

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.058

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 钢玄武岩纤维复合筋混凝土梁受剪承载力试验研究

范旭红<sup>1</sup>,倪林<sup>1</sup>,秦卫红<sup>2</sup>,解鹏<sup>2</sup>,张思博<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013;2. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室; 国家预应力工程技术研究中心,南京 211189)

**摘要:**钢玄武岩纤维复合筋(SFCB)兼具钢筋的延性和玄武岩纤维的防腐性能,并具有显著的二次刚度,但弹性模量低于钢筋。SFCB作为纵向筋时可使混凝土构件的受弯性能具有二次刚度,但构件的受剪承载力会低于钢筋混凝土梁。为深入研究SFCB作为纵筋时混凝土梁的受剪性能,以纵筋筋材种类、构件剪跨比为试验参数,进行梁的四点加载试验。详细分析了不同参数对混凝土梁的破坏形态、裂缝发展、受剪承载力的影响。试验结果表明:SFCB混凝土梁的受剪破坏主要呈现斜压破坏、剪压破坏和非典型剪压破坏3种形态。SFCB混凝土梁的受剪承载力整体低于钢筋混凝土梁、斜裂缝宽度大于钢筋混凝土梁。基于桁架拱模型,推导了SFCB混凝土梁受剪承载力的理论计算公式。与试验承载力对比发现,SFCB混凝土梁受剪承载力理论计算公式具有一定的适用性与安全性。

**关键词:**钢玄武岩纤维复合筋;受剪承载力;试验研究;破坏模式;裂缝发展

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)02-0112-11

## Experimental study on shear capacity of steel-basalt fiber composite bar(SFCB) reinforced concrete beams

FAN Xuhong<sup>1</sup>, NI Lin<sup>1</sup>, QIN Weihong<sup>2</sup>, XIE Peng<sup>2</sup>, ZHANG Sibao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China;  
2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education; National Prestress Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

**Abstract:** The steel-basalt fiber composite bar (SFCB) has the advantages of the ductility of steel bar and the corrosion resistance of basalt fiber, and has significant secondary stiffness as well. However, SFCB's elasticity modulus is lower than that of the steel bar. The application of SFCBs as longitudinal reinforcement bars enables the flexural properties of concrete members to present secondary stiffness, but the shear capacity of the members will be reduced, compared with that of steel reinforced concrete beams. In this paper, four-point loading experiment of the beams longitudinal reinforced with SFCBs were carried

**收稿日期:**2020-02-11

**基金项目:**国家自然科学基金(51378108,51678137);国家科技支撑计划(2015BAL02B02)

**作者简介:**范旭红(1969-),女,副教授,主要从事土木工程减灾防灾研究,E-mail:55358319@qq.com。

秦卫红(通信作者),女,副教授,博士,E-mail:qinweihongseu@163.com。

**Received:**2020-02-11

**Foundation items:**National Natural Science Foundation of China (No. 51378108, 51678137); National Key Technology R & D Program (No. 2015BAL02B02)

**Author brief:**FAN Xuhong (1969-), associate professor, main research interests: civil engineering disaster prevention and reduction, E-mail: 55358319@qq.com.

QIN Weihong (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: qinweihongseu@163.com.

out, taking the following variables of the specimens into consideration: the type of longitudinal reinforcement, and the shear span ratio. The influences of the above variables on the shear failure modes, the development of diagonal cracks, and shear force capacity of the above concrete beams were analyzed and summarized in detail. The research revealed the following three main results: the failure modes of the SFCB beam were mainly described as diagonal-compression failure, shear-compression failure and atypical shear-compression failure; the shear force capacity of SFCB beams was lower than that of steel reinforced beams; the diagonal cracks of SFCB reinforced beams were wider than those of steel reinforced beams. Based on the truss arch model, the shear force capacity formula of SFCB beams is derived. The calculating results of the formula agree well with the experimental ones with fairly applicability and safety.

**Keywords:** steel-basalt fiber composite bar (SFCB); shear bearing capacity; experimental research; failure modes; crack development

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, 简称 FRP)由于拥有高含量的纤维,使得其抗拉强度相比钢筋具有一定的优势,故近年来关于 FRP 材料在混凝土结构中的应用获得了学者们的广泛关注。

徐玉野等<sup>[1]</sup>探究了碳纤维复合材料的加入对混凝土抗震性能的提升效果,卢亦焱等<sup>[2]</sup>对纤维的加固效果进行了深入研究,吴涛等<sup>[3]</sup>围绕纤维掺量、纵筋类型、配筋率及纵筋直径等参数对混凝土梁的承载能力、挠度发展、抗裂性能展开了完整、深入的分析,牛建刚等<sup>[4]</sup>研究了不同纤维掺入量情况下混凝土梁受弯承载力的变化规律。FRP 筋混凝土梁受剪方面, Lignola 等<sup>[5]</sup>推导了 FRP 箍筋梁受剪承载力计算公式, Issa 等<sup>[6]</sup>对不同配箍率的 BFRP 筋混凝土梁试件进行受剪试验, Refai 等<sup>[7]</sup>深入研究了 FRP 纵筋轴向刚度对抗剪强度的影响, Alam 等<sup>[8]</sup>探究了 FRP 混凝土梁尺寸对承载力的影响,张智梅等<sup>[9]</sup>研究了 FRP 箍筋梁的受剪承载力,刘宗全等<sup>[10]</sup>对各国规范中 FRP 筋混凝土梁斜截面承载力计算公式的可靠性进行了全面的评价。由上述对 FRP 和混凝土混合材料性能以及 FRP 梁受弯、受剪的研究可知,以 FRP 筋替代钢筋作为纵筋虽然可提高梁受弯承载力,但 FRP 筋弹性模量较低,没有明显屈服点,所以受弯破坏时容易发生脆性破坏,没有明显预兆,正常使用状态下刚度低、裂缝宽度大。并且, FRP 筋混凝土梁的受剪承载力比钢筋混凝土梁低。因此,如何在保留 FRP 强度优势的同时改善其弹性模量低的缺点,并提高构件的刚度、延性和受剪承载力成为推广其应用的关键问题。Bakis 等<sup>[11]</sup>使用 AFRP 纤维布包裹钢筋制备混杂筋材,吴刚等<sup>[12]</sup>将钢筋与纤维增强复合材料进行复合,得到新型筋材

