

# 混杂纤维对高性能混凝土拉压比的影响

刘胜兵<sup>1</sup>, 徐礼华<sup>2</sup>

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**为研究低掺量钢-聚丙烯混杂纤维对高性能混凝土拉压比的影响,采用正交试验法设计了18组混杂纤维高性能混凝土试件及1组普通高性能混凝土对比试件,通过标准试验方法进行立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验,试验中考虑的因素主要是钢纤维的特征参数(类型、体积率、长径比)和聚丙烯纤维体积率.分析各因素对高性能混凝土拉压比的影响,结果表明:混杂纤维高性能混凝土具有明显延性破坏特征,而普通高性能混凝土表现为脆性破坏,混杂纤维的掺入使高性能混凝土的拉压比最大提高了26.2%,平均提高了9.9%.在影响高性能混凝土拉压比的四个因素中,钢纤维类型的影响最大,其次是聚丙烯纤维的体积率,影响最小的是钢纤维长径比.高性能混凝土中掺入适量钢-聚丙烯混杂纤维后,拉压比显著提高,韧性得到明显改善.

**关键词:**混杂纤维;正交试验;劈裂抗拉强度;立方体抗压强度;韧性

**中图分类号:**TU375 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2012.09.005

## 0 引言

随着高层和超高层建筑的不断涌现,混凝土正朝着高强度、高性能和多功能的方向发展,但目前高性能混凝土仍然存在脆性大、易开裂等明显不足.混凝土抗拉强度和立方体抗压强度的比值称为拉压强度比,简称拉压比,是反映混凝土脆性的一个重要指标.研究<sup>[1]</sup>表明,随着高性能混凝土强度等级的提高,其劈裂抗拉强度也相应增大,劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的比值大致在1/18~1/14.9之间,而普通混凝土劈裂强度为抗压强度的1/12~1/8.这说明高性能混凝土的抗压强度远比抗拉强度增长得快,随着抗压强度的提高,拉压强度比逐渐减小,脆性随之增加,这对抗震极为不利.钢-聚丙烯混杂纤维高性能混凝土以其优越的力学性能,近年来成为学术界的一大研究热点<sup>[2-11]</sup>.夏广政等<sup>[12]</sup>对混杂纤维高性能混凝土的拉压比进行了试验研究,结果表明,钢纤维和聚丙烯纤维的掺入提高了基体高性能混凝土的抗拉强度和拉压比.

“正交试验法”是安排多因素试验问题行之有效的一种方法,通过安排合理的因素和水平,可以达到以较少试验代替全面试验,从而取得较多成

果的目的.本文采用正交试验法,设计了18组混杂纤维(钢纤维/聚丙烯纤维)高性能混凝土试件和1组未掺纤维的普通高性能混凝土对比试件,进行立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验研究,分析混杂纤维对高性能混凝土拉压比及韧性的影响,以期对《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)<sup>[13]</sup>增补有关混杂纤维混凝土的内容提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 材料和配合比

根据高性能混凝土有关材料选用和配合比设计的要求,参考《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004),选择配置基体高性能混凝土C50及混杂纤维高性能混凝土的材料,相关材料的选用及各种性能指标参见文献[14].现场配置基体高性能混凝土时,配合比设计取水胶比0.3,1 m<sup>3</sup>高性能混凝土中所用材料为:水泥390.5 kg,砂子747.1 kg,石子856 kg,水156.8 kg,粉煤灰132 kg,减水剂4.4 kg.混杂纤维高性能混凝土仅根据纤维掺量及坍落度适当调整减水剂的用量,其他材料均与基体高性能混凝土相同.

### 1.2 正交设计

根据试验的因素和水平数,采用L<sub>18</sub>(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)

收稿日期:2012-07-04

基金项目:湖北省教育厅青年科学基金(B200514003);武汉工程大学科学研究基金(13105021)

作者简介:刘胜兵(1976-),男,湖北天门人,讲师,博士.研究方向:纤维混凝土结构.

正交表安排试验. 正交试验的因素和水平安排见表 1 所示.

