第57卷第6期
2017年11月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol.57, No.6
Nov. 2017

文章编号：1000-8608(2017)06-0601-06

CFRC复合梁力学性能试验研究

任慧韬*， 吴英伯， 韩少楠， 王立成

（大连理工大学 建设工程学部，辽宁 大连 116024）

摘要： 碳纤维混凝土(CFRC)复合梁是在普通混凝土梁中掺入短切碳纤维，以此改善混凝土的性能. 碳纤维弹性模量高，将其掺入混凝土中能改善混凝土的韧性并起到增强阻裂的效果. 通过四点加载试验，研究普通混凝土梁与不同纤维层厚度、不同纤维长度的复合梁的弯曲破坏机理、荷载挠度行为、裂缝形态等. 试验结果表明，在混凝土梁的受拉区掺入短切碳纤维可以有效改善其变形能力；碳纤维对混凝土裂缝扩展的抑制、裂缝形态的改善效果较好；纤维层厚75 mm、纤维长度10 mm的复合梁性能最优. 最后提出了CFRC弯曲构件极限承载力的计算公式.

关键词： 碳纤维混凝土(CFRC)；复合梁；抗弯性能；裂缝抑制

中图分类号： TU528.024　**文献标识码：** A　**doi：** 10.7511/dllgxb201706008

0 引　言

混凝土已经广泛应用于工程结构中，但其抗拉强度低、变形能力弱等缺点使其在大型复杂结构中的使用受限[1-2]. 纤维混凝土是混凝土向高抗拉、高韧性、高阻裂、高耐久、材料智能性发展的产物. 碳纤维属于高模量纤维，与其他纤维（钢纤维、玻璃纤维等）相比，碳纤维性质更稳定，在环境中耐腐蚀、耐老化、耐温差效果更好. 此外碳纤维密度小，采用碳纤维混凝土(CFRC)可以使构件更加轻质、施工简便. 在成本上，碳纤维的抗拉强度在3 500 MPa以上，达到增强效果所需的纤维掺量普遍低于其他纤维. 除了以上力学性质优良外，CFRC还在电磁屏蔽、热电除冰、结构健康自检测、钢筋阴极保护等方面有广阔前景. 近年来碳纤维价格的持续走低使CFRC的研究备受瞩目[3].

然而目前的研究大多针对全截面碳纤维复合材料的力学性能[4-5]. 研究表明，碳纤维的掺入对混凝土抗拉强度、韧性均有较大提高，但是对抗压强度影响不大[6]. 若只在受弯构件的受拉区掺入碳纤维，那么既可提高纤维利用率又能缩减材料成本[7]. Rahimi等[8]研究了局部钢纤维砂浆的受弯性能，得出当纤维层厚为梁高的16%时，试件的抗折强度有较大提高，且与全截面增强砂浆试件相比降幅不大. Sri Ravindrarajah等[9]研究了不同纤维层高比的钢纤维复合梁抗弯强度，发现抗弯强度随着层高比的增加而增加，但达到某一限值后增强效果减弱.

本文的研究借鉴当前最新的研究成果，设计7组复合梁试件，探讨不同因素下碳纤维对复合梁静态受弯性能的增强效果.

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用材料为P·O 42.5R普通硅酸盐水泥、粉煤灰、瓜子石（粒径5～10 mm）、河砂、自来水、碳纤维分散剂（甲基纤维素）、高效减水剂、消泡剂（磷酸三丁酯）和短切碳纤维. 钢筋强度等级为HRB400. 短切碳纤维的性能指标见表1.

表1　短切碳纤维性能指标

Tab.1　Performance indicators of short carbon fibers

纤维直径/μm	密度/(g·cm⁻³)	抗拉强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
10	1.79	3.53×10^3	230	1.53

收稿日期： 2017-04-05；　**修回日期：** 2017-09-20.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51378090).
作者简介： 任慧韬*(1973-)，男，博士，副教授，E-mail：renht@dlut.edu.cn.

