

## 聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力试验研究

张广泰<sup>†</sup>, 张路杨<sup>1</sup>, 邢国华<sup>1,2</sup>, 魏飞来<sup>1</sup>, 陆东亮<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为研究聚丙烯纤维混凝土梁在单调荷载作用下的受剪性能,考虑纤维掺量、剪跨比、配箍率和混凝土强度等级的影响,制作9根聚丙烯纤维混凝土梁,对其进行受剪性能试验。根据试验得到的破坏形态、荷载-挠度曲线和受剪承载力实测值,分析不同参数对试件的破坏形态、受剪承载能力、刚度和剪切延性的影响。研究表明:混凝土裂缝间的纤维可延缓裂缝发展、减小斜裂缝倾斜角度、提高构件受剪性能,且聚丙烯纤维混凝土梁较普通混凝土梁具有更好的承载能力、刚度和剪切延性。基于修正压力场理论,考虑了纤维混凝土抗拉强度对受剪承载力的贡献,建立了聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力计算公式,并通过国内外26组聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力试验数据对其进行验证,理论计算值与试验值之比的平均值为1.049,标准差为0.107,变异系数为0.102,二者吻合较好。

**关键词:**修正压力场理论;聚丙烯纤维;抗拉强度;受剪承载力

**中图分类号:**TU528.01

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Shear Capacity of Polypropylene Fiber Concrete Beams

ZHANG Guangtai<sup>†</sup>, ZHANG Luyang<sup>1</sup>, XING Guohua<sup>1,2</sup>, WEI Feilai<sup>1</sup>, LU Dongliang<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to study the shear performance of polypropylene fiber concrete beams under monotonic loading, nine polypropylene fiber concrete beams were constructed and tested considering the effect of fiber content, shear span ratio, stirrup ratio and concrete strength grade. According to the failure mode, load-deflection curve and shear bearing capacity measured by the test, the influence of different parameters on the failure mode, shear bearing capacity, stiffness and shear ductility of the specimen was analyzed. The results show that the fiber between concrete cracks can delay the development of cracks, reduce the inclination angle of diagonal cracks, and improve the shear performance of structures. The polypropylene fiber concrete beams had higher capacity, stiffness and shear ductility than the ordinary concrete beams. Based on the modified compression field theory, and considering the contribution of tensile strength of fiber concrete to the shear bearing capacity, a calculation formula of shear capacity for polypropylene fiber

\* 收稿日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51868073), National Natural Science Foundation of China(51868073)

作者简介:张广泰(1963—),男,新疆伊犁人,新疆大学教授

† 通讯联系人, E-mail: zgtlxh@126.com

concrete beam was established and verified by the test data of the shear capacity for 26 sets of polypropylene fiber concrete beams. The mean, standard deviation and coefficient of variation of the calculated-to-tested value were 1.049, 0.107 and 0.102, respectively, which indicated that these two results were in good agreement.

**Key words:** modified compression field theory; polypropylene fiber; tensile strength; shear capacity

近年来,为改善混凝土材料应变软化、脆性破坏等性能,国内外众多学者开始探索新型混凝土,尤其是聚丙烯纤维混凝土受到广泛关注.聚丙烯纤维的掺入可以增强混凝土的抗折强度、劈裂抗拉强度、抗压强度以及抗弯韧性,亦可提高混凝土的耐腐蚀、耐火和耐磨等性能<sup>[1-4]</sup>;此外,将聚丙烯纤维混凝土应用于梁构件中可提高构件的耐久性和受剪性能.目前,国内外众多学者对钢纤维、混杂纤维混凝土梁受剪性能进行了较多的研究<sup>[5-8]</sup>,但对于聚丙烯纤维混凝土梁受剪性能的研究极其匮乏.因此,研究聚丙烯纤维混凝土梁受剪性能,对其受剪承载力增强机理进行深入探讨,建立以一定的力学模型为基础的抗剪强度计算公式尤为重要,有利于聚丙烯纤维混凝土在实际工程中应用范围的拓展.

