

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222564

BFRP 筋局部钢纤维混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究

张亚坤, 张东锋, 侯黎黎

(黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

摘要: 为了研究 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面的抗剪性能, 以 BFRP 筋钢纤维混凝土梁为研究对象, 开展了 9 根 BFRP 筋钢纤维混凝土梁的斜截面抗剪承载力试验, 分析了试验构件的破坏形态, 探讨了剪跨比、BFRP 筋配筋率、钢纤维体积掺量、钢纤维范围等参数对 BFRP 筋钢纤维混凝土梁抗剪性能的影响。结果表明, BFRP 筋钢纤维混凝土梁的破坏形态以剪切破坏为主; 试验梁的斜截面抗剪承载力随着剪跨比的增大而下降, 随着纤维掺量和 BFRP 筋配筋率的增大而提高; 支座以内剪跨范围设置钢纤维能够较好地改善 BFRP 筋混凝土梁的斜截面抗剪性能。最后, 由试验数据拟合得到 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力计算公式, 公式计算值与试验结果吻合较好。研究丰富了 FRP 筋混凝土复合结构斜截面设计理论, 对 FRP 筋钢纤维混凝土复合结构在实际工程的应用具有参考价值。

关键词: BFRP 筋; 钢纤维混凝土; 梁; 剪跨比; 配筋率; 纤维掺量; 抗剪承载力

中图分类号: TV8

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0151-05

1 引言

混凝土结构中钢筋的锈蚀及其产生的一系列问题严重影响结构的承载力、耐久性, 成为长期困扰土木工程领域的一大难题^[1]。FRP 筋具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲耐冲、无磁透波、节能环保等优异性能^[2], 因而成为钢筋混凝土结构中能够替代钢筋最具潜力的产品。然而, FRP 筋的拉伸模量远低于钢筋的弹性模量^[3], FRP 筋混凝土梁比同等条件下的钢筋混凝土梁的整体刚度低, 导致其变形较大, 裂缝较宽^[4]。对 FRP 筋混凝土梁及 FRP 筋钢纤维混凝土梁正截面受弯性能已开展了较多研究^[4-7], 但尚缺少 FRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪性能的研究。将 FRP 筋、钢纤维、混凝土三种材料结合起来, 用于混凝土梁, 是建筑结构性能优化的一种大胆尝试。由于 FRP 筋与钢筋的材料性能及这两种不同筋材与混凝土基体粘结性能等的迥异, 导致 FRP 筋钢纤维混凝土梁的抗剪承载力不能直接套用钢筋混凝土梁斜截面抗剪承载力的计算模式, 开展 FRP 筋钢纤维

混凝土梁斜截面抗剪承载力的研究十分必要。因此, 本文浇筑了 9 根 BFRP 筋钢纤维混凝土梁, 采用四点加载的方式, 研究其斜截面受力破坏过程和破坏形态, 分析剪跨比、BFRP 筋配筋率、钢纤维体积掺量、局部钢纤维掺加范围等参数的变化对试验梁斜截面抗剪承载力的影响规律, 并在试验研究的基础上, 尝试构建 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力计算模型, 研究结果对 FRP 筋纤维混凝土梁斜截面设计理论的建立和相关规范的制定具有重要意义。

2 试验

2.1 主要材料及配合比

混凝土采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥, 粗骨料为粒径范围 10~20 mm 的碎石, 细骨料为天然河砂, 细度模数为 3.1, 含水率为 4.6%, 级配良好。减水剂采用聚羧酸高效减水剂, 固含量为 29.97%, pH 值为 6.93, 密度为 1.043 g/cm³, 减水率为 27%, 坍落度 1 h 经时变化量为 28 mm。拌和水采用开封市饮用自来水。根据表 1 配合比

收稿日期: 2022-12-08, **修回日期:** 2023-03-13

基金项目: 2022 年度河南省高等学校重点科研项目(22B570001); 2020 年度黄河水利职业技术学院青年骨干教师培养计划(2020HYGG01); 开封市黄河流域生态保护和高质量发展创新专项计划(2019018); 2020 年开封市科技发展计划(科技攻关 2001021)

