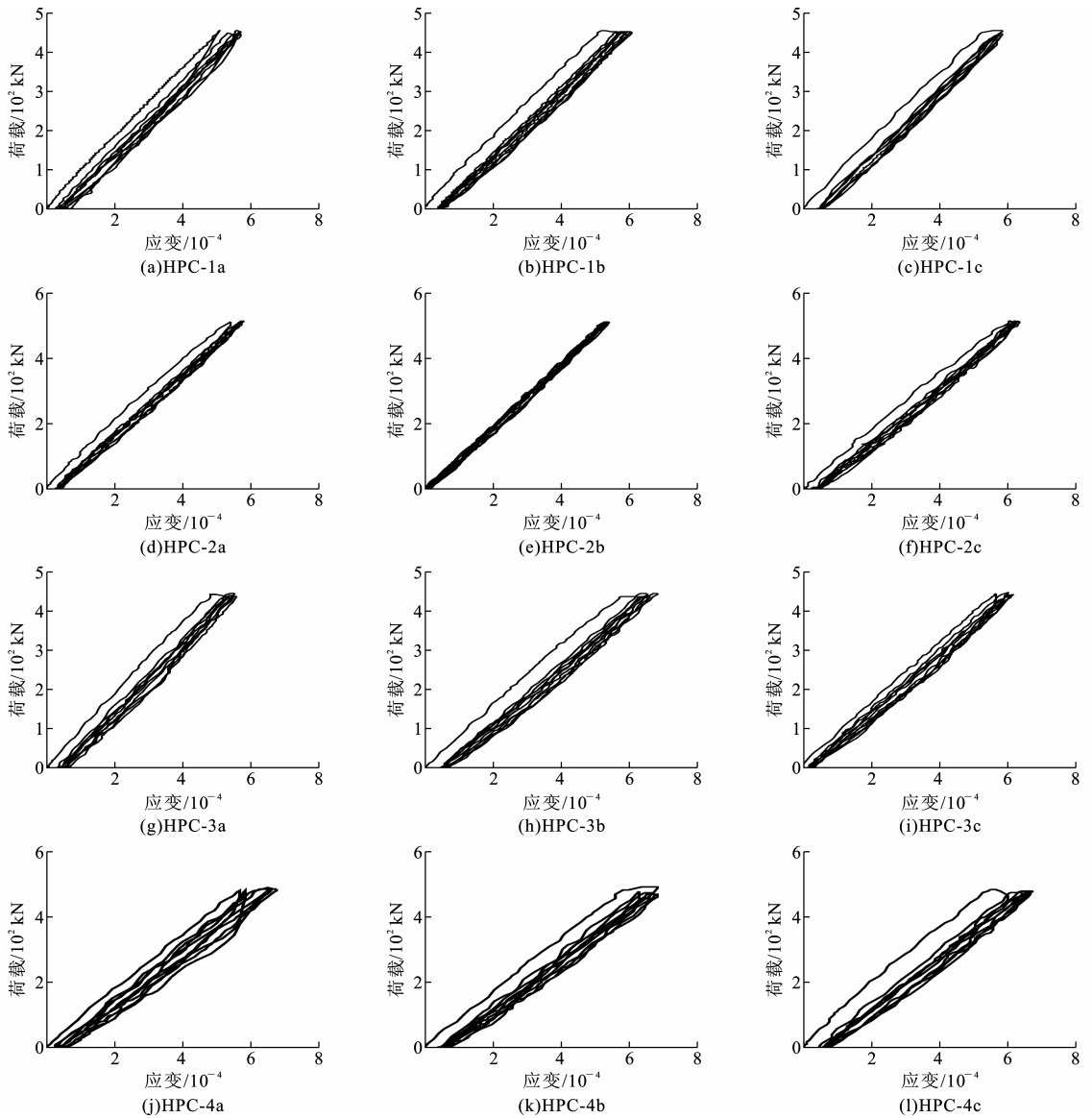


图 5 测定弹性模量的荷载-应变关系曲线

Fig. 5 Relation Curves of Loads and Strains of Measuring Elastic Modulus

表 7 测定弹性模量后的极限承载力

Tab. 7 Ultimate Bearing Capacities After Measuring Elastic Modulus

Measuring Elastic Modulus

混凝土类型		HPC-1	HPC-2	HPC-3	HPC-4
纤维种类			0.5% 钢纤维	0.2% 聚丙烯纤维	0.2%碳纤维和 0.3%钢纤维
棱柱体	a 组	1 140	1 385	960	1 185
抗压极限	b 组	1 170	1 290	1 300	1 150
承载力/kN	c 组	1 090	1 315	1 235	1 240

抗压强度值的 20%，所以对于弹性模量的计算取 3 个试件的算术平均值。由此可以根据每个试件试验数据[图 5(a)~(d)],按式(2)计算得到混凝土的割线模量(表 8)

$$E_c = \frac{P_a - P_0}{A \Delta_n} L \quad (2)$$

式中： E_c 为混凝土弹性模量； P_a 为应力在 40% 轴心抗压强度时的荷载； P_0 为初始荷载； Δ_n 为最后 1 次从 P_0 加荷到 P_a 时试件两侧变形差的平均值。