本文通过聚丙烯纤维混凝土梁受剪试验,探讨了试验梁的受剪机理,分析了纤维掺量、剪跨比、配箍率和混凝土强度等级对聚丙烯纤维混凝土梁受剪性能的影响;采用修正压力场理论,考虑纤维混凝土残余抗拉强度对受剪承载力的贡献,建立聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力计算方法,为聚丙烯纤维混凝土梁构件的抗剪设计提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验以纤维掺量、剪跨比、配箍率和混凝土强度等级为变化参数,共设计 9 根试验梁,模型的缩尺比为 1/2. 试验梁混凝土配合比见表 1, 试验梁尺寸及配筋见图 1. 试验采用 500 kN 的油压千斤顶通过分配梁对试件进行三分点加载,加载装置见图 2. 采用 BX120-3AA、BX120-6AA、BX120-100AA 型应变片测定剪跨区混凝土、箍筋和纵筋应变,利用 DH-3816 型静态应变测试系统收集数据.

表 1 混凝土设计配合比

Tab.1 Concrete design mix ratio					kg/m <sup>3</sup>
混凝土强度	水	水泥	砂	石	减水剂
C40	126	300	530	1 237	3.75
C60	146	429	526	1 150	5.36

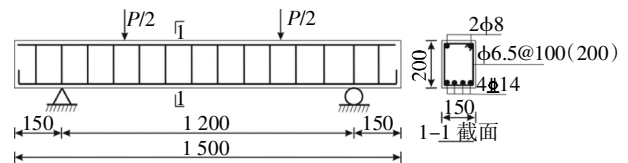


图 1 试验梁尺寸及配筋

Fig.1 Test beam size and reinforcement

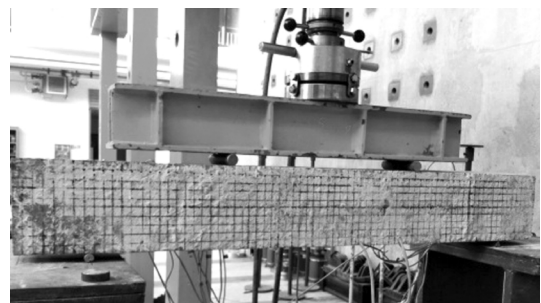


图 2 加载装置

Fig.2 Loading apparatus

### 1.2 试验材料

砂采用初步筛洗后的中砂,石子采用 5~20 mm 连续级配的卵石,水泥采用 P·O 42.5 水泥,减水剂选用聚羧酸系高效减水剂,水为生活用水,聚丙烯纤维选用润强丝抗裂防渗纤维 I 型.聚丙烯纤维的主要基本参数见表 2,钢筋的力学指标实测值见表 3,混凝土材料力学性能见表 4.

表 2 聚丙烯纤维基本参数

Tab.2 Basic parameters of polypropylene fiber

长度/mm	直径/ $\mu\text{m}$	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
19	33	0.91	530	>3.5

表3 钢筋力学性能实测值

Tab.3 Measured values of mechanical properties of steel bars

直径/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限抗拉强度 $f_u$ /MPa
6.5	340	415
10	400	510
14	470	630

表4 混凝土力学性能实测值

Tab.4 Measured values of mechanical properties of concrete

混凝土设计强度等级	编号	混凝土抗压强度/MPa	混凝土抗拉强度/MPa
	LC-0	46.2	3.77
C40	PLFC-1.5	47.5	3.96
	PLFC-3.0	55	4.64
-----			
	LC-0	65	3.97
C60	PLFC-1.5	68.9	4.32
	PLFC-3.0	76.8	5.25

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试验结果及破坏形态

试验梁的破坏形态以及受剪开裂荷载、受剪极限荷载详见表5,破坏形态见图3。

表5 试验结果一览表

Tab.5 List of test results

试件编号	$V_f$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\rho_{sv}$ /%	$\lambda$	混凝土强度	$V_{cr}$ /kN	$V_{exp}$ /kN	破坏形态
L01	3	0.22	2	C40	39.9	96.6	剪压
L02	0	0.22	2	C40	35.7	88.2	剪压
L03	1.5	0.22	2	C40	37.6	90.3	剪压
L04	3	0.22	1	C40	40.8	99.8	斜压
L05	3	0.22	3	C40	29.4	73.5	斜拉
L06	3	0.44	2	C40	42.0	100.8	剪压
L07	0	0.22	2	C60	46.2	105.0	剪压
L08	3	0.22	2	C60	60.4	117.6	剪压
L09	1.5	0.22	2	C60	52.5	107.1	剪压

