

GFRP 箍筋钢纤维混凝土梁的受剪试验研究 及其斜裂缝宽度计算

李文龙^{1,2}, 黄伟², 赵善超³, 张丽²

(1. 阜阳师范大学信息工程学院, 安徽 阜阳 236041; 2. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032;
3. 宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司总师室, 浙江 宁波 315000)

摘要: 为改善普通混凝土的抗裂性能, 解决纤维增强聚合物 (FRP) 配筋混凝土梁变形大、斜裂缝过宽等问题, 采用钢纤维混凝土制备玻璃纤维增强树脂基箍筋混凝土 (GFRP-R-SFRC) 梁试件, 对 GFRP-R-SFRC 梁试件进行受剪试验, 研究钢纤维掺量和剪跨比对试件斜裂缝分布和宽度的影响; 考虑 GFRP 箍筋特性和钢纤维掺量的影响, 修正 GFRP 箍筋应力计算方法, 提出试件受剪的最大斜裂缝宽度计算公式。结果表明: 掺入钢纤维可显著抑制 GFRP-R-SFRC 梁斜裂缝的萌生及发展, 但较大的剪跨比不利于钢纤维抑裂效用的发挥; 在一定的纤维掺量范围内, 相同剪力条件下, GFRP-R-SFRC 梁的斜裂缝宽度随纤维掺量的增加而减小; 与未掺纤维的试件相比, 掺量为 1.5%(体积分数) 的钢纤维梁试件的最大斜裂缝宽度减少了 24.3%。提出的最大斜裂缝宽度公式计算结果与试验结果吻合较好, 本文研究可为 GFRP-R-SFRC 梁在实际工程中的推广应用提供重要参考依据。

关键词: 混凝土梁; GFRP 箍筋; 钢纤维; 剪跨比; 斜裂缝; 裂缝宽度; 抗裂性能

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24106



Experimental Study on Shear Behavior and Calculation of Diagonal Crack Width in Steel Fiber Reinforced Concrete Beams with GFRP Stirrups

LI Wenlong^{1,2}, HUANG Wei², ZHAO Shanchao³, ZHANG Li²

(1. School of Information Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236041, China; 2. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 3. Chief Engineer's Office, Ningbo Communication Construction Engineering Testing Center Co., Ltd, Ningbo 315000, China)

Abstract: To improve the crack resistance of ordinary concrete and address issues such as excessive deformation and wide diagonal cracks in fiber-reinforced polymer (FRP) reinforced concrete beams, steel fiber-reinforced concrete was used to prepare glass fiber-reinforced polymer bar-reinforced steel fiber-reinforced concrete (GFRP-R-SFRC) beam specimens. Shear tests were conducted on the GFRP-R-SFRC beam specimens to investigate the influence of steel fiber content and shear span ratio on the distribution and width of diagonal cracks. On this basis, considering the characteristics of GFRP stirrups and the influence of steel fiber content, the calculation method for GFRP stirrup stress was modified, and a formula for predicting the maximum width of diagonal cracks in the specimens under

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目 (2022AH052823); 安徽省高校优秀青年人才计划一般项目 (YQYB2023111)

作者简介: 李文龙 (1992—), 男, 安徽亳州人, 讲师, 主要研究方向为纤维混凝土材料与结构。

通信作者: 黄伟 (1963—), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 主要研究方向为土木工程材料与结构。

引文格式: 李文龙, 黄伟, 赵善超, 等. GFRP 箍筋钢纤维混凝土梁的受剪试验研究及其斜裂缝宽度计算 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2025, 42(2):189-197.

shear was proposed. The results show that incorporating steel fibers can significantly inhibit the initiation and propagation of diagonal cracks in GFRP-R-SFRC beams, although a larger shear span ratio is not conducive to the effectiveness of steel fibers in crack suppression. Within a certain range of fiber content, under identical shear conditions, the width of diagonal crack in GFRP-R-SFRC beams decreases with increasing fiber content. Compared to specimens without fiber, the maximum diagonal crack width of beams with 1.5% (volume fraction) steel fiber content is reduced by 24.3%. The calculated results from the proposed maximum diagonal crack width formula agree well with the experimental results. This study provides an important reference for the practical application and promotion of GFRP-R-SFRC beams in engineering.

Keywords: concrete beam; GFRP stirrup; steel fiber; shear span ratio; diagonal crack; crack width; crack resistance

钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 结构在长期暴露于恶劣腐蚀环境时, 往往出现显著的性能退化和服役寿命缩短问题^[1-3]。针对钢筋锈蚀引起的 RC 结构耐久性不足, 近年来, 采用纤维增强聚合物 (fiber reinforced polymer, FRP) 筋部分或完全替代传统钢筋已成为 1 种极具前景的解决方案。FRP 筋具有轻质、高强、耐腐蚀及电绝缘等优异性能, 相较于其他防腐措施 (如钢筋镀锌、环氧树脂涂层钢筋及增加混凝土保护层厚度等), 其在提升 RC 结构耐久性和延长使用寿命方面表现出显著优势^[4-5]。然而, 由于 FRP 筋存在弹性模量低 (仅为钢筋的 20%~30%)、与混凝土黏结性能差、横截面抗剪能力较低等缺陷, 致使纯 FRP 配筋混凝土梁表现出比普通 RC 梁更差的延性和更宽的宏观裂缝^[6-8], 限制其工程应用。为满足正常使用状态下构件裂缝宽度的控制要求, 提升 FRP 配筋混凝土结构的抗裂性和抗变形能力已成为学界及工程界关注的热点。

