

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909063

CFRP筋增强钢纤维混凝土梁受剪承载力 试验与分析*

宋守坛^{1,2}, 曹天³, 端宁¹, 刘东运¹

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏南京 210096; 3. 南京特殊教育师范学院, 江苏南京 210038)

摘要: 对CFRP箍筋和纵筋增强钢纤维混凝土梁的受剪承载力进行研究, 通过6根梁的加载试验研究了剪跨比、配箍率和箍筋种类对受剪承载力的影响。考虑CFRP纵筋与混凝土的粘结性能, 建立了CFRP筋增强钢纤维梁受剪承载力计算方法。结果表明: ①CFRP筋增强钢纤维混凝土梁受剪承载力高, 破坏前斜裂缝宽度大, 破坏有明显预兆; ②钢纤维可有效减小斜截面开裂后前期的CFRP箍筋应力, 有利于箍筋强度发挥, CFRP箍筋的极限应变可取为0.004; ③CFRP纵筋发挥强度高, 需注意锚固长度和设计使用应力, 防止滑移拔出和销栓破坏; ④给出的受剪承载力计算方法具有较高的计算精度高。

关键词: CFRP箍筋; CFRP纵筋; 钢纤维混凝土; 梁; 抗剪承载力

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1012-08

Experiment and Analysis on Shear Capacity of CFRP Reinforced Steel Fiber Concrete Beams

SONG Shoutan^{1,2}, CAO Tian³, DUAN Ning¹, LIU Dongyun¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Nanjing Normal University of Special Education, Nanjing 210038, China)

Abstract: The shear capacity of steel fiber concrete beams reinforced with CFRP stirrups and longitudinal bars was studied. The loading tests of 6 beams were conducted to study the effects of shear span ratio, stirrup ratio, and stirrup type on their shear capacity. The calculation method of shear capacity of CFRP reinforced steel fiber beam was proposed by considering the bonding properties between CFRP longitudinal bars and concrete. The test and analyzing results show that: CFRP reinforced steel fiber concrete beam has high shear capacity and shows large inclined crack width, which are obvious signs of beam failure; Steel fiber can effectively reduce the stresses of CFRP stirrups in the early stage after the occurrence of inclined cracks, which is beneficial to the exertion of stirrup strength. The ultimate strain of CFRP stirrups can be taken as 0.004; CFRP longitudinal bars have high strength, and attention should be paid to the anchorage length and design working stress to prevent interface slipping and dowel rupture; The proposed calculation method of shear bearing capacity has high calculation accuracy.

Keywords: CFRP stirrup; CFRP longitudinal bar; steel fiber concrete; beam; shear capacity

* 收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-11-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703006-01)、江苏省博士后基金项目(1601148B)资助

作者简介: 宋守坛(1984—), 男, 博士后。主要从事工程结构方面的研究。E-mail: songshoutan@seu.edu.cn

引言

钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀问题突出^[1],钢筋混凝土结构的耐久性问题导致许多桥梁、建筑物提前破坏,造成了巨大的经济损失。纤维增强复合材料(FRP)具有轻质高强、抗腐蚀性能好等优点,在一定场合可替代钢筋应用于工程建设。在结构受力筋中,箍筋距离混凝土表面最近,在使用FRP纵筋的同时使用FRP箍筋可有效解决结构的耐久性问题。

FRP筋为线弹性材料,弹性模量低,横截面抗剪能力差,应用于混凝土结构时表现出更宽的裂缝宽度。K.E.Ahmed等^[2]、杜修力等^[3]、M.Said等^[4]分别指出FRP纵筋的使用降低了结构的抗剪承载力。A.K.El-Sayed^[5]根据试验结果指出相同的配箍指标(按弹性模量等效)下配置钢箍筋梁与碳纤维(CFRP)箍筋梁力学性能接近。在普通混凝土结构中FRP筋的强度不能充分发挥,限制了FRP筋混凝土结构的推广应用。