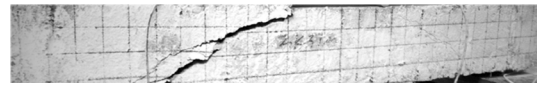
注: $V_f$ 为纤维掺量; $\rho_{sv}$ 为箍筋配箍率; $\lambda$ 为剪跨比; $V_{cr}$ 为受剪开裂荷载; $V_{exp}$ 为受剪极限荷载。

试验中 L04(剪跨比  $\lambda=1$ )的破坏形态为斜压破坏。加荷初期,在剪跨跨长范围内梁腹部出现数条近似平行的斜裂缝;继续加荷,斜裂缝宽度缓慢增大,

同时出现数条新裂缝,之后斜裂缝间纤维被拉断或拔出,最终混凝土被压溃,初加载至构件破坏过程中箍筋未屈服。



(a)剪压破坏



(b)斜拉破坏



(c)斜压破坏

图3 聚丙烯纤维混凝土梁破坏形态

Fig. 3 Failure form of polypropylene fiber lithium slag concrete beam

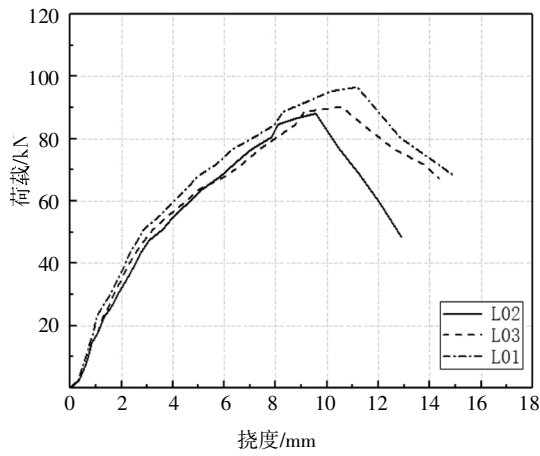
试验中 L01、L02、L03、L06、L07、L08 和 L09(剪跨比  $\lambda=2$ )的破坏形态为剪压破坏。加荷初期,首先在受弯区出现数条竖向裂缝,此时箍筋应变较小均在  $47\mu\epsilon \sim 99\mu\epsilon$  之间;继续加荷,箍筋受拉屈服,斜裂缝间纤维被拉断或拔出,竖向受拉箍筋承载力不再增加;继续加载,所加荷载由混凝土拱体承担,荷载通过混凝土拱体向支座传递,支座反力亦通过混凝土拱体向加荷处传递,混凝土拱体处于双向压应力作用下,最终被压溃,构件退出工作。其中加入纤维的试件相对于普通混凝土试件,在破坏过程中表现出明显的延性,且随着纤维掺量的增加延性越明显。

试验中 L05(剪跨比  $\lambda=3$ )的破坏形态为斜拉破坏。加载初始阶段,试验梁跨中首先出现细微竖向裂缝,混凝土处于受拉状态,此时箍筋应变较小;继续加荷,裂缝沿竖向缓慢延伸并在接近中和轴后便不再发展;之后在支座处出现细微竖向裂缝,继续加载竖向裂缝迅速向集中力作用处斜向延伸,纤维混凝土受拉破坏,箍筋随即屈服,构件宣告破坏。相对于剪压破坏的试件,斜拉破坏的试件裂缝较少,裂缝宽度较宽。

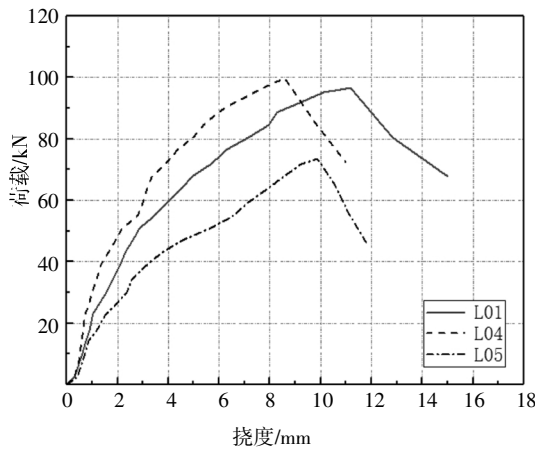
### 2.2 荷载-挠度曲线分析

试验梁的荷载-挠度曲线如图4所示。由图4可知,聚丙烯纤维混凝土梁的受力阶段大致可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。弹性阶段为开始加载至试验梁斜截面开裂阶段,在此阶段,试验梁的荷载与挠度呈现线性关系;弹塑性阶段为斜截面开裂至荷载达到极限承载力阶段,在此阶段,荷载与挠度