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels table

因素	A 钢纤维 体积率/%	B 钢纤维 类型	C 聚丙烯纤 维体积率/%	D 钢纤维 长径比
水平 1	0.5	端钩形	0.055	30
水平 2	1.0	波纹形	0.110	50
水平 3	1.5		0.165	70

### 1.3 试验方法

混杂纤维高性能混凝土立方体抗压强度及劈裂抗拉强度的试验方法、试件尺寸及误差限制、加载速率和试验结果处理等关键问题上的取值原则,与钢纤维混凝土试验方法标准相同. 参考《钢纤维混凝土试验方法》<sup>[15]</sup>及《普通混凝土力学性能试验方法标准》有关规定,抗压强度和劈拉强度试验所用试件均为标准试件,即尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块,常温下养护 28 天后在 5 000 kN 的压力试验机上进行试验. 试验中当试块接近破坏而迅速变形时,停止调整试验机阀门,直至试块破坏,记录破坏荷载.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 受压破坏过程及破坏形态

对于基体高性能混凝土试件,试件的上下端面因受加载垫板的摩阻约束而横向变形很小,试块中部在水平方向膨胀变形最大,当试块的水平伸长应变达到混凝土的极限拉应变或者靠近表面的混凝土在多轴压-拉力作用下达到其极限强度值时,试块出现裂缝. 最初出现的裂缝靠近表层,在中央部分为竖向,斜向往上、下端发展,至承压面附近则向试块角部发展,上方形成倒立的“八”字形裂缝,下方形成正“八”字形裂缝. 荷载继续增加时,新的“八”字裂缝由表层逐渐向内部扩展,表层混凝土开始向外鼓凸剥落,随着荷载稍许增加,试件的最终破坏为正倒相连的四角锥状破坏. 破坏时试件被压碎,且碎块四处散落,表现出明显的脆性性质. 对于混杂纤维高性能混凝土,由于纤维的加入,显著改善了高性能混凝土的受压变形和破坏特性,破坏时没有明显的碎块或崩落,只出现近似垂直的微小裂纹,具有较好的完整性,破坏时表现出一定的塑性性能,如图 1 所示.

### 2.2 受拉破坏过程及破坏形态

普通高性能混凝土基体由于干缩,在其内部存在很多微小收缩裂缝,在整个受力过程中,随着



图 1 混杂纤维高性能混凝土的受压破坏形态

Fig. 1 Compressive failure mode of hybrid fiber reinforced HPC

荷载的逐步增加,微裂缝在应力集中处被引发,此后裂缝进一步稳定扩展,临近破坏时裂缝变为不稳定扩展,并发展很快,最终混凝土破坏. 如图 2 所示,普通高性能混凝土的劈裂抗拉破坏表现出明显的脆性,从宏观上呈现有明显的碎块或崩落;高性能混凝土具有不同于普通混凝土的特点,随着强度的提高其脆性也愈大,延性更差. 混杂纤维高性能混凝土的劈拉破坏表现出较好的延性,破坏时没有明显的碎块或崩落,整体基本保持完整,只是在中部附近出现细小微裂缝,混杂纤维的加入对普通高性能混凝土的脆性性能有明显改善.

### 2.3 试件参数及试验结果

18 组混杂纤维高性能混凝土试件及 1 组普通高性能混凝土试件的相关参数及试验结果见表 2.