钢纤维混凝土是由水泥基类材料为基质,钢纤维作为增强材料组合而成的一种复合材料,具有较高的强度和密实性。钢纤维可以抑制混凝土的早期开裂,减小裂缝宽度并提高材料的韧度及强度^[6]。S.Y.Park等^[7]指出钢纤维的加入可以提升FRP纵筋梁的抗剪承载力,避免或延迟力筋受剪断裂破坏。陈升平等^[8]通过试验研究了钢纤维含量对FRP纵筋梁的抗剪承载力提升效果的影响。以上研究表明,将钢纤维混凝土与FRP结合形成FRP增强钢纤维混凝土梁可以综合两者优点,改善结构的抗剪力学性能。现有的对于钢纤维混凝土梁受剪力学性能研究主要集中在钢筋钢纤维梁,研究参数包括有无箍筋、钢纤维含量、配箍率、剪跨比、纤维种类等^[9-13]。赵善超^[14]研究了玻璃纤维(GFRP)箍筋—钢纵筋钢纤维梁的受剪力学性能。现有成果中缺乏对FRP箍筋和纵筋增强钢纤维混凝土梁受剪力学性能的研究,本文对CFRP筋增强钢纤维混凝土梁的受剪承载能力进行试验研究,建立相关结构受剪承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试验方案

试验共设计6根受剪试验梁,其中5根采用

CFRP箍筋、1根为钢箍筋对比梁,试验梁受拉纵筋全部采用CFRP螺纹筋。试验构件由课题组配置的钢纤维混凝土一次浇筑成型。试验考虑了剪跨比和配箍率的影响,每个参数设置3个构件。试验构件长3 000 mm,截面高300 mm,宽150 mm,保护层厚度为10 mm。截面下部受拉区配置4根直径为16 mm的CFRP螺纹筋,上部配置两根直径为14 mm的HRB400级架立筋。试件尺寸和配筋信息见图1和表1。

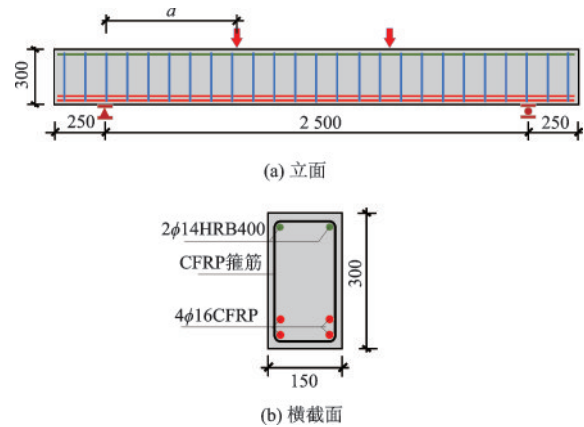


图1 试验构件基本设计情况

Fig.1 Specimen design

表1 试验构件基本信息

Table 1 Details of test specimens

构件编号	剪跨长/mm	剪跨比	箍筋间距/mm	配箍率/%	纵筋及配筋率
B1	500	2	CFRP@100	0.4	
B2	625	2.5	CFRP@100	0.4	4根直径
B3	750	3	CFRP@100	0.4	16mm CFRP螺
B4	750	3	CFRP@150	0.27	纹筋配筋率:
B5	750	3	CFRP@200	0.2	2.1%
B6	750	3	C6@100	0.38	

1.2 材性试验

1.2.1 CFRP箍筋

试验用CFRP箍筋为东南大学与江苏恒神纤维材料有限公司共同研制的新型闭合箍筋。箍筋制作时将CFRP纤维在模具上缠绕并浸润树脂一次成

型,有效解决了FRP直线筋软化弯折造成的箍筋角部纤维的褶皱问题,可提升CFRP箍筋角部受力性能。闭合箍筋形式减小了常规FRP箍筋因弯折闭合导致重叠造成的材料浪费。CFRP箍筋试验采用课题组设计的专用夹具连接,在MTS试验机上完成,如图2所示。