1.2 配合比

为使纤维层与混凝土层的界面接触、分层效果良好，试验配制了 C40 自密实混凝土，配合比见表 2. 周乐等[10]研究得出，当碳纤维掺量为 0.24% 时，对混凝土的阻裂作用最佳. 因此纤维混凝土配比是在此基础上掺入 0.24% 的碳纤维，胶凝材料为质量 0.7% 的分散剂和 0.1% 的消泡剂. 配制碳纤维混凝土时，应适量提高减水剂的掺量以达工作度要求.

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

ρ(水泥)/(kg·m^{-3})	ρ(粉煤灰)/(kg·m^{-3})	ρ(砂子)/(kg·m^{-3})	ρ(石子)/(kg·m^{-3})
401	172	742	710

ρ(水)/(kg·m^{-3})	ρ(减水剂)/(L·m^{-3})	水胶比
229.2	7.45	0.4

1.3 试件制作

试验共设计了 7 组试件，每组 2 个，变量参数包括拌入纤维层厚度和纤维长度. 表 3 为试件分组情况，图 1 为试件尺寸及配筋方式. 试件采用热浇法，即在 CFRC 层初凝前完成自密实混凝土的浇筑. 浇筑完成后用塑料保鲜膜包裹浇筑面，防止水分流失. 试件在室内标准养护至 28 d 龄期.

表 3 试件分组表

Tab. 3 Grouping table of test samples

试件编号	纤维层厚度/mm	纤维长度/mm	数量
RC	0	0	2
CFRC-40-05	40	5	2
CFRC-40-10	40	10	2
CFRC-40-15	40	15	2
CFRC-75-05	75	5	2
CFRC-75-10	75	10	2
CFRC-75-15	75	15	2

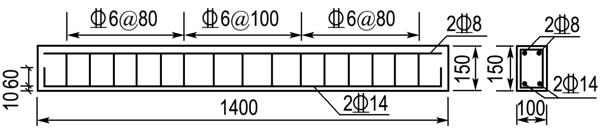


图 1 梁的配筋图

Fig. 1 Steel reinforcement of beam

1.4 试验装置

试验在 1 000 t 电液伺服试验机上进行，采用荷载等级为 5 kN 的分级加载方式. 跨中挠度用两个 LVDT 对称测量，支座处布置两个 LVDT 测量支座位移.

2 试验结果与讨论

2.1 破坏模式

复合梁的破坏过程分为 3 个阶段. 弹性阶段：此时试件的荷载挠度曲线为线性，碳纤维的作用还未体现. 屈服阶段：初裂后，拉应力由碳纤维与钢筋共同承担. 当碳纤维与基体的黏结应力达到其黏结强度时，二者脱黏，随着加载过程的持续，纤维在基体中产生滑移，消耗了一定的能量. 破坏阶段：受拉钢筋屈服后，裂缝向受压区扩展，此时挠度增长较快，受压区产生明显的塑性变形，随着裂缝的不断扩展，大部分碳纤维被拔出，受压区混凝土出现鳞片状凸起，直至压碎，碳纤维的增强作用基本消失.

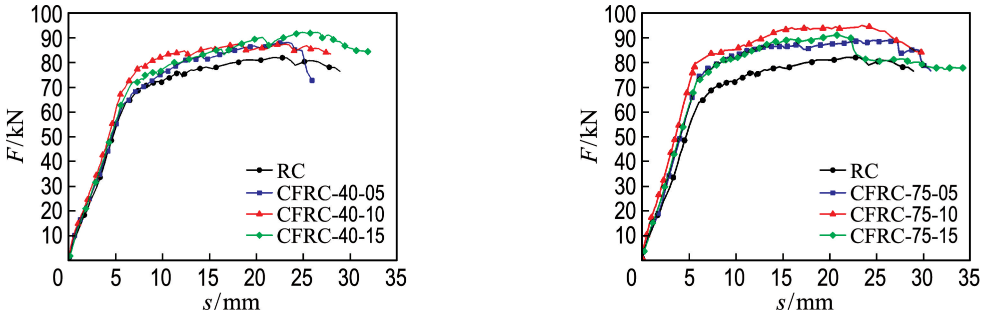
所有试件破坏模式均为正截面受弯破坏且界面均未出现剥离，可见热浇法能有效避免复合梁的剥离破坏. RC 梁与复合梁破坏模式基本相同，说明碳纤维层的加入对梁的最终破坏形态影响不大.