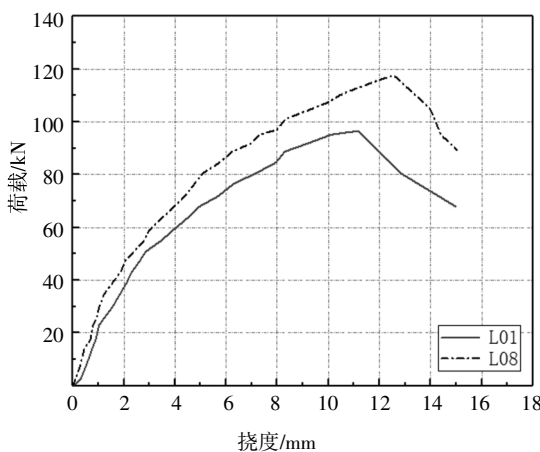
呈现非线性关系, 曲线斜率增大, 试验梁的刚度降低; 破坏阶段为荷载达到极限承载力至卸载阶段, 在此阶段挠度发展较快.



(a) 聚丙烯纤维掺量影响



(b) 剪跨比影响



(c) 混凝土强度影响

图4 试验梁的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of test beams

图4(a)展现聚丙烯纤维掺量对试验梁荷载-挠度曲线的影响. 由图可知: 聚丙烯纤维的掺入, 提高

了试验梁的开裂荷载和受剪极限荷载, 且使荷载-挠度曲线在破坏阶段下降较为平缓, 这是因为随着聚丙烯纤维掺量的增加, 混凝土的抗拉强度有所增大, 考虑抗剪因素时不可忽略, 因此使试验梁的开裂荷载和受剪极限荷载有所提高. 而且, 聚丙烯纤维混凝土梁在达到峰值荷载后仍有残余抗拉强度, 故其延性优于普通混凝土梁. 图4(b)展现剪跨比对试验梁荷载-挠度曲线的影响. L04的剪跨比为1, 试件破坏形态为斜压破坏, 对于斜压破坏的试件而言, 混凝土的抗压对试件抗剪的贡献较多, 故其荷载-挠度曲线的线性阶段较长, 但当其达到极限荷载之后混凝土退出工作, 曲线下下降斜率较陡, 表现出明显的脆性破坏. L01的剪跨比为2, 试件破坏形态为剪压破坏, 在破坏阶段荷载-挠度曲线下下降段斜率较缓, 说明剪压破坏试件的延性相对较好<sup>[9]</sup>. L05的剪跨比为3, 其破坏形态为斜拉破坏, 荷载-挠度曲线线性阶段最短, 在破坏阶段荷载-挠度曲线下下降段斜率最陡, 其脆性破坏形态最为明显. 整体而言, 随着剪跨比的增加, 试验梁的刚度逐渐减小, 且极限承载力亦随之减小, 这是因为剪跨比反映计算截面上正应力与剪应力的比值, 当剪跨比增大时, 截面有效惯性矩随之减小<sup>[10]</sup>, 因此使试验梁的刚度逐渐减小. 图4(c)展现混凝土强度对荷载-挠度曲线的影响. 由图可知, 随着混凝土强度的提高, 弹性阶段荷载-挠度曲线斜率随之增大, 即初始刚度随着混凝土强度的提高而增大, 其主要原因是随着混凝土强度的提高, 混凝土的弹性模量也随之增大, 从而使刚度增大.

