

混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能试验

刘胜兵¹,徐礼华²

(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:对 18 组钢—聚丙烯混杂纤维高性能混凝土深梁试件和 2 组高性能混凝土深梁对比试件进行受剪试验,分析混杂纤维高性能混凝土深梁受剪破坏过程及破坏形态,探讨混杂纤维对高性能混凝土深梁剪切初裂强度及抗剪极限强度的影响。结果表明:掺入适量的钢—聚丙烯混杂纤维,可使深梁水平及竖向分布钢筋应变明显减小,剪切延性得到提高。掺入混杂纤维后,无腹筋深梁剪切初裂强度平均提高 20.3%,抗剪极限强度平均提高 17.2%;有腹筋深梁剪切初裂强度平均提高 70.1%,抗剪极限强度平均提高 33.9%。

关键词:混杂纤维;受剪破坏;剪切延性;剪切初裂强度;抗剪极限强度

中图分类号:TU375

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.01.001

0 引言

钢筋混凝土深梁以其巨大的承载能力,在土木工程中得到越来越广泛的应用。由于深梁的跨高比较小,在荷载作用下弯矩值较低,而剪力值却相对较高,其受剪承载力的计算在结构设计中显得尤为重要。为满足抗剪要求,深梁高度一般较大,并且需要配置大量的钢筋,这样既浪费材料,也给施工增加了难度。高性能混凝土(HPC)具有较高的强度和耐久性,将其应用于深梁结构能较大地提高深梁的承载能力,减小构件的尺寸和自重,节约材料。但主要缺点是仍然没有改变混凝土的脆性性质,并且混凝土强度越高,其脆性越大^[1],这使得深梁剪切破坏时延性更差,不利于结构抗震。混杂纤维混凝土以其优良的力学性能,近年来持续受到各国研究者的关注^[2-8]。能否将钢纤维/聚丙烯纤维混杂掺入高性能混凝土,得到性能更优的混凝土:一方面利用混杂纤维增加高性能混凝土的韧性,提高深梁剪切破坏延性;另一方面依靠混杂纤维的增强作用,提高深梁斜截面承载能力,减小分布钢筋用量,解决配筋过密引起的施工困难等问题。笔者进行了这方面的探讨。我国《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)对钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁受剪设计内容进行了规定^[9],但有关混杂纤维高性能混凝土深梁的规定还是空白。夏冬桃等^[10]对钢/聚丙烯混杂纤维

高性能混凝土深梁受弯性能进行了研究,指出混杂纤维能显著提高高性能混凝土深梁的开裂弯矩和屈服弯矩,同时深梁极限承载力和受弯韧性大幅提高。目前国内外对于混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能的研究还鲜有报道,本文采用正交试验法,设计 18 组混杂纤维 HPC 深梁以及 2 组 HPC 深梁对比试件,通过静力试验研究其受剪性能,以期对《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

1.1 试件设计

采用正交试验法,按照《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)的有关要求,选用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 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。

所有深梁截面尺寸均为 150 mm×500 mm,长 1 040 mm,跨高比均为 1.6,剪跨比 $\lambda=a/h_0=1$,其中 $a=h_0=400$ mm。为防止混凝土发生局压破坏,支座及加载点处均设置钢垫板,垫板宽度均为 120 mm。为确保深梁发生剪切破坏,20 组深梁下部的 $0.2h$ (h 为梁高)范围内均配置了 $4\phi 18$ 作

收稿日期:2012-11-11

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。

为纵向受力钢筋,分上下两层布置,配筋率为 1.356%,纵向钢筋的锚固满足 GB50010—2002 中的有关规定.水平及竖向分布钢筋均采用 HPB235 钢筋 $\phi 10$.深梁相关参数及受剪试验结果见表 2.