“钢玄武岩纤维复合筋”,郑百林等<sup>[13]</sup>则选择使用 GFRP 材料包覆钢筋,制作了外包玻璃纤维的钢-连续纤维复合筋(steel-basalt fiber composite bar (SFCB));罗云标等<sup>[14]</sup>则通过 OpenSees 软件模拟探究了 SFCB 混凝土结构在反复荷载下的受力性能。

上述研究表明, SFCB 具有明显的二次刚度、且屈服后残余变形较小。尽管 SFCB 筋弹性模量与抗剪强度高于 FRP 筋,但是其弹性模量和筋材抗剪强度仍然低于钢筋。因此, SFCB 筋材在梁内起到的销栓作用要弱于钢筋。由于销栓作用计算较复杂,现有规范中钢筋混凝土梁受剪承载力公式未单独列出销栓作用贡献,而是将其贡献以及裂缝间骨料咬合作用一起并入到混凝土对受剪承载力的贡献中。如果完全按照钢筋混凝土梁受剪公式计算 SFCB 混凝土梁,会带来安全隐患。基于梁配筋设计时所遵循的“强剪弱弯”原则,梁的受剪性能应受到重点关注。笔者依据 SFCB 混凝土梁与钢筋混凝土梁受剪试验结果,研究适用于 SFCB 的受剪承载力公式,为后续 SFCB 相关研究提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

设计了 16 根混凝土梁,其中,底部受拉纵筋为 SFCB 筋的梁 10 根(S1~S10),受拉纵筋为 3 $\Phi$ 22 (HRB400)的对比梁 6 根(D1~D6),所有试件梁顶部受压纵筋均配置为 2 $\Phi$ 22;梁纯弯段与剪跨段箍筋均为 $\Phi$ 6@200,整体的配箍率为 0.0019,箍筋保护层厚度为 20 mm。图 1 为梁配筋与试验装置示意图,图中 a、b、c 为筋材应变片粘贴位置,分别测量剪跨段支座近处箍筋应变、支座远处箍筋应变与纵筋应变,应变片均左右对称布置。梁截面尺寸为  $b \times$

$h=150\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 。表 1 为各试件梁详细参数梁跨度、剪跨比、纵向钢筋配筋情况。表 1 中“2S10B17”代表梁底部纵筋为两根内芯配置 10 mm 直径钢筋、外层包裹 17 匝 BFRP 纤维层的 SFCB 筋,其余同理。

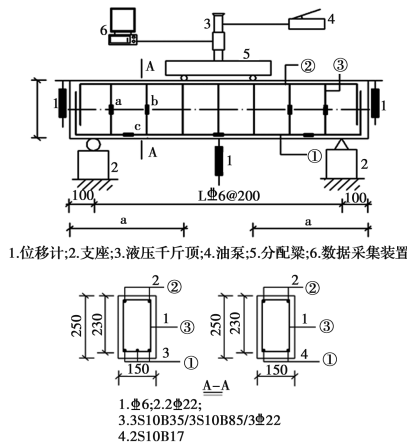


图 1 试件详图及测试方案

Fig. 1 Detail of the specimens and the measurement

表 1 梁试验参数

Table 1 Test parameters of the beams

| 试件 | $L/\text{mm}$ | $\lambda$ | 受拉纵筋    | 试件  | $L/\text{mm}$ | $\lambda$ | 受拉纵筋        |
|----|---------------|-----------|---------|-----|---------------|-----------|-------------|
| S1 | 800           | 0.91      | 2S10B17 | S9  | 1 500         | 2.50      | 3S10B85     |
| S2 | 1 200         | 1.52      | 2S10B17 | S10 | 1 500         | 3.00      | 3S10B85     |
| S3 | 800           | 0.91      | 3S10B39 | D1  | 800           | 0.61      | 3 $\Phi$ 22 |
| S4 | 1 200         | 1.52      | 3S10B39 | D2  | 800           | 0.91      | 3 $\Phi$ 22 |
| S5 | 800           | 0.61      | 3S10B85 | D3  | 1 200         | 1.52      | 3 $\Phi$ 22 |
| S6 | 800           | 0.91      | 3S10B85 | D4  | 1 500         | 2.00      | 3 $\Phi$ 22 |
| S7 | 1 200         | 1.52      | 3S10B85 | D5  | 1 500         | 2.50      | 3 $\Phi$ 22 |
| S8 | 1 500         | 2.00      | 3S10B85 | D6  | 1 500         | 3.00      | 3 $\Phi$ 22 |

注: $L$ 为梁跨度; $\lambda$ 为剪跨比。

### 1.2 材料性能

试验预留 3 块立方体混凝土标准试块,养护后进行力学试验。试验所用筋材、混凝土具体力学性能参数见表 2~表 4。

表 2 SFCB 筋主要力学性能

Table 2 Mechanical performance index of SFCB bars

| 筋材种类   | FRP 捆绑匝数 | 内部钢筋直径/mm | 总直径/mm | 弹性模量/GPa | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|--------|----------|-----------|--------|----------|----------|----------|
| S10B17 | 17       | 10        | 15     | 127.4    | 232.77   | 646.13   |
| S10B35 | 39       | 10        | 19     | 92       | 167.10   | 680.00   |
| S10B85 | 85       | 10        | 22     | 83       | 154.88   | 835.22   |

注:S1~S2 纵筋为 S10B17;S3~S4 纵筋为 S10B35;S5~S10 纵筋

为 S10B85。

表 3 钢筋主要力学性能

Table 3 Mechanical performance index of steel bars

| 钢筋级别   | 直径/mm | 弹性模量/GPa | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|--------|-------|----------|----------|----------|
| HRB400 | 6     | 203      | 421      | 511      |
| HRB400 | 22    | 203      | 455      | 580      |

表 4 混凝土主要力学性能

Table 4 Mechanical performance index of the concrete

| 混凝土 | $f_{cu}/\text{MPa}$ | $f_c/\text{MPa}$ |
|-----|---------------------|------------------|
| C30 | 31.8                | 21.3             |

### 1.3 加载方案

试验采用四点加载方式施加荷载(如图 1 所示)。荷载由千斤顶提供,通过力传感器控制。力传感器和应变片均与泰斯特静态应变测试仪相连。试验前先进行 15 kN 的预加载,然后按照每级 5 kN 分级加载,在接近开裂荷载及极限荷载计算值时适当放慢加载步。每级荷载加载完等待 5 min。试验结果见表 5。