2.2 荷载-挠度行为

图 2 为纤维层厚度相同、纤维长度不同的梁试件荷载位移曲线对比情况. 结果表明，从开始加载到屈服，复合梁都比 RC 梁的斜率更大. 5 mm 与 15 mm 长度碳纤维复合梁在屈服前斜率与 RC 梁对比增加相对较小，而 10 mm 碳纤维梁试件斜率相对 RC 梁增加较大. 由此可知：在荷载相同条件下，复合梁的跨中挠度小于普通钢筋混凝土梁，并随着荷载的增加，差异更为明显，碳纤维的加入会对梁的后期刚度产生明显改善作用，其中 10 mm碳纤维对混凝土的改善效果要优于其他两种长度的碳纤维.

图 3 给出了纤维长度相同时，纤维层厚度不同的荷载位移曲线. 3 图表现出相同趋势：试件屈服以前，曲线斜率随纤维层厚度的增大而增大；屈服点以后，复合梁曲线几乎包络 RC 梁曲线. 结果表明，在纤维长度相同的条件下，75 mm 厚纤维层复合梁的刚度、屈服荷载、极限荷载提高效果要比 40 mm 的更好.

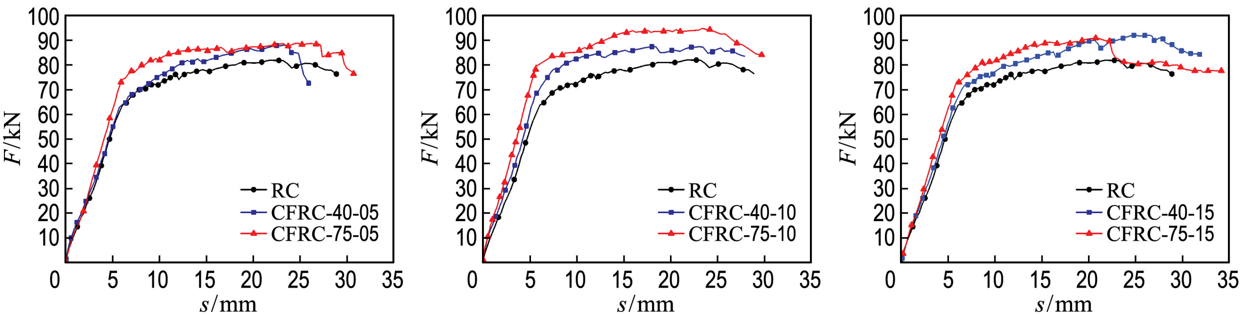
表 4 为试件的开裂、屈服和极限荷载试验结果，由表中数据可知：碳纤维对试件的开裂荷载影响不大，这是由于开裂荷载主要取决于基体的极限拉应变；掺入碳纤维的复合梁屈服荷载普遍高于 RC 梁. 当纤维层厚度为 75 mm 时，与对比试件相比，纤维长度为 10 mm 的试件屈服荷载提高



（a）RC 梁与纤维层厚度 40 mm 复合梁对比　（b）RC 梁与纤维层厚度 75 mm 复合梁对比

图 2　纤维长度对荷载-位移曲线的影响

Fig. 2　Effect of fiber length on load-displacement curves



（a）RC 梁与纤维长度 5 mm 复合梁对比　（b）RC 梁与纤维长度 10 mm 复合梁对比　（c）RC 梁与纤维长度 15 mm 复合梁对比

图 3　纤维层厚度对荷载-位移曲线的影响

Fig. 3　Effect of fiber layer thickness on load-displacement curves

表 4　CFRC 复合梁的弯曲试验结果

Tab. 4　Bending test results of CFRC composite beams

试件编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	屈服荷载提高率/%	极限荷载/kN	极限荷载提高率/%
RC	6.8	63.72	—	82.06	—
CFRC-40-05	9.0	64.77	1.65	88.17	7.45
CFRC-40-10	6.5	77.89	22.24	88.70	8.09
CFRC-40-15	6.0	71.54	12.27	92.17	12.32
CFRC-75-05	8.5	74.57	17.03	88.90	8.34
CFRC-75-10	7.5	80.66	26.59	92.92	13.23
CFRC-75-15	5.0	73.65	15.58	92.00	12.11

