

[文章编号] 1003-4684(2023)01-0076-04

BFRP 筋钢纤维部分增强混凝土梁延性性能研究

陈升平, 李航宇, 张建波, 沈 伟, 董 辉

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以不同钢纤维体积率(0,0.5%,1%)和受压区的不同钢纤维混凝土层厚度(180,300)为试验变量,进行 4 根 BFRP 筋钢纤维混凝土梁和 1 根 CFRP 筋钢纤维混凝土梁的受弯性能试验。通过分析其破坏特征及破坏机理,研究了钢纤维体积率和受压区钢纤维混凝土层的厚度对其延性性能的提升效果。结果表明:添加钢纤维会显著提高梁的延性系数,较未掺加钢纤维的混凝土梁其延性系数的提高幅度约可达 7%~42%;受压区钢纤维混凝土层的厚度对梁的延性系数也有一定的影响,随着混凝土层厚度的增加,其延性系数约可提高 30%;CFRP 筋对梁的增强增韧效果优于 BFRP 筋。

[关键词] FRP 筋;钢纤维;受弯性能;延性性能

[中图分类号] TU312 [文献标识码] A

传统的钢筋混凝土梁开裂时存在裂缝宽度大、破坏突然、延性较差等缺点,这种突然的破坏对社会经济生产会造成不可估量的损失^[1-2]。为此,研究一种既能提高梁的受弯性能,又能提高梁延性的材料尤为关键。纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic,FRP)是往基体材料中增加一定量的纤维而形成的高性能新型材料,用此制作的 FRP 筋相比钢筋具有高韧性,抗拉性能好等特点^[3-4]。但由于 FRP 筋弹性模量低,应力应变关系呈线性^[5],以及与普通混凝土浇筑裂缝开裂大,延性较低,用 FRP 筋替代钢筋,具有其自身的局限性^[6]。往梁中加入钢纤维,可以高效利用 FRP 筋对混凝土的增强增韧作用,增加梁的受弯性能,提高梁的开裂荷载与延性^[7]。

国内大量研究围绕 FRP 筋钢纤维混凝土这种材料进行。吴涛等^[8]完成了 9 根 GFRP 筋钢纤维混凝土梁的受弯性能试验,以各国规范对试验梁进行开裂弯矩、承载力、挠度的评估。结果表明:掺入钢纤维能有效抑制梁裂缝宽度的延伸,并提高了梁的极限荷载,从而改善了梁的延性性能。徐可等^[9]研究了 GFRP 筋与普通钢筋混合配筋对钢纤维增强混凝土梁受弯性能的影响。结果表明:混合配筋模式下,加入钢纤维的 GFRP 筋混凝土梁,筋材的抗拉作用得到充分发挥,进一步提高了梁的承载力以及延性。

已有研究表明,部分截面掺加钢纤维的混凝土梁的增强增韧效果可以达到全截面掺加钢纤维的混凝土梁的增强增韧效果^[10]。朱海堂等^[11]完成了 12 根 BFRP 筋钢纤维高强混凝土梁的四点弯曲试验,研究了钢纤维掺加高度和含量与梁延性之间的关系。结果表明:钢纤维能很好地抑制初裂缝后梁刚度的减少,提高梁的延性性能。陈信展等^[12]研究了 7 根 BFRP 筋钢纤维混凝土梁,分析钢纤维体积率与钢纤维掺加高度对梁受弯破坏程度之间的关系。结果表明:掺加了钢纤维的混凝土梁,其开裂荷载和极限荷载都有一定程度的提升,钢纤维的存在抑制了裂缝的发展,有效地提高梁的延性。

上述研究表明,掺加钢纤维可以有效提高梁的延性性能。但目前的研究主要集中在全截面掺加钢纤维和受拉区部分截面掺加钢纤维这一研究点上,关于受压区的研究还较少。在梁截面部分地加入钢纤维不仅可以达到全截面掺加钢纤维的效果,而且能有效节约成本,减少钢纤维的损耗。故本文在上述研究的基础上,以钢纤维掺量和受压区钢纤维混凝土层厚度为试验的主要变量,研究其对钢纤维混凝土梁延性性能的影响。

