

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.005

# 混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算方法

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, 武汉 430073; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院 武汉 430072)

**摘要:**采用正交试验法设计钢-聚丙烯混杂纤维高性能混凝土(简称 HPC)深梁试件,通过静力试验研究混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算方法。正交试验中考虑的因素主要有钢纤维特征参数(类型、体积率、长径比)、聚丙烯纤维体积率、水平及竖向分布钢筋配筋率等。结果表明:混杂纤维能改变无腹筋 HPC 深梁的受剪破坏形态;混杂纤维的掺入使得 HPC 深梁的剪切初裂强度和抗剪极限强度明显提高,其平均提高幅度分别为 45.2% 和 25.6%。将塑性理论应用于混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算得到了很好的结果,分析表明水平及竖向分布钢筋配筋率的大小对混杂纤维 HPC 深梁抗剪强度的影响不显著,但水平分布钢筋的作用大于竖向分布钢筋。分析了混杂纤维的增强机理,提出了基于“拉杆拱”模型和劈裂破坏计算模式的混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算式。

**关键词:**混杂纤维;高性能混凝土;深梁;正交试验;受剪承载力;计算方法

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0033-05

## Calculation Method of Shear Behavior of Hybrid Fiber Reinforced High Performance Concrete Deep Beams

Liu Shengbing<sup>1</sup>, Xu Lihua<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, P. R. China;  
2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

**Abstract:** The static tests on hybrid fiber (steel fiber and polypropylene fiber) reinforced high performance concrete deep beams according to the orthogonal experimental design were conducted. The shear capacity and calculation method of deep beams were discussed as well. 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 analyzed. Results show that the shear failure mode of deep beams is changed with adding a reasonable volume of hybrid fibers, and hybrid fiber can greatly increase the diagonal cracking strength and shear strength of HPC deep beams. The diagonal cracking strength is increased by 45.2% averagely while the shear strength is increased by 25.6% averagely. A satisfied result is obtained when the plasticity theory is used to analyze shear behavior of hybrid fiber reinforced HPC deep beams. The contribution of web horizontal reinforcement and web vertical reinforcement to shear strength of deep beams is not obvious but the former plays a major role. After analyzing the strengthening mechanism of hybrid fiber, a formula to calculate the shear capacity of hybrid fiber reinforced HPC deep beams is presented based on spatial strut-and-tie mode and splitting failure.

**Key words:** hybrid fiber; high performance concrete (HPC); deep beam; orthogonal experiment; calculation method

收稿日期:2012-09-21

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(K201315)

作者简介:刘胜兵(1976-),男,博士,主要从事纤维混凝土结构、工程结构抗震研究,(E-mail)ajie2046@sina.com。

钢纤维混凝土具有优良的抗拉、抗剪、抗震等力学性能,聚丙烯纤维混凝土韧性高、阻裂效果好,且价格便宜,而钢-聚丙烯混杂纤维高性能混凝土兼具两者的优点,具有良好的正混杂效应<sup>[1]</sup>。随着城市经济的不断发展,愈来愈多的高层、超高层建筑、大跨度桥梁不断涌现,高性能混凝土和深梁在土木工程中的应用越来越广泛,常见的深梁有转换层大梁、地下室墙壁和墙式基础梁等<sup>[2]</sup>。深梁由于自身的受力特点,常常会发生受剪破坏。各国学者<sup>[3-5]</sup>已经探讨了钢纤维增强混凝土深梁和聚丙烯纤维增强混凝土深梁的受剪承载力计算方法,但有关混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算方法的研究还鲜有报道。《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)<sup>[6]</sup>还没有对混杂纤维高性能混凝土深梁的设计和施工提出相关规定。为建立混杂纤维高性能混凝土深梁受剪承载力计算公式,结合正交试验方法,制作 20 组

HPC 深梁试件,其中 2 组为不掺纤维的 HPC 深梁对比试件。

## 1 试验概况

18 组混杂纤维 HPC 深梁依照  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  正交表设计并制作,2 组不掺纤维的 HPC 深梁作为对比试件同时制作。正交设计的因素及水平安排见表 1。试验中对比深梁的混凝土强度为 C50,采用标准试验方法测得其立方体抗压强度为  $52.1 \text{ N/mm}^2$ 。试验中采用的 6 种钢纤维长度均为 32 mm,聚丙烯纤维采用美国杜拉纤维,长度为 19 mm。各组混杂纤维 HPC 的相关参数及强度试验结果详见文献<sup>[7]</sup>。