作者简介: 张亚坤(1983-), 男, 副教授, 研究方向为新型复合材料及其结构性能, E-mail: yakunzhang@126.com

通讯作者: 侯黎黎(1984-), 女, 讲师, 研究方向为纤维混凝土、FRP 筋混凝土结构, E-mail: houlixiaodan@163.com

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of concrete

混凝土	水灰比	水 /kg	水泥 /kg	砂子 /kg	碎石 /kg	钢纤维 /kg	减水剂 /%
C50	0.48	175	364	840	1 070	0	1.5
CF50-0.4%	0.48	175	364	836	1 033	31	1.8
CF50-0.8%	0.48	175	364	832	996	63	2.4
CF50-1.2%	0.48	175	364	828	959	94	2.4

拌制成强度为 CF50 的钢纤维混凝土或 C50 的普通混凝土浇筑试验梁构件。

钢纤维采用 3D 端钩形钢纤维,纤维长度为 30 mm,公称直径为 0.65 mm,长径比为 46,单丝拉伸强度为 1 135.6 MPa。

增强筋材中纵筋采用直径为 12 mm 的 BFRP 筋(玄武岩纤维增强塑料筋),筋的外形呈凹陷的螺旋肋。拉伸试验测得试验用 BFRP 筋的抗拉强度为 1 186 MPa,拉伸弹性模量为 $48.3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$,最大伸长率为 1.87%。

根据《钢纤维混凝土》(JG/T 472-2015)规范^[8]和《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)^[9]进行钢纤维混凝土配合比设计。通过配合比计算,并对计算配合比进行试验,分别得到强度等级为 C50 的普通混凝土、钢纤维掺量分别为 0.4%、0.8%、1.2% 的钢纤维混凝土的施工配合比,见表 1。

2.2 构件设计与制作

图 1 为试验梁的设计情况,具体参数设计见表 2。构件的总长度均为 1 690 mm,且都布置 2 根直径 12 mm 的 BFRP 筋作为架立钢筋;纵向受拉筋分别采用 2、4、6 根直径为 12 mm 的 BFRP

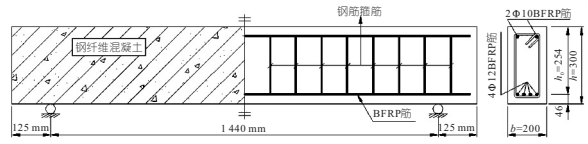


图 1 构件设计

Fig. 1 Structural member design

筋。混凝土保护层厚度为 40 mm,配置 2、4 根 BFRP 筋的构件,截面的计算保护层厚度为 46 mm;配置 6 根 BFRP 筋的梁,截面的计算保护层厚度为 65 mm,相应的截面有效高度 h_0 分别为 254、235 mm。箍筋采用 $\Phi 8@100$ 的钢筋。试验梁钢纤维的设置范围包括剪跨局部布置(h 长度梁段和 $2h$ 长度梁段)和全梁($5h$ 长度梁段)设置。钢纤维的体积掺量分别为 0.4%、0.8%、1.2%。按照施工配合比称量钢纤维混凝土的原材料。搅拌机开机后,先加入砂子、石子,搅拌 30 s;接着掺入钢纤维,搅拌 30 s;再加入水泥,搅拌 30 s;最后分 3 次加入水和减水剂,搅拌 180 s。测量拌合物的坍落度,浇筑钢纤维混凝土梁,同时浇筑梁的伴随试块。浇筑结束 24 h 后拆模,用塑料模覆盖构件,洒水养护至 28 d,养护期间始终保持混凝土表面湿润。

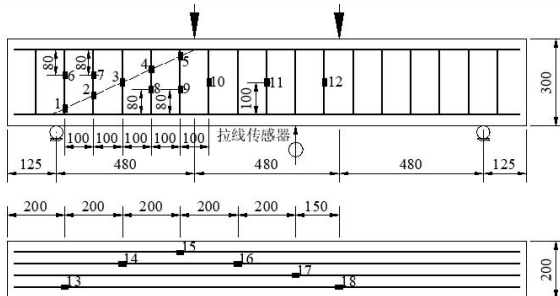
2.3 测点布置

为了量测 BFRP 筋、箍筋、混凝土的应变和跨中挠度变形,在梁的剪跨区段、纯弯段、跨中梁底部等位置布置了胶基应变片和拉线式位移传感器,应变测点的布置情况见图 2。图 2 中数字 1~18 代表筋材上的应变测点,字母 a~m 代表混凝土