从表 8 中 4 类混凝土弹性模量的比较可知：添加 0.5% 钢纤维的 HPC-2 的弹性模量最大，比基准混凝土提高 6.5%；添加 0.2% 聚丙烯纤维的 HPC-3 的弹性模量最小，且小于基准混凝土 HPC-1。产生这一结果的原因是由于钢纤维的弹性模量远远大于基体的弹性模量，而聚丙烯纤维的弹性模量小于基体的弹性模量。纤维的弹性模量与基体的弹性模量的比值，对复合材料的弹性模量有直接的影响。

表8 各种混凝土试件的弹性模量

Tab. 8 Elastic Moduli of Various Concrete Specimens

混凝土类型	初始荷载/kN	初始荷载对应的应变/ 10^{-6}	控制荷载/kN	控制荷载对应的应变/ 10^{-6}	弹性模量/10 GPa	弹性模量平均值/10 GPa
HPC-1	11.3	60	450	569	3.83	3.69
		55		607	3.53	
		60		585	3.71	
HPC-2	11.3	40	513	607	3.93	3.93
		22		570	4.07	
		48		637	3.79	
HPC-3	11.3	60	440	558	3.83	3.50
		66		657	3.22	
		40		594	3.44	
HPC-4	11.3	65	480	639	3.45	3.72
		70		638	3.54	
		78		629	3.59	

3 结 语

(1)以 HPC-1(未添加任何纤维)作为基准混凝土进行对比,根据试验结果可知:添加 0.5% 钢纤维的 HPC-2 的抗压强度最大,比 HPC-1 大 12.4%;添加 0.2% 碳纤维和 0.3% 钢纤维的 HPC-4 的抗压强度次之,比 HPC-1 大 7.7%;添加 0.2% 聚丙烯纤维的 HPC-3 的抗压强度比 HPC-1 大 2.5%。

(2)等量添加碳纤维和钢纤维时,碳纤维对于混凝土抗压强度的提高作用略小于钢纤维。添加聚丙烯纤维的作用并不明显。纤维弹性模量的大小对于混凝土抗压强度的提高有直接的关系。

(3)添加 0.5% 钢纤维的 HPC-2 的抗拉强度同样是最大的,比 HPC-1 大 17.1%;添加 0.2% 碳纤维和 0.3% 钢纤维的 HPC-4 的抗拉强度与 HPC-2 相同;添加 0.2% 聚丙烯纤维的 HPC-3 的抗拉强度比 HPC-1 大 9.8%。

(4)纤维对于混凝土抗拉强度的提高优于其对混凝土抗压强度的提高。纤维抗拉强度大小对于混凝土抗拉强度的作用影响显著。

(5)添加 0.5% 钢纤维的 HPC-2 的弹性模量最大,比 HPC-1 提高 6.5%;添加 0.2% 聚丙烯纤维的 HPC-3 的弹性模量最小,且小于 HPC-1。纤维的弹性模量与基体的弹性模量的比值,对复合材料的弹性模量有直接的影响。

参考文献:

References:

- [1] PAULA R, LEENA S. Microstructure of Fiber Mortar Composites Under Fire Impact-effect of Polypropylene and Polyacrylonitrile Fibers[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(5): 896-906.
- [2] ALLAN M L, KUKACKA L E. Permeability and Microstructure of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Grouts[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(4): 671-681.
- [3] LOWELL Y, THOMAS M W, ROBERT D. Bond Strength of Mild Steel in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete[J]. ACI J, 1985, 82(1): 40-45.
- [4] PARK S B, LEE B L, LIM Y S. Experimental Study on the Engineering Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites[J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(3): 589-600.
- [5] KATZ A, BENTUR A. Mechanical Properties and Pore Structure of Carbon Fiber Reinforced Cementations Composites[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(2): 214-220.
- [6] QIAN C X, STROEVEN P. Development of Hybrid Polypropylene-steel Fiber-reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 20(1): 63-69.
- [7] JOHN S L, DAVIDE Z, SURENDRA P S. Permeability of Cracked Hybrid Fiber-reinforced Mortar Under Load[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(2): 379-385.
- [8] YAO Wu, LI Jie, WU Ke-ru. Mechanical Properties of Hybrid Fiber-reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1): 27-30.
- [9] NEMKUMAR B, VIVEK B. Repairing with Hybrid-fiber-reinforced Concrete[J]. Concrete International, 2001, 23(6): 29-33.
- [10] 胡金生, 杨秀敏, 周早生, 等. 钢纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土材料冲击荷载下纤维增韧特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 101-105.
HU Jin-sheng, YANG Xiu-min, ZHOU Zao-sheng, et al. Experimental Study on Tenacity Increase Characteristics of Steel Fiber Reinforced Concrete and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Under Impact Load[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 101-105.