1 试验概况

本次试验共设计 4 根 BFRP 筋混凝土梁和 1 根 CFRP 筋混凝土梁作为对比梁。试验梁的制作有 1 根 BFRP 筋混凝土梁(B1)、1 根钢纤维掺量为 0.5%

[收稿日期] 2021-10-18

[第一作者] 陈升平(1965-),男,湖南醴陵人,湖北工业大学教授,研究方向为高性能纤维增强混凝土

[通信作者] 李航宇(1996-),男,广西梧州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为纤维增强混凝土材料

的 BFRP 筋部分钢纤维混凝土梁(B2)、2 根钢纤维掺量为 1% 的 BFRP 筋部分钢纤维混凝土梁(B3-1, B3-2)、1 根钢纤维掺量为 1% 的 CFRP 筋钢纤维混凝土梁(B4)。试验梁具体截面尺寸如图 1 所示。

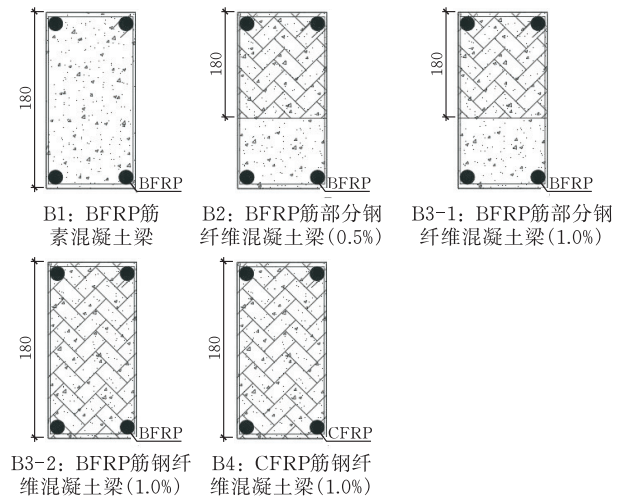


图 1 梁截面 mm

本次试验选用的筋材为 BFRP 筋和 CFRP 筋，这两种筋材的力学性能见表 1。

表 1 BFRP/CFRP 筋力学性能

筋材类型	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
BFRP 筋	52.2	1209	2.3
CFRP 筋	130	1650	1.8

本次实验所选用的水泥为普通硅酸盐水泥(P. O42.5)，I 级粉煤灰，适量矿物掺合料，粗骨料粒径 5~20 mm，级配 II 区中砂，适量高效减水剂。试件配合比如表 2 所示。

表 2 配合比设计

编号	水胶比	砂率/%	钢纤维体积率/%	水/kg	水泥/kg	砂/kg	石/kg
B1	0.422	30.00	0	185	417	548	1278
B2	0.422	41.00	0.50	185	417	745	1069
B3-1	0.422	41.00	1.00	185	417	741	1061
B3-2	0.422	41.00	1.00	185	417	742	1060
B4	0.422	41.00	1.00	185	417	742	1060

2 BFRP 筋部分钢纤维混凝土梁受弯试验

本次试验采用逐级加载的方式，初裂缝开裂前以 10 kN 的力逐级加载，开裂后以 15 kN 的力进行逐级加载，加载设备见图 2。主要收集的数据有：1) 跨中挠度；2) 顶部混凝土应变；3) 初裂荷载、极限荷载；4) 梁裂缝宽度。本次实验在梁跨中及其梁端各 1/3 处设置位移计，同时在梁支座上端也设置位移计，用于测试梁支座位移。

根据《混凝土结构试验方法标准》GB/T50152—2012^[13]，加载方式为三分点加载，加载详细过程如

图 2、图 3 所示。

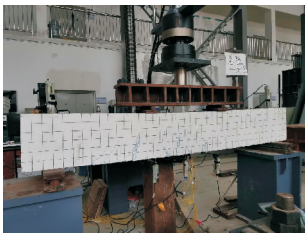
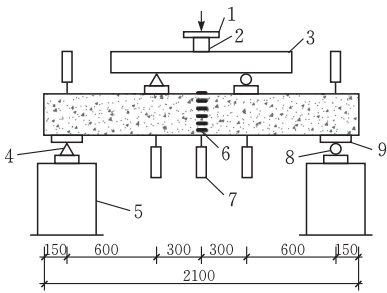