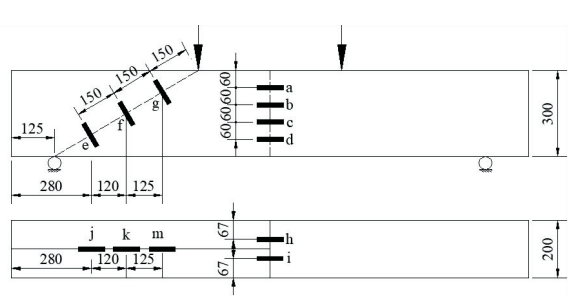
表 2 构件参数设计及斜截面承载力试验结果

Tab. 2 Parameters design and shear capacity test results

编号	b /mm	h /mm	$f_{cu,d}$ /MPa	$f_{cu,a}$ /MPa	ρ_f /%	λ_f /%	a/h_0	纤维	V_{cr} /kN	V_u /kN	V_c /kN	V_{pred} /kN	$\frac{V_{pred}}{V_c}$
BM1	200	300	CF50	44.1	0.9	0.8	1.9	5h	68	275	137.5	136.9	1.00
BM2	200	300	CF50	44.9	0.4	0.8	1.9	5h	75	199	99.5	138.3	1.39
BM3	200	300	CF50	41.2	1.3	0.8	1.9	5h	46	350	175.0	131.5	0.75
BM4	200	300	CF50	53.8	0.9	0.4	1.9	5h	43	302	151.0	153.8	1.02
BM5	200	300	CF50	53.8	0.9	1.2	1.9	5h	86	339	169.5	154.4	0.91
BM6	200	300	CF50	52.2	0.9	0.8	2.4	5h	85	193	96.5	131.3	1.36
BM7	200	300	CF50	40.9	0.9	0.8	1.4	5h	100	349	174.5	155.0	1.07
BM8	200	300	CF50	48.3	0.9	0.8	1.9	h	20	327	163.5	144.5	1.24
BM9	200	300	CF50	45.9	0.9	0.8	1.9	2h	36	252	126.0	140.2	1.11



(a) BFRP筋应变片布置



(b) 混凝土应变片布置

图 2 测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of measuring points

土表面的应变测点。在试验中,为了避免主斜裂缝方向(图 2(b)中的虚线)混凝土应变测量值失真,对编号为 f 的应变测点增设手持应变采集仪,进行该点应变的冗余采集,以获得较为可靠的混凝土应变结果。

2.4 加载装置

试验采用 JAW-10000F 多功能结构试验机对构件进行加载,加载方式为四点对称加载,加载装置见图 3。应变通过 DH3816N 静态应变采集仪采集。试验开始前通过预加载的方式检查仪器设备是否正常。采用分级加载的方式对构件进行荷载施加,先采用力控的方式加载,构件开裂前每级荷载大小为 10 kN,构件开裂后每级荷载大小为 30 kN,当加载达到预估破坏荷载的 80%时,改用位移控制的方式进行加载,直到构件破坏。每级荷载施加后等待 10 min,读取稳定的应力、应变及变形等数据。

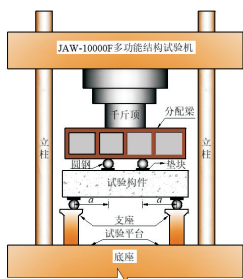


图 3 构件加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading device

3 试验结果

3.1 破坏类型

所有试验梁都发生了沿斜截面的剪切破坏,从加载开始到破坏的整个受力过程较为相似。在第一条裂缝出现前观察不到明显的现象。随着荷载的继续增大,先是在纯弯段出现了第一条裂缝。由于每根梁浇筑的混凝土实际强度、配筋数量、纤维掺量等不同,各梁第一条裂缝出现的位置、开裂时荷载大小都存在较大差异,开裂荷载约为极限荷载的 1/4。随着荷载的不断增大,梁纯弯段的裂缝数量增多,宽度增大,并不断向受压区延伸,与此同时,梁的剪跨段依次出现了斜向裂缝。荷载继续增大,弯曲裂缝的发展基本稳定,而斜裂缝逐渐向支座和加载点附近延伸,最后当荷载达到极限时,主要斜裂缝单向裂通或双向对称裂通,混凝土保护层崩落,梁发生脆性剪切破坏。