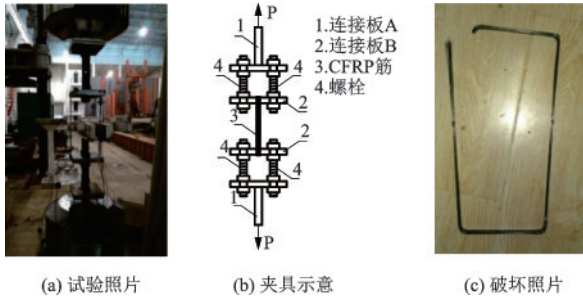


图2 CFRP箍筋试验及破坏形态

Fig.2 Load test and failure mode of the CFRP stirrup

试验测试了5个试件,均为箍筋角部破断(图2(c)),平均破断强度达到897 MPa。箍筋弹性模量采用直线段粘贴应变片方式测量,应变片粘贴于箍筋中部,箍筋的平均极限应变为6 400 $\mu\epsilon$ 。根据破断强度以及极限应变的结果进行测算,箍筋的弹性应变为140.1 GPa。

1.2.2 钢纤维混凝土

试验用钢纤维混凝土由粉体材料、减水剂、钢纤维和水按照一定的比例配置搅拌而成,其中粉体材料由硅灰、粉煤灰、水泥等材料组成,配置材料均由上海罗洋新材料科技有限公司提供,钢纤维采用江阴市华方机电科技有限公司生产的微细表面镀铜钢纤维,纤维直径为0.20 mm,长度为13 mm,长径比为65,弹性模量为210 GPa,抗拉强度 $\geq 2\ 000$ MPa,钢纤维体积含量为2%。

轴心受压试验试件为70 mm \times 70 mm \times 210

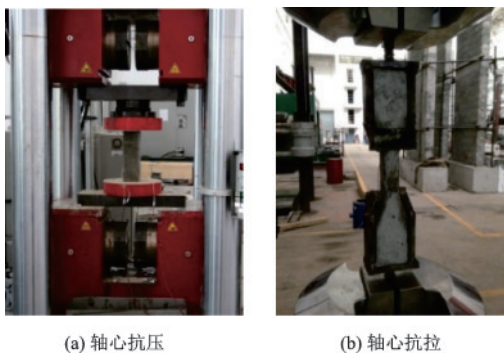


图3 钢纤维混凝土力学性能试验

Fig.3 Mechanical property tests of steel fiber concrete

mm的棱柱体,采用LFV-1000 kN电液伺服阀刚性试验机位移控制加载(图3(a))。轴心受拉试验制作了狗骨式试件(图3(b)),由专用夹具夹持进行试验,试验机加载速率为0.1 mm/min。试验主要材料性能结果见表2。

表2 钢纤维混凝土材料性能

Table 2 Properties of the steel fiber concrete

试件 编号	峰值强度/ MPa	弹性模量/ GPa	峰值应变/ $\mu\epsilon$	极限 应变/ $\mu\epsilon$
抗压	118.5	43.4	4 356	6 392
抗拉	10.4	45.5	375	794

1.2.3 CFRP纵筋及钢筋

本文CFRP纵筋采用江苏恒神纤维材料有限公司生产的直径16 mm螺纹钢,螺纹深度为0.1 mm。钢箍筋采用直径6 mm的HRB400级螺纹钢。CFRP纵筋性能试验采用筋材端部套筒灌胶锚固方式完成,试验过程中加载速率约为250 MPa/min,最终破坏为筋材中部爆散式破断。每个材料性能试验制作3个试件,采用平均值作为材料性能见表3。

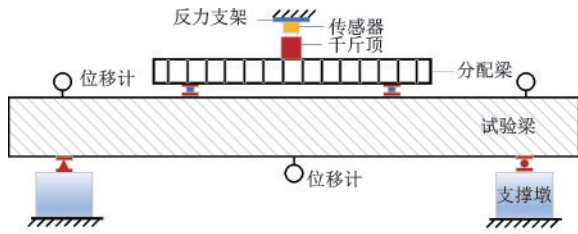
表3 筋材受拉力学性能

Table 3 Tensile properties of the bars

筋材种类	抗拉/屈服 强度/MPa	弹性模量/ GPa	延伸率/ %
CFRP	1 777	159	1.1
6 mm 钢筋	451	201	18.0
14 mm 钢筋	432	201	17.0