表 5 试验结果

Table 5 Experimental results

| 试件 | $V_u/\text{kN}$ | 破坏形态 | 试件  | $V_u/\text{kN}$ | 破坏形态    |
|----|-----------------|------|-----|-----------------|---------|
| S1 | 152.5           | 斜压破坏 | S9  | 59.0            | 非典型剪压破坏 |
| S2 | 89.0            | 剪压破坏 | S10 | 70.0            | 非典型剪压破坏 |
| S3 | 158.0           | 斜压破坏 | D1  | 242.5           | 斜压破坏    |
| S4 | 117.5           | 剪压破坏 | D2  | 238.5           | 斜压破坏    |
| S5 | 188.5           | 斜压破坏 | D3  | 181.0           | 剪压破坏    |
| S6 | 191.0           | 斜压破坏 | D4  | 130.0           | 剪压破坏    |
| S7 | 140.0           | 剪压破坏 | D5  | 100.0           | 剪压破坏    |
| S8 | 101.5           | 剪压破坏 | D6  | 88.5            | 非典型剪压破坏 |

注: $V_u$ 为受剪承载力,试验为对称四点加载,故取试验最终荷载  $P_u$  的 1/2。

## 2 试验现象

SFCB 混凝土梁的破坏呈现出不同的剪切破坏形态(列于表 5),主要包括斜压破坏,剪压破坏与非典型剪压破坏 3 种,破坏特征类似于钢筋混凝土梁。典型破坏形态试验照片如图 2 所示。由于梁所配箍筋均为适中配箍率,所以,影响试件破坏形态的主要因素为剪跨比。



## 2.1 斜压破坏(以梁 S6 为例)

斜压破坏大多发生于小剪跨比试件中,试验中小剪跨比为 $\lambda \leq 1$ 。以图 2(a)所示的试件梁 S6 为例,裂纹发展初期表现为梁跨中纯弯段的细小垂直裂缝。随着加载的持续,梁腹弯剪段开始出现多条斜裂缝,斜裂缝大致呈现平行状态,将梁腹分割成若干个有角度的斜向短柱,使得该处混凝土逐渐丧失承载能力;梁腹部主压应力随着荷载提高不断增大,使得斜裂缝逐渐趋于密集。最后,过大的应力导致腹部混凝土发生破碎,试件梁破坏,同时混凝土保护层出现剥落现象。

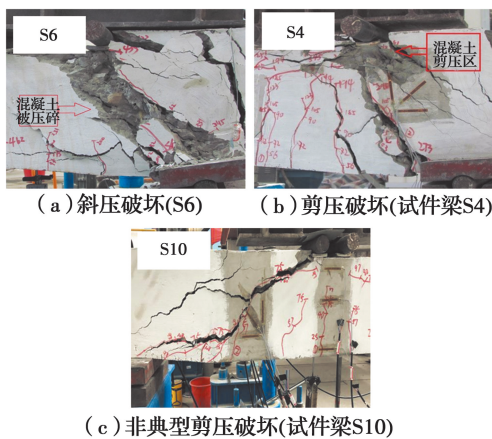


图 2 SFCB 试件受剪破坏形态

Fig. 2 Shear failure modes of the beams with SFCB bars

## 2.2 剪压破坏(以梁 S4 为例)

剪压破坏大多发生于剪跨比适中的试件中,试验中剪跨比适中范围为 $1 < \lambda < 2.5$ 。以图 2(b)所示试件 S4 为例,加载初期,试件梁 S4 的细小弯曲裂缝首次出现在纯弯段梁底部。随后,剪跨段梁底部也出现细小弯曲裂缝,随着荷载的增加,裂缝开始倾斜。其中 1~2 条斜裂缝增长速率较快,并迅速发展为临界斜裂缝。临界斜裂缝形成时,梁内与临界斜裂缝相交的箍筋屈服。箍筋屈服之后,临界斜裂缝走向迅速向加载点开展,但发展至一定高度后便不会继续增长,裂缝上部会保持一定高度的混凝土剪压区。直至该处剪压应力超出混凝土承受极限,使得混凝土压碎,梁破坏。

## 2.3 非典型剪压破坏(以梁 S10 为例)

试件梁剪跨比较大时,大多会发生非典型剪压破坏,试验中剪跨比 $\lambda \geq 2.5$ 定义为剪跨比较大。图 2(c)展示了具备非典型剪压破坏特征的试件梁 S10

的照片。开始加载后,裂缝最初为跨中纯弯段的细小垂直裂缝,随后,梁剪跨段下部形成垂直裂缝并向腹部倾斜形成斜裂缝。斜裂缝数量少但开展迅速,短时间内便与该处的箍筋相交,其中一条发展为临界斜裂缝。伴随着荷载的增大,与临界斜裂缝相交的箍筋屈服,然后,临界斜裂缝迅速延伸至梁顶部集中加载点,加载点附近的混凝土剪压区面积很小,甚至不能形成剪压区,梁很快破坏。

## 3 试验结果分析

### 3.1 箍筋应变

每种破坏模式各选 2 根 SFCB 混凝土梁与 1 根钢筋混凝土梁,根据箍筋(与临界斜裂缝相交的应变较大的箍筋)应变片采集数据,绘制其荷载与箍筋应变的关系曲线,如图 3 所示。

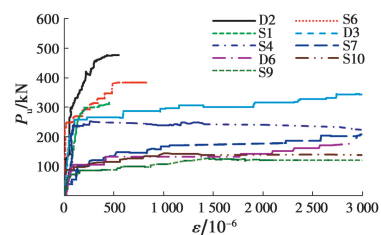


图 3 梁荷载-箍筋应变关系

Fig. 3 Load versus stirrup strain of beams

由图 3 可知,梁 S1、S6、D2(呈现斜压破坏)箍筋初始应变增长缓慢,达到破坏荷载后箍筋应变增长速率急剧增加,但是梁破坏时箍筋尚未屈服。这是因为斜压破坏模式下,混凝土承载贡献大,箍筋未承受较大的拉力,而当接近破坏荷载后,梁截面发生应力重分布,主要承载部位由混凝土转向箍筋,使得箍筋突然承受过大的拉力,因此,应变迅速增长。但由于混凝土已经承受了大部分荷载,梁破坏前的剩余荷载不足以使箍筋的总应变达到其屈服应变。

梁 S4、S7、D3(呈现剪压破坏)箍筋应变在临界斜裂缝形成前增长缓慢。这是因为临界斜裂缝形成前,相比于斜压破坏,箍筋虽承担了更大的应力,但大部分的荷载依旧由剪压区未开裂的混凝土承担。直至临界斜裂缝形成,截面发生应力重分布,梁内与临界斜裂缝相交的箍筋开始工作,应变迅速增长,直至箍筋屈服。