### 2.3 斜裂缝宽度分析

图5为聚丙烯纤维掺量对试验梁斜裂缝宽度的影响. 由图可知, 普通混凝土梁试件的初裂荷载较小, 初始裂缝宽度大于纤维混凝土梁, 破坏时的裂缝宽度亦较大. 对于纤维混凝土梁而言, 随着纤维掺量的增加, 初裂荷载随之增大, 试件破坏时的宽度越小, 其主要原因是聚丙烯纤维在混凝土内三维乱向分布提高了混凝土的抗干缩性能, 使混凝土的初裂荷载提高, 裂缝出现后, 纤维桥联于裂缝两侧, 与裂缝两侧混凝土有较好的粘结作用, 使试件内发生应力重分布, 阻止裂缝的发展, 从而使裂缝的宽度减小, 纤维掺量越大, 横跨裂缝的纤维数量越多, 阻裂效果越明显. 当荷载达到一定程度时, 裂缝处的聚丙烯纤维部分被拉断或拔出, 退出工作, 对裂缝的限制作用减小.

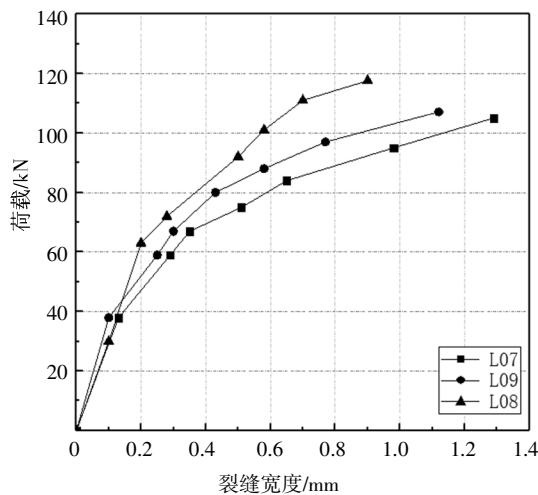


图5 聚丙烯纤维掺量对裂缝宽度影响

Fig. 5 Effect of polypropylene fiber content on crack width

## 2.4 剪切延性分析

本文引入剪切位移延性系数来评定聚丙烯纤维混凝土梁的剪切延性,初始屈服点采用能量法确定<sup>[1]</sup>,计算结果见表6.

表6 试验梁剪切位移延性系数

Tab.6 Shear ductility indexes of test beams

试件编号	屈服位移 $\Delta_y$ /mm	破坏位移 $\Delta_u$ /mm	延性系数 $u_1$
L01	4.88	11.23	2.30
L02	5.71	10.51	1.84
L03	6.32	11.95	1.89
L04	6.84	12.11	1.77
L05	3.38	8.42	2.94
L06	5.65	13.95	2.47
L07	6.60	12.01	1.82
L08	6.95	14.25	2.05
L09	6.97	13.04	1.87

### 2.4.1 聚丙烯纤维掺量的影响

由表6可知,在混凝土强度等级为C40和C60条件下,纤维掺量从 $0 \text{ kg/m}^3$ 增加到 $1.5 \text{ kg/m}^3$ 时,试验梁剪切延性系数分别增加了2.71%和2.75%;纤维掺量从 $1.5 \text{ kg/m}^3$ 增加到 $3 \text{ kg/m}^3$ ,试验梁剪切延性系数分别增加了21%和9.6%;纤维掺量从 $0 \text{ kg/m}^3$ 增加到 $3 \text{ kg/m}^3$ ,试验梁剪切延性系数分别增加了25%和12.6%。说明纤维混凝土梁的延性优于普通混凝土梁,随着聚丙烯纤维掺量的增大,试验梁的剪切延性系数随之增大。其主要原因是由于聚丙烯纤维跨越斜裂缝的桥联作用,在混凝土开裂时纤维承担了

混凝土释放的应力,限制了裂缝的发展,且聚丙烯纤维与混凝土有较好的粘结,缓解了破坏的突发性,使荷载在达到峰值后能相对缓慢回落,其剪切延性系数就较高。

### 2.4.2 剪跨比的影响

由表6可知,当剪跨比从1增加到2,试验梁剪切延性系数增加了29%;当剪跨比从2增加到3,试验梁剪切延性系数增加了27.8%。其主要原因是不同的剪跨比下,梁的破坏形态不同,承担荷载的方式不同。在斜压破坏情况下,主要由混凝土抗压承担荷载,与斜裂缝相交的箍筋较少且裂缝处纤维未起到作用,因此破坏时的延性较差;当剪压或斜拉破坏时,纤维和箍筋参与承担荷载,尤其是斜拉破坏参与承担荷载的纤维和箍筋更多,箍筋的作用更加明显,因此试验梁达到峰值荷载后,荷载能相对缓慢回落,其剪切延性系数就较高。