RC 结构腐蚀现象表明, 结构的角区在风压和双向碳化作用下更易发生腐蚀, 角区钢箍筋最先发生锈胀破坏进而导致结构的承载能力和耐久性下降^[9-10]。因此, 部分学者提出将 FRP 箍筋取代钢箍筋, 底部钢筋仍沿用普通钢筋的配筋方式^[11], 这种方式能在有效提高结构耐久性的同时又能保证结构具有足够的延性。而梁志强^[12]研究发现, 玻璃纤维增强聚合物 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 箍筋的低弹性模量同样使承载状态下的 GFRP 配筋梁表现出更大的裂缝宽度; 贺红卫^[13]在 GFRP 箍筋混凝土梁受剪试验研究中也得出类似结论。为控制构件裂缝宽度, 部分学者采用弹性模量较高且具有优异抗裂性能的钢纤维对混凝土进行改性。张海坤等^[14]、宋守坛等^[15]基于碳纤维 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 筋钢纤维混凝土梁的受剪试验研究发现, 钢纤维的加入能有效弥补 CFRP 筋混凝土梁的脆性及裂缝宽度过大的缺陷; Hosseini 等^[16]通过试验也证实了掺入钢纤维可有效抑制 FRP 配筋梁

的受剪斜裂缝。

综上, 在 FRP 箍筋-钢筋配筋方式的基础上, 掺加钢纤维可有效提升 FRP 配筋混凝土梁的延性和承载能力。目前, 针对钢纤维-FRP 配筋混凝土梁的研究主要集中于 FRP 筋的黏结锚固、正截面受弯和斜截面受剪等方面, 对于钢纤维-FRP 配筋混凝土梁剪切斜裂缝的发展特点及最大斜裂缝宽度的计算仍缺乏研究。因此, 在本课题组^[11]关于 GFRP 箍筋-钢纵筋混凝土梁 (GFRP-R-RC 梁) 受剪承载力研究的基础上, 开展掺加钢纤维的 GFRP-R-RC 梁 (GFRP-R-SFRC 梁) 的受剪试验, 分析钢纤维掺量和剪跨比对 GFRP-R-SFRC 梁受剪斜裂缝发展的影响, 并基于普通混凝土梁斜裂缝宽度的计算理论, 提出适用于 FRP-R-SFRC 梁的最大斜裂缝宽度计算公式, 以期 FRP-R-SFRC 梁的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 梁试件的设计

参考文献 [6, 15, 17], 为防止混凝土的离析和纤维球化现象, 需对钢纤维掺量进行严格控制, 钢纤维体积分数应小于 2.0%。因此文中将钢纤维体积分数控制在 2.0% 以内, 选取钢纤维体积分数为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5% 制备钢纤维混凝土 (steel fiber reinforced concrete, SFRC)。设置剪跨比为 1.5, 2.0, 3.0, 设计制作 8 根尺寸为 150 mm×300 mm×2 400 mm 的试验梁。其中 5 根为掺加 SFRC 的 GFRP-R-SFRC 梁, 3 根为未掺加 SFRC 的 GFRP 箍筋对比梁。梁试件的架立筋和底部纵向受力筋的级别均为 HRB400, 采用 GFRP 箍筋。试件的其他配筋及设计参数见图 1 和表 1。表 1 中试件编号※-※-※的含义为: 第 1 位表示箍筋类型, 第 2 位表示剪跨比, 第 3 位表示钢纤维体积分数。表中: G 表示 GFRP 箍筋; λ 为剪跨比; φ 为钢纤维的体积分数; ρ 为纵筋配筋率; s 为箍筋间距。

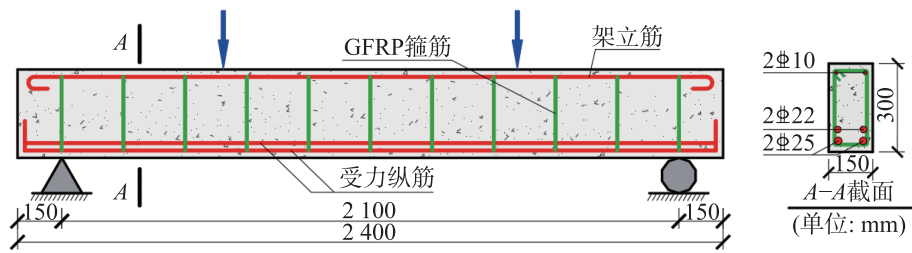


图1 试件截面配筋细节

Fig. 1 Reinforcement details of specimen cross-section

表 1 试件的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the specimen

试件编号	λ	$\varphi/\%$	$\rho/\%$	s/mm
G-2.0-0.5	2.0	0.5	4.47	130
G-2.0-1.0	2.0	1.0	4.47	130
G-2.0-1.5	2.0	1.5	4.47	130
G-1.5-1.0	1.5	1.0	4.47	130
G-3.0-1.0	3.0	1.0	4.47	130
G-2.0-0	2.0	0	4.47	130
G-1.5-0	1.5	0	4.47	130
G-3.0-0	3.0	0	4.47	130

