

钢/聚丙烯混杂纤维对 HPC 深梁受弯性能的影响

夏冬桃^{1,2}, 徐世琅², 夏广政¹

(1. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430064, xdtxy@126.com; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要: 为研究钢纤维和聚丙烯纤维对高性能混凝土(HPC)深梁受弯性能的影响,对17根含有不同钢纤维(体积掺量 $\leq 1\%$)和聚丙烯纤维(体积掺量 $\leq 0.2\%$)以及不同纵筋配筋率的HPC简支深梁进行4点受弯性能试验.结果显示:单一纤维或混杂纤维增强HPC深梁的初裂荷载提高了10%~40%;混杂纤维增强HPC适筋深梁的纵筋屈服荷载提高50%~150%,极限受弯承载力提高1~2倍,但无筋的混杂纤维HPC深梁承载力很小,破坏为剪切脆性破坏.试验结果表明:混杂纤维可以极大提高HPC深梁的受弯承载力,但混杂纤维的作用不能代替纵向钢筋的作用;可采用复合材料强度叠加原理及剩余弯曲强度理论来探讨混杂纤维增强HPC深梁的极限受弯承载力计算公式.

关键词: 混杂纤维;高性能混凝土;深梁;受弯承载力

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0313-04

Effect of hybrid fibers on bending capacity of high-performance concrete deep beams

XIA Dong-tao^{1,2}, XU Shi-lang², XIA Guang-zheng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China, xdtxy@126.com;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to investigate the effect of steel fibers and polypropylene fibers on flexural behavior of HPC deep beams, four-point bending tests were conducted on 17 simply supported HPC deep beams with different fiber contents and steel bars. Results show that the first crack load of FRHPC beams (either single type or hybrid) is increased by 10% - 40%, the yield load of hybrid FRHPC beams is increased by 50% - 150%, and its ultimate flexural capacity is increased by 1 - 2 times. Thus hybrid fibers can be used to greatly increase the flexural capacity of HPC deep beams, but the failure pattern of hybrid FRHPC beams without steel bar is brittle failure, it means that hybrid fibers can not replace steel bars. The method to calculate the ultimate flexural capacity of hybrid FRHPC deep beams is discussed as well.

Key words: hybrid fiber; high-performance concrete (HPC); deep beam; bending capacity

钢纤维可以显著提高混凝土的抗拉强度和受弯韧性,聚丙烯纤维可提高混凝土的抗裂性能.实际工程中纤维增强高性能混凝土深梁已大量应用于多高层建筑中的上下层不同结构型式间的转换大梁、片筏基础、以及仓筒侧壁等结构形式中^[1-2],因为纤维混凝土结构技术规程CECS2004:38中还未建立钢纤维增强混凝土深梁

的承载力计算公式以及混杂纤维增强混凝土的受弯承载力计算方法^[2],实际工程参考GB50010中的相关计算方法,计算中并未考虑纤维对深梁抗弯性能的作用,所以,研究不同体积掺量的钢/聚丙烯混杂纤维增强高性能混凝土深梁的受弯承载力,分析和探讨钢/聚丙烯纤维增强高性能混凝土深梁的初裂荷载以及受弯承载力计算公式,为进一步完善纤维混凝土结构技术规程中深梁的有关内容提供参考依据,这具有极大的工程应用价值.

收稿日期: 2008-06-01.

作者简介: 夏冬桃(1974—),女,博士,副教授;

徐世琅(1953—),男,博士,博士生导师.

1 试验概况

根据文献[1,3-4]按高性能混凝土配比的有关要求,选择配置强度等级 C45 的高性能混凝土(HPC)的材料. 试验采用武汉汉森钢纤维有限公司生产的剪切型 SFB-32 钢纤维,为中碳钢 30#,呈波浪型,长度 32 mm,等效直径 0.56 mm,长径比 57,抗拉强度 >600 MPa;采用美国生产的杜拉牌聚丙烯纤维,其他 HPC 的材料选用、配合比设计以及现场配置等内容见文献[5].

本次试验按照 CECS2004:38 中梁试验的相关要求,共设计了 4 个系列(共 17 根)深梁试件,包括

基准 HPC 深梁(编号 C-1)、钢纤维增强 HPC 深梁(编号 SF 系列)、聚丙烯纤维增强 HPC 深梁(编号 PF 系列)、混杂纤维增强 HPC 适筋深梁(编号 SPF 系列)和混杂纤维增强 HPC 无筋深梁(编号 C-2). 所有深梁截面尺寸均为 180 mm×600 mm,跨度 1 240 mm. 主要变化参数为纵筋配筋率、混杂纤维体积掺量等,试验梁的构造见表 1^[5].