1.3 试验加载与测试

试验加载采用三分点加载方式,如图4所示。荷载施加采用液压千斤顶,加载分为预加载和正式加载,预加载用于消除构件间隙,正式加载采用分级加载,每级加载到位后持荷3 min。构件开裂前以10 kN为一级,即将达到开裂荷载时以5 kN为一级加载,开裂后以30 kN为一级,缓慢加载至极限荷载。测试内容包括荷载、箍筋应变、纵筋应变和位移等,荷载由千斤顶上部布置的传感器完成,筋材应变由应变片记录,底部纵筋应变片布置在跨中纯弯段,剪弯段箍筋应变片布置在同侧加载点与支座连线与箍筋相交的部位,应变片布置见后文测试数据。位移计布置如图4(a)所示。



(a) 加载示意



(b) 加载照片

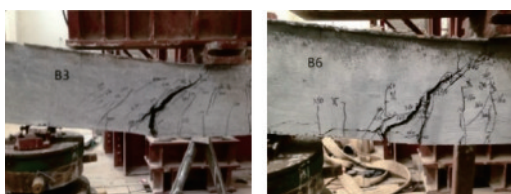
图4 CFRP增强钢纤维混凝土梁试验加载图

Fig.4 Test setup of the steel fiber concrete beam reinforced with CFRP

2 试验结果

试验构件均发生了斜截面受剪破坏(图5),破坏斜裂缝与水平方向的倾角为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。所有构件试验现象的共同点:荷载介于 $50\sim 75\text{ kN}$ 时构件开裂,先出现纯弯段弯曲裂缝,后出现剪弯段的弯剪斜裂缝。斜裂缝出现后箍筋应变开始增加,但增长速度较小,最主要的原因是钢纤维约束裂缝宽度的发展,同时可以承担一定的剪应力。当荷载达到极限荷载 $40\%\sim 60\%$ 时,主斜裂缝开始显著发展同时出现多条细小斜裂缝,此时箍筋应变增长进入快速期。随着加载的继续,可以听到钢纤维不断拔出的声音,最终发生斜裂缝顶部剪压破坏。

试验构件破坏时出现了CFRP箍筋角部破断(图6(a))、CFRP箍筋直线段破断(图6(b))、CFRP纵筋错断、滑移(图6(a)、(c))以及钢箍筋破断(图

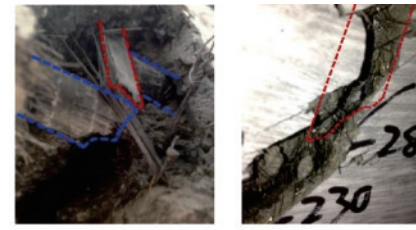


(a) B3试验梁

(b) B6试验梁

图5 试验构件破坏

Fig.5 Failure modes of test specimens



(a) CFRP箍筋及纵筋断裂

(b) CFRP箍筋断裂



(c) CFRP纵筋滑移

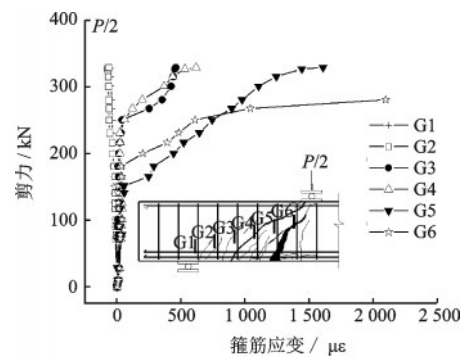
(d) 钢箍筋断裂

图6 试验构件破坏细节

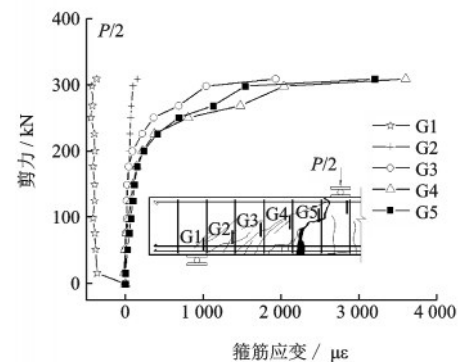
Fig.6 Typical failure patterns of the test specimens