1.2 梁试件的材料特性

1.2.1 钢纤维混凝土 (SFRC)

制备 SFRC 所用的原材料: 胶凝材料为海螺 P.O42.5 普通硅酸盐水泥; 细骨料为级配良好的中粗河砂, 细度模数 2.66; 粗骨料为连续级配的无针片状碎石, 粒径 5~25 mm; 钢纤维为端钩冷拉切断型, 长度、公称直径和长径比分别为 35 mm, 0.75 mm 和 46.7, 弹性模量为 200 GPa。原材料具体配合比见表 2。SFRC 的制备流程: 首先, 将级配碎石和钢纤维投入搅拌机干拌 2 min, 确保钢纤维均匀分散; 其次, 加入河砂和水泥继续搅拌 3 min, 使原料混合均匀; 最后, 分批次加入自来水进行湿拌, 直至 SFRC 的湿度和流动性满足要求。对于制备的 SFRC 预留标准立方体试块, 与梁试件同条件养护 28 d 后进行受压试验, 结果如表 2。表 2 表明制备 SFRC 的抗压强度 (f_{cu}) 等级为 C40。

表 2 原材料配合比及制备 SFRC 的实测抗压强度

Tab. 2 Mix proportion of raw materials and measured compressive strength of fabricated SFRC

$\varphi_f/\%$	组分质量浓度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)					f_{cu}/MPa
	钢纤维	水	水泥	细骨料	粗骨料	
0	0	183	456	745	1 096	40.67
0.5	39.3	183	456	745	1 096	43.64
1.0	78.6	183	456	745	1 096	45.21
1.5	117.9	183	456	745	1 096	47.75

1.2.2 玻璃纤维增强聚合物 (GFRP) 箍筋

根据《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)^[18], 采用筋材两端加钢套筒灌胶锚固方式制作 GFRP 箍筋拉伸试样, 采用 MTS 试验机进行拉伸测试, 得到试样的极限抗拉强度和弹性模量分别为 913 MPa 和 62 GPa。表明 GFRP 箍筋是 1 种高抗拉强度、低弹性模量的脆性材料。

1.3 梁试件的制作

根据 GFRP-R-SFRC 梁试件的形状和尺寸制作模板, 按照上述设计参数绑扎钢筋笼、支模和浇注混凝土。绑扎过程中 GFRP 箍筋与架立筋、底部纵筋需垂直且位置准确; 为便于脱模和保护受力钢筋, 支模时对模板内壁涂油且调整混凝土保护层厚度; 为使浇注面磨平、不留气泡, 浇注过程中采用插入式振动器将混凝土振捣密实。对浇注好的梁试件进行恒温保湿养护 28 d, 为达到良好的保温效果且防止水分蒸发, 在试件表面覆盖一层不透气的塑料薄膜。GFRP-R-SFRC 梁试件的制作细节如图 2。



(a) 钢筋笼绑扎



(b) 支模



(c) 混凝土浇注

图2 GFRP-R-SFRC 梁试件的制作细节

Fig. 2 Fabrication details of GFRP-R-SFRC beam specimens

1.4 试件加载试验

试件的加载和测点分布如图3。

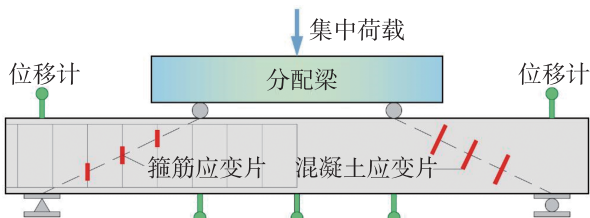


图3 试件加载及测点分布细节

Fig. 3 Details of specimen loading and measuring point distribution

采用荷载控制模式,通过加载分配梁对试件进行两点对称集中加载。预加载后采用分级加载模式进行正式加载,试件斜裂缝出现前后的荷载级差分别为 10, 15 kN, 临近破坏时的荷载级差视情况减少 3~6 kN。为保证数据采集的有效性,每级荷载下持荷 5 min 且保证连续 3 组数据相同时再进行下一级加载。测量参数为剪力、箍筋应变、混凝土应变、挠度和裂缝宽度,箍筋和混凝土应变片的布置位置如图3。由千斤顶上部的传感器测量剪力,由安装在支座、加载点及跨中位置的位移计测量挠度,采

用裂缝测宽仪借助放大镜实时测量梁试件在纯弯段和剪跨区的裂缝。

2 结果与分析

2.1 裂缝分布及发展规律

试验过程中,在集中荷载作用下,所有试件均发生沿斜截面的剪切破坏。从加载开始到最终破坏的整个过程,各试件的裂缝开展规律较为相似,大致可分为4个阶段:

1) 试件承受荷载后,在跨中纯弯段底部首先出现竖向裂缝并沿梁高迅速向受压区发展,裂缝数量也不断增多。

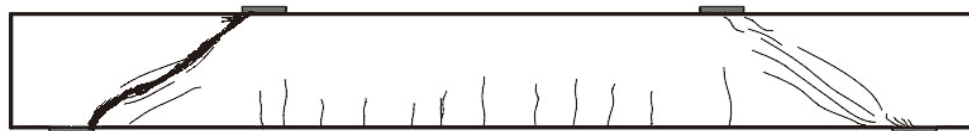
2) 随着荷载的增加,纯弯段裂缝发展变缓甚至停滞,剪跨段出现弯剪斜裂缝并向斜上方(加载点方向)延伸;荷载继续增大,剪跨区中部出现数条腹剪斜裂缝。

3) 荷载较高时,剪跨段出现1条延伸较长、裂缝相对较宽的临界斜裂缝并不断向加载点和支座方向扩展;混凝土受压区高度不断减小,裂缝形状和数量不再发生变化。

4) 在弯剪复合应力状态下,剪压区混凝土达到极限强度而破坏。

典型试件受剪破坏时的裂缝分布如图4。

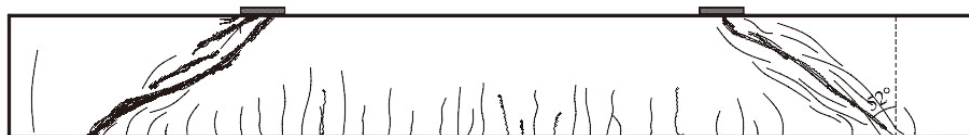
由图4(a)~(c)可看出:与未掺加钢纤维的梁试件相比,掺加钢纤维的GFRP-R-SFRC梁在纯弯段竖向裂缝多而密,且随纤维掺量的增加,裂缝数量逐渐增多、裂缝间距变小,说明钢纤维在试件底部受拉区起到了较好地抗裂效果;剪压区斜裂缝的发展和延伸得到有效抑制,钢纤维掺量越大,斜裂缝分布越密,抑制效果越明显,说明乱向随机分布的钢纤维在混凝土基体中起到良好的“桥接应力”作用^[9]。



(a) G-2.0-0



(b) G-2.0-0.5



(c) G-2.0-1.0

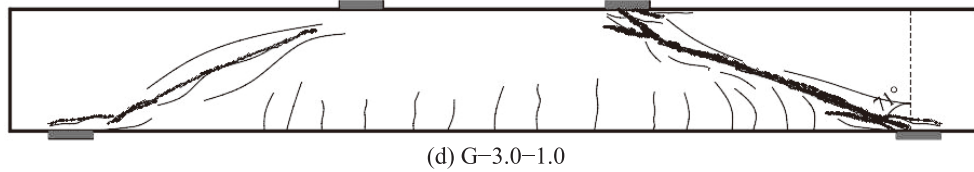


图 4 典型试件的裂缝分布规律

Fig. 4 Crack distribution pattern of typical specimen

对比图 4(c), (d) 可看出: 剪跨比较大时, 斜裂缝在较低荷载水平下出现, 且迅速向受压区延伸并形成临界斜裂缝, 斜截面承载力随之丧失, 说明剪跨比增大对抑制裂缝的开展和延伸起到负面作用; 此外, 相比于试件 G-2.0-1.0, 试件 G-3.0-1.0 在剪跨段的斜裂缝数较少, 主斜裂缝与试件垂直方向的倾角 (71°) 也较大。

2.2 斜裂缝宽度的影响因素

2.2.1 钢纤维掺量

不同剪力 (V) 下, 钢纤维掺量对试件最大斜裂缝宽度 (w_{\max}) 的影响见图 5。斜截面开裂剪力为图中不同裂缝宽度曲线与横坐标轴相交处对应的剪力。

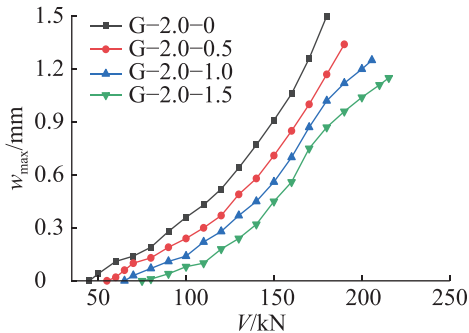


图 5 不同钢纤维掺量下试件所受剪力与最大裂缝宽度的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between shear force and maximum crack width of specimens with different steel fiber contents

从图 5 可看出: 钢纤维体积分数在 $[0, 1.5\%]$ 范围, 随钢纤维掺量的增大, 试件的斜截面开裂剪力增大, 说明钢纤维有效抑制了混凝土内部微裂缝的开展, 延缓了宏观裂缝的形成, 起到了良好的抗裂增韧效果; 斜裂缝出现后, 相同剪力等级下, 钢纤维掺量越大, 试件的裂缝宽度越小, 主要是因为试件受力的整个过程中, 钢纤维掺量增大时跨越斜裂缝的钢纤维数增加, 增强了其对斜裂缝发展的抑制作用^[20]; 与未掺加钢纤维的试件 (G-2.0-0) 相比, 钢纤维体积分数为 0.5%, 1.0% 和 1.5% 的试件 (G-2.0-0.5, G-2.0-1.0, G-2.0-1.5) 在受剪破坏时的最大裂缝宽度分别减小了 11.8%, 17.8% 和 24.3%。

