

文章编号:1674-2869(2013)03-0008-05

# 混杂纤维高性能混凝土深梁斜截面抗裂度计算方法

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:**为研究混杂纤维(钢纤维/聚丙烯纤维)高性能混凝土深梁的斜截面抗裂度,采用正交试验法设计了 18 组混杂纤维高性能混凝土深梁试件和 2 组未掺纤维的普通高性能混凝土深梁对比试件.通过静载作用下的受剪试验,探讨了钢纤维的特征参数(类型、体积率、长径比)、聚丙烯纤维体积率、水平分布钢筋配筋率及竖向分布钢筋配筋率等 6 个因素对高性能混凝土深梁斜截面抗裂度的影响,通过正交试验的直观分析法比较了各个因素对斜截面抗裂度的影响顺序.试验结果表明:掺入适量的混杂纤维(钢纤维/聚丙烯纤维)后,无腹筋高性能混凝土深梁斜截面抗裂度提高幅度可达 34.9%,有腹筋高性能混凝土深梁斜截面抗裂度提高幅度可达 83.8%.基于现行规范提出了与钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁相衔接的混杂纤维(钢纤维/聚丙烯纤维)高性能混凝土深梁斜截面抗裂度的计算公式,可为工程设计提供参考.

**关键词:**混杂纤维;正交试验法;受剪试验;剪切初裂强度;计算公式

**中图分类号:**TU375

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.03.002

## 0 引 言

钢筋混凝土深梁以其巨大的承载能力,已广泛应用于肩梁、墙梁、剪力墙连梁、框支梁等构件.近年来各国研究者已开始将高性能混凝土(HPC)应用于深梁结构,但仍然没能改变混凝土结构脆性大、易开裂的特点<sup>[1]</sup>.深梁的斜截面抗裂验算是结构正常使用极限状态设计阶段的重要内容<sup>[2]</sup>.已有研究<sup>[3-7]</sup>表明,钢/聚丙烯混杂纤维混凝土具有良好的抗拉能力,将其应用于深梁结构或许能有效提高其抗裂度.目前国内外对于钢/聚丙烯混杂纤维 HPC 深梁的研究尚处于起步阶段,而有关混杂纤维 HPC 深梁抗裂度的研究更是鲜有报道.本文采用正交设计法,通过对 18 组混杂纤维 HPC 深梁试件以及 2 组普通 HPC 深梁试件进行受剪

试验,研究混杂纤维 HPC 深梁斜截面抗裂性能,提出混杂纤维 HPC 深梁斜截面抗裂度的计算公式,以期为《纤维混凝土结构技术规程》增补有关混杂纤维混凝土深梁的内容提供参考.

## 1 试验概况

采用正交试验法,按照《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)<sup>[8]</sup>的有关要求,选用 L<sub>18</sub>(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)正交表设计 18 组钢/聚丙烯混杂纤维 HPC 深梁,同时设计了 2 组不掺纤维的对比深梁.正交设计时考虑的影响因素有钢纤维体积率、长径比及类型、聚丙烯纤维体积率、水平及竖向分布钢筋配筋率等.正交试验的因素及水平安排详见表 1.

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	E 水平分布 钢筋配筋率/%	F 竖向分布 钢筋配筋率/%
水平 1	0.5	端钩形	0.055	30	0	0
水平 2	1.0	波纹形	0.110	50	0.581	0.581
水平 3	1.5		0.165	70	0.872	0.872

收稿日期:2013-01-19

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.

20组深梁剪跨比 $\lambda=a/h_0=1$ ,其中 $a=h_0=400$  mm,跨高比均取1.6,截面均为150 mm×500 mm矩形截面,长1 040 mm.混杂纤维高性能混凝土的材料选用、配合比设计及现场配置等内容参见文献[9].采用标准试验方法测得的基体HPC

立方体抗压强度为52.1 N/mm<sup>2</sup>,劈拉强度为3.35 N/mm<sup>2</sup>,钢筋的力学性能指标见表2.所有试验深梁均为简支深梁,加载试验在5 000 kN的压力试验机上进行,采用跨中单点集中加载的静力加载装置.深梁相关参数及受剪试验结果见表3.