6(d))等形态,破坏前弯剪斜裂缝的宽度均超过了 4 mm ,最大的B1构件超过了 10 mm 。破坏前结构变形明显,破坏有明显预兆。试验结果主要数据及破坏现象见表5。

图7和图8为部分试验构件箍筋应变和纵筋应变发展示意图,由于应变片提前破坏,未测试到加



(a) B2试验梁



(b) B4试验梁

图7 试验构件CFRP箍筋应变

Fig.7 Strain development of CFRP stirrups of the test specimens

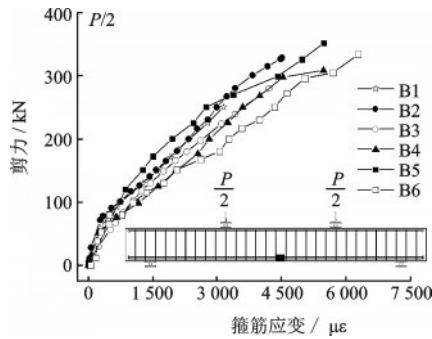


图8 CFRP纵筋应变图

Fig.8 Strain development of the CFRP longitudinal bar

载后期的试验结果。根据测试数据结合箍筋破坏现象推算,与主斜裂缝相交箍筋平均应变均能超过0.004。根据测试数据并结合结构破坏时的弯曲承载力推算,最终破坏时纵筋应力均能超过1200 MPa。鉴于破坏时纵筋处裂缝宽度较大并有纵筋发生滑移及销栓错断,建议CFRP纵筋的有效使用应力不超过1000 MPa,同时需注意CFRP纵筋的锚固长度设计。

3 受剪承载力分析

CFRP筋增强钢纤维混凝土梁与普通钢筋混凝土梁的主要差别在三个方面:FRCC材料强度远高于普通混凝土;CFRP筋箍筋和纵筋的纤维纵向强度高模量小,弯折、横向剪切强度小;CFRP筋与水泥基材料的粘结性能稍差。现有的钢筋混凝土梁受剪承载力^[15]分为混凝土部分和箍筋部分,计算的模型如下:

$$V = V_c + V_s \quad (1)$$

式中, V_c 为混凝土承担的抗剪承载力; V_s 为箍筋承担的抗剪承载力。

纤维混凝土斜裂面开裂后钢纤维未完全拔出,

纤维可以承担一部分剪力,同时纤维的加入减小了裂缝宽度,提升了混凝土裂面的骨料咬合力。纤维混凝土结构技术规程^[16](CECS 38:2004)认为钢纤维提高了混凝土抗拉强度,在混凝土抗剪承载力的基础上引入了纤维的影响,其给出的纤维混凝土结构受剪承载力计算公式如下:

$$V_{fcs} = V_{fc} + V_{sv} \quad (2)$$

$$V_{fc} = V_c(1 + \beta_v \lambda_f) \quad (3)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (4)$$

式中, V_{fcs} 为纤维混凝土结构受剪承载力; V_{fc} 为纤维混凝土承受的受剪承载力; V_{sv} 为箍筋承受的受剪承载力; V_c 为根据纤维混凝土强度等级不考虑纤维对抗拉强度的影响,与混凝土有关的承载力; β_v 钢纤维的影响系数,与纤维种类有关; λ_f 为钢纤维含量特征值; ρ_f 、 l_f 、 d_f 分别为纤维的体积含量、长度和直径。

文献[6]考虑钢纤维对斜裂面抗剪强度的贡献,建立了钢纤维钢箍筋梁的受剪承载力计算方法如下:

$$V_{fc} = \left(\frac{0.85f_{ft}}{\lambda - 0.3} + \frac{97\rho_f}{\lambda} \right) (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + 1.45 \frac{f_{yv} A_{sv}}{b s} \quad (5)$$

式中, λ 为梁体剪跨比; f_{ft} 为钢纤维混凝土的抗拉强度; b 为梁体宽度; h_0 为梁体有效高度; f_{yv} 、 A_{sv} 、 s 分别为箍筋强度、面积和间距。