2.2.2 剪跨比

图 6 为钢纤维体积分数分别为 0 和 1.0%, 不同剪跨比 (1.5, 2.0, 3.0) 下试件的剪力-最大裂缝宽度曲线。

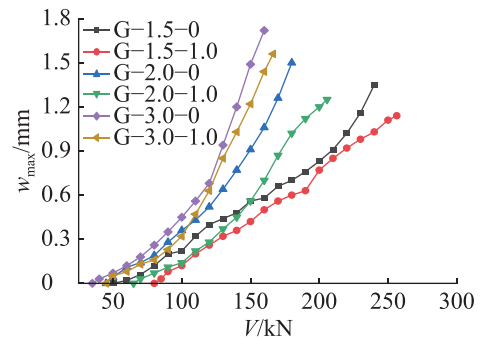


图 6 不同剪跨比下试件所受剪力与最大裂缝宽度的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between shear force and maximum crack width of specimens with different shear span ratios

由图 6 可知: 相同剪跨比下, 试件的斜截面开裂荷载及裂缝宽度的发展速度均小于未掺加钢纤维的试件, 这是因为混凝土中乱向分布的钢纤维有效控制了斜裂缝的开展; 试件破坏时, 掺入体积分数为 1.0% 钢纤维试件 (G-1.5-1.0, G-2.0-1.0, G-3.0-1.0) 对相同剪跨比下未掺钢纤维试件 (G-1.5-0, G-2.0-0, G-3.0-0) 的最大裂缝宽度抑制率分别为 16.7%, 15.6%, 9.3%, 剪跨比越大, 钢纤维对斜裂缝宽度的抑制作用越小; 同一荷载等级下, 相同掺量纤维梁试件的斜裂缝发展速度和最大裂缝宽度随剪跨比的增大而明显变大, G-1.5-0, G-2.0-0, G-3.0-0 试件在受剪破坏时的最大裂缝宽度分别为 1.35, 1.52, 1.72 mm。主要原因是剪跨比的变化影响了梁的破坏形态, 剪跨比增大时, 梁的斜截面破坏形态从由混凝土抗压强度控制的斜压型逐渐转为由混凝土抗拉强度控制的斜拉型。Li 等^[21]研究也表明, 随着剪跨比的增加, 梁的主斜裂缝宽度迅速增大, 梁的应力承载机制由剪压逐渐向斜拉转变。由图 6 还可知: 在纤维体积分数为 0 的情况下, 剪跨比由 1.5 (G-1.5-0) 增至 3.0 (G-3.0-0) 时, 试件的最大斜裂缝宽度增大了 27.5%; 由于钢纤维对混凝土裂缝的抑制作用, 在纤维体积分数为 1.0% 的情况下, G-3.0-1.0 试件的最大裂缝宽度比 G-1.5-1.0 试件仅增大了 16.5%。

3 FRP-R-SFRC 梁最大斜裂缝宽度的计算

文献 [22–24] 中的研究表明, 钢筋混凝土梁斜裂缝是由于外荷载作用下, 剪跨段箍筋与混凝土之间产生相对滑移所致。影响斜裂缝形成和发展的因素很多, 如加载方式、混凝土强度和剪跨比等, 且因素之间相互影响, 致使梁的截面应力情况尤为复杂。由上文可知, 与钢筋混凝土梁不同, 钢纤维在 GFRP-R-SFRC 梁中的“桥架”作用使内部应力能够在斜裂缝间传递, 对斜裂缝的发展起到良好的约束效果。因此, 对于 GFRP-R-SFRC 梁, 现有的关于钢筋混凝土梁的斜裂缝宽度计算理论体系不再适用。

3.1 现有斜裂缝宽度计算公式的评估

《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ/T 465—2019^[25] 中没有明确给出钢纤维混凝土受弯构件的斜裂缝宽度计算公式, 关于斜裂缝宽度的计算多是基于试验数据分析的半理论半经验公式^[12,26]。Li 等^[11] 和贺红卫^[13] 分析了剪跨比和配箍率对 FRP 箍筋混凝土梁斜裂缝宽度的影响规律, 但并未提出相应的最大斜裂缝宽度计算公式。仅极少数学者如赵顺波等^[27] 针对腹筋钢纤维混凝土梁, 综合考虑钢纤维掺量对斜裂缝发展的影响, 建立斜裂缝宽度计算的理论模型, 并提出最大斜裂缝宽度的计算公式。具体如下:

$$w_{\max} = 1.15(1 - 0.37\lambda_f) \frac{\sigma_{sv}}{E_{sv}} h_0 \sqrt{0.83 - 0.636\lambda h_0/l} \quad (1)$$

$$\sigma_{sv} = \frac{V - 0.9V_{cr}}{A_{sv}} \times \frac{s}{0.6\lambda h_0} \quad (2)$$

$$V_{cr} = \left(\frac{2.45}{\lambda + 3.5} + \frac{20\rho_l}{\lambda + 1.1} \right) f_t b h_0 \quad (3)$$