图 2 加载设备



1—千斤顶；2—荷载传感器；3—分配梁；4—固定铰支座；
5—混凝土支墩；6—应变片；7—固定铰支座；
8—位移计；9—钢板

图 3 测量仪器 mm

2.1 试验结果

试验得到不同纤维掺量和不同纤维高度的部分钢纤维混凝土梁受弯试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果

	开裂荷载 P_0 /kN	极限荷载 P_u /kN	极限压应变 ϵ	跨中最大挠度 ω /mm
B1	29	165	1622	17
B2	33.7	179	2253	16
B3-1	34.4	187	2310	21
B3-2	37.6	194	3290	25
B4	37	189	3199	26

从表 3 可以看出：1) 钢纤维体积率会显著影响梁的极限承载力。钢纤维体积率越大，梁极限承载力的提升越多；2) 钢纤维在受压区混凝土的不同厚度分布也会对梁的极限承载力存在一定的影响，经试验结果可以看出钢纤维掺入率越大，对混凝土梁的极限压应变提升越多；3) 钢纤维的掺入会提高梁的开裂荷载。掺入钢纤维的混凝土梁的开裂荷载要高于未掺钢纤维的混凝土梁。

2.2 梁破坏形态与破坏机理分析

由图 4 可以看出，梁的破坏为受压区混凝土的压碎破坏。试验梁在预加载阶段，其并无明显变化。随着荷载缓慢增长，到达开裂荷载时，梁表面下部边缘开始出现细小的裂纹。随着荷载的增加，裂缝沿着分配梁两端的支座逐渐延伸至梁顶，此阶段维持的一段时间内可以听见“滋滋”的声响，这是错乱分布的钢纤维在混凝土内部逐渐被拔出的声音，发展过程中裂缝继续延伸、变宽，且有细碎的混凝土块脱

落。在即将到达峰值应力时,梁顶部逐渐开裂,裂缝逐渐向梁中间延伸,破坏特征明显,并表现出一定的延性。最后伴随“轰”的巨响,梁顶部混凝土被压碎,梁宣告破坏。由表 3 可知,钢纤维掺入率越高,梁的极限承载力越大,从而使得梁的破坏程度有所减轻,延性越好。而作为对照组的 BFRP 筋混凝土梁(B1),在到达开裂荷载前的现象与钢纤维混凝土梁相似,但到达峰值应力后,其裂缝延伸速度快,且裂缝宽度大,达到极限荷载时,梁顶部破坏突然且迅速,为脆性破坏。



图 4 FRP 筋钢纤维混凝土梁的破坏形态

2.3 跨中挠度分析

图 5 为不同钢纤维混凝土梁的跨中挠度。在初裂缝出现以前,梁的跨中挠度增长缓慢;在裂缝出现以后,跨中挠度有了明显变化。在相同的荷载条件下,FRP 筋混凝土梁随着钢纤维含量的增加,挠度随之变小,呈现出一定的延性。添加了钢纤维的 FRP 筋混凝土梁(B2~B4)较未添加钢纤维的混凝土梁(B1),其跨中挠度要小 25%左右。随着荷载的增加,钢纤维含量越高,其跨中挠度逐渐减小。影响其跨中挠度的主要因素为钢纤维含量,而钢纤维混凝土厚度的影响较小。

3 BFRP 筋部分钢纤维混凝土梁延性计算方法

添加了钢纤维的 BFRP 筋混凝土梁,其极限压应变得到提升,破坏前,裂缝延伸速度较慢,有明显的破坏征兆。由于 BFRP 筋从受力-破坏的过程中始终未屈服,故传统延性指标的计算方法误差较大^[14]。

根据延性的评价标准,Naaman 等^[15]提出了基于能量的延性系数:

$$\mu_E = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{E_t}{E_e} \right)$$