3.2 抗剪承载力

试验采用四点对称加载的方式对构件逐级施

加集中荷载,梁的剪力为所加荷载的 1/2,因此梁的抗剪承载力为破坏荷载的 1/2。试验测得各构件的开裂荷载、极限荷载、斜截面抗剪承载力见表 2。表 2 中 b 为截面宽度; h 为截面高度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; $f_{cu,d}$ 为混凝土设计强度; $f_{cu,a}$ 为构件伴随试块的实测立方体抗压强度; ρ_f 为 BFRP 筋配筋率; λ_f 为钢纤维体积掺量; a/h_0 为剪跨比; V_{cr} 为开裂荷载; V_u 为极限荷载; V_c 为构件斜截面抗剪承载力; V_{pred} 为由式(1)计算得到的斜截面抗剪承载力。

4 结果分析与讨论

4.1 BFRP 筋配筋率对抗剪承载力的影响

保持其他参数不变, BM2、BM1、BM3 三根梁中 BFRP 筋的配筋率分别为 0.4%、0.9%、1.3%,而其斜截面抗剪承载力从 99.5 kN 提高到 137.5、175.0 kN,分别提高了 38.2%、75.9%。图 4 为试验得到的 BFRP 筋配筋率对梁斜截面承载力的影响。由图 4 可知, BFRP 筋配筋率在一定范围内增加,梁的斜截面抗剪承载力会不断提高,配筋率与抗剪承载力呈明显的正相关关系。一方面配置 BFRP 筋越多的梁,筋的销栓效应越明显;另一方面配置 BFRP 筋越多的梁,筋材与基体混凝土接触面积就越大,两种材料的粘结力就越大, BFRP 筋就越能发挥出其卓越的高抗拉性能^[10]。

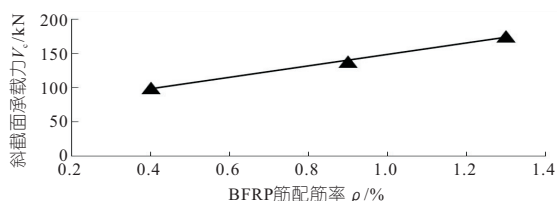


图 4 BFRP 筋配筋率对梁斜截面承载力的影响

Fig. 4 Effect of BFRP reinforcement ratio on the bearing capacity

4.2 纤维掺量对抗剪承载力的影响

在其他条件不变的情况下, BM4、BM1、BM5 三根梁中钢纤维体积掺量分别为 0.4%、0.8%、1.2%,而其斜截面抗剪承载力分别为 151.0、137.5、169.5 kN。由于浇筑中混凝土实际强度的差异, BM1 梁的混凝土强度仅为 44.1 MPa,从而导致 BM1 梁的斜截面抗剪承载力低于 BM4 梁。但 BM5 梁的斜截面抗剪承载力相比 BM4、BM1 梁的斜截面抗剪承载力而言,依然提高了 11.9%、22.9%,这说明 BFRP 筋钢纤维混凝土梁中钢纤维体积掺量的增加,也能提高其斜截面抗

剪能力。图 5 为钢纤维体积掺量对梁斜截面承载力的影响。由图 5 可知,随着 BFRP 筋钢纤维混凝土梁中钢纤维体积掺量的增加,梁的斜截面抗剪承载力呈现出不断提高的趋势,但这种增加趋势没有 BFRP 筋配筋率的增大对梁斜截面承载力提高的明显。