式中: w_{\max} 为最大斜裂缝宽度; σ_{sv} 为箍筋应力; E_{sv} , A_{sv} 分别为箍筋的弹性模量和截面积; h_0 , b 分别为梁的有效高度和截面宽度; l 为梁的长度; V , V_{cr} 分别为梁的剪力和开裂剪力; λ_f , f_t 分别为钢纤维特征值和钢纤维混凝土的轴心抗拉强度, 根据 JGJ/T 465—2019^[25], $\lambda_f = \varphi l_f/d_f$, $f_t = f_i(1 + \alpha_i \lambda_f)$; f_i 为基体混凝土的轴心抗拉强度; l_f , d_f 分别为钢纤维长度、直径; α_i 为钢纤维形状参数, 对于端钩型钢纤维取值为 0.76。

GFRP-R-SFRC 梁与文献 [27] 中试验梁的主要区别在于箍筋类型不同, 分别为 GFRP 箍筋、钢箍筋。因此, 结合本文试验结果, 对文献 [27] 中最大斜裂缝宽度计算公式的适用性进行评估。表 3 为本文试件受剪破坏时最大斜裂缝宽度的实测值 w_{\max}^e 与文献 [27] 中计算公式的预测值 w_{\max}^c 。从表 3 可看出: 最大斜裂缝宽度的计算值多高于实测值, 预测偏于保守; w_{\max}^e/w_{\max}^c 的均值为 1.35, 计算与实测结果偏差

过大。以 G-1.5-0 试件为例, 最大裂缝宽度的计算与实测结果的比值为 1.99, 表明该计算公式需改进。

表 3 最大裂缝宽度实测与计算结果的比较

Tab. 3 Comparison between measured and calculated results of maximum crack width

编号	V_u/kN	w_{\max}^e/mm	w_{\max}^c/mm	w_{\max}^e/w_{\max}^c
G-2.0-0.5	195.6	1.34	1.91	1.43
G-2.0-1.0	212.7	1.25	1.84	1.47
G-2.0-1.5	226.3	1.15	1.63	1.42
G-1.5-1.0	257.4	1.14	2.08	1.82
G-3.0-1.0	173.5	1.56	0.94	0.60
G-2.0-0	180.2	1.52	2.02	1.33
G-1.5-0	245.4	1.35	2.69	1.99
G-3.0-0	159.0	1.72	1.25	0.73
均值	—	—	—	1.35

注: V_u 为试件的抗剪承载力。

3.2 最大斜裂缝宽度计算公式的提出

GFRP 筋是 1 种弹性模量较低且没有屈服平台的线弹性材料, GFRP 箍筋的表面较为光滑, 其与混凝土间的黏结性能比钢箍筋差, 导致 GFRP-R-SFRC 梁的箍筋应力减小。本课题组^[11] 研究表明, 由于 GFRP 箍筋较低的轴向刚度且对混凝土的有效约束不足, 使得 GFRP 箍筋混凝土梁的最大斜裂缝宽度比普通钢筋混凝土梁更大。因此, 采用文献 [27] 中的箍筋应力公式计算 GFRP 箍筋的应力不合适。图 7 为不同荷载作用下 GFRP 箍筋实测应力 σ'_{sv} 与采用式 (2) 计算箍筋应力 σ_{sv} 的关系曲线。其中 σ'_{sv} 为本文试验梁在 120, 160 kN 和极限承载力状态下实测的箍筋应力, 为消除箍筋应力不均匀现象的影响, σ'_{sv} 取剪跨段内不同位置处箍筋应力的平均值。通过 Origin 软件对实测应力的数据点进行最小二乘法回归分析, 得到如图 7 所示的拟合曲线。

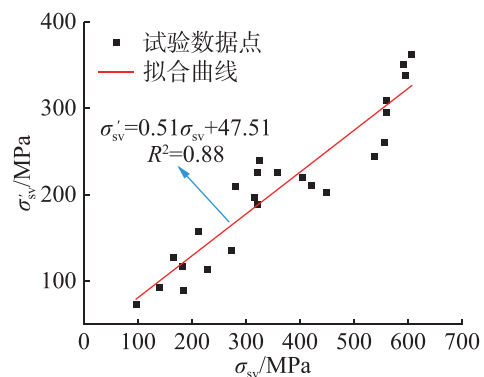


图 7 实测与计算箍筋应力的拟合关系曲线

Fig. 7 Fitted relationship curve between measured and calculated stirrup stress

由图 7 可看出: σ'_{sv} 与 σ_{sv} 呈现较好的线性关系 ($R^2=0.88$)。 σ'_{sv} 的修正公式为

$$\sigma'_{sv} = 0.51\sigma_{sv} + 47.51 \quad (4)$$

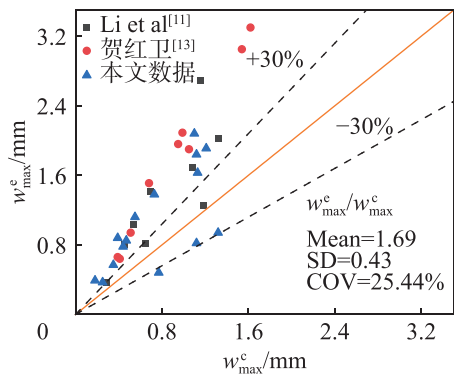
在文献 [27] 的基础上, 基于式 (2) 提出适用于 FRP-R-SFRC 梁的最大斜裂缝宽度计算公式:

$$w_{\max} = 1.15(1 - 0.37\lambda_f) \frac{\sigma'_{sv}}{E_{sv}} h_0 \sqrt{0.83 - 0.636\lambda h_0/l} \quad (5)$$