### 2.4.3 混凝土强度的影响

由表6可知,当聚丙烯纤维混凝土强度由55 MPa增加到76.8 MPa,试验梁剪切延性系数降低了12.2%。说明随着混凝土强度的增大,试验梁剪切延性系数反而降低。其主要原因为随着混凝土强度的提高,混凝土的孔隙变小,极限压应变减小,极限变形能力降低,延性变差。

## 2.5 影响抗剪强度的因素

混凝土强度等级对抗剪强度的影响。在同一剪跨比、配箍率和纤维掺量下,试件的抗剪能力随混凝土强度等级的提高而增大,然抗剪特征值( $V_{exp}/f_c b h_0$ )反而变小,说明随混凝土强度等级的提高抗剪能力虽有所提高,但提高的幅度较小。

纤维掺量对抗剪强度的影响。在同一剪跨比、配箍率和混凝土强度等级下,由于聚丙烯纤维在混凝土中呈三维乱向分布形成网架结构,限制了裂缝的发展,且聚丙烯纤维与水泥基材料具有较高的黏结性能,混凝土裂缝间的纤维承受一定的剪力,故试验梁的受剪承载力有所提高。图6为聚丙烯纤维掺量与受剪承载力关系图。由图可知,试验梁的受剪承载力随纤维掺量的增加而提高,其变化近似呈线性关系。当聚丙烯纤维掺量由 $0 \text{ kg/m}^3$ 增加到 $3 \text{ kg/m}^3$ 时,受剪极限荷载分别提高了10%和12%。

剪跨比对抗剪强度的影响。在同一配箍率、混凝土强度等级和纤维掺量下,剪跨比从1依次增加到2和3,聚丙烯纤维混凝土梁的破坏形态也依次从斜压转变成剪压和斜拉,聚丙烯纤维混凝土梁的受剪承载力亦随之下降。

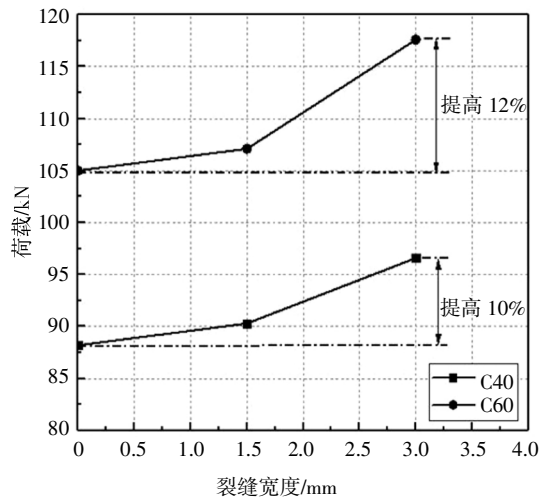


图 6 纤维掺量对受剪极限荷载的影响  
Fig. 6 Effect of fiber content on shear capacity

### 3 受剪承载力计算

#### 3.1 基于修正压力场理论的受剪承载力公式

##### 3.1.1 纤维混凝土裂缝间应力的平衡

本文采用修正压力场理论<sup>[12-13]</sup>进行聚丙烯纤维混凝土梁的受剪承载力分析,受剪模型如图 7 所示.引入纤维对混凝土构件的贡献,得到平面①与平面②的静力等效平衡方程式:

$$\rho_{sz} f_{sz} \cos \theta + f_1 \cos \theta = \rho_{sz} f_{socr} \cos \theta - f_{ci} \cos \theta + v_{ci} \sin \theta + v_f \sin \theta + \sigma_f \cos \theta \quad (1)$$