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 水平分布筋 配筋率/%	F 竖向分布筋 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

表 2 试件参数及试验结果

Table 2 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 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/%	剪切初裂强度 (V_{fer}/bh_0)/ MPa	抗剪极限强度 (V_{fu}/bh_0)/ MPa
BF3—1—1	1(0.5)	1(波纹形)	1(0.055)	3(70)	2(0.872)	2(0.872)	3.63	11.88
BF1—2—1	2(1.0)	1(波纹形)	1(0.055)	1(30)	1(0)	1(0)	3.44	7.71
BF2—3—1	3(1.5)	1(波纹形)	1(0.055)	2(50)	3(0.581)	3(0.581)	4.75	10.42
BF2—1—2	1(0.5)	1(波纹形)	2(0.11)	2(50)	2(0.872)	1(0)	4.38	10.00
BF3—2—2	2(1.0)	1(波纹形)	2(0.11)	3(70)	1(0)	3(0.581)	4.50	7.59
BF1—3—2	3(1.5)	1(波纹形)	2(0.11)	1(30)	3(0.581)	2(0.872)	4.25	10.00
BF1—1—3	1(0.5)	1(波纹形)	3(0.165)	1(30)	1(0)	3(0.581)	2.88	8.17
BF2—2—3	2(1.0)	1(波纹形)	3(0.165)	2(50)	3(0.581)	2(0.872)	5.00	10.21
BF3—3—3	3(1.5)	1(波纹形)	3(0.165)	3(70)	2(0.872)	1(0)	4.06	10.84
DF1—1—1	1(0.5)	2(端钩形)	1(0.055)	1(30)	3(0.581)	1(0)	2.88	9.21
DF2—2—1	2(1.0)	2(端钩形)	1(0.055)	2(50)	2(0.872)	3(0.581)	2.50	11.04
DF3—3—1	3(1.5)	2(端钩形)	1(0.055)	3(70)	1(0)	2(0.872)	3.63	10.75
DF3—1—2	1(0.5)	2(端钩形)	2(0.11)	3(70)	3(0.581)	3(0.581)	3.25	11.13
DF1—2—2	2(1.0)	2(端钩形)	2(0.11)	1(30)	2(0.872)	2(0.872)	4.13	12.13
DF2—3—2	3(1.5)	2(端钩形)	2(0.11)	2(50)	1(0)	1(0)	4.38	7.92
DF2—1—3	1(0.5)	2(端钩形)	3(0.165)	2(50)	1(0)	2(0.872)	4.06	6.88
DF3—2—3	2(1.0)	2(端钩形)	3(0.165)	3(70)	3(0.581)	1(0)	3.25	10.29
DF1—3—3	3(1.5)	2(端钩形)	3(0.165)	1(30)	2(0.872)	3(0.581)	3.13	12.00
C—1	0		0		0.581	0.872	2.72	7.55
C—2	0		0		0	0	3.25	6.67

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; V_{fer} 、 V_{fu} 分别表示深梁斜截面初裂荷载和极限荷载, b 、 h_0 分别表示深梁截面宽度和有效高度.

1.2 试验材料

试验采用 HPC 的基体强度为 C50,由于钢纤维和聚丙烯纤维掺量均较低,对 HPC 原有组分体积变化影响不明显,故现场配置混杂纤维 HPC 时,除纤维外其它组分均与基体 HPC 相同.混杂纤维 HPC 的材料选用、配合比设计及现场配置等内容参见文献[11].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/mm²,劈拉强

度为 3.35 N/mm²,钢筋的力学性能指标见表 3.

表 3 钢筋的力学性能指标

Table 3 Mechanical properties of steel bar

钢筋	实测直 径/mm	屈服强度 σ_s /MPa	极限强度 σ_b /MPa	延伸 率/%
$\Phi 18$	18.5	370	550	27
$\phi 10$	10.4	300	395	26

1.3 加载装置

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加载方式. 试验加载装置见图 1.