幅度最大，为 26.59%. 纤维长度为 15 mm 的试件屈服荷载提高幅度有所降低. 初步分析可能是由于长纤维在混凝土拌和过程中无法完全分散所致. 纤维层厚度同样影响复合梁的屈服荷载. 试件 CFRC-40-05、CFRC-75-05 屈服荷载分别提高 1.65%、17.03%；试件 CFRC-40-10、CFRC-75-10 屈服荷载分别提高 22.24%、26.59%；试件 CFRC-40-15、CFRC-75-15 屈服荷载分别提高 12.27%、15.58%.

试验结果表明，加入碳纤维对于复合梁极限荷载有一定提高，但幅度小于屈服荷载. 所有试件的极限荷载提高幅度在 7%～14%. 这是因为复合梁在达到屈服后，随着受拉区混凝土裂缝宽度的增大，碳纤维被拔出或者拉断，不能继续桥接裂缝，因此碳纤维对极限荷载的提高与屈服荷载相比幅度较低.

2.3　抗弯承载力计算

碳纤维混凝土梁的计算可以参考钢纤维混凝土梁的计算原理[11]，结合碳纤维的增强作用机理，计算复合梁的极限承载力. 首先建立梁的平衡方程：

$$f_{\mathrm{fcm}}bx=f_{\mathrm{y}}A_{\mathrm{s}}-f'_{\mathrm{y}}A'_{\mathrm{s}}+f_{\mathrm{ftb}}bx_{\mathrm{t}} \tag{1}$$

$$M_{\mathrm{fu}}=f_{\mathrm{fcm}}bx\left(h_0-\frac{x}{2}\right)+f'_{\mathrm{y}}A'_{\mathrm{s}}(h_0-a'_{\mathrm{s}})+f_{\mathrm{ftb}}bx_{\mathrm{t}}\left(\frac{x_{\mathrm{t}}}{2}-a_{\mathrm{s}}\right) \tag{2}$$

式中：f_{fcm} 为普通混凝土等效应力图抗压强度；f_{ftb} 为纤维混凝土等效应力图抗拉强度；f_{y}、f'_{y} 为钢筋拉、压屈服强度；A_{s}、A'_{s} 为钢筋拉、压截面面积；b 为复合梁的宽度；M_{fu} 为复合梁的极限抗弯承载

力；a_s、a'_s 为拉、压钢筋合力点到拉、压边缘距离；h_f、h_0 为纤维层高度、截面有效高度；x 为等效受压区高度；x_t 为等效受拉区高度，这里取 $x_t=h_f$. 国内外的学者对纤维混凝土弯曲抗拉强度 f_{ftb} 做过较多研究[12-13]，赵国藩等认为可以采用下式计算：

$$f_{ftb}=\beta_{tb}\lambda_f f_t \tag{3}$$

式中：β_{tb} 为回归参数，纤维对混凝土的抗拉影响系数；f_t 为同等级混凝土轴心抗拉强度；λ_f 为纤维特征参数，$\lambda_f=\rho_f\dfrac{l_f}{d_f}$.

实际上，采用式(3)计算 f_{ftb} 时，β_{tb} 的确定较为分散，导致计算结果差异较大. 因此 f_{ftb} 通常用劈裂抗拉强度的转换与修正间接得到. 在计算 f_{ftb} 时，还应考虑纤维特征参数 λ_f 和纤维乱向增强效率 η_f. f_{ftb} 可按下式计算：

$$f_{ftb}=0.85(1+\lambda_f\eta_f)f_{tc} \tag{4}$$

$$\eta_f=\begin{cases} l_f/4l_{fcrit}; & l_f\leqslant l_{fcrit} \\ (1-l_{fcrit})/4l_f; & l_f>l_{fcrit} \end{cases} \tag{5}$$

其中 l_{fcrit} 为纤维临界长度，根据 Heim 等[14]采用的碳纤维双倍搭接试验，取碳纤维临界长度为 52 mm；f_{tc} 为 100 mm 立方体劈拉强度.