表2 钢筋的力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of steel bar

钢筋	实测直径/mm	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	极限强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率/%
$\Phi 18$	18.5	370	550	27
$\Phi 10$	10.4	300	395	26

表3 试件参数及试验结果

Table 3 Parameters of test specimens and test results

深梁编号	A 钢纤维 体积率/%	B 钢纤维 类型	C 聚丙烯纤维 维体积率/%	D 钢纤维 长径比	E 水平分布 筋配筋率/%	F 竖向分布 筋配筋率/%	纵筋	剪切初裂强度 ( $V_{\text{fer}}/bh_0$ )/MPa
BF3-1-1	1(0.5)	1(波纹形)	1(0.055)	3(70)	2(0.872)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	3.63
BF1-2-1	2(1.0)	1(波纹形)	1(0.055)	1(30)	1(0)	1(0)	4 $\Phi 18$	3.44
BF2-3-1	3(1.5)	1(波纹形)	1(0.055)	2(50)	3(0.581)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	4.75
BF2-1-2	1(0.5)	1(波纹形)	2(0.110)	2(50)	2(0.872)	1(0)	4 $\Phi 18$	4.38
BF3-2-2	2(1.0)	1(波纹形)	2(0.110)	3(70)	1(0)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	4.50
BF1-3-2	3(1.5)	1(波纹形)	2(0.110)	1(30)	3(0.581)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	4.25
BF1-1-3	1(0.5)	1(波纹形)	3(0.165)	1(30)	1(0)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	2.88
BF2-2-3	2(1.0)	1(波纹形)	3(0.165)	2(50)	3(0.581)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	5.00
BF3-3-3	3(1.5)	1(波纹形)	3(0.165)	3(70)	2(0.872)	1(0)	4 $\Phi 18$	4.06
DF1-1-1	1(0.5)	2(端钩形)	1(0.055)	1(30)	3(0.581)	1(0)	4 $\Phi 18$	2.88
DF2-2-1	2(1.0)	2(端钩形)	1(0.055)	2(50)	2(0.872)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	2.50
DF3-3-1	3(1.5)	2(端钩形)	1(0.055)	3(70)	1(0)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	3.63
DF3-1-2	1(0.5)	2(端钩形)	2(0.110)	3(70)	3(0.581)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	3.25
DF1-2-2	2(1.0)	2(端钩形)	2(0.110)	1(30)	2(0.872)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	4.13
DF2-3-2	3(1.5)	2(端钩形)	2(0.110)	2(50)	1(0)	1(0)	4 $\Phi 18$	4.38
DF2-1-3	1(0.5)	2(端钩形)	3(0.165)	2(50)	1(0)	2(0.872)	4 $\Phi 18$	4.06
DF3-2-3	2(1.0)	2(端钩形)	3(0.165)	3(70)	3(0.581)	1(0)	4 $\Phi 18$	3.25
DF1-3-3	3(1.5)	2(端钩形)	3(0.165)	1(30)	2(0.872)	3(0.581)	4 $\Phi 18$	3.13
C-1	0		0		0.581	0.872	4 $\Phi 18$	2.72
C-2	0		0		0	0	4 $\Phi 18$	3.25

注:表中BF系列表示采用波纹形钢纤维的混杂纤维高性能混凝土深梁,DF系列表示采用端钩形钢纤维的混杂纤维高性能混凝土深梁;BF2-3-1表示波纹形钢纤维长径比的水平取为2、体积率的水平取为3、聚丙烯纤维体积率的水平取为1时的混杂纤维高性能混凝土深梁,其它依此类推。