本文通过截面分层法对斜截面的抗剪承载力进行分析,认为斜截面的正应力分布与符合平截面假定的正截面正应力分布一致,钢纤维混凝土受拉区的受剪承载力不可忽略。采用截面受弯分析确定梁体受压区、受拉未开裂区和受拉开裂区大小,然后分别计算钢纤维混凝土受压区抗剪承载力 V_{c1} 和受拉区域的受剪承载力 V_{c2} (图9)。在钢纤维混

表5 试验结果汇总

Table 5 Summary of test results

试件编号	开裂荷载/kN		极限荷载/ kn	开裂位移/ mm	极限位移/ mm	破坏细节	
	纯弯段	剪弯段				箍筋	纵筋
B1	65	75	460	2.8	19.1	中部断裂	纵向撕裂未断有滑移
B2	65	75	435	2.7	21.3	角部断裂	纵筋错断
B3	55	60	409	3.4	26.5	角部断裂	—
B4	50	60	385	4.1	27.4	中部劈裂	纵向撕裂未断
B5	50	55	361	2.3	24.1	中部劈裂	—
B6	50	65	374	3.0	25.0	钢筋断裂	—

注:位移为跨中位移;极限位移为破坏前一级荷载;—为未发现破坏。极限荷载为 $P/2$

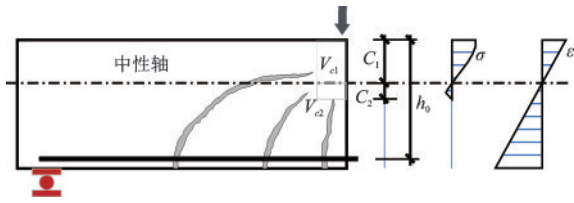


图9 受剪承载力分析模型

Fig.9 Analysis model of shear capacity

混凝土受剪承载力基础上叠加箍筋部分承载力 V_{sv} 得到 CFRP 筋增强钢纤维混凝土梁受剪承载力计算公式(4):

$$V = V_{c1} + V_{c2} + V_{sv} \quad (6)$$

本文试验采用 CFRP 筋,分析时需要对此进行考虑。CFRP 纵筋对钢纤维混凝土压剪区承载力的影响主要体现在其弹性模量和与混凝土的粘结性能上。根据文献[17]对 FRP 筋梁裂缝宽度的研究成果,本文将 CFRP 筋的弹性模量取为实际弹性模量的 80%,以考虑 CFRP 筋与混凝土的粘结性能的影响。

分层计算过程中认为剪应力均为分布在受压区,根据受压区正应力的分布,按照压剪破坏准则^[9]计算每层截面的抗剪应力 τ_i ,公式如下:

$$\frac{\tau_i}{f_{tc}} = A \frac{\sigma}{f_{tc}} + B \quad (7)$$

式中, A、B 分别为常数,根据建议^[9],其数值分别为 -0.25、0.33。

对比每个加载步中每层剪应力和抗剪应力,达到设定的终止计算条件后将每层抗剪应力进行积分得到 V_{c1} (式 8)。本文考虑了两种计算终止的条件:①任何一层截面剪应力超过抗剪应力;②受压区剪力超过抗剪力。前者条件最为严格,其计算结果可视为 V_{c1min} ,后者条件宽松,其计算结果可视为 V_{c1max} 。 V_{c1} 的取值介于两者之间,本文取两者的平均值:

$$V_{c1} = \int_0^{c_1} \tau_{fi} dx \quad (8)$$

本文认为开裂区不承担剪力,受拉未开裂区承担的受剪承载力 V_{c2} 计算如下:

$$V_{c2} = \int_{c_2}^0 \tau_{fi} dx \quad (9)$$

式中, c_2 为受拉未开裂部分的高度; τ_{fi} 为受拉未开裂区抗剪应力,本文取为固定值为纤维混凝土的抗拉强度。

钢纤维混凝土承担抗剪承载力 V_c 的计算流程如图 10 所示。

箍筋受剪承载力 V_{sv} 按式(8)计算得到。本文

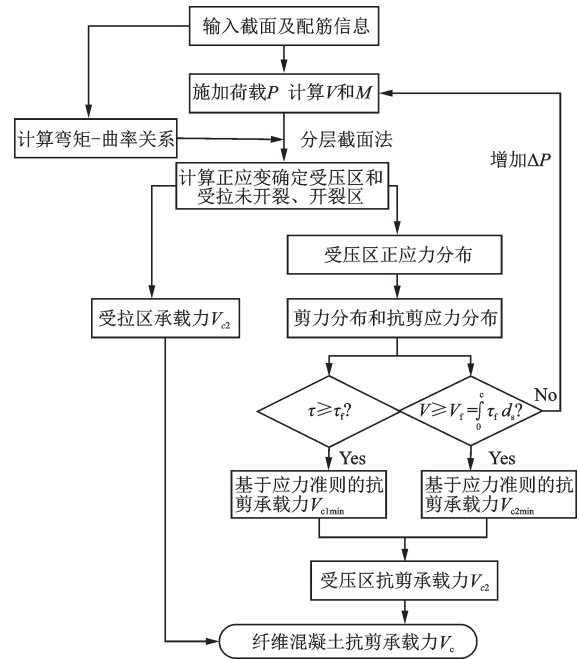


图10 钢纤维混凝土受剪承载力计算流程

Fig.10 Flow chart for calculating shear capacity of steel fiber concrete

已经开展了箍筋强度试验,同时根据试验梁中箍筋破坏形态及测试数据,本文按照规范[18]中的规定采用 $0.004E_f$ 计算箍筋应力:

$$V_{sv} = f_{sv} \frac{A_f}{s_v} h_0 \quad (10)$$

式中, A_f 为同一截面箍筋总截面积; s_v 为箍筋间距; h_0 为截面有效高度; f_{sv} 为箍筋的有效强度,本文取 $0.004E_f$, E_f 为 CFRP 箍筋的弹性模量。

将本文式(6)的计算结果与 CECS38:2004、文献[6]建议公式的计算结果汇总于表 6。因缺乏不考虑纤维贡献的抗拉强度数据,CECS38:2004 中纤维混凝土承受的受剪承载力按 GB50010—2010 规范^[15]中的公式进行计算得到。CECS38:2004 及本文计算方法中箍筋承担的剪力均按式(8)计算得到。由表 6 可以看出,CECS38:2004 计算结果较为保守,文献[6]建议方法的试验值与计算值比值均值结果较好,但离散程度较大。本文计算方法得到的试验值与计算值比值均值为 1.17,标准差仅为 0.014,计算结果具有一定安全系数,同时具有较高的计算精度。

4 结论

(1)全部试验构件均发生了斜截面受剪破坏,

表6 不同公式计算结果汇总

Table 6 Summary of results calculated by different formulas

单位:kN

试件 编号	试验值	CECS 38:2004(式(2)~(4))		文献[6](式(5))		本文(式(6))				
		计算值	试验/计算	计算值	试验/计算	V_{c1}	V_{c2}	V_{sv}	计算值	试验/计算
B1	460.0	311.5	1.48	530.6	0.87	265.9	47.6	84.0	397.5	1.16
B2	435.0	279.0	1.56	439.5	0.99	243.0	38.9	84.0	365.9	1.19
B3	409.0	254.6	1.60	381.6	1.07	233.0	33.9	84.0	350.8	1.16
B4	385.0	226.6	1.70	341.0	1.13	233.0	33.9	56.0	322.8	1.19
B5	361.0	212.6	1.70	320.7	1.12	233.0	33.9	42.0	308.8	1.17
B6	374.0	254.6	1.47	381.6	0.98	233.0	33.9	56.5	323.3	1.16
	均值		1.58	均值	1.03			均值		1.17
	标准差		0.093	标准差	0.092			标准差		0.014

破坏前弯剪斜裂缝宽度较大,结构变形明显,破坏虽属于脆性破坏但有明显的预兆。剪跨比越大配箍率越小结构的受剪承载力越低。CFRP箍筋梁(B3)的抗剪承载力比钢箍筋梁(B6)高9%。