梁 S9、S10、D6(呈现非典型剪压破坏)开裂后箍

筋应变一直保持较大的增长速率,并迅速达到屈服应变。这是因为,非典型剪压破坏模式下,梁开裂后迅速形成临界斜裂缝。箍筋承担荷载比例很大,因而箍筋应变始终保持着持续增长的状态。临界斜裂缝形成后,箍筋很快屈服,试验梁宣告破坏,破坏荷载与开裂荷载较为相近。

### 3.2 纵筋筋材影响承载分析

图 4 为相同纵筋配筋面积情况下不同剪跨比时梁的受剪承载力与纵筋筋材种类的关系图。

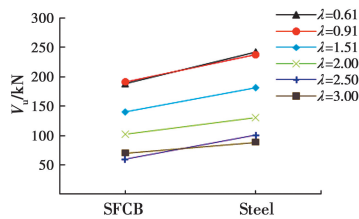


图 4 梁受剪承载力-纵筋筋材关系

Fig. 4 Shear capacity versus types of longitudinal bars

由图 4 可知, SFCB 混凝土梁受剪承载力整体低于钢筋混凝土梁, SFCB 筋材横向剪切强度低于钢筋, 作为纵筋受剪时发挥的销栓力小于钢筋。由表 2、表 3 可知, SFCB 筋材弹性模量小于钢筋, 进而导致梁体对斜裂缝的抑制作用较弱, 减小了斜裂缝间的咬合力(图 7 所示的两种梁的斜裂缝宽度图和图 12 所示的钢筋混凝土梁和 SFCB 混凝土梁的裂缝分布图可证), 因此, SFCB 梁受剪承载力相较于钢筋梁会有所降低。

### 3.3 纵筋应变

图 5 为不同剪跨比下试件梁的荷载-纵筋应变曲线, 所测纵筋应变均来自与临界斜裂缝相交的剪跨段纵筋。由图 5 可知, 刚开始加载时, 纵筋应变均增长缓慢, 混凝土开裂后, 发生应力重分布, 纵筋应变增长速率有所增加。试验中剪跨比较大的梁纵筋应变发展速度较剪跨比小的梁更为迅速。

同时, 对比图 5 中不同纵筋筋材试件梁可以发现, 钢筋试件梁剪跨段最终的纵筋应变均较小, 未达到屈服应变, 剪跨段纵筋均未屈服, 而相同剪跨比下的 SFCB 梁纵筋应变增长速率大于钢筋梁纵筋应变。这是由于 SFCB 弹性模量小于钢筋, 承受荷载后, 表现出了更大的应变变形, 试验所得应变数据也证实了这一点。所选 SFCB 梁中, 梁 S1、S8 纵筋最

终未屈服, 梁 S2、S10 在箍筋屈服后纵筋也达到屈服。

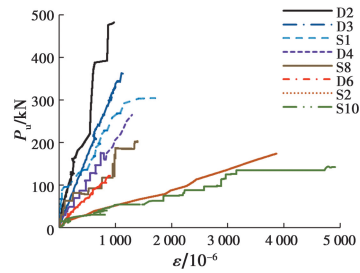


图 5 梁荷载-纵筋应变关系

Fig. 5 Load versus the strain of longitudinal bars

### 3.4 剪跨比影响承载分析

图 6 为不同纵筋筋材与配筋情况下梁的受剪承载力与剪跨比关系曲线。其中, D 代表钢筋混凝土梁试验组, S-1、S-2 和 S-3 分别代表纵筋为 3S10B85、3S10B35 和 2S10B17 的 SFCB 混凝土梁试件组。

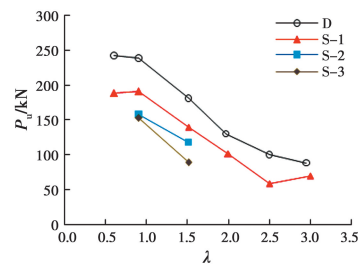


图 6 梁的受剪承载力-剪跨比关系

Fig. 6 Shear capacity versus shear span ratio

由图 6 可知, 试件梁受剪承载力随着剪跨比的增大整体上呈减小趋势。这是因为, 随着剪跨比的增大, 梁的破坏形态首先由以混凝土受压为主的斜压破坏形态转为由顶部受压区和斜裂缝骨料咬合控制的剪压破坏形态, 最后变为以混凝土抗拉强度控制为主的非典型剪压破坏, 混凝土对承载力的贡献随之变弱, 梁承载力下降。

当  $1.0 \leq \lambda \leq 2.5$  时, 剪跨比对受剪承载力影响较为明显, 承载力随剪跨比增大而减小, 而当  $\lambda < 1.0$  及  $\lambda > 2.5$  时, 剪跨比对受剪承载力影响较小。这是因为, 剪跨比过大时, 拉杆拱机理起主要作用, 受剪承载力受剪跨比的影响不大。而剪跨比过小时, 梁破坏形态则主要为以腹部混凝土受压控制为主的斜压破坏, 此时对承载力贡献较大的是混凝土强度, 剪跨比对受剪承载力的影响也不大。故剪跨

比过大或者过小时,承载力受剪跨比的影响较小。

从图 6 还可以看出,SFCB 筋混凝土梁的纵筋配筋率越大,受剪承载力越高(S-1>S-2>S-3)。同时还可得到与图 4 相同的结论:SFCB 筋混凝土梁的受剪承载力比钢筋混凝土梁低。

### 3.5 斜裂缝宽度规律

图 7 为试件 S9、S10、D5、D6 的荷载-最大斜裂缝宽度曲线。图中,各试件梁分别在 a、b、c、d 点箍筋屈服。

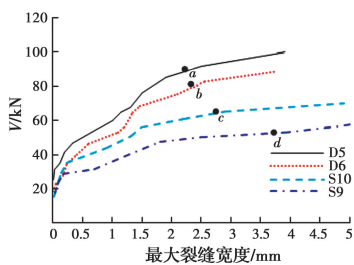


图 7 梁剪力-最大斜裂缝宽度关系

Fig. 7 Shear forces versus maximum crack width

由图 7 可知,试件梁刚开裂时,斜裂缝增长均较缓慢。随着施加荷载的增大,尤其是箍筋屈服后,斜裂缝宽度增长速度加快。SFCB 试件梁裂缝整体比钢筋试件梁裂缝发展迅速,产生的裂缝较钢筋试件梁更为宽大。由此可见,SFCB 作为受拉纵筋时,对混凝土梁裂缝宽度的约束力不及钢筋。这是因为,相对钢筋,SFCB 筋材弹性模量小,作为纵筋时,对斜裂缝开展宽度的抑制作用较弱。