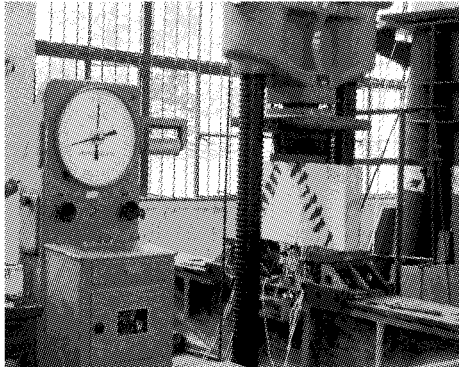


图 1 压力试验系统

Fig. 1 Test loading device

1.4 测试内容及方法

试验中需要测试的内容及方法:**a.** 布置 14 个 $50\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 混凝土电阻应变片量测纤维混凝土应变,见图 2;**b.** 在纵向受力钢筋中部以及与两个可能破坏斜截面相交的分布钢筋上布置 $3\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 应变片测量钢筋应变;**c.** 在深梁跨中布置位移计、支座布置百分表以量测跨中挠度及支座沉降;**d.** 采用目测法确定斜截面初裂荷载,以斜截面开裂的前一级荷载作为斜截面初裂荷载;**e.** 采用传感器记录深梁受剪极限荷载.

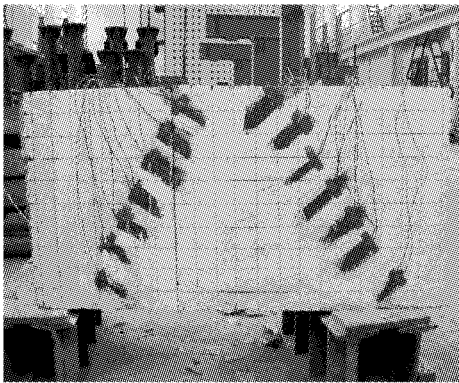


图 2 混凝土应变片布置

Fig. 2 Location of concrete strain gauges

1.5 失效准则

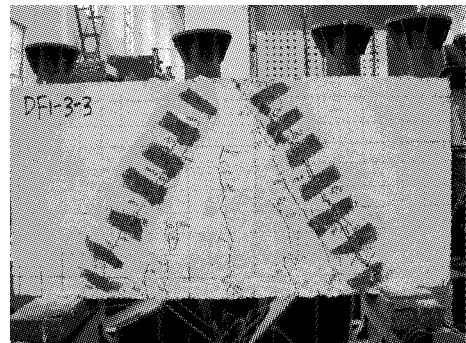
试验后期,当油泵机继续进油而电子秤读数不增加或反而降低,同时位移计读数急剧增加时,可以认为试件达受剪极限状态,为得到荷载—跨中挠度曲线下降段,此后采用位移加载.

2 试验结果及分析

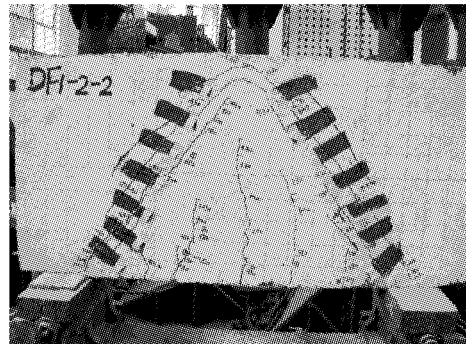
2.1 破坏形态及破坏过程

所有 20 组试验深梁均发生剪切破坏,其中,除 BF1—2—1、DF1—1—1、DF2—2—1、DF1—2

—2 及 DF2—3—2 发生斜压破坏外,其余混杂纤维 HPC 深梁及 2 组对比深梁均发生劈裂破坏. 混杂纤维 HPC 深梁典型的破坏形态如图 3 所示. 除深梁 BF2—3—1 外,其余混杂纤维 HPC 深梁均表现为首先在跨中出现竖向弯曲裂缝,裂缝高度随荷载增加而稳步增长,随后在跨中附近出现新的弯曲裂缝. 当荷载增大到接近深梁斜截面开裂荷载时,竖向裂缝发展缓慢,继续增大荷载时,部分弯曲裂缝斜向集中力与加载点方向发展,同时在深梁支座部位沿加载点方向出现斜裂缝,少数试件则是在支座和加载点方向的中间部位出现斜裂缝. 随着荷载的进一步增大,深梁弯曲裂缝继续缓慢增长,支座和加载点连线方向的斜裂缝继续发展,同时有新的细小斜裂缝出现. 当荷载达到斜截面极限承载力时,劈裂破坏的深梁斜裂缝向上延伸至接近集中荷载作用点处,向下延伸到支座处,跨越斜裂缝的钢纤维和聚丙烯纤维拔出或拉断,斜裂缝迅速开展形成临界斜裂缝直至破坏,斜压破坏的深梁则继续出现一些与支座和加载点连线方向大致平行的斜裂缝,直至混凝土被压碎而破坏.