相关纤维混凝土的材料性能试验结果和分析见文献[5-6],所有深梁均为简支深梁,按照 CECS2004:38 中相关要求,进行 4 点受弯性能试验^[3].

表 1 试验深梁的具体构造

试验深梁编号	纵筋	聚丙烯纤维掺量 kg·m ⁻³	钢纤维掺量 kg·m ⁻³	试验深梁编号	纵筋	聚丙烯纤维掺量 kg·m ⁻³	钢纤维掺量 kg·m ⁻³
C-1	3Φ12			SPF-2-2	3Φ12	1.0	63
C-2		1.5	50	SPF-3-2	3Φ12	0.5	63
SPF-1-1	3Φ12	1.5	50	SF-2	3Φ12	0	63
SPF-2-1	3Φ12	1.0	50	PF-2	3Φ12	1.0	0
SPF-3-1	3Φ12	0.5	50	SPF-1-3	4Φ12	1.5	78
SF-1	3Φ12	0	50	SPF-2-3	4Φ12	1.0	78
PF-1	3Φ12	1.5	0	SPF-3-3	4Φ12	0.5	78
SPF-1-2	4Φ12	1.5	63	SF-3	3Φ12	0	78
				PF-3	3Φ12	0.5	0

2 试验结果和分析

2.1 FRHPC 深梁的受弯性能

参加单一纤维入 HPC 深梁中,即可对深梁的荷载-应变关系产生一定的增强效果:当钢纤维的掺量为 0.8% 或聚丙烯纤维掺量为 0.011% 时,对 HPC 深梁抗弯性能增强效果最明显;当聚丙烯纤维掺量太低为 0.005 5% 时,由于纤维在 HPC 深梁受弯过程中承担的拉力太少,对 HPC 深梁抗弯性能增强效果不明显;当聚

丙烯纤维掺量太高为 0.016 5% 时,由于纤维在 HPC 中分布不均匀,粘结成团的纤维具有弱界面效应,因此,对 HPC 深梁抗弯性能增强效果也不明显. 试验结果也显示:当同时参加两种纤维入 HPC 深梁中,其中一种纤维的掺量由于另一种纤维的协作可适当增加,混杂纤维对深梁的抗弯性能增强效果更明显,混杂纤维 HPC 深梁的初裂强度提高 10%~40%,如图 1,2 所示. 17 根深梁跨中截面开裂荷载、纵筋屈服荷载和受弯极限荷载试验结果如表 2 所示.