表 5 是采用本文给出的公式计算的复合梁极限承载力与试验结果的对比. 由对比结果可知，采用式(4)能较好地表达碳纤维对复合梁的增强效应.

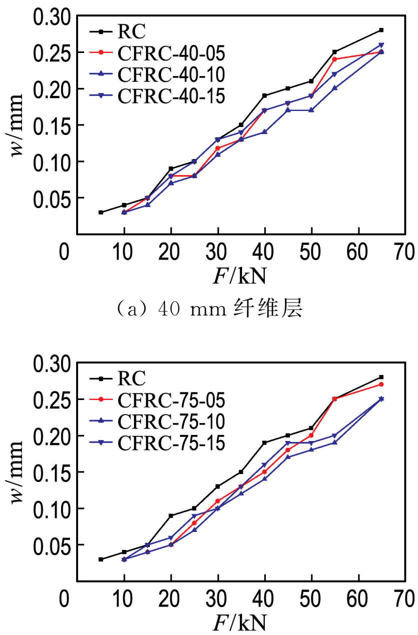
表 5　极限承载力理论值与试验值的对比

Tab. 5　Comparison between theoretical value and experimental value of ultimate bearing capacity

梁类型	极限荷载试验值 F_1/kN	极限荷载理论值 F_2/kN	误差/%
RC	82.06	79.90	2.6
CFRC-40-05	88.17	85.10	3.5
CFRC-40-10	88.70	85.27	3.9
CFRC-40-15	92.17	84.05	8.8
CFRC-75-05	88.90	87.73	1.3
CFRC-75-10	94.92	88.01	7.3
CFRC-75-15	92.00	86.36	6.1

2.4　裂缝分析

2.4.1　裂缝宽度分析　试件在分级加载过程中，每个荷载等级对应的裂缝最大宽度变化如图 4 所示. 在同级荷载下，复合梁的裂缝宽度更小. 说明碳纤维层可以提高构件的抗裂能力，延缓裂缝开展. 其中 10 mm 碳纤维较 5、15 mm 碳纤维对裂缝的抑制效果更明显；75 mm 纤维层比 40 mm 纤维层效果更好.



(a) 40 mm 纤维层

(b) 75 mm 纤维层

图 4　纤维长度对裂缝宽度-荷载曲线的影响

Fig. 4　Effect of fiber length on crack width-load curves

所有试件中，5 mm 碳纤维试件对裂缝改善的效果最弱，幅度在 11%～13%. 这是由于 5 mm 碳纤维长度较短，远小于临界长度，裂缝截面上纤维锚固长度不足，过早被拔出，导致纤维的利用率低，增强效果不明显.

10 mm 碳纤维试件随着裂缝宽度的增大，对应荷载提高率在 13.81%～26.02%. 这是由于梁刚开裂时，裂缝宽度很小，纤维没有被“拉紧”，界面的黏结应力没有发挥，因此对裂缝的抑制作用较小；随着荷载的增大，裂缝宽度不断扩展，纤维对于裂缝的抑制作用增强，相应的裂缝宽度对应的荷载提高率增大.

15 mm 碳纤维试件也表现出随着裂缝宽度增大，对应荷载增大的特点，但是相同裂缝宽度下，荷载提高率较小，在 0.60%～6.67%，抑制裂缝作用不理想. 分析其中原因，是纤维长度较长，难于分散，使纤维层在浇筑时成束、结团或打断. 部分长纤维没有形成乱向分布的单丝状，此类纤维不能在基体中形成均匀分布的纤维以桥接裂缝；另一部分碳纤维被打断成长度较小的短纤维，此类短纤维在基体中的锚固长度不足.