## 2 斜截面抗裂度

### 2.1 混杂纤维对深梁斜截面抗裂度的影响

由表3可知,掺入体积率1.0%钢纤维和0.055%聚丙烯纤维的无腹筋深梁BF1-2-1以及体积率为1.5%钢纤维和0.110%聚丙烯纤维的无腹筋深梁DF2-3-2,与对比深梁C-2相

比,剪切初裂强度分别提高了5.6%和34.9%;掺入体积率1.5%钢纤维和0.110%聚丙烯纤维的有腹筋深梁BF1-3-2以及体积率为1.0%钢纤维和0.165%聚丙烯纤维的有腹筋深梁BF2-2-3,与对比深梁C-1相比,剪切初裂强度分别提高了56.3%和83.8%.说明掺入钢/聚丙烯混杂纤维可显著提高高性能混凝土深梁的斜截面抗裂度。

根据各因素所做的深梁剪切初裂强度试验成果,采用直观分析法进行分析如表 4. 由表 4 可以看出,各因素对深梁斜截面抗裂度的影响顺序依次

为 D(钢纤维长径比)>C(聚丙烯纤维体积率)>B(钢纤维外形)>A(钢纤维体积率)>E(水平分布钢筋配筋率)>F(竖向分布钢筋配筋率).

表 4 深梁剪切初裂强度直观分析计算表  
Table 4 Intuitive analysis of diagonal cracking strength

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 $R'$
$V_{fer}$	A(钢纤维体积率)	21.09	22.83	24.20	3.51	3.81	4.04	0.53	0.68
	B(钢纤维外形)	36.89	33.71		4.10	3.75		0.35	0.75
	C(聚丙烯纤维体积率)	20.84	24.90	22.40	3.48	4.16	3.74	0.68	0.87
	D(钢纤维长径比)	20.71	25.07	22.32	3.45	4.18	3.72	0.73	0.93
	E(水平钢筋配筋率)	22.89	21.83	21.02	3.81	3.65	3.51	0.30	0.38
	F(竖向钢筋配筋率)	22.40	23.46	22.28	3.74	3.92	3.72	0.20	0.25

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.

## 2.2 单一因素对深梁斜截面抗裂度的影响

2.2.1 钢纤维体积率的影响 在相关各因素不变的条件下,只改变钢纤维体积率,可得到图 1. 由图 1 可以看出,HPC 深梁斜截面抗裂度与钢纤维体积率近似呈线性关系. 当钢纤维体积率从 0.5%增加到 1.5%时,深梁的斜截面抗裂度提高了 15.1%.

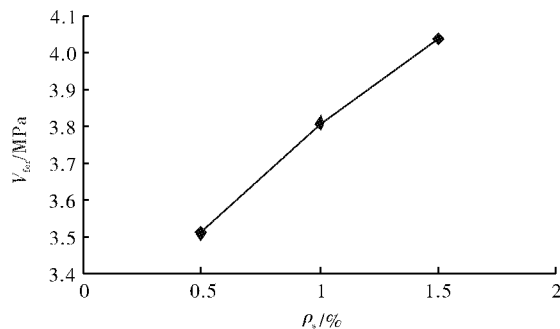


图 1 钢纤维体积率对剪切初裂强度的影响  
Fig. 1 Effect of the volume fraction of steel fiber on diagonal cracking strength

2.2.2 钢纤维类型的影响 在相关各因素不变的条件下,只改变钢纤维类型,可得到图 2. 从图 2 可以看出,波纹形钢纤维对 HPC 深梁斜截面抗裂度的影响更明显,主要是由于波纹形钢纤维的表面存在较多波纹,在开裂前与混凝土粘结能力更强,因此抗裂效果更好.