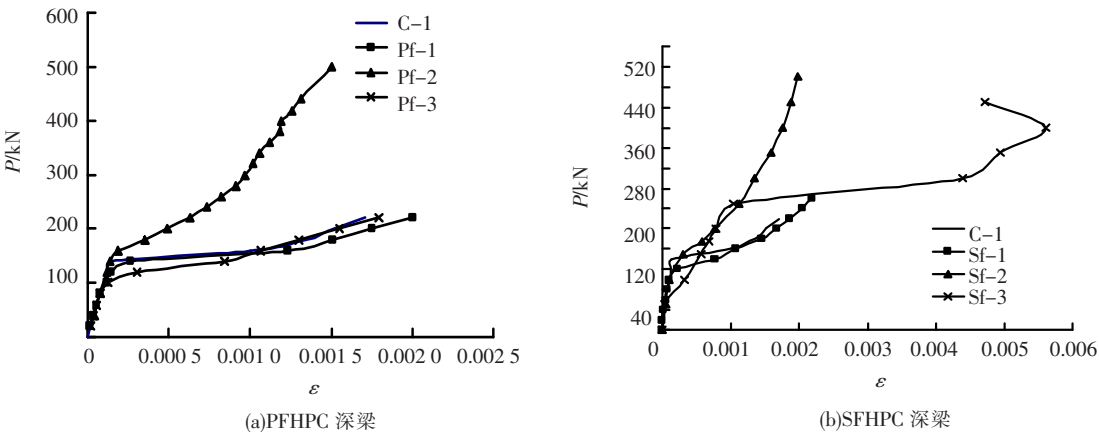


图 1 FRHPC 深梁与 HPC 深梁中受拉纵筋应变

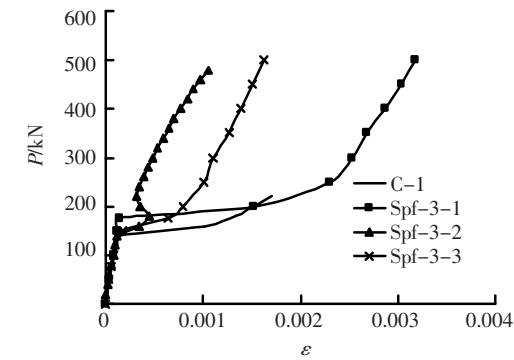


图2 HFRHPC 深梁与 HPC 深梁中受拉纵筋应变

2.2 FRHPC 深梁的增强机理分析

根据文献[5-6]由于混杂纤维对混凝土抗压强度的影响较小,可以认为 HFRHPC 深梁强度得以提高的主要原因是混杂纤维发挥了承担拉力的作用和增韧作用. FRHPC 适筋深梁在正截面抗弯受力过程均可分为弹性阶段、带裂缝工作阶段、纤维强化阶段和破坏阶段. 弹性阶段:深梁尚未开裂时,主要由混凝土基体和纤维共同抵抗外拉力. 带裂缝工作阶段:当构件内部微裂缝一旦出现,混

凝土就失去了承担拉力的能力. 由于混凝土与混杂纤维之间的粘结力,使得混杂纤维承担的拉力作用提高,由此提高了深梁的整体抗拉作用,并因而是使深梁抗裂强度得以提高,即混杂纤维提高了 HPC 抗拉性能并且改善了 HPC 韧性. 纤维强化阶段:由于混凝土与混杂纤维之间的粘结力增强,混杂纤维混凝土与钢筋之间的粘结力也增强,因此,纤维混凝土与钢筋之间的协调变形能力增强,混杂纤维限制裂缝开展和直接承担拉力的作用降低了受拉钢筋的工作应力,从而明显地提高了 HFRHPC 深梁的整体刚度,受拉纵筋屈服荷载提高 50%~150%,并且纵筋屈服后,荷载还可继续增加很多(纵筋和混凝土的变形增加很多);直到深梁到达破坏阶段(发生斜截面弯曲破坏)时, HFRHPC 深梁的受弯极限承载力比未加纤维的普通混凝土深梁受弯极限承载力提高 1~2 倍,跨中截面混凝土出现多中和轴现象,破坏时 HFHPC 最大拉应变可达到 800 $\mu\epsilon$,如图 3. 各深梁破坏过程可参考文献[5].

表2 试验梁的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载试验值

				kN			
深梁编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载	深梁编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
C-1	120	200	240	SPF-1-1	150	350	550
C-2	100		102	SPF-1-2	170	400	550
SF-1	140	220	260	SPF-1-3	180	450	650
SF-2	160	350	550	SPF-2-1	150	400	650
SF-3	250	450	500	SPF-2-2	150	400	600
PF-1	140	180	260	SPF-2-3	200	500	750
PF-2	180	420	500	SPF-3-1	200	300	500
PF-3	120	200	260	SPF-3-2	160	500	550
				SPF-3-3	180	450	600

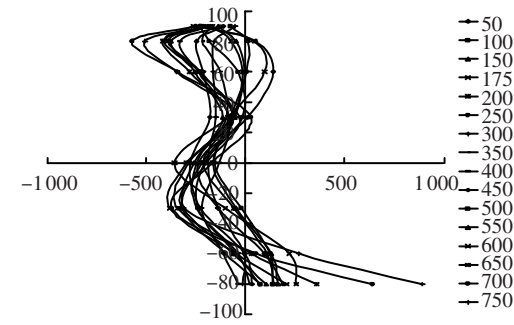


图3 HFRHPC 深梁跨中截面混凝土应变

无筋 HFHPC 深梁随着荷载增加,跨中截面很快就出现垂直微裂缝,当荷载稍微增加时,深梁即迅速裂成均匀的两半,破坏时发生爆炸式的巨响,为剪切脆性破坏,如图 4 所示,破坏时跨中截面的混凝土应变分布如图 5 所示.



图4 无筋 HFHPC 深梁的脆性破坏

3 混杂纤维增强 HPC 深梁受弯承载力计算公式推导

3.1 基本假定

假定钢/聚丙烯混杂纤维高性能混凝土深梁的正截面受弯承载力计算公式:包括深梁和短梁

在内与一般钢筋混凝土受弯构件相衔接的深受弯构件的正截面受弯承载力计算公式也采用内力臂表达式,同时考虑极限状态时受拉区钢纤维混凝土的残余拉应力(即取纤维混凝土拉应变为 $500\text{ }\mu\epsilon$ 时对应的拉应力)和极限状态时聚丙烯纤维混凝土的剩余弯曲强度^[1,3-4].