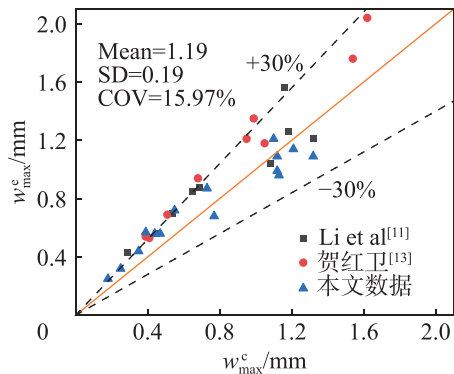
其中 σ'_{sv} 可联立式 (2)~(4) 求得。

3.3 最大斜裂缝宽度公式适用性的验证

为验证本文所提公式的适用性, 采用式 (1), (5) 分别对文献 [11, 13] 及本文 GFRP-R-SFRC 梁的最大斜裂缝宽度进行计算, 并将计算结果与实测结果进行比较。不同公式对最大斜裂缝宽度的计算结果如图 8。



(a) 式(1)的计算结果



(b) 式(5)的计算结果

图8 不同公式对最大斜裂缝宽度的计算结果

Fig. 8 Calculation results of maximum diagonal crack width with different formulas

由图 8(a) 可看出: 采用式 (1) 计算的结果与实测结果比值 (w_{\max}^c/w_{\max}^c) 的平均值 (Mean) 为 1.69, 标准差 (SD) 为 0.43, 变异系数 (COV) 为 25.44%; 大部分数据点位于基准线以上且多数落在+30%的偏离线以外。表明预测结果高于实测结果, 预测较为保守且偏差较大。由图 8(b) 可看出: 式 (5) 计算结果的大部分数据点落在 $\pm 30\%$ 的偏离线以内, 与式 (1)

相比, 式 (5) 计算结果与实测结果比值的平均值和标准差分别降至 1.19 和 0.19, 变异系数也较小 (15.97%)。表明式 (5) 计算结果与实测结果的偏差较小, 离散性减少, 预测精度明显提高。

综上分析可看出, 采用本文提出的计算公式能够较好地预测 FRP-R-SFRC 梁试件在荷载下的最大斜裂缝宽度, 公式具有良好的适用性。

4 结论

采用钢纤维混凝土制备玻璃纤维增强树脂基箍筋混凝土 (GFRP-R-SFRC) 梁试件, 并对其进行三点加载作用下的受剪试验, 分析钢纤维掺量和剪跨比对试件斜裂缝宽度的影响; 基于试验数据, 提出考虑 FRP 箍筋和钢纤维影响的受剪最大斜裂缝宽度计算公式, 得到如下主要结论:

1) 钢纤维的“桥接”效应对斜裂缝的发展起到良好的约束作用, 使 GFRP-R-SFRC 梁在剪跨区域的斜裂缝分布更密、裂缝数更多。

2) 相同剪力条件下, 钢纤维掺量越大, GFRP-R-SFRC 梁受剪斜裂缝宽度越小。与未掺纤维的 G-2.0-0 试件相比, 纤维体积分数为 1.5% 的 G-2.0-1.5 试件在临近受剪破坏时的斜裂缝宽度减小了 24.3%。

3) 剪跨比对 GFRP-R-SFRC 梁斜裂缝宽度的影响也较为显著。相同条件下, 随剪跨比的增加, 试件斜裂缝的发展和延伸加快, 裂缝宽度明显增加。钢纤维体积分数为 1.0%、剪跨比由 1.5 增至 3.0 时, 试件在极限受剪状态下的最大斜裂缝宽度由 1.15 mm 增至 1.56 mm。

4) 考虑 GFRP 箍筋特性和钢纤维掺量的影响, 提出 GFRP-R-SFRC 梁受剪最大斜裂缝宽度的计算公式, 计算结果与实测结果的偏差较小、离散度较低, 该公式具有良好的适用性。

参考文献:

- [1] QIN J G, ZHANG W W, HUANG T, et al. Effect of steel reinforcement corrosion on progressive collapse resistance of beam-slab structures with interior column failure[J]. *Engineering Structures*, 2024, 312:118257.
- [2] 许见超, 吴洁琼, 刁波, 等. 配筋率和氯腐蚀环境对钢筋混凝土梁疲劳损伤累积的影响 [J]. *铁道建筑*, 2021, 61(2):16-19.
- XU J C, WU J Q, DIAO B, et al. Impact of reinforcement ratio and chloride-corrosion environment on fatigue damage