2.2.3 钢纤维长径比的影响 为研究钢纤维长径比对 HPC 深梁斜截面抗裂度的影响,在相关各因素不变的条件下,改变钢纤维长径比,可得到直方图 3. 由图 3 可以看出,钢纤维长径比从 30 增加到 50 时,深梁斜截面抗裂度提高了 21.2%,当长径比从 50 增大到 70 时斜截面抗裂度降低了 11%. 原因是长径比为 50 的钢纤维与混凝土基体的粘结力更强,不易拔出,有效抑制了微裂缝的产

生与发展.

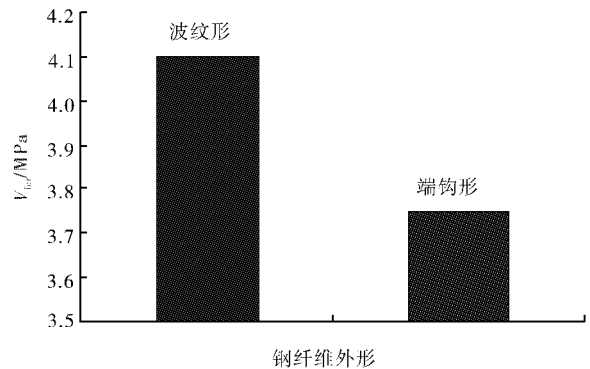


图 2 钢纤维类型对剪切初裂强度的影响  
Fig. 2 Effect of types of steel fiber on diagonal cracking strength

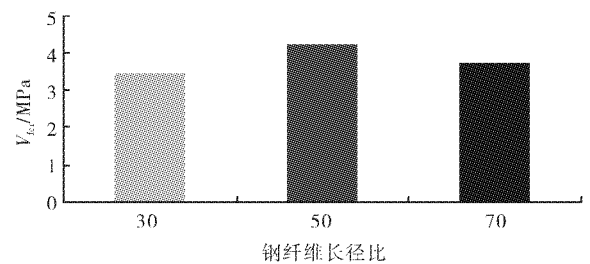


图 3 钢纤维长径比对剪切初裂强度的影响  
Fig. 3 Effect of the aspect ratio of steel fiber on diagonal cracking strength

2.2.4 聚丙烯纤维体积率的影响 同理,聚丙烯纤维体积率变化对 HPC 深梁斜截面抗裂度的影响,如图 4. 可见,当聚丙烯纤维体积率从 0.055%增加到 0.110%时,深梁斜截面抗裂度提高了 19.5%;当聚丙烯纤维体积率从 0.110%增加到 0.165%时,斜截面抗裂度降低了 10.1%. 表明聚丙烯纤维体积率为 0.110%时对深梁斜截面抗裂度增强效果最好,纤维体积率过大效果反而降低.

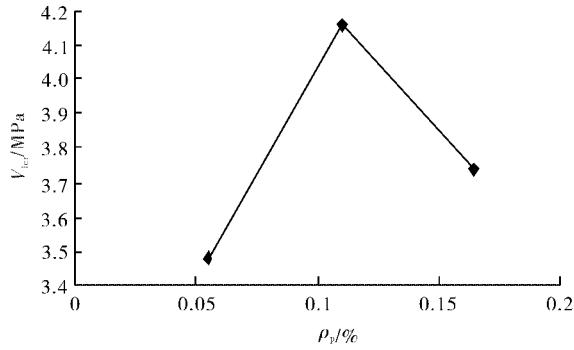


图4 聚丙烯纤维体积率对剪切初裂强度的影响

Fig. 4 Effect of the volume fraction of polypropylene fiber on diagonal cracking strength

2.2.5 水平分布钢筋配筋率的影响 按同样的试验方法,可有图5所示,当水平分布钢筋配筋率从0增加到0.581%时,深梁的斜截面抗裂度降低了4.2%,当配筋率从0.581%增大到0.872%时,斜截面抗裂度降低了3.83%,在试验误差范围以内。说明水平分布钢筋对深梁斜截面抗裂度的影响较小,分析原因主要是混凝土深梁斜裂缝出现前,钢筋与混凝土作为一个整体共同承担拉力,水平钢筋的抗拉作用得不到充分发挥,这与普通混凝土深梁的试验结果是一致的。