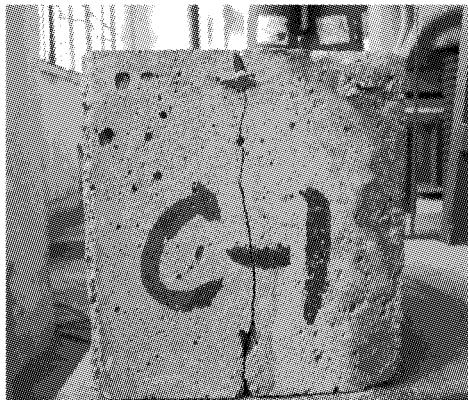




(a) 波纹形钢纤维混杂



(b) 端钩形钢纤维混杂



(c) 基体高性能混凝土

图2 劈裂抗拉破坏形态

Fig.2 Splitting tensile failure mode

表2 试件参数及试验结果

Table 2 Parameters of test specimens and test results

试验 编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	抗压 强度/ MPa	劈拉 强度/ MPa	拉压比
1	/	/	/	/	52.1	3.35	0.065
2	水平 1	水平 1	水平 1	水平 3	56.2	3.75	0.067
3	水平 2	水平 1	水平 1	水平 1	62.8	4.12	0.066
4	水平 3	水平 1	水平 1	水平 2	62.2	4.03	0.065
5	水平 1	水平 1	水平 2	水平 2	40.8	3.38	0.082
6	水平 2	水平 1	水平 2	水平 3	61.4	4.37	0.071
7	水平 3	水平 1	水平 2	水平 1	57.5	4.28	0.075
8	水平 1	水平 1	水平 3	水平 1	44.5	3.69	0.082
9	水平 2	水平 1	水平 3	水平 2	54.8	4.31	0.078
10	水平 3	水平 1	水平 3	水平 3	53.9	3.86	0.072
11	水平 1	水平 2	水平 1	水平 1	64.2	4.55	0.071
12	水平 2	水平 2	水平 1	水平 2	62.9	4.31	0.068
13	水平 3	水平 2	水平 1	水平 3	64.1	4.69	0.073
14	水平 1	水平 2	水平 2	水平 3	63.0	4.44	0.071
15	水平 2	水平 2	水平 2	水平 1	62.2	3.78	0.060
16	水平 3	水平 2	水平 2	水平 2	64.2	4.29	0.067
17	水平 1	水平 2	水平 3	水平 2	63.6	4.07	0.065
18	水平 2	水平 2	水平 3	水平 3	52.5	4.12	0.078
19	水平 3	水平 2	水平 3	水平 1	62.0	4.59	0.075

## 2.4 拉压比分析

采用直观分析法分析各因素对拉压比的影响非常方便,通过极差(平均效果中的最大值与最小值之差)可以非常方便地判断各因素对试验结果的影响大小.由于4个因素的水平数不尽相同,故不能直接比较极差 $R$ ,而需要换算为折算极差 $R'$ 后进行比较.因素A、C、D的折算极差为 $R' = 0.52\sqrt{6}R$ ,因素B的折算极差为 $R' = 0.71\sqrt{9}R$ .直观分析结果见表3.

表3 拉压比直观分析计算表

Table 3 Intuitive analysis of tension - compression ratio

分析指标	因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	极差( $R$ )	折算极差( $R'$ )
拉压比	A	0.437	0.424	0.425	0.073	0.071	0.071	0.003	0.003 3
	B	0.660	0.627		0.073	0.070		0.003	0.008 2
	C	0.409	0.425	0.449	0.068	0.071	0.075	0.007	0.008 1
	D	0.428	0.424	0.432	0.072	0.071	0.072	0.002	0.001 6

注:表中 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 分别表示各因素取水平1、2、3时对应的试验结果之和, $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$ 表示它们的平均值.

### 2.4.1 混杂纤维对拉压比的影响

由表4的直观分析结果可见,混杂纤维的4

个因素对高性能混凝土拉压比的影响顺序为:B(钢纤维类型)>C(聚丙烯纤维体积率)>A(钢纤维

维体积率) $>D$ (钢纤维长径比).由表 2 的试验结果可以看出,与对比试件相比,除个别组合外,实测混杂纤维高性能混凝土的拉压比普遍有所提高,最大提高了 26.2%,平均提高了 9.9%.

#### 2.4.2 单一因素的影响

**a. 钢纤维体积率的影响.**从图 3 可以看出,随着钢纤维体积率的增大,混杂纤维高性能混凝土的拉压比减小,当钢纤维体积率从 0.5% 增大到 1.0% 时,拉压比降低了 2.7%;当钢纤维体积率从 1.0% 增大到 1.5% 时,拉压比基本没有变化.说明当钢纤维体积率达一定程度时,钢纤维的继续增加不仅不能改善高性能混凝土的韧性,还可能起负面作用,原因主要是钢纤维掺入过多会导致分散不均,和混凝土产生弱界面效应.