式中, μ_E 为能量延性系数; E_t 为加载全过程所消耗的总能量; E_e 为加载过程中消耗的弹性能。

能量延性系数与传统的延性系数相比,适用性较广,可以用于无明显屈服点的材料体系中,反映了构件塑性变形能力。然而,用该方法评价 FRP 筋混凝土构件的延性仍会得到延性不足的结论^[16]。本

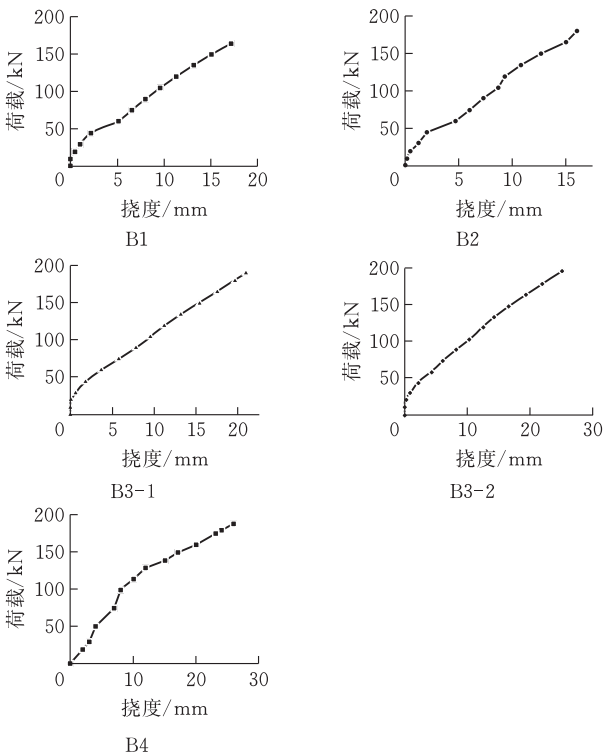


图 5 梁跨中挠度

文试验结果表明,钢纤维的掺入使得梁的荷载-挠度曲线更加光滑,用该方法所得到的延性结果并不理想。

祁皓等^[16]考虑了 FRP 筋高强度的特点,选用综合延性系数,考虑构件变形能力以及承载能力。该方法认为 FRP 筋混凝土梁在使用阶段,混凝土受压区边缘应变取 $\epsilon_c = 0.001$,所用评价延性的方法如下:

承载力标准 $S = \frac{M_u}{M_{0.001}}$

变形性标准 $D = \frac{\varphi_u}{\varphi_{0.001}}$

综合性能标准 $J = SD$

式中, φ_u 、 M_u 分别为极限曲率和极限弯矩; $\varphi_{0.001}$ 、 $M_{0.001}$ 分别为混凝土梁受压边缘应变时的曲率和弯矩。

将 FRP 筋混凝土构件的荷载-挠度曲线或荷载-曲率曲线简化为直线^[16],根据本文的试验结果,由于钢纤维与混凝土的增强增韧作用,使得构件的荷载-挠度曲线更加圆滑。因此,若使用综合延性系数所反映的延性结果仍有一定的误差。

美国 ACI440.1R-15 规范^[17]采用的计算方法考虑构件的正常使用极限状态,计算方法为构件极限状态所需要的能量与构件正常使用状态所需要的能量的比值,计算方法较为简便,适用性较广,故本次试验的延性计算方法采用其规范建议的计算方法,算法如下:

$$\mu = \frac{E_u}{E_{scr}}$$

式中, E_u 为极限状态下构件所消耗的能量; E_{scr} 为正常使用状态下构件所消耗的能量; μ 为美国规范 ACI 提出的延性系数。

根据文献[14]的建议,正常使用状态下试验梁跨中挠度取为跨度的 1/200。经计算,本次试验的延性系数计算结果如表 4 所示。

表 4 试验梁延性系数计算结果

	E_u	E_{scr}	μ
B1	1593.73	562.78	2.83
B2	1616.68	532.70	3.03
B3-1	2339.20	580.03	4.03
B3-2	2946.55	556.15	5.30
B4	3028.70	467.50	6.48