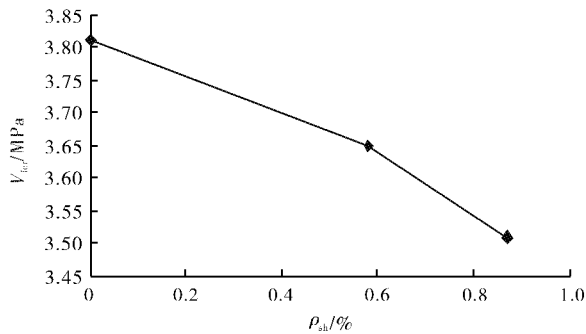


图5 水平分布钢筋配筋率对剪切初裂强度的影响

Fig. 5 Effect of the ratio of web horizontal reinforcement on diagonal cracking strength

2.2.6 竖向分布钢筋配筋率的影响 同理,图6是竖向分布钢筋配筋率的变化对深梁斜截面抗裂度的影响。由图6可见,随着竖向分布钢筋配筋率的提高,深梁斜截面抗裂度先增大后减小;当竖向分布钢筋配筋率从0增加到0.581%时,斜截面抗裂度提高了4.8%;而当竖向分布钢筋配筋率从0.581%增加到0.872%时,斜截面抗裂度降低了5.1%。竖向分布钢筋对提高混杂纤维HPC深梁斜截面抗裂度不明显,原因是在斜裂缝即将出现时,竖向分布钢筋的应力不大,同时竖向分布钢筋的直径小且光滑,间距也较大,对斜裂缝上混凝土应力重分布的调节作用和抑制微裂缝开展的作用很小,难以起到抗裂作用。

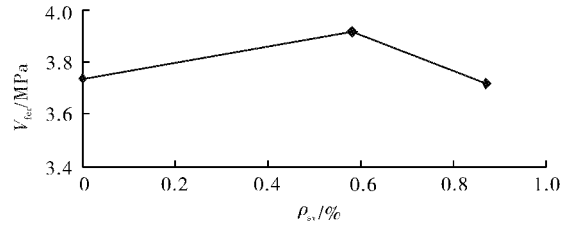


图6 竖向分布钢筋配筋率对剪切初裂强度的影响

Fig. 6 Effect of the ratio of web vertical reinforcement on diagonal cracking strength

### 2.3 混杂纤维HPC深梁斜截面抗裂度计算公式

由前述分析可知,在影响混杂纤维HPC深梁斜截面抗裂度的因素中,聚丙烯纤维的作用是相当明显的,但同时影响程度并不与聚丙烯纤维体积率呈线性关系。因此,不单独考虑聚丙烯纤维的增强作用,而是将聚丙烯纤维和钢纤维的作用作为整体共同考虑。试验所考虑的三种体积量中,体积率为0.110%的聚丙烯纤维对HPC深梁斜截面抗裂度的增强效果最明显。同时文献[10]指出,混杂纤维混凝土中掺入体积率为0.110%的聚丙烯纤维时,对深梁抗弯性能提高幅度最大。因此,建议实际工程中聚丙烯的体积率可取在0.055%~0.110%之间。为反映聚丙烯纤维对HPC深梁斜截面抗裂度的提高作用,并考虑与我国现行《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)相衔接,混杂纤维HPC深梁的斜截面开裂剪力计算方法可考虑在钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁斜截面开裂剪力的基础上乘以一提高系数 $\beta$ 。于是,混杂纤维高性能混凝土深梁斜截面开裂剪力可表达为

$$V_{fcr} = \beta V_{cr} (1 + 1.15 \varphi_f \lambda_f) \quad (1)$$

式中 $V_{fcr}$ 为按荷载效应的标准组合计算的深梁剪力值, $V_{cr}$ 为按荷载效应的标准组合计算的普通高性能混凝土深梁剪力值, $\beta$ 为混杂纤维的增强系数, $\varphi_f = h_f/h$ , $h_f$ 为受拉区混杂纤维配置高度, $h$ 为全截面高度, $\lambda_f$ 为钢纤维含量特征值, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ , $\rho_f$ 为钢纤维体积率, $l_f$ 为钢纤维长度, $d_f$ 为钢纤维直径或等效直径。