## 4 SFCB 混凝土梁受剪承载力计算方法

### 4.1 桁架拱模型

试件梁受剪时,梁内纵筋、箍筋以及混凝土部分互相约束与平衡,构成了完整的受剪承载体系,因此,建立能够全面反映承载系统中各部分工作方式的受剪模型,是分析梁受剪承载力的前提。学者们通过理论推导与试验验证,提出多种可用于分析梁受剪过程的模型。其中,桁架拱模型为 Ichinose<sup>[15]</sup>结合欧洲与加拿大规范,建立起的较为完善的混凝土梁受剪承载模型,笔者基于该模型探究试件梁各部分承载工作方式,并推导 SFCB 混凝土梁的受剪承载力公式。

图 8 为试件梁桁架拱模型示意图,图中  $V_c$  为上

部混凝土所受剪力, $V_{sb}$ 为箍筋拉力, $V_d$ 为纵筋销栓力, $V_u$ 为支座处荷载产生的剪力。为简化计算,假设所有斜裂缝倾角均为  $\varphi$ 。梁受剪时,上部纵筋与上部受压混凝土共同组成受压上弦杆,下部纵筋成为受拉下弦杆,梁腹部混凝土与箍筋分别成为受压与受拉腹杆。集中点加载时,腹部混凝土基本呈拱状,将荷载由加载点传递至支座。

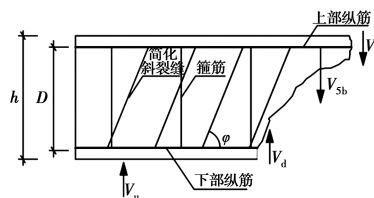


图 8 桁架拱模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of truss-arch model

### 4.2 模型受力分析

4.2.1 桁架拉杆 图 9 为桁架拉杆隔离体,AB 为桁架模型斜裂缝破坏面。桁架拉杆合力主要来自于箍筋产生的拉力和纵筋的销栓力。根据图中平衡关系可得

$$T = A_{sv} f_{yv} \frac{D \cot \varphi}{s} + V_d = \rho_{sv} f_{yv} D b \cot \varphi + V_d \quad (1)$$

式中: $T$ 为拉杆合力; $A_{sv}$ 为截面配箍面积; $\rho_{sv}$ 为配箍率; $f_{yv}$ 为箍筋抗拉强度; $D$ 为上下部纵筋距离; $s$ 为箍筋间距; $b$ 为试件梁截面宽度; $V_d$ 为纵筋销栓力。

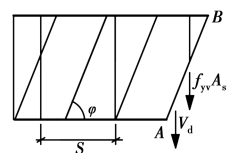


图 9 拉杆部分示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the tensile rods

4.2.2 桁架压杆 图 10 为桁架压杆隔离体,CD 为混凝土受压截面。桁架压杆合力主要来自于混凝土受压后产生的作用力。根据图中平衡关系,得到式(2)。

$$C = \sigma_c b h_0 \cos \varphi \sin \varphi \quad (2)$$

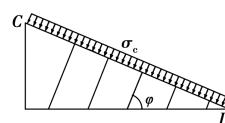


图 10 混凝土斜压杆部分示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the concrete compression rods



式中: $C$ 为压杆合力; $\sigma_c$ 为混凝土压应力; $h_0$ 为梁的有效高度。

平衡桁架拉压杆合力,即  $T=C$ ,可得

$$\rho_{sv} f_{yv} D b \cot \varphi + V_d = \sigma_c b h_0 \cos \varphi \sin \varphi \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{\rho_{sv} f_{yv} D b + V_d \tan \varphi}{b h_0 \sin^2 \varphi} \quad (4)$$

4.2.3 混凝土拱体 如果箍筋屈服的同时,混凝土便失去承载能力,则梁体极易发生脆性破坏,破坏无明显预兆。为规避这种情况,通常要求箍筋屈服即桁架受拉腹杆达到极限承载后混凝土依旧具有剩余承载强度,即式(5),以保证梁体具有一定的延性。

$$\sigma_k = v f_c - \sigma_c \quad (5)$$

式中: $\sigma_k$ 、 $f_c$ 分别为混凝土剩余承载强度和抗压强度; $v$ 为混凝土软化系数。由于混凝土受剪后产生软化现象,抗压强度降低,故需乘以软化系数。 $v$ 采用美国规范<sup>[16]</sup>中规定的数值,即  $v=0.6$ 。

桁架承载达到极限后,混凝土部分会形成拱体状继续承载,因此 $\sigma_k$ 亦可视作混凝土拱体的强度。

图 11 为梁构件混凝土拱体示意图。图中, $X_c$ 为混凝土拱剪压区高度。由图 11 平衡关系与几何关系可得

$$V_k = \sigma_k b \frac{x_c}{\cos \alpha} \sin \alpha \quad (6)$$

$$\tan \alpha = \frac{h - x_c}{x_c \tan \alpha + a} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4x_c h - 4x_c^2}}{2x_c} \quad (7)$$

式中: $V_k$ 为混凝土拱剪力; $a$ 为梁剪跨长度; $\alpha$ 为混凝土拱倾角。

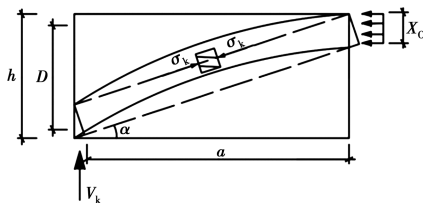


图 11 混凝土拱体示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the concrete arch

由于 SFCB 筋比钢筋弹性模量低,对梁裂缝开展的约束能力低,从而使得混凝土拱体顶部产生不同的剪压区高度。试验中,SFCB 梁斜裂缝和弯曲裂缝的平均延伸长度比其他参数相同的钢筋混凝土梁的长度长。因此,其剪压区高度较小(见图 12 两

种纵筋梁剪压区高度的对比)。经过对试件剪压区高度实测数据的统计,SFCB 梁与钢筋梁剪压区高度  $x_c$  的大小分别约为  $0.28h_0$  与  $0.35h_0$ 。