(a) 劈裂破坏形态



(b) 斜压破坏形态

图 3 混杂纤维 HPC 深梁破坏形态

Fig. 3 Failure mode of hybrid fiber reinforced HPC deep beams

2.2 应变分析

2.2.1 混凝土及纵筋应变 当荷载较小时,混杂纤维 HPC 深梁斜截面上混凝土及受拉纵筋的应变均较小,与荷载近似呈线性关系,混杂纤维

HPC 深梁钢筋应变比对比深梁增长的更为缓慢. 斜裂缝出现后, 斜截面上混凝土的应变产生突变, 受拉纵筋的应变迅速增加, 破坏时一般都能屈服. 与普通 HPC 对比深梁相比, 混杂纤维 HPC 有腹筋深梁破坏时纵筋应变有所增大, 无腹筋深梁的纵筋应变减小. 原因是混杂纤维的掺入使得深梁在纵筋屈服后还能承担较长时间的荷载, 改善了深梁的变形性能, 因而破坏时纵筋应变有所增加. 而无腹筋深梁掺入混杂纤维后破坏形态由劈裂破坏变为斜压破坏, 斜压破坏是由于混凝土的压溃所致, 使得纵筋应变有所减小.

2.2.2 水平及竖向分布钢筋应变 实测得到的深梁水平分布钢筋的荷载-应变关系如图 4 所示. 从加载到出现斜裂缝之前, 水平分布钢筋应变很小. 斜裂缝出现后, 水平分布钢筋应变迅速增

加, 破坏时受拉区水平分布钢筋一般都能屈服. 与对比深梁 C-1 相比, 深梁 BF1-3-2 水平分布钢筋的应变随荷载的发展明显减缓, 深梁 C-1 破坏时水平分布钢筋 SP1 的应变为 0, SP2 的应变为 $4\,610\ \mu\epsilon$; 而深梁 BF2-2-3 破坏时水平分布钢筋 SP1 的应变为 $-702\ \mu\epsilon$, SP2 的应变为 $2\,250\ \mu\epsilon$. 原因是裂缝间的混杂纤维承担了一部分拉力, 减小了水平分布钢筋承担的拉力所致.

实测得到深梁竖向分布钢筋的荷载-应变关系如图 5 所示. 从加载到出现斜裂缝之前, 竖向分布钢筋应变很小. 斜裂缝出现后, 深梁 C-1 中穿越斜裂缝的竖向分布钢筋应变迅速增加, 破坏时