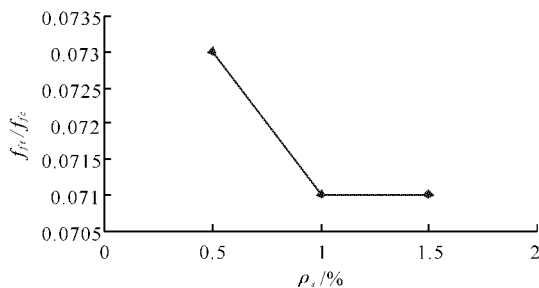


图 3 钢纤维体积率对拉压比的影响

Fig. 3 Effect of the volume fraction of steel fiber on tension-compression ratio

**b. 钢纤维类型的影响.**图 4 为钢纤维类型对混杂纤维高性能混凝土拉压比的影响直方图.掺入波纹形钢纤维的混杂纤维高性能混凝土比掺入端钩形钢纤维的混杂纤维高性能混凝土拉压比平均高 11.7%.

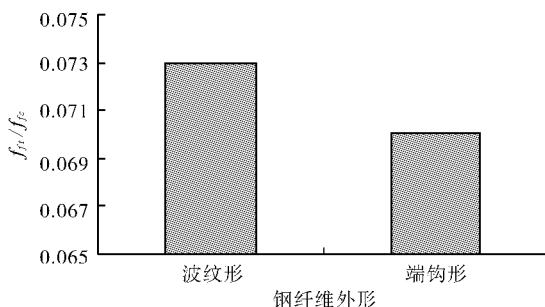


图 4 钢纤维类型对拉压比的影响

Fig. 4 Effect of types of steel fiber on tension-compression ratio

**c. 钢纤维长径比的影响.**图 5 给出了钢纤维长径比对混杂纤维高性能混凝土拉压比的影响直方图.在本文试验钢纤维长径比范围内,混杂纤维高性能混凝土拉压比的最大值和最小值之间的相对误差为 1.4%,在试验误差范围内.可见在 30~70 范围内钢纤维长径比对混杂纤维高性能混凝土

拉压比几乎没有影响.

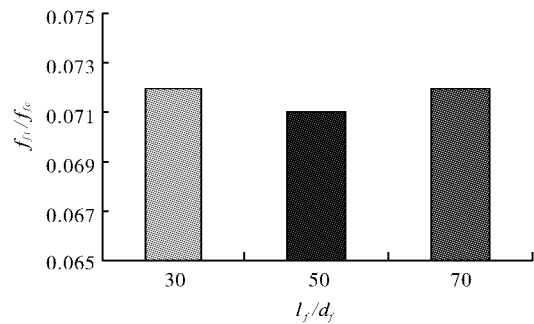


图 5 钢纤维长径比对拉压比的影响

Fig. 5 Effect of the aspect ratio of steel fiber on tension-compression ratio

**d. 聚丙烯纤维体积率的影响.**从图 6 可见,高性能混凝土的拉压比随聚丙烯纤维体积率的增大而增大,近似呈线性关系.当聚丙烯纤维体积率从 0.055% 增大到 0.165% 时,混杂纤维高性能混凝土拉压比提高了 10.3%.说明掺入适量的聚丙烯纤维能有效提高高性能混凝土的韧性.

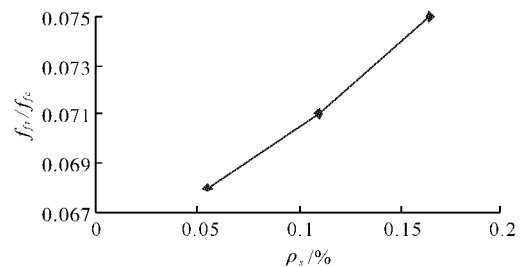


图 6 聚丙烯纤维体积率对拉压比的影响

Fig. 6 Effect of the volume fraction of polypropylene fiber on tension-compression ratio

### 3 结 语

**a. 普通高性能混凝土的受压破坏和劈裂抗拉破坏**均表现出很大的脆性,而混杂纤维高性能混凝土大都近似于延性破坏.**b. 混杂纤维掺入高性能混凝土后**,使基体高性能混凝土的拉压比普遍提高.各种混杂组合使高性能混凝土的拉压比最大提高了 26.2%,平均提高了 9.9%.**c. 钢纤维类型对混杂纤维高性能混凝土拉压比影响最大**,聚丙烯纤维体积率的影响其次,钢纤维长径比的影响最小.