式中: $\rho_{sz}$ 为横向钢筋配筋率; $f_{sz}$ 为横向钢筋应力; $f_{socr}$ 为裂缝处的横向应力; $f_{ci}$ 为裂缝处的压应力; $v_{ci}$ 为裂缝处的剪应力; $v_f$ 为纤维沿斜截面的剪应力贡献; $\theta$ 为裂缝倾角, $\theta = 29^\circ + 7000\varepsilon_x$ .其中 $f_{ci}$ 和 $v_{ci}$ 的影响较小<sup>[14]</sup>,为简化计算,取 $f_{ci} = 0, v_{ci} = 0$ .假设混凝土开裂时箍筋达到屈服强度(即 $f_{sz} = f_{socr} = f_{sy}$ )故可得:

$$f_1 = v_{ci} \tan \theta + \sigma_f \quad (2)$$

根据文献[12]混凝土裂缝处的剪应力 $v_{ci}$ 为:

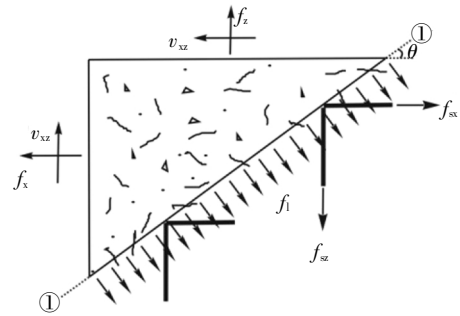
$$v_{ci} = 0.18 \sqrt{f'_c} / \left( 0.3 + \frac{24w}{d_g + 16} \right) \quad (3)$$

式中: $f'_c$ 为聚丙烯纤维混凝土圆柱体抗压强度,取立方体抗压强度的 0.86 倍; $d_g$ 为骨料的最大粒径; $w$ 为裂缝宽度, $w = \varepsilon_1 s_0$ , $\varepsilon_1$ 为垂直于裂缝的平均主拉应变, $\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta$ , $\varepsilon_x$ 为纵向应变,这里偏安全的取为 0.002<sup>[12]</sup>;裂缝间距 $s_0$ 取 300 mm<sup>[15-16]</sup>.

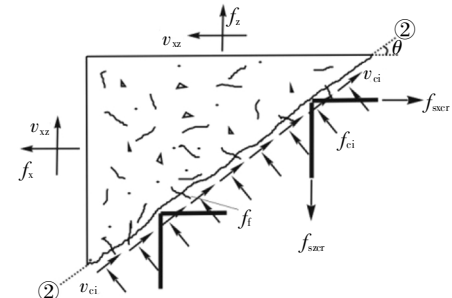
结合复合材料理论与纤维约束概念可得聚丙烯纤维混凝土拉应力 $\sigma_f$ 为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_f = (1 + \eta_0 \eta_1 \eta_2 V_f \frac{l_f}{d}) f_t \quad (4)$$

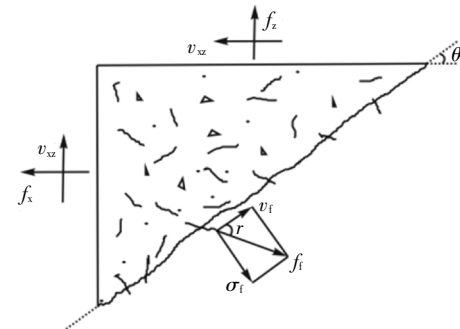
式中: $\eta_0$ 为纤维方向有效系数,纤维二维乱向分布时取 0.375,纤维三维乱向分布时取 0.2; $\eta_1$ 为纤维长度有效系数取 0.5; $\eta_2$ 为界面粘结系数取 1; $V_f$ 为纤维体积率; $l_f$ 为纤维长度; $d$ 为纤维等效直径; $f_t$ 为混凝土基体的抗拉强度.



(a) 计算平均应力



(b) 裂缝处的局部应力



(c) 单根纤维垂直与平行裂缝的应力分量

图 7 纤维混凝土梁裂缝处的计算平均应力、局部应力及单根纤维应力

Fig. 7 Calculation of average stress, local stress and single fiber stress at cracks in fiber concrete beams

##### 3.1.2 纤维混凝土梁裂缝间力的平衡

梁截面的剪应力由主拉应力 $f_1$ 和主压应力 $f_t$ 抵抗,根据应力莫尔圆得:

$$f_1 + f_t = v(\tan \theta + \cot \theta) = \frac{V}{b_w d_