20 组深梁均为简支深梁,采用跨中单点集中加载,剪跨比均为 1,跨高比均取 1.6,长 1 040 mm,截面尺寸均为  $150 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 。深梁部分参数及试验结果见表 2,其他相关参数详见文献<sup>[8]</sup>。

表 1 因素水平表

因素	A	B	C	D	E	F
	钢纤维体积率/%	钢纤维类型	聚丙烯纤维体积率/%	钢纤维长径比	水平分布筋配筋率/%	竖向分布筋配筋率/%
水平 1	0.5	端钩形	0.055	30	0.000	0.000
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

表 2 试件参数及试验结果

深梁编号	水平分布筋配筋率/%	竖向分布筋配筋率/%	剪切初裂强度 /MPa	抗剪极限强度 /MPa	破坏形态
C-1	0.581	0.872	2.72	7.55	劈裂
C-2	0.000	0.000	3.25	6.67	劈裂
BF3-1-1	0.872	0.872	3.63	11.88	劈裂
BF1-2-1	0.000	0.000	3.44	7.71	斜压
BF2-3-1	0.581	0.581	4.75	10.42	劈裂
BF2-1-2	0.872	0.000	4.38	10.00	劈裂
BF3-2-2	0.000	0.581	4.50	7.59	劈裂
BF1-3-2	0.581	0.872	4.25	10.00	劈裂
BF1-1-3	0.000	0.581	2.88	8.17	劈裂
BF2-2-3	0.581	0.872	5.00	10.21	劈裂
BF3-3-3	0.872	0.000	4.06	10.84	劈裂
DF1-1-1	0.581	0.000	2.88	9.21	斜压
DF2-2-1	0.872	0.581	2.50	11.04	斜压
DF3-3-1	0.000	0.872	3.63	10.75	劈裂
DF3-1-2	0.581	0.581	3.25	11.13	劈裂
DF1-2-2	0.872	0.872	4.13	12.13	斜压
DF2-3-2	0.000	0.000	4.38	7.92	斜压
DF2-1-3	0.000	0.872	4.06	6.88	劈裂
DF3-2-3	0.581	0.000	3.25	10.29	劈裂
DF1-3-3	0.872	0.581	3.13	12.00	劈裂

注:表中深梁编号的 BF 系列表示钢纤维采用波纹形,DF 系列表示钢纤维采用端钩形;BF1-3-2 表示波纹形钢纤维长径比的水平取 1、体积率水平取 3、聚丙烯纤维体积率水平取 2 时的混杂纤维 HPC 深梁,其它依此类推。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏形态

全部深梁试件均发生剪切破坏,破坏形态详见表 2。对比深梁 C-1、C-2 破坏形态均为劈裂破坏,见图 1。混杂纤维 HPC 深梁典型的破坏形态见图 2,分为斜压破坏和劈裂破坏 2 种形态。试验中,掺入混杂纤维的高性能混凝土无腹筋深梁 BF1-2-1 和 DF2-3-2 均发生斜压破坏,而无腹筋对比深梁 C-2 发生劈裂破坏,可见混杂纤维的加入可改变无腹筋深梁的受剪破坏形态。