#### 参考文献:

- [1] 冯乃谦. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [2] 夏冬桃,徐礼华,池寅,等. 混杂纤维增强高性能混凝土强度的试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2007(1): 77-81.
- [3] 王立久. 低掺量钢纤维/聚丙烯纤维高性能混凝土

- 试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [4] Khaliq Wasim, Kodur Venkatesh. High temperature properties of fiber reinforced high strength concrete[J]. ACI Special Publication, 2008, 279:77-118.
- [5] SONG P S, WU J C, HWANG S, et al. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19 (1):129.
- [6] SOFREN Leo Suhaendi, TAKASH I Horiguchi. Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (6):1003-1009.
- [7] Bajaj Vineet, Singh Amrit Pal, Singh Surinder Pal, et al. Flexural fatigue analysis of hybrid fibre-reinforced concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(4):361-373.
- [8] Köksal Fuat, Gencel Osman, Unal Burhan, et al. Durability properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2012, 19(1):19-27.
- [9] Suhaendi, Sofren Leo, Horiguchi, et al. Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9):1672-1678.
- [10] Hsie Machine, Chen Guohuei, Song Peyshiu. Investigating abrasion resistance of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete using statistical experimental design [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2011, 4(5):274-280.
- [11] Taner Yildirim S, Ekinçi Cevdet E, Findik Fehim. Properties of hybrid fiber reinforced concrete under repeated impact loads[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2010, 46(7):538-546.
- [12] 夏广政, 夏冬桃, 徐礼华, 等. 混杂纤维增强高性能混凝土拉压比试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5):103-106.
- [13] 大连理工大学. CECS 38:2004 纤维混凝土结构技术规程[M]. 北京:中国计划出版社, 2004.
- [14] 刘胜兵, 徐礼华, 周建民. 混杂纤维高性能混凝土强度的正交试验[J]. 武汉理工大学学报:自然科学版, 2009, 31(8):5-9.
- [15] 大连理工大学. CECS 13:89 钢纤维混凝土试验方法[M]. 北京:中国计划出版社, 1989.

## Effect of hybrid fiber on tension-compression ratio of high performance concrete

LIU Sheng-bing<sup>1</sup>, XU Li-hua<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of hybrid fiber (steel fiber and polypropylene fiber) on tension-compression ratio of high performance concrete (HPC), 18 different groups of specimens with steel fiber and polypropylene fiber and 1 group contradistinctive HPC specimen were designed according to the orthogonal experiment. The splitting tensile strength and compressive strength were tested by standard test method. The contributory factors such as the characteristic parameters of steel fiber (types, volume fraction, aspect ratio) and the volume fraction of polypropylene fiber were analyzed. Influence of all kinds of factors on tension-compression ratio of hybrid fiber reinforced high performance concrete was compared by direct-viewing analysis of the orthogonal experimental design. Experimental results illuminate that hybrid fibers make the failure process of high performance concrete ductile damage change from brittle failure into ductility failure, the maximum value of ratio between splitting tensile strength and compressive strength increases by 26.2% and the average value increases by 9.9%. Among four factors which influence tension-compression ratio of HPC, the most important factor is the type of steel fiber, the second factor is polypropylene fiber volume fraction, the least one is length/diameter aspect ratio of steel fiber. Thus adding a reasonable volume of hybrid fibers into high performance concrete can increase tension-compression ratio, so as to improve toughness.

**Key words:** hybrid fiber; splitting tensile strength; compressive strength; orthogonal experiment; toughness; tension-compression ratio

本文编辑:龚晓宁