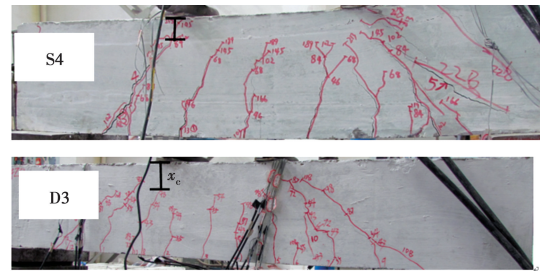


图 12 SFCB 试件梁与钢筋试件梁剪压区高度对比

Fig. 12 The compression depth of the beams with SFCB and steel bars

### 4.3 纵筋销栓力

关于销栓力  $V_d$ ,规范<sup>[17]</sup>和有关文献尚未有明确的计算公式,笔者结合试验数据分析销栓力的计算方法。

当混凝土梁受剪时,其受拉纵筋所起的作用类似于螺栓受力。但是由于纵筋较细长,一般不会发生纯剪切破坏(图 13(b)为文献<sup>[18]</sup>中的 FRP 筋纯剪切破坏试验照片),筋材无法完全发挥抗剪强度,而是发生介于弯曲和剪切之间的破坏状态(图 13(a)、(c))。

假定筋材发生理想的纯剪破坏(图 13(d)),则其销栓力可按式(8)计算。

$$V_{d1} = A_s f_v \quad (8)$$

式中: $f_v$ 为筋材的抗剪强度。关于  $f_v$  的取值,由塑性力学的强度理论可知,钢筋的抗剪强度约为抗拉强度的 0.58 倍。FRP 筋材抗剪强度约为抗拉强度的 0.10 倍<sup>[18]</sup>。SFCB 筋材由钢筋与 FRP 筋复合而成,按复合面积比例,SFCB 筋材抗剪强度可按式(9)计算。

$$f_{vs} = \frac{0.10 S_f f_{tf} + 0.58 S_b f_{tb}}{S_f + S_b} \quad (9)$$

式中: $S_f$ 、 $S_b$ 分别代表 SFCB 横截面上 FRP、钢筋的面积, $f_{tf}$ 、 $f_{tb}$ 分别表示 FRP、钢筋的抗拉强度。

若假定纵筋的销栓力等于纵筋受纯剪切时的破坏力,则根据所配置的受拉纵筋情况,由式(8)算得各根梁的销栓力  $V_{d1}$  如表 6 所示。从表 6 可见,该计算方法过高地估计了纵筋的销栓作用。

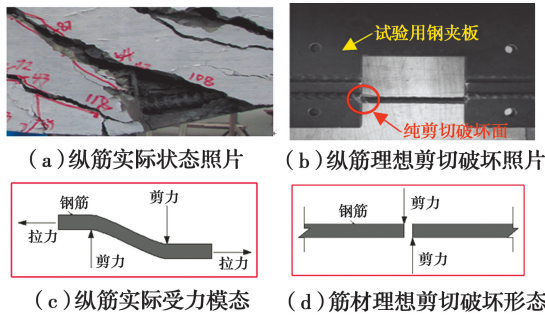


图 13 纵筋在梁中实际受力与理想剪切时的破坏形态

Fig. 13 Shear failure modes of the longitudinal bars

表 6 不同纵筋纯弯、纯剪销栓力计算结果

Table 6 The dowel action of the different longitudinal bar in bending and shearing

| 梁      | 受拉纵筋        | $f_v/\text{Mpa}$ | $V_{dt}/\text{kN}$ | $V_{d2}/\text{kN}$ |
|--------|-------------|------------------|--------------------|--------------------|
| S1~S2  | 2S10B17(15) | 206.95           | 73.14              | 1.54               |
| S3~S4  | 3S10B39(19) | 167.94           | 142.84             | 3.38               |
| S5~S10 | 3S10B85(22) | 151.53           | 172.81             | 4.86               |
| D1~D6  | 3Φ22        | 336.40           | 383.63             | 14.27              |

如图 13(a)所示,梁在发生斜截面受剪破坏时,纵筋不可避免存在弯曲变形。由于箍筋的约束作用,假定纵筋发生纯弯曲的两个弯曲点位于与箍筋相交处(如图 14 所示的 A、B 两点),忽略其他部位的弯曲变形,根据虚功原理,外力虚功(剪力  $V$  在虚位移  $\Delta$  上产生的虚功)等于内力虚功(筋材本身的弯曲塑性铰在转角上所作的虚功),因此有

$$2M\theta = V\Delta \quad (10)$$

又因为  $\theta \approx \tan \theta = \Delta/s$ ,故可得到

$$V_{d2} = nV = \frac{2nM}{s} = \frac{2nWf_y}{s} \quad (11)$$

式中: $V_{d2}$ 为纵筋本身的弯曲变形提供的销栓力; $n$ 为纵筋数量; $s$ 为箍筋间距; $W$ 为单根纵筋截面抵抗矩,取  $\pi d^3/32$ ; $f_y$ 为纵筋屈服强度。

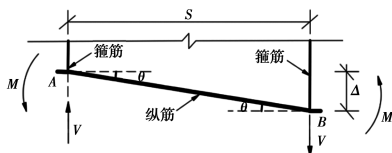


图 14 纵筋弯曲部分示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the bending part of longitudinal bar

由式(11)可以计算得到只考虑纵筋弯曲变形贡献的销栓力,将计算结果也列于表 6。由表 6 可见,

由此方法计算的销栓力结果又过于保守,低估了纵筋的销栓力。因此,纵筋实际受剪时的销栓力应假定为抗剪强度提供销栓力的部分贡献与筋材弯曲变形提供的销栓力之和,即

$$V_d = kV_{d1} + V_{d2} \quad (12)$$

式中: $k$ 为纵筋销栓力折减系数。

#### 4.4 受剪承载力计算公式

由上述分析可知,梁剪力由桁架杆与混凝土拱共同承担,即

$$V_{cal} = T + V_k \quad (13)$$

$$V_{cal} = \rho_{sv}f_{yv}Db \cot \varphi + V_d + \sigma_k b x_c \tan \alpha \quad (14)$$

其中:

$$\sigma_k = 0.6f_c - \sigma_c = 0.6f_c - \frac{\rho_{sv}f_{yv}Db + V_d \tan \varphi}{bh_0 \sin^2 \varphi} \quad (15)$$

$$V_d = V_{dt} + \frac{2nWf_y}{s} = kA_s f_v + \frac{2nWf_y}{s} \quad (16)$$

式中: $V_{dt}$ 为纵筋受剪部分实际贡献销栓力。

#### 4.5 销栓折减系数 $k$ 的取值

基于表 5 试验数据与式(14),反算得到所有试件梁的受剪部分实际贡献销栓力  $V_{dt}$ ,并根据其与筋材受剪承载力  $A_s f_v$  的关系对系数  $k$  进行回归求解。