(2)斜裂缝出现后的前期钢纤维能有效抑制裂缝的发展,与斜截面相交的箍筋应力较小,当加载至极限荷载的40%~60%后钢纤维逐步退出工作,CFRP箍筋应力开始显著增加。试验梁中箍筋出现了中部断裂和角部破坏,建议CFRP箍筋的有效应变取为0.004。

(3)钢纤维混凝土梁受剪试验中CFRP纵筋发挥出较高强度,最终破坏时CFRP纵筋出现销栓断裂和滑移,建议斜截面受剪梁中CFRP纵筋的有效利用强度取值不超过1000MPa,抗剪设计时需注意锚固长度设置。

(4)本文建议的计算方法考虑了钢纤维混凝土受拉区、CFRP纵筋与混凝土的粘结性能对结构受剪承载力的影响,与试验结果的离散程度最小,具有较高的精度。

参考文献:

- [1] 吕志涛.高性能材料FRP应用与结构工程创新[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):2-5.
Lyu Zh T. Application of high performance FRP and innovations of structure engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 2-5. (in Chinese)
- [2] Ahmed K E, Ehab F E, Brahim B. Shear capacity of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(3):383-389.

- [3] 杜修力,王作虎,詹界东.预应力CFRP筋混凝土梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(4):80-86.
Du X L, Wang Z H, Zhan J D. Experimental studies on shear behavior of concrete beams prestressed with CFRP tendons [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 80-86. (in Chinese)
- [4] Said M, Adam M A, Mahmoud A A, et al. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars[J]. Construction & Building Materials, 2016, 102(1): 574-591.
- [5] El-Sayed A K, El-Salakawy E, Benmokrane B, et al. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4): 352-362.
- [6] 张宏战,黄承逵,张瑞瑾.钢纤维高强混凝土箍筋梁抗剪性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(10):1781-1785.
Zhang H Zh, Huang Ch K, Zhang R J. Experimental study on shear resistance of steel fiber reinforced high strength concrete beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(10):1781-1785. (in Chinese)
- [7] Park S Y, Naaman A E. Shear behavior of concrete beams prestressed with FRP tendons[J]. PCI Journal, 1999, 44(1): 74-85.
- [8] 陈升平,马小霞,罗寒寒,等. FRP筋钢纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2019,45(4):60-64.
Chen Sh P, Ma X X, Luo H H, et al. Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams reinforced with FRP bars [J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(4):60-64. (in Chinese)

- [9] 高丹盈. 钢纤维钢筋混凝土无腹筋梁的斜截面抗剪强度[J]. 水利学报, 1992(2):63-66.
Gao D Y. Shear strength of steel fiber concrete beams without web reinforcement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992(2):63-66. (in Chinese)
- [10] 张发盛. 钢纤维自密实混凝土梁斜截面受剪性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
Zhang F Sh. Shear behavior of steel fiber reinforced self-consolidating concrete beams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 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.
Xu X W, Gao B, Li Zh Y, et al. Study on shear resistance calculation of steel fiber reinforced concrete beams[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 2006-2013. (in Chinese)
- [12] 金陵志, 梅臣, 杨蕊. 钢纤维对高强钢筋 RPC 无腹筋梁的剪切性能影响研究[J]. 工程力学, 2016, 33(增1):190-195.
Jin L Zh, Mei Ch, Yan R. Study on the effect of steel fiber on shear performance of high-strength reinforced RPC beams without stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Sup 1): 190-195. (in Chinese)
- [13] Tahenni T, Chemrouk M, Lecompte T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams[J]. Construction & Building Materials, 2016, 105:14-28.
- [14] 赵善超. GFRP 箍筋钢纤维混凝土梁受剪性能试验研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2018.
Zhao Sh Ch. Experimental study on shear behavior of GFRP stirrups steel fiber reinforced concrete beams[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38:2004[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38:2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [17] 董志强. FRP 筋增强混凝土结构耐久性能及其设计方法研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
Dong Zh Q. Study on the durability of FRP bars reinforced concrete structures and its design method[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [18] ACI 440 committee. ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [S]. USA: American Concrete Institute, 2015.

(本文责编:赵霞)