由表 4 可以看出,随着钢纤维掺量的增加,构件的延性系数也有所提高。对于部分截面掺加钢纤维的 BFRP 筋混凝土梁(B2,B3-1)相比未掺钢纤维的 BFRP 筋混凝土梁(B1),其延性系数约可提高 7%~42%;对于全截面掺加钢纤维的 FRP 筋混凝土梁(B3-2,B4)的延性系数,其提高幅度逐渐增加,相比部分增强混凝土梁(B2,B3-1),其延性系数约可提高 30%,分析其原因是因为全截面钢纤维的掺入,使梁的开裂荷载以及极限承载力得到提高,充分发挥了 FRP 筋的增强增韧作用,从而延缓了梁的破坏。从梁(B3-2)和梁(B4)可以看出,CFRP 筋钢纤维混凝土梁的增强增韧效果要高于 BFRP 筋钢纤维混凝土梁,对于延性控制要求严格的工程项目建议采用 CFRP 筋钢纤维混凝土梁。

4 结论

1) 分析研究了梁的的破坏过程与破坏机理,钢纤维的掺入可以有效提高梁的开裂荷载、极限承载力与极限压应变,且其提升幅度会随着钢纤维体积率的增加而增加。

2)通过美国 ACI 规范提出的延性系数指标来综合评价 FRP 筋钢纤维混凝土梁的延性性能。对于部分截面掺加钢纤维的混凝土梁,可以有效提高梁的延性性能,并且随着钢纤维体积率的提高而逐渐增加。对于全截面掺加钢纤维的混凝土梁,其延性性能相比部分增强混凝土梁也有所提高,约可提高 30%。但钢纤维混凝土层厚度对梁跨中挠度的影响较小。

3)全截面掺加钢纤维的 FRP 筋混凝土梁,筋材选用 CFRP 筋的增强增韧效果要高于 BFRP 筋,对于延性性能控制要求严格的工程项目,筋材建议采用 CFRP 筋。

[参 考 文 献]

[1] GE W, ZHANG J, CAO D, et al. Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars[J]. Construction & Building Materials, 2015, 87(15): 28-37.

[2] SONG YANG, ZHANG XIANGDONG, HE MIN. Experimental study on flexural properties of basalt FRP reinforced concrete beams[J]. Application of Engineering Plastics, 2014, 42(4): 82-85.

[3] ALNAHHAL W, ALJIDDA O. Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169(30): 165-178.

[4] 王勃,常福财. GFRP 筋海砂混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(05): 76-79.

[5] 陈应贺. FRP 及其增强混凝土构件疲劳性能研究现状[J]. 广东建材, 2021, 37(04): 76-78.

[6] 朱海堂,程晟钊,高丹盈. BFRP 筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3313-3323.

[7] 陈升平,马小霞,卢应发.FRP 筋钢纤维混凝土梁延性性能研究[J].混凝土与水泥制品, 2019(05):59-63.

[8] 吴涛,孙艺嘉,刘喜. GFRP 筋钢纤维高强轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(04): 129-139.

[9] 徐可,陆春华,宣广宇. 混合配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算[J]. 复合材料学报, 2020, 37(09): 2348-2357.

[10] 马小霞. FRP 筋钢纤维混凝土梁受弯性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2019.

[11] 朱海堂,程晟钊,高丹盈. FRP 筋钢纤维高强混凝土梁变形性能试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 162-170.

[12] 陈信展,韩飞,孔祥清. BFRP 筋钢纤维部分增强再生混凝土梁抗弯性能研究[J]. 混凝土, 2021(01): 77-81.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50152-2012. 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

[14] 程晟钊. BFRP 筋钢纤维复合增强高强混凝土梁受弯性能研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.

[15] JEONG S M, NAAMAN A E. Ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons[C].//Restructuring: America and Beyond. ASCE, 2010.

[16] 祁皑,翁春光. FRP 筋混凝土梁延性性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(05): 63-67.

[17] ACI COMMITTEE. ACI committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.