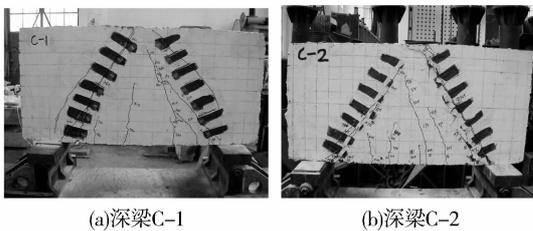


图 1 普通 HPC 深梁破坏形态

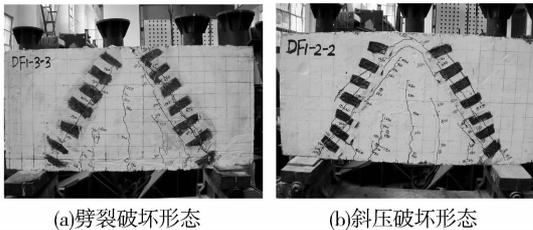


图 2 混杂纤维 HPC 深梁破坏形态

### 2.2 剪切初裂强度及抗剪极限强度

由表 2 可知,混杂纤维的掺入显著提高了 HPC 深梁的剪切初裂强度和抗剪极限强度。剪切初裂强度平均提高 45.2%,抗剪极限强度平均提高 25.6%。

### 2.3 增强机理分析

纤维对高性能混凝土基体的作用主要体现在阻裂、增强和增韧 3 方面。由于纤维能提高混凝土抗拉强度,使得以主拉应力控制的抗剪强度也同时提高。有限元分析表明,混杂纤维 HPC 深梁应力分布符合“拉杆拱”模型。深梁开裂的原因是由于混凝土主拉应力达到极限强度,开裂前拉力主要由混凝土承担,开裂后混凝土失去抗拉能力,此时跨越微裂缝的钢纤维和聚丙烯纤维开始承担拉力,随着微裂缝继续发展,混杂纤维承担的拉力越来越大。纤维使得深梁的整体性得以增强,从而也相应提高了深梁斜截面初裂强度。钢纤维的作用类似箍筋,能起到一定抗剪作用,从而降低跨越斜裂缝的分布钢筋应力。另外,纤维还能强化斜截面骨料的咬合力和摩

擦力,相应增强了钢筋的销栓作用,强化了深梁中的“拉杆拱”作用。混杂纤维高性能混凝土的极限应变也得到了提高,相应地提高了深梁斜截面受剪承载力。

## 3 斜截面受剪承载力计算公式

### 3.1 基于塑性理论的计算公式

各国学者利用塑性理论对混凝土构件及结构进行过很多分析,其中赵军等<sup>[9]</sup>利用塑性理论提出了与普通混凝土深梁相衔接的钢筋纤维混凝土深梁受剪承载力计算公式。笔者借鉴这一方法,采用塑性理论推导混杂纤维 HPC 深梁的受剪承载力计算公式。

屈服条件借鉴文献<sup>[10]</sup>中的钢纤维混凝土的屈服条件。屈服条件可表达为

$$\sigma_1 = (1 + \frac{\sigma_2}{f_{tc}}) f_{ft} \quad (\text{双向受力}),$$

$$\sigma_2 = -f_{tc} \quad (\text{单向受力})$$

式中:  $f_{ft}$  为混杂纤维 HPC 的轴心抗拉强度;  $f_{tc}$  为混杂纤维 HPC 的轴心抗压强度。

由于求解下限解难度较大,故求解上限解。求上限解时,选择的机动体系见图 3。

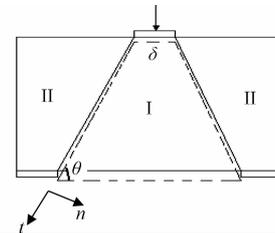


图 3 深梁受力模型

图 3 中,外力所做的功为

$$W_{\text{外}} = V_{fu} \delta \quad (1)$$

沿塑性绞线建立坐标系,则

$$\epsilon_1 = 0, \epsilon_n = \delta \cos \theta, \gamma = \delta \sin \theta \quad (2)$$

主应变为

$$\epsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \delta (\cos \theta \pm 1) \quad (3)$$

当混杂纤维高性能混凝土屈服流动时,应力状态应处于双向拉压状态。假设

$$\sigma_1 = (1 - \mu) f_{ft}, \sigma_2 = -\mu f_{tc} \quad (4)$$

式中  $\mu$  为塑性系数。

内力功为

$$W_{\text{内}} = \frac{bh_0}{\sin \theta} (\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2) \quad (5)$$

由虚功原理得

$$W_{\text{外}} = W_{\text{内}} \quad (6)$$

联立式(1)、(3)、(4)、(5)、(6)解得

$$V_{fu} = \frac{bh_0}{2\sin\theta} [(1-\mu)(\cos\theta+1)f_{ft} + \mu f_{fc}(1-\cos\theta)] \quad (7)$$

又因为

$$\sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \quad (8)$$

$$\cos\theta = \frac{\lambda}{\sqrt{1+\lambda^2}}$$

将式(8)代入式(7)得

$$V_{fu} = \frac{1}{2}bh_0 [(1-\mu)f_{ft}(\sqrt{1+\lambda^2} + \lambda) + \mu f_{fc}(\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda)] \quad (9)$$

将  $f_{ft} = f_t(1+\alpha_t\lambda_t)$ ,  $f_{fc} = f_c(1+\alpha_c\lambda_c)$  代入式(9)得

$$V_{fu} = \frac{1}{2}bh_0 [(1-\mu)f_t(1+\alpha_t\lambda_t)(\sqrt{1+\lambda^2} + \lambda) + \mu f_c(1+\alpha_c\lambda_c)(\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda)] \quad (10)$$