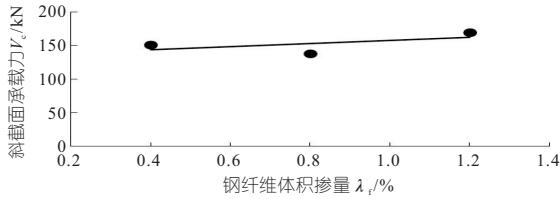


图 5 钢纤维体积掺量对梁斜截面承载力的影响

Fig. 5 Effect of steel fiber content on the bearing capacity

4.3 剪跨比对抗剪承载力的影响

控制其他变量不变,调整 BM7、BM1、BM6 三根梁加载时的剪跨比分别为 1.4、1.9、2.4,而其斜截面抗剪承载力从 174.5 kN 降低到 137.5、96.5 kN,分别降低了 21.2%、44.7%。图 6 为试验梁剪跨比对 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力的影响规律。由图 6 可知,剪跨比对构件斜截面抗剪承载力的影响十分明显,随着剪跨比的增大,BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力明显降低。原因在于随着剪跨比的增大,钢纤维混凝土梁的斜截面承载力大幅衰减。试验中的剪跨比与 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力呈反比关系。

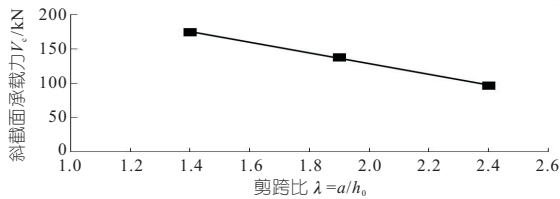


图 6 剪跨比对梁斜截面承载力的影响

Fig. 6 Effect of shear span to effective depth ratio on the bearing capacity

4.4 钢纤维设置范围对抗剪承载力的影响

BM8、BM9、BM1 梁为局部钢纤维混凝土构件,从距离支座内侧 50 mm 截面起向跨中截面方向的梁段分别设置长度范围为 h 、 $2h$ 、 $5h$ (全梁) 的钢纤维混凝土。图 7 为钢纤维设置范围对梁斜

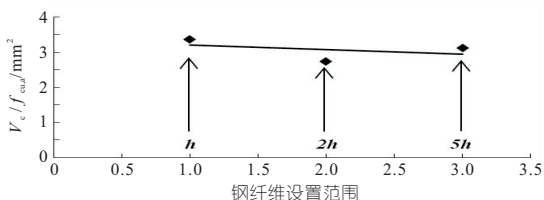


图 7 钢纤维设置范围对梁斜截面承载力的影响

Fig. 7 Effect of steel fiber range on the bearing capacity

截面抗剪承载力的影响。由图 7 可看出,BFRP 筋钢纤维混凝土梁的斜截面抗剪承载力并没有随钢纤维设置范围的扩大而提高。也就是说,只要在简支梁的剪跨范围内设置钢纤维混凝土就能起到改善梁斜截面抗剪性能的效果。值得一提的是,随着钢纤维设置范围的扩大,梁的开裂荷载有所提高。若试验中构件设置钢纤维的范围从 h 到 $2h$ 、 $5h$,梁的开裂荷载分别提高了 80%、240%,这归因于混凝土中乱向钢纤维所起的限裂、阻裂作用。在 BFRP 筋混凝土结构的实际工程实践中,为了达到改善梁斜截面抗剪性能的目的,可以通过在剪跨梁段局部设置钢纤维的办法来实现,这种局部钢纤维增强的方式比全钢纤维构件更为经济。

4.5 斜截面抗剪承载力计算模型

根据 BFRP 筋钢纤维混凝土梁的斜截面承载力试验结果,参考《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[11]和《钢纤维混凝土结构设计标准》(JGJ/T465-2019)^[12]中关于梁斜截面抗剪承载力的计算方法^[13],综合考虑剪跨比 λ 、钢纤维体积掺量 λ_f 、BFRP 筋配筋率 ρ_f 和混凝土强度 f_c 等因素的影响,拟合出 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力计算公式:

$$V_{\text{pred}} = 1.35 \frac{1 + \beta_v \lambda_f}{\lambda + 1} \sqrt{1 + \rho_f} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (1)$$