图 15 为各试件梁  $V_{dt}$  与  $A_s f_v$  构成的散点图,图中线段斜率即表示纵筋销栓力与混凝土梁筋材本身受剪承载力的关系,即销栓折减系数  $k$ 。由图 15 可知,混凝土梁的  $k$  值取为 0.15 较为合适。

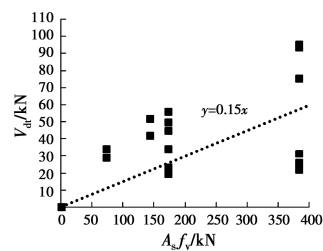


图 15 SFCB 梁和钢筋梁  $k$  值回归结果

Fig. 15 The result of  $k$  values of SFCB beams and reinforced concrete beams from regressive calculation

#### 4.6 斜裂缝倾角 $\varphi$ 的取值

如前所述, $\varphi$  可视为试件梁斜裂缝平均倾角。由式(1)可知,斜裂缝倾角越大,与斜裂缝相交的箍筋数量越少,箍筋拉力总和越小,故斜裂缝角度  $\varphi$  对梁的斜截面受剪承载力影响显著。



图 16 为 SFCB 试件梁 S8 与钢筋试件梁 D4(所述两根梁仅纵筋筋材不同)全梁裂缝对比图,图中蓝色虚线为两根梁的斜裂缝走向。由图 16 可以看出, SFCB 试件梁斜裂缝与构件纵轴的夹角略大于钢筋混凝土梁。造成这种现象的原因是, SFCB 筋弹性模量低于钢筋,在相同的荷载增量下,它对斜裂缝开展的约束小于纵向钢筋的约束作用,影响了混凝土主拉应力的方向,进而影响了斜裂缝的走向。

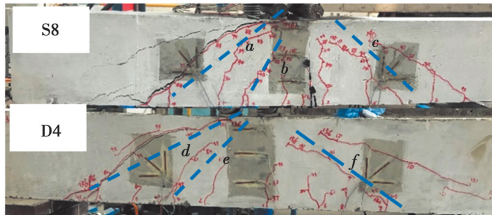


图 16 SFCB 试件梁与钢筋试件梁斜裂缝对比

Fig. 16 Diagonal cracks of the beams with SFCB and steel bars

变角桁架拱模型中只限制了受剪梁斜裂缝倾角的上限值为  $45^\circ$ ,并未给出斜裂缝倾角具体的求解方法<sup>[19]</sup>。根据文献[20],纵筋销栓力约束了斜裂缝的开展,两者之间的关系为

$$\tan \varphi = \frac{0.4\sigma_s A_s}{V_d} = \frac{0.4E_s \varepsilon_s A_s}{V_d} \quad (17)$$

式中: $V_d$ 为纵筋销栓力; $E_s$ 为纵筋弹性模量; $\sigma_s$ 为纵筋应力; $\varepsilon_s$ 为纵筋应变; $A_s$ 为纵筋配筋面积。

基于试验测得的纵筋应变数据以及计算得到的纵筋销栓力,在变角桁架拱理论限制的倾角范围内,计算得到 SFCB 与钢筋梁斜裂缝倾角均值分别为  $45^\circ$ 与  $40^\circ$ 。表 7 为所有试件梁斜裂缝倾角量测统计结果,由表 7 可知,式(17)计算所得倾角值与试验中梁的倾角大致相符。

表 7 斜裂缝倾角量测统计结果

Table 7 Measurement results of the diagonal cracks angles

| 编号 | 倾角 $\varphi/(^\circ)$ | 编号  | 倾角 $\varphi/(^\circ)$ |
|----|-----------------------|-----|-----------------------|
| S1 | 46.2                  | S10 | 51.3                  |
| S2 | 49.5                  | 均值  | 47.2                  |
| S3 | 42.8                  | D1  | 42.3                  |
| S4 | 50.5                  | D2  | 38.5                  |
| S5 | 45.7                  | D3  | 38.0                  |
| S6 | 47.3                  | D4  | 36.3                  |
| S7 | 49.7                  | D5  | 41.2                  |
| S8 | 46.3                  | D6  | 39.7                  |
| S9 | 43.0                  | 均值  | 39.3                  |

#### 4.7 公式验证

将式(14)计算结果与试验值同列于表 8。由表 8 可知,当梁满足  $1.0 < \lambda < 2.5$  时,式(14)的计算结果在整体略小于试验结果的基础上吻合较好,且基本反映了剪跨比对承载力的影响。因为此时梁多发生剪压破坏,传力机理明确,计算精度高。而当  $\lambda \leq 1.0$  时,式(14)计算结果则偏于保守,因为式(14)是在正常的剪压破坏基础上进行推导的,而剪跨比较小时,试件梁多发生斜压破坏,承载力高于正常的剪压破坏。而当  $\lambda \geq 2.5$  时,试件梁多发生非典型剪压破坏,受剪承载力低于正常的剪压破坏梁,破坏十分突然,因此,大剪跨比时理论结果比试验值稍大。

由此可见,式(14)用于剪跨比适中的 SFCB 及钢筋混凝土梁的受剪承载力计算时具备较高的安全性与适用性,可为后续的 SFCB 混凝土梁研究和应用提供一定的参考依据。

表 8 试件梁受剪承载力试验值与计算值对比

Table 8 Comparison of shear capacity of beams between experimental values and calculated values

| 梁   | $b/\text{mm}$ | $h/\text{mm}$ | $\lambda$ | $V_{\text{cal}}/\text{kN}$ | $V_{\text{exp}}/\text{kN}$ | $V_{\text{cal}}/V_{\text{exp}}$ |
|-----|---------------|---------------|-----------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| S1  | 150           | 250           | 0.91      | 110                        | 152.50                     | 0.72                            |
| S2  | 150           | 250           | 1.52      | 85                         | 89.00                      | 0.96                            |
| S3  | 150           | 250           | 0.91      | 119                        | 158.00                     | 0.75                            |
| S4  | 150           | 250           | 1.52      | 117                        | 117.50                     | 0.99                            |
| S5  | 150           | 250           | 0.61      | 155                        | 188.50                     | 0.82                            |
| S6  | 150           | 250           | 0.91      | 150                        | 191.00                     | 0.79                            |
| S7  | 150           | 250           | 1.52      | 132                        | 140.00                     | 0.95                            |
| S8  | 150           | 250           | 2.00      | 106                        | 101.50                     | 1.04                            |
| S9  | 150           | 250           | 2.50      | 89                         | 59.00                      | 1.50                            |
| S10 | 150           | 250           | 3.00      | 77                         | 70.00                      | 1.10                            |
| D1  | 150           | 250           | 0.61      | 206                        | 242.50                     | 0.85                            |
| D2  | 150           | 250           | 0.91      | 195                        | 238.50                     | 0.82                            |
| D3  | 150           | 250           | 1.52      | 163                        | 181.00                     | 0.90                            |
| D4  | 150           | 250           | 2.00      | 126                        | 130.00                     | 0.97                            |
| D5  | 150           | 250           | 2.50      | 110                        | 100.00                     | 1.10                            |
| D6  | 150           | 250           | 3.00      | 99                         | 88.50                      | 1.12                            |