由试验结果,波纹形钢纤维可取  $\alpha_t = 0.25$ ,  $\alpha_c = 0.18$ ;端钩形钢纤维可取  $\alpha_t = 0.36$ ,  $\alpha_c = 0.32$ 。代入式(10)统计回归得到混杂纤维高性能混凝土的塑性系数为

$$\mu = 0.97 + 93\rho_{sh} + 26\rho_{sv} \quad (\text{波纹形钢纤维}) \quad (11)$$

$$\mu = 0.9 + 110\rho_{sh} + 33\rho_{sv} \quad (\text{端钩形钢纤维}) \quad (12)$$

从回归分析过程可以看出:

1)第1项常数在表达式中所占比重较大,说明配置腹筋能改善深梁塑性性能,但腹筋率的影响不显著。

2)  $93/26=3.58$ (波纹形钢纤维),  $110/33=3.33$ (端钩形钢纤维),说明水平分布钢筋对深梁塑性性能的影响大于竖向分布钢筋。

### 3.2 基于拉杆拱模型和劈裂破坏模式的计算公式

3.2.1 基本假定 试验表明,混杂纤维高性能混凝土深梁斜裂缝出现后不满足平截面假定,这与普通混凝土深梁一致,因而变形协调条件难以建立,利用解析法建立公式就相当困难。因此,通过分析受力机理,在试验结果的基础上建立回归公式求解混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力更为现实。

各国学者已采用不同的模型对深梁受剪承载力进行过探讨, Yang 等<sup>[11]</sup>提出基于断裂带理论的“拉压杆”模型,据此模型对 637 根深梁试件的受剪承载力进行复核,结果证明优于美国混凝土协会推荐的“拉压杆”模型; Kim 等<sup>[12]</sup>通过定义荷载分配比提出了“模糊拉压杆”模型; Smith 等<sup>[13]</sup>认为“拉杆拱”模型更符合深梁的应力分布情况,在忽略变形协调条件的基础上根据平衡条件确定应力; Hwang 等<sup>[14]</sup>

提出“软化拉杆拱”模型; Kong<sup>[15]</sup>提出基于混凝土劈裂的破坏模型。

试验中混杂纤维 HPC 深梁主要发生劈裂破坏,运用 ABAQUS 有限元程序进行分析发现,混杂纤维 HPC 深梁应力分布与“拉杆拱”模型符合较好,同时深梁主要破坏形态为拱腹劈裂,故建立基于“拉杆拱”模型和劈裂破坏模式的受剪承载力计算公式。卢建峰<sup>[16]</sup>指出,当承台距厚比不超过 2 时,承台破坏源自压杆劈裂。借鉴该文相关推导方法,建立混杂纤维 HPC 无腹筋深梁的抗剪承载力计算式。

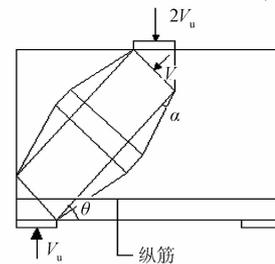


图 4 拉杆拱模型

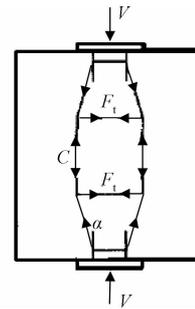


图 5 压杆劈裂计算模式

3.2.2 受剪承载力计算公式 按照图 4 的桁架拱模型及图 5 的压杆劈裂计算模式,假设拱腹两端所受压力为  $V$ ,则单位长度作用压力为  $\frac{V}{2b}$ ,压力扩散角为  $\alpha$ ,则单位长度上产生的横向分力为

$$F_t = \frac{V}{2b} \tan\alpha \quad (13)$$

每端横向分力产生拉力

$$T = F_t b \quad (14)$$

上下端横向拉力作用下引起劈拉破坏,从而有

$$F_t = \frac{f_{ts} h_0}{2\sin\theta} \quad (15)$$

式中  $f_{ts}$  为混凝土的劈裂破坏强度,与混凝土劈拉强度有关,设

$$f_{ts} = \xi f_{ft} \quad (16)$$

将式(15)、(16)代入式(13)解得

$$V = \frac{f_{ts} b h_0}{\sin\theta \tan\alpha} \quad (17)$$

参考文献[15],偏安全地取  $\tan \alpha = 1/2$  代入式(17),得

$$V = \frac{2f_{ts}bh_0}{\sin \theta} \quad (18)$$

由平衡条件,有

$$V_u = V \sin \theta = 2f_{ts}bh_0 = 2\xi f_{ft}bh_0 \quad (19)$$

式中:  $f_{ft}$  为混凝土劈拉强度;  $\xi$  可由试验数据通过回归分析确定,可取  $\xi = 1$ 。对于有腹筋混杂纤维 HPC 深梁,忽略竖向分布钢筋的抗剪作用后可表达为