式中, V_{pred} 为斜截面抗剪承载力预测值,N; λ 为剪跨比,无量纲; λ_f 为钢纤维体积掺量,%; ρ_f 为 BFRP 筋配筋率,%; β_v 为钢纤维对斜截面上混凝土抗剪承载力的影响系数,本试验中取 $\beta_v = 0.6$; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值,MPa; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值,MPa; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积, mm^2 ; s 为箍筋的间距,mm; b 为截面的宽度,mm; h_0 为截面的有效高度,mm。

利用式(1)算出试验中梁的斜截面抗剪承载力列入表 2 中的“ V_{pred} ”列。不难看出,公式预测结果“ V_{pred} ”列与试验结果“ V_c ”列的数值较为接近,计算 V_{pred}/V_c ,并将结果列入表 2 中的“ V_{pred}/V_c ”列, V_{pred}/V_c 的均值 $\mu = 1.09$,方差 $\sigma = 0.21$,变异系数 $C_V = 0.21$,说明公式算出的斜截面抗剪承载力能与试验承载力吻合很好。因此,式(1)对 BFRP 筋钢纤维混凝土梁的斜截面的实际工程设计具有很好的参考价值。

5 结论

a. 所有试验梁的斜截面破坏形态均为剪切破坏, 破坏属于没有明显预兆的脆性破坏。BFRP 筋配筋率、钢纤维掺量、剪跨比是影响 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力的重要因素, BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力随着 BFRP 筋配筋率和钢纤维掺量的增大而提高, 随着剪跨比的增大而降低。

b. 剪跨梁段局部范围设置钢纤维混凝土能够改善 BFRP 筋混凝土梁的斜截面抗剪性能。

c. 得到了 BFRP 筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载力计算公式, 公式预测结果与试验结果具有较高的吻合度。

参考文献:

- [1] 张亚坤, 张敏, 侯黎黎, 等. FRP 筋混凝土梁斜截面承载力影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 156-160.
- [2] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [3] 熊琦龙, 周凯, 范佩, 等. 玄武岩纤维筋混凝土梁正截面抗弯承载力试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(1): 71-75.
- [4] 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(4): 129-139.

- [5] 李德春, 许冲, 崔振东, 等. 基于正交试验的纤维混凝土力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2022(6): 29-32, 39.
- [6] 常虹, 沈鹏, 谷复光. 钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(4): 67-69.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土: JG/T 472-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 刘华新, 柳根金, 王学志, 等. BFRP 筋再生混凝土无腹筋深梁抗剪承载力[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 17-22.
- [11] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [12] 郑州大学. 钢纤维混凝土结构设计标准: JGJ/T465-2019[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.
- [13] 徐旭炜, 高波, 李志业, 等. 钢纤维混凝土梁抗剪承载力计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2006-2013.

Experimental Study on Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with Local Steel Fiber and BFRP Bars

ZHANG Ya-kun, ZHANG Dong-feng, HOU Li-li

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to study the shear resistance of the inclined section of steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars, this paper takes the steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars as the research object, and carries out the shear capacity tests of 9 steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars. The effects of failure mode, shear span ratio, BFRP reinforcement ratio, steel fiber volume fraction, and steel fiber range on the shear resistance of steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars are analyzed. The results show that the failure mode of steel fiber reinforced concrete beams reinforced with BFRP is mainly shear failure; The shear capacity of the inclined section decreases with the increase of shear span ratio, and increases with the increase of fiber content and BFRP reinforcement ratio; Setting steel fiber within the shear span of the support can better improve the shear resistance of the inclined section of the concrete beam with BFRP reinforcement. Finally, the formula for calculating the shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars is obtained by fitting test data, and the calculated results of the formula are consistent with the experimental results. The research enriches the design theory of inclined section of FRP reinforced concrete composite structure, and has reference value for the application of FRP reinforced steel fiber concrete composite structure in practical projects.

Key words: BFRP bars; steel fiber concrete; beam; shear span to effective depth ratio; reinforcement ratio; fiber volume content; shear capacity