- accumulation of reinforced concrete beams[J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(2):16–19.
- [3] HUANG L, JIN X Y, FU C, et al. Stochastic characteristics of reinforcement corrosion in concrete beams under sustained loads[J]. *Computers and Concrete*, 1998, 25:447–460.
- [4] TRAN T T, PHAM T M, HAO H. Effect of hybrid fibers on shear behavior of geopolymer concrete beams reinforced by basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars without stirrups[J]. *Composite Structures*, 2020, 243:112236.
- [5] FALLAH-VALUKOLAEI S, HASHEMI S K, NEMATZADEH M. Effect of steel fiber on flexural performance of bilayer concrete beams with steel and GFRP rebars: experiments and predictions[J]. *Structures*, 2022, 39:405–418.
- [6] 张文福, 周宇. 基于“板-梁理论”单轴对称FGM工字形梁组合扭转[J]. *安徽科技学院学报*, 2025, 39(1): 91–101.
ZHANG W F, ZHOU Y. Uniaxial symmetric FGM I-beam combination torsion based on the “plate and beam theory” [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2025, 39(1):91–101.
- [7] AL-HAMRANI A, ALNAHHAL W. Shear behavior of basalt FRC beams reinforced with basalt FRP bars and glass FRP stirrups: experimental and analytical investigations[J]. *Engineering Structures*, 2021, 242:112612.
- [8] LI Z Z, ZHU H T, DU C X, et al. Experimental study on cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading[J]. *Composite Structures*, 2021, 267:113878.
- [9] 唐仕盈, 刘杰, 陈浩东, 等. 纤维增强复合材料加固锈蚀箍筋混凝土梁的抗剪承载力计算模型分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022, 42(5):861–866.
TANG S Y, LIU J, CHEN H D, et al. Analysis on calculation model for shear capacity of rust-stirrup reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2022, 42(5):861–866.
- [10] EL-SAYED A K. Shear capacity assessment of reinforced concrete beams with corroded stirrups[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134:176–184.
- [11] LI W L, HUANG W, FANG Y, et al. Experimental and theoretical analysis on shear behavior of RC beams reinforced with GFRP stirrups[J]. *Structures*, 2022, 46:1753–1763.
- [12] 梁志强. 混杂配筋混凝土梁抗剪性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LIANG Z Q. Research on Shear Performance of Hybrid Reinforced Concrete Beams[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [13] 贺红卫. FRP箍筋混凝土梁受剪承载力试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
HE H W. Experimental Study on Shear Capacity of FRP Stirrups Reinforced Concrete Beams[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [14] 张海坤, 高志杰, 孔炯, 等. 型钢-钢纤维高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(2):205–212.
ZHANG H K, GAO Z J, KONG J, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced high-strength concrete column with steel fiber[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2023, 40(2):205–212.
- [15] 宋守坛, 曹天, 端宁, 等. CFRP筋增强钢纤维混凝土梁受剪承载力试验与分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(5):1012–1019.
SONG S T, CAO T, DUAN N, et al. Experiment and analysis on shear capacity of CFRP reinforced steel fiber concrete beams[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(5):1012–1019.
- [16] HOSSEINI S A, NEMATZADEH M, CHASTRE C. Prediction of shear behavior of steel fiber-reinforced rubberized concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars[J]. *Composite Structures*, 2021, 256:113010.
- [17] 黄伟, 卞祝, 陈涛. 钢纤维高强钢筋混凝土梁剪切韧性试验研究[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(3):313–317.
HUANG W, BIAN Z, CHEN T. Experimental study on shear toughness of steel fiber high-strength reinforced concrete beams[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2013, 30(3):313–317.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法: GB/T 30022—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Test Methods for Basic Mechanical Properties of Fiber Reinforced Composite Bars: GB/T 30022—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [19] XU C, WU K, CAO P Z, et al. Failure mechanism and

- bearing capacity analysis of steel fiber steel reinforced concrete(SFSRC) beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416:135063.
- [20] 陆春华, 吴小龙, 徐可, 等. 普通/钢纤维混凝土混合配筋梁裂缝和挠度计算分析 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2):197-206.
- LU C H, WU X L, XU K, et al. Calculation analysis of the cracking and deflection of ordinary/steel fiber concrete hybrid-reinforced beams[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(2):197-206.
- [21] LI C Y, ZHAO M L, GENG H B, et al. Shear testing of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete beams with varying of shear-span to depth ratio and stirrups[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 14:e00550.
- [22] DEMIR A, CAGLAR N, OZTURK H. Parameters affecting diagonal cracking behavior of reinforced concrete deep beams[J]. *Engineering Structures*, 2019, 184:217-231.
- [23] TAHENNI T, CHEMROUK M, LECOMPTE T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105:14-28.
- [24] 吴涛, 孙艺嘉, 刘喜, 等. 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):129-139,159.
- WU T, SUN Y J, LIU X, et al. Flexural behavior of steel fiber-reinforced high-strength lightweight aggregate concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(4):129-139,159.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土结构设计标准: JGJ/T 465—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Standard for Steel Fiber Reinforced Concrete Structures: JGJ/T 465—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [26] HU B, WU Y F. Quantification of shear cracking in reinforced concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2017, 147:666-678.
- [27] 赵顺波, 赵国藩. 钢筋钢纤维混凝土梁斜裂缝宽度计算方法 [J]. *建筑结构*, 1998, 28(7):39-42.
- ZHAO S B, ZHAO G F. Calculation of shear-crack width of steel fiber reinforced concrete beams[J]. *Building Structure*, 1998, 28(7):39-42.

责任编辑: 何莉