注: $V_{\text{cal}}$ 为承载力公式计算值; $V_{\text{exp}}$ 为承载力试验值。

## 5 结论

基于 SFCB 筋和钢筋作为纵筋的混凝土梁受剪承载力对比试验,得出以下结论:

1) SFCB 混凝土梁受剪承载力整体低于钢筋混凝土梁。

2) 配箍率适中的 SFCB 筋混凝土梁受剪破坏时有 3 种破坏模式: 剪跨比较小( $\lambda \leq 1.0$ )时为斜压破坏, 剪跨比适中( $1.0 < \lambda < 2.5$ )时为剪压破坏, 剪跨比较大( $\lambda \geq 2.5$ )时为非典型剪压破坏。

3) SFCB 混凝土梁受剪承载力随着剪跨比的增大整体呈减小趋势。当  $\lambda < 1.0$  和  $\lambda > 2.5$  时, 剪跨比对受剪承载力影响较小, 而当  $1.0 \leq \lambda \leq 2.5$  时, 剪跨比对受剪承载力的影响则较为明显。

4) SFCB 筋混凝土梁受剪承载力随着纵筋配筋率的增大而增大, 多数试件梁破坏时, 受拉纵筋均未屈服。

5) 与钢筋混凝土梁相比, SFCB 混凝土梁承受荷载后会产生更宽更长的斜裂缝且裂缝发展速度整体快于钢筋混凝土梁, 由此可知, SFCB 混凝土梁受剪时所展现的斜截面抗裂性不及钢筋混凝土梁。

6) 基于桁架拱模型, 推导了混凝土梁受剪承载计算公式, 计算公式对剪跨比适中的 SFCB 混凝土梁受剪承载计算具有较高的安全性与适用性。

#### 参考文献:

- [1] 徐玉野, 王振, 林碧兰. CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土短柱的抗震性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 67-76.  
XU Y Y, WANG Z, LIN B L. Seismic performance of corroded reinforced concrete short columns strengthened with CFRP [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 67-76. (in Chinese)
- [2] 卢亦焱, 张号军, 石志龙. CFRP 与钢板复合加固混凝土梁斜截面试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 55-59.  
LU Y Y, ZHANG H J, SHI Z L. Experimental research on shear capacity of RC beams combination strengthened with CFRP and steel plate [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007(4): 55-59. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 牛建刚, 梁剑, 焦孟友. 塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(5): 92-98.  
NIU J G, LIANG J, JIAO M Y. Experimental study on flexural behavior of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete beams [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 92-98. (in Chinese)
- [5] LIGNOLA G P, JALAYER F, NARDONE F, et al. Probabilistic design equations for the shear capacity of RC members with FRP internal shear reinforcement [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 67: 199-208.
- [6] ISSA M A, OVITIGALA T, IBRAHIM M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(4): 04015083.
- [7] EL REFAI A, ABED F. Concrete contribution to shear strength of beams reinforced with basalt fiber-reinforced bars [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(4): 04015082.
- [8] ALAM M S, HUSSEIN A. Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams without stirrups [J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(4): 507-516.
- [9] 张智梅, 陈刚, 王卓. FRP 筋混凝土梁的抗剪承载力[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(2): 301-310.  
ZHANG Z M, CHEN G, WANG Z. Shear bearing capacity for concrete beams with FRP reinforcement [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2020, 26(2): 301-310. (in Chinese)
- [10] 刘宗全, 岳清瑞, 李荣, 等. 全 FRP 筋混凝土梁斜截面承载力研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(1): 109-115, 35.  
LIU Z Q, YUE Q R, LI R, et al. Research progress on shear strength of concrete beams reinforced with FRP rebars and stirrups [J]. Fiber Reinforced Plastics/

- Composites, 2017(1): 109-115, 35. (in Chinese)
- [11] BAKIS C E, NANNI A, TEROSKY J A, et al. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(6): 815-823.
- [12] 吴刚, 罗云标, 吴智深, 等. 钢-连续纤维复合筋(SFCB)力学性能试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 53-61.
- WU G, LUO Y B, WU Z S, et al. Experimental and theoretical studies on the mechanical properties of steel-FRP composite bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 53-61. (in Chinese)
- [13] 郑百林, 李伟, 张伟伟, 等. 增强混凝土中 FRP 包覆筋研究 II: 力学性能测试[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 79-83.
- ZHENG B L, LI W, ZHANG W W, et al. Mechanics behavior of FRP wrapped rebar reinforced concrete II: mechanic tests [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(3): 79-83. (in Chinese)
- [14] 罗云标, 吴刚, 吴智深, 等. 钢-连续纤维复合筋(SFCB)增强混凝土柱抗震性能初探[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(1): 14-20, 34.
- LUO Y B, WU G, WU Z S, et al. Numerical study on seismic performance of steel fiber composite bar(SFCB) reinforced concrete column [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(1): 14-20, 34. (in Chinese)
- [15] ICHINOSE T. A shear design equation for ductile R/C members [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21(3): 197-214.
- [16] Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-08 [S]. American Concrete Institute, 2008.
- [17] 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)
- [18] 姬瑞璞, 张宁远. 预应力状态下 FRP 筋材剪切性能的试验研究[J]. 中国市政工程, 2018(4): 101-104, 114.
- JI R P, ZHANG N Y. Experimental study on shear properties of FRP tendons under prestressed condition [J]. China Municipal Engineering, 2018(4): 101-104, 114. (in Chinese)
- [19] 端茂军, 魏洋, 李国芬, 等. 考虑混凝土贡献的修正变角桁架模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 42-49.
- DUAN M J, WEI Y, LI G F, et al. Modified variable-angle truss model considering contribution of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 42-49. (in Chinese)
- [20] ZARARIS P D, PAPADAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 733-742.

(编辑 王秀玲)