2.4.2　裂缝开展情况讨论　对比试件 RC 梁在开裂后，梁体表面出现一条或两条裂缝并随着荷载的增大迅速向受压区发展，接近屈服荷载时裂

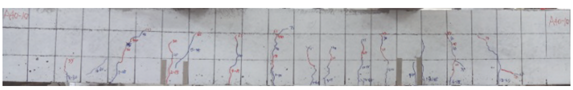
缝宽度急剧增大以致破坏.复合梁在开裂后直到屈服荷载前,纤维层中的碳纤维会发挥作用限制裂缝的扩展,并且受力过程中,复合梁不会像 RC 梁一样形成宽度很大、条数很少的主裂缝,而是形成多条间距较小的细裂缝.复合梁在达到屈服荷载后才会出现宽度较大、发展较迅速的几条主裂缝,在试件整个受力过程中,复合梁的裂缝发展速度较 RC 梁缓慢,直到屈服荷载前经常有新的裂缝产生.表 6 记录了 7 组试件在破坏时产生的裂缝条数,图 5 为部分试件的裂缝形态.由图可见 RC 梁达到破坏时,一般形成 2～4 条的宽裂缝,细裂缝较少,裂缝条数平均为 10 左右,平均间距为 8.00 cm;而复合梁达到破坏时出现的裂缝条数明显多于 RC 梁,为 12～17 条,裂缝形态是细而密的均匀裂缝,平均间距为 5.29～7.20 cm.

表 6　试验梁破坏时裂缝条数

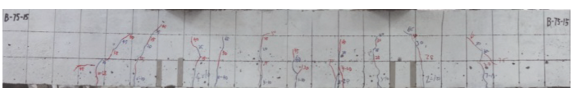
Tab.6　Crack number of test beam under fatigue

梁类型	编号	裂缝条数	平均条数	裂缝平均间距/cm
RC	L1	10	10	8.00
	L2	10		
CFRC-40-05	L1	13	12.5	6.54
	L2	12		
CFRC-40-10	L1	15	16	5.29
	L2	17		
CFRC-40-15	L1	14	12.5	7.20
	L2	11		
CFRC-75-05	L1	15	14	5.71
	L2	13		
CFRC-75-10	L1	17	16.5	6.06
	L2	16		
CFRC-75-15	L1	12	12	6.67
	L2	12		

(a) RC



(b) CFRC-40-10



(c) CFRC-75-15

图 5　裂缝形态

Fig.5　Crack pattern

3　结　论

(1)在混凝土梁受拉区掺入短切碳纤维能有效提高其屈服荷载.针对本文试验选用的 3 种纤维长度,长度为 10 mm 的梁试件,屈服荷载提高幅度最大.

(2)碳纤维的加入对混凝土梁极限荷载也有提高,但提高幅度相对屈服荷载有所降低.主要原因是由于裂缝扩展贯通纤维层后,纤维退出工作而不能继续承受拉应力.纤维层对最终破坏形态影响不大.在计算复合梁极限承载力时,纤维混凝土等效应力图抗拉强度可以按照式(4)计算.

(3)在荷载相同条件下,复合梁的跨中挠度均小于混凝土对比梁,且随着荷载的增加,改善作用更为明显,说明加入碳纤维会对梁的后期刚度有明显的改善.

(4)碳纤维的加入对混凝土梁的裂缝发展具有明显改善作用,具体表现是:相同荷载下裂缝宽度更小;相同裂缝下,对应的荷载更大.碳纤维加入可以改善混凝土梁受弯裂缝的形态,与对比试件相比,裂缝表现出更细和更密的特点,这对提高混凝土梁的耐久性具有很大意义.

参考文献:

[1]　侯利军,陈　达,孙晋永,等. RC/UHTCC 复合梁的弯曲与界面性能试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(s1):100-107.
HOU Lijun, CHEN Da, SUN Jinyong, *et al*. Flexural and interface responses of RC/UHTCC beams [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2014, **45**(s1):100-107. (in Chinese)

[2]　ARYA C, CLARKE J L, KAY E A, *et al*. TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials: a review [J]. **Engineering Structures**, 2002, **24**(7): 889-900.