摒弃聚丙烯纤维体积率为0.165%时各深梁的试验数据后,经线性拟合,得到 $\beta = 1.16$ ,标准差为0.06。

## 3 结 语

a. 掺入适量的钢/聚丙烯混杂纤维后,无腹筋深梁斜截面抗裂度提高幅度可达34.9%,有腹筋深梁斜截面抗裂度提高幅度可达83.8%。

b. 影响混杂纤维HPC深梁斜截面抗裂度的

各因素排序为 D(钢纤维长径比) > C(聚丙烯纤维体积率) > B(钢纤维类型) > A(钢纤维体积率) > E(水平分布钢筋配筋率) > F(竖向分布钢筋配筋率)。

c. 基于现行规范提出的与钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁相衔接的混杂纤维 HPC 深梁斜截面抗裂度计算公式形式简单, 可供工程设计参考。

## 致谢

本研究得到了湖北省教育厅和武汉工程大学的经费资助, 在此表示诚挚的谢意, 同时还要感谢武汉大学工程结构中心在试验过程中提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] 丁大钧. 高性能混凝土及其在工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 高丹盈, 赵军, 朱海堂, 等. 钢筋钢纤维混凝土深梁抗裂度的计算方法[J]. 水利学报, 2007(11): 124-128.
- [3] 尹机会, 丁一宁. 混杂纤维混凝土劈拉性能试验研究[J]. 混凝土, 2007(3): 11-13.
- [4] 刘胜兵, 徐礼华. 混杂纤维高性能混凝土强度的计算

- 方法探讨[J]. 武汉理工大学学报: 自然科学版, 2012, 34(11): 109-113.
- [5] 刘胜兵, 徐礼华. 混杂纤维对高性能混凝土抗压比的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(9): 17-21.
- [6] Hsie Machine, Chen Guohuei, Song Peyshuan. 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.
- [7] Köksal Fuat, Gencil 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.
- [8] 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.
- [9] 刘胜兵, 徐礼华, 周健民. 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.
- [10] 夏冬桃, 徐世烺, 夏广政. 钢/聚丙烯混杂纤维对 HPC 深梁受弯性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 313-316.

# Calculation method for diagonal section crack resistance of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams

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 study diagonal section crack resistance of hybrid fiber reinforced high performance concrete (HPC) deep beams, 18 different groups of deep beams with steel fiber and polypropylene fiber and 2 groups HPC deep beams without fiber were made according to orthogonal test method. The effects of 6 factors on diagonal section crack resistance of HPC deep beams were explored through the shear tests under dead load. The contributory factors such as the characteristic parameters of steel fiber (types, volume fraction, aspect ratio), the volume fraction of polypropylene fiber, the ratio of web horizontal reinforcement and the ratio of web vertical reinforcement were compared by direct-viewing analysis of the orthogonal experiment. The results show that hybrid fiber can be used to greatly increase the diagonal section crack resistance of HPC deep beams. The diagonal section crack resistance of HPC deep beams without web reinforcement is increased by 34.9% while diagonal section crack resistance of HPC deep beams with web reinforcement is increased by 83.8%. Based on current code, a formula for calculating the diagonal section crack resistance of hybrid fiber reinforced HPC deep beams is proposed coordinating with steel fiber reinforced concrete deep beams, which can be taken as a reference in engineering design.

**Key words:** hybrid fiber; orthogonal test method; shear test; diagonal cracking strength; calculation formula

本文编辑: 龚晓宁