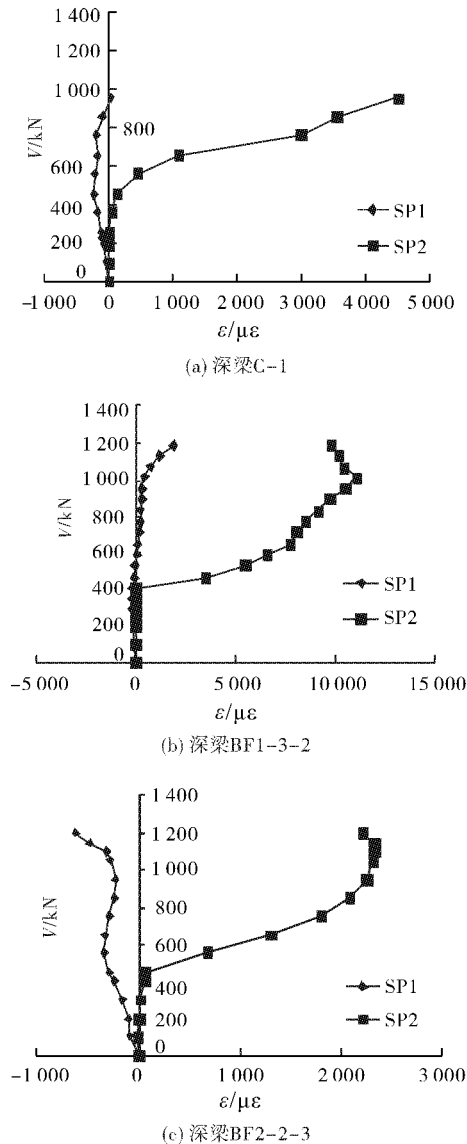


图 4 水平分布钢筋荷载-应变关系

Fig. 4 Relationship between load and strain of web horizontal reinforcement

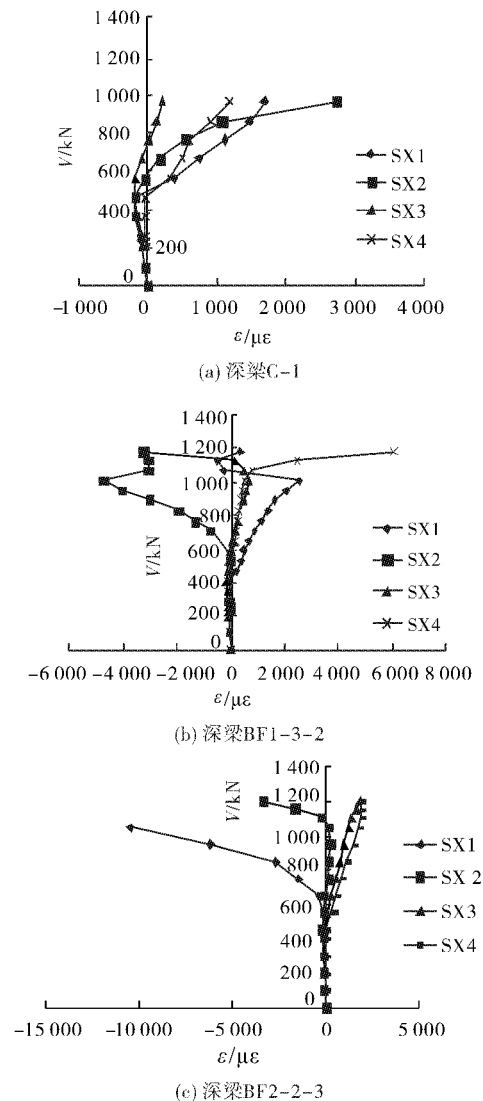


图 5 竖向分布钢筋荷载-应变关系

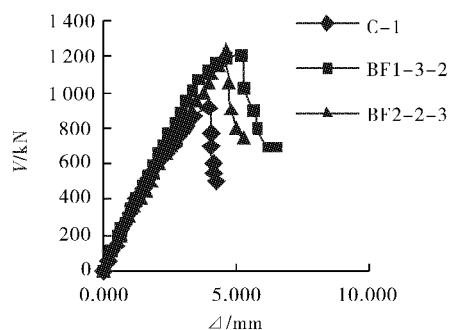
Fig. 5 Relationship between load and strain of web vertical reinforcement

受拉区竖向分布钢筋一般都能屈服, 并且竖向分布钢筋应变一般都小于水平分布钢筋应变, 说明水平分布钢筋的作用大于竖向分布钢筋. 与对比深梁 C-1 相比, 深梁 BF1-3-2 及深梁 BF2-2-3

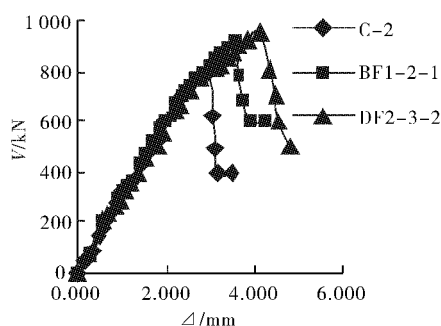
—3 竖向分布钢筋的应变随荷载的发展明显减缓,而且开裂后竖向分布钢筋的应变均低于深梁 C—1. 原因是裂缝间的混杂纤维承担了一部分拉力,减小了竖向分布钢筋承担的拉力所致。