[3]　BADANOIU A, HOLMGREN J. Cementitious composites reinforced with continuous carbon fibres for strengthening of concrete structures [J]. **Cement and Concrete Composites**, 2003, **25**(3):387-394.

[4]　彭　勃,陈志源,王立华. CFRC 中碳纤维长度分布对强度和电阻率的影响[J]. 建筑材料学报, 2002, **5**(3):235-239.
PENG Bo, CHEN Zhiyuan, WANG Lihua. Length distribution of carbon fibers in CFRC and its influence on the resistivity and strength [J]. **Journal**

of Building Materials, 2002, **5**(3):235-239. (in Chinese)

[5] XIN Yuan, ZHU Guohua, YU Liang. Freeze/thaw durability of carbon fiber reinforced concrete [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, **174-177**: 816-820.

[6] ZHENG Q, CHUNG D D L. Carbon fiber reinforced cement composites improved by using chemical agents [J]. **Cement and Concrete Research**, 1989, **19**(1):25-41.

[7] WANG Wei, DAI Hongzhe, WU Sigang. Mechanical behavior and electrical property of CFRC-strengthened RC beams under fatigue and monotonic loading [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2008, **479**(1/2):191-196.

[8] RAHIMI M M, KESLER C E. Partially steel-fiber reinforced mortar [J]. **Journal of the Structural Division**, 1979, **105**(1):101-109.

[9] SRI RAVINDRARAJAH R, TAM C T. Flexural strength of steel fibre reinforced concrete beams [J]. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, 1984, **6**(4): 273-278.

[10] 周 乐,王晓初,刘洪涛. 碳纤维混凝土力学性能与破坏形态试验研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(s1): 226-231.
ZHOU Le, WANG Xiaochu, LIU Hongtao. Experimental study of mechanical behavior and failure mode of carbon fiber reinforced concrete [J]. **Engineering Mechanics**, 2013, **30**(s1):226-231. (in Chinese)

[11] 中国工程建设标准化协会. 钢纤维混凝土结构设计与施工规程: CECS 38:92 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
China Association for Engineering Construction Standardization. Specification for Design and Construction of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures: CECS 38: 92 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992. (in Chinese)

[12] 高丹盈. 钢纤维钢筋混凝土梁正截面强度的计算[J]. 工业建筑, 1991, **21**(10):9-14.
GAO Danying. The calculation of the positive section strength of steel fiber reinforced concrete beams [J]. **Industrial Construction**, 1991, **21**(10): 9-14. (in Chinese)

[13] 林长青,彭少民. 钢纤维钢筋混凝土梁正截面承载能力分析[J]. 重庆交通学院学报, 1992, **11**(2):36-41.
LIN Changqing, PENG Shaomin. Analysis of steel fiber reinforced concrete beams [J]. **Journal of Chongqing Jiaotong Institute**, 1992, **11**(2):36-41. (in Chinese)

[14] HEIM D, HARTMANN M, NEUMAYER J, *et al*. Novel method for determination of critical fiber length in short fiber carbon/carbon composites by double lap joint [J]. **Composites Part B-Engineering**, 2013, **54**(1):365-370.

Experimental study of mechanical properties of CFRC composite beams

REN Huitao*, WU Yingbo, HAN Shaonan, WANG Licheng

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced concrete (CFRC) composite beam is a kind of concrete beam which is reinforced with short carbon fiber to improve the performance of concrete. CFRC toughness and crack resistance ability can be enhanced by high elastic modulus carbon fiber. The failure mechanism, load deflection behaviors, crack pattern of concrete beams and composite beams with different fiber layer thickness and fiber length are studied by four-point bending test. The results show that the deformation ability of concrete beams can be effectively improved by the short carbon fiber in the tension zone. The carbon fiber shows positive effect on restraining crack propagation and changing crack distribution in concrete matrix. Composite beam with 75 mm fiber layer thickness and 10 mm fiber length shows the best performance. Finally, the design formula for ultimate bearing capacity of CFRC bending member is proposed.

Key words: carbon fiber reinforced concrete (CFRC); composite beams; flexural properties; crack propagation restraint