$$V_{fu} = V_u + V_{sh} = 2\alpha_c f_{ft}bh_0 + \alpha_{sh} f_{yh} \frac{A_{sh}}{S_v} h_0 \quad (20)$$

为简化计算,可将  $\alpha_c, \alpha_{sh}$  视为常数。经试验数据回归得  $\alpha_c = 0.95$ , 标准差 0.04;  $\alpha_{sh} = 1.33$ , 标准差 0.18, 相关系数为 0.99。

## 4 结论

1) 混杂纤维的掺入显著提高了 HPC 深梁的剪切初裂强度和抗剪极限强度。剪切初裂强度平均提高 45.2%, 抗剪极限强度平均提高 25.6%。

2) 将塑性理论用于混杂纤维 HPC 深梁受剪极限承载力的计算得到了很好的结果。腹筋能改善混杂纤维 HPC 深梁的塑性性能,但腹筋配筋率的大小对塑性性能的影响不显著,水平分布钢筋的作用大于竖向分布钢筋。

3) 以劈裂破坏形态为依据,采用“拉杆拱”模型建立了混杂纤维 HPC 深梁受剪承载力计算公式。

### 参考文献:

- [1] 张海波. 混杂纤维混凝土增强、增韧效应研究[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [2] 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.
- [3] Patel V R, Rana A, Pandya I I. Shear strength of polypropylene fiber reinforced concrete moderate deep beams without stirrups [J]. Journal of Structural Engineering (Madras), 2011, 37(5):364-368.
- [4] Lee H K, Cheong S H, Ha S K. Shear behavior and performance of deep beams reinforced with a honeycomb steel mesh [J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(6):989-999.
- [5] 赵军,朱海堂,高丹盈. 钢筋钢纤维混凝土深梁受剪承载力的试验研究[J]. 河南科学, 2003, 21(5):670-673.
- [6] CECS 38: 2004 纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
- [7] 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, 2009, 31(8):5-9.
- [8] Liu S B, Xu L H, Zhou J M. Orthogonal experimental study on strength of hybrid fiber reinforced high performance concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(8):5-9.
- [9] 刘胜兵,徐礼华. 混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3):29-39.
- [10] Liu S B, Xu L H. Shear behavior of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3):29-39.
- [11] 赵军,高丹盈,朱海堂. 钢筋钢纤维混凝土深梁受剪承载力塑性分析[J]. 郑州大学学报:理学版, 2004, 36(3):83-86.
- [12] Zhao J, Gao D Y, Zhu H T. Plastic analysis of the shear capacity of steel fiber reinforced concrete deep beams [J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2004, 36(3):83-86.
- [13] 董毓利,樊承谋,潘景龙. 钢纤维混凝土双向破坏准则的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(6):69-73.
- [14] Dong Y L, Fan C M, Pan J L. Study on biaxial failure criteria of SFRC [J]. Journal of Harbin Architecture and Civil Engineering Institute, 1993, 26(6):69-73.
- [15] Yang K H, Ashour A F. Strut-and-Tie model based on crack band theory for deep beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10):1030-1038.
- [16] Kim B H, Yun Y M. An indeterminate strut-tie model and load distribution ratio for RC deep beams-(I) model & load distribution ratio [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(6):1031-1041.
- [17] Smith K N, Vantsiotis A S. Shear strength of deep beam [J]. ACI Structural Journal, 1982, 79(2):201-213.
- [18] Hwang S J, Lu W Y, Lee H J. Shear strength prediction for deep beams [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(3):367-376.
- [19] Kong F K, Robins F J, Singh A, et al. Shear analysis and design of reinforced concrete deep beams [J]. The Structural Engineer, 1972, 50(10):311-323.
- [20] 卢建峰. 桩基承台空间桁架理论设计方法研究[D]. 南京:东南大学, 2001.

(编辑 胡英奎)