2.3 荷载—挠度关系

根据试验结果,图 6 给出了部分混杂纤维 HPC 深梁及其对比深梁荷载—挠度曲线. 从开始加载到第一条斜裂缝出现以前,荷载—挠度曲线近似呈线弹性关系. 开裂前拉力主要由混凝土承担,钢纤维和聚丙烯纤维承担的份额很少. 早期微裂缝一旦出现,开裂处混凝土就失去了承担拉力的能力,跨越微裂缝的钢纤维和聚丙烯纤维开始发挥作用,早期主要是聚丙烯纤维发挥作用,此后钢纤维承担拉力的份额逐渐提高. 由于混杂纤维增强了深梁的整体抗拉能力,使得深梁斜截面初裂荷载得到提高. 深梁宏观斜裂缝出现后,斜裂缝处混凝土退出工作,拉力主要由弹性模量高的钢纤维承担,聚丙烯纤维承担拉力的份额减少. 由图 6 可见,混杂纤维的掺入使得无腹筋深梁和有腹筋深梁的极限承载能力显著提高,刚度明显增大,而且荷载—挠度曲线的下降段比对比梁平缓,提高了深梁的剪切延性。



(a) 有腹筋深梁对比



(b) 无腹筋深梁对比

图 6 荷载—挠度关系曲线

Fig. 6 Relationship between load and deflection

2.4 剪切初裂强度及抗剪极限强度

由表 2 可知,无腹筋深梁 BF1—2—1 及 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%,平均提高了 20.3%,抗

剪极限强度分别提高了 15.6% 和 18.8%,平均提高了 17.2%;有腹筋深梁 BF1—3—2 及 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%,平均提高了 70.1%,抗剪极限强度分别提高了 32.5% 和 35.2%,平均提高了 33.9%。

3 结 语

a. 混杂纤维 HPC 深梁的受剪破坏形态有劈裂破坏和斜压破坏两种模式, HPC 无腹筋深梁中混杂掺入钢纤维和聚丙烯纤维后,可使深梁受剪破坏形态由劈裂破坏变为斜压破坏。

b. 混杂纤维的掺入可使深梁剪切刚度明显增大,水平及竖向分布钢筋应变明显减小,而且深梁荷载—挠度曲线的下降段更为平缓,剪切延性有所提高。

c. 混杂掺入适量的钢纤维及聚丙烯纤维,可使无腹筋深梁剪切初裂强度平均提高 20.3%,抗剪极限强度平均提高 17.2%;有筋深梁剪切初裂强度平均提高 70.1%,抗剪极限强度平均提高 33.9%。

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] 冯乃谦. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [2] 徐礼华, 夏冬桃, 夏广政, 等. 钢纤维和聚丙烯纤维对高强混凝土强度的影响[J]. 武汉理工大学学报: 自然科学版, 2007, 29(4): 129: 58-60.
- [3] 杨成蛟. 混杂纤维混凝土力学性能及耐久性试验研究[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] Taner Yildirim S, Ekin 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.
- [6] Hsie Machine, Chen Guohuei, Song Peyshuan. Investigating abrasion resistance of steel-polypropylene hybrid fiberreinforced 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] Bajaj Vineet, Singh Amrit Pal, Singh Surinder Pal, et al. Flexural fatigue analysis of hybrid fiber reinforced concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(4):361-373.
- [9] 大连理工大学. 纤维混凝土结构技术规程[M]. 北京:中国计划出版社, 2004.
- [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.
- [11] 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.

Experimental study on shear behavior of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams

LIU Sheng-bing¹, XU Li-hua²

- (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: Shear behavior was studied on 18 different groups of deep beams with steel fiber and polypropylene fiber and 2 groups contrastive HPC deep beams based on experiment. The process and the mode of shear failure of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams were analyzed. The effects of hybrid fiber on the diagonal cracking strength and the shear strength of HPC deep beams were explored. The results show that hybrid fiber can be used to reduce the strain of web horizontal reinforcement and web vertical reinforcement and increase shear ductility of deep beams. The average diagonal cracking strength is increased by 20.3% and the average shear strength is increased by 17.2% when HPC deep beams without web reinforcement are mixed into hybrid fiber. The average diagonal cracking strength is increased by 70.1% and the average shear strength is increased by 33.9% after hybrid fiber added into HPC deep beams with web reinforcement.

Key words: hybrid fiber; shear failure; shear ductility; diagonal cracking strength; shear strength

本文编辑: 龚晓宁