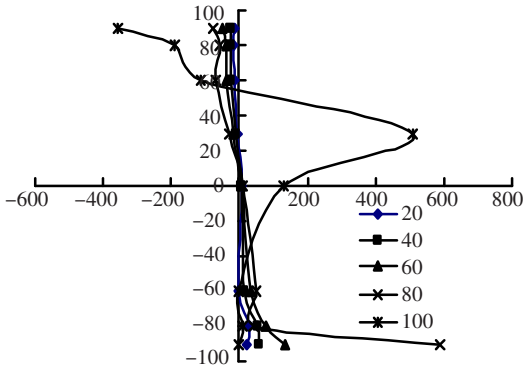


图 5 无筋 HFHPC 深梁跨中截面的混凝土应变

3.2 受弯承载力计算公式探讨

分析混杂纤维增强高性能混凝土深梁的正截

面受弯破坏试验过程,可以认为适筋的混杂纤维增强高性能混凝土深梁的正截面受弯承载力 M_u 由 3 部分线性叠加,即 $M_u = \gamma_h M_s + M_{tp} + M_{rs}$.式中: M_s 为不考虑纤维存在而计算的普通混凝土深梁所承受的正截面受弯承载力,按照(GB50010-2002)^[2]中的公式 10.7.3 计算; γ_h 为考虑高性能混凝土与纵向受拉钢筋的粘结力增强后高性能混凝土深梁的正截面受弯承载力的修正系数,可取 1.1; M_{tp} 为不考虑钢筋存在由聚丙烯纤维混凝土承担的剩余弯矩.计算公式可参考文献[4]; M_{rs} 为考虑极限状态时受拉区钢纤维混凝土的残余拉应力而计算的钢纤维混凝土所承担的受弯承载力.计算公式可参考文献[5].

按以上方法计算的结果与试验结果对比如表 3,表中计算的 HFRHPC 受弯承载力值为 $87.3 \sim 128.9\text{ kN}\cdot\text{m}$,与试验值($97.5 \sim 162.5\text{ kN}\cdot\text{m}$)相差 $11.1\% \sim 27.3\%$.

表 3 SPF 系列深梁受弯承载力 M_u 的计算值与试验值

试验梁编号	屈服弯矩 M_{u0} kN·m	M_s	M_{tp}	M_{rs}	M_u
C-1	65.00	47.08	0	0	47.08
SPF-1-1	114.10	47.08	9.96	30.95	87.99
SPF-2-1	146.25	47.08	8.38	30.95	86.41
SPF-3-1	97.50	47.08	5.02	30.95	83.05
SPF-1-2	130.00	60.26	9.96	43.91	114.13
SPF-2-2	130.00	47.08	8.38	43.91	99.37
SPF-3-2	162.50	47.08	5.02	43.91	96.11
SPF-1-3	146.25	60.26	9.96	58.75	128.97
SPF-2-3	162.50	60.26	8.38	58.75	127.39
SPF-3-3	146.25	60.26	5.02	58.75	126.47

4 结 论

- 1) 在高性能混凝土深梁中单独加入少量钢纤维(体积率 $\leq 1\%$)可使适筋深梁的屈服荷载提高 $10\% \sim 100\%$ 左右,且屈服荷载提高基本与钢纤维体积率成正比.
- 2) 在高性能混凝土深梁中单独加入体积率为 0.11% 的聚丙烯纤维,可使相同配筋率的深梁屈服荷载提高 100% 左右,但加入体积率大于 0.11% 的聚丙烯纤维时,深梁屈服荷载均未见提高.
- 3) 钢/聚丙烯混杂纤维可显著提高 HPC 适筋深梁的受弯承载力:纵向钢筋屈服荷载可提高 $50\% \sim 150\%$,极限荷载可提高 $1 \sim 2$ 倍,但混杂纤维的作用不能代替纵向钢筋的作用.
- 4) 可采用复合材料强度叠加原理和剩余弯曲强度理论来探讨混杂纤维增强高性能混凝土深梁受弯承载力.

参考文献:

[1] 徐至钧. 纤维混凝土技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 107-136.

[2] Structural Design of Concrete Structure (GB50010) [S]. Beijing: Construction Industry Press of China, 2002.

[3] Fiber Reinforced Concrete Structure of the Technical Point of Order CECS 38: 2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.

[4] HUANG C K. Fiber Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.

[5] 夏冬桃. 混杂纤维增强高性能混凝土深梁受弯性能试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.

[6] NIHAL A, ZCANNA G, ERGIN A. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion[J]. ACI Materials Journal Technical Paper, 2006(1/2): 18-24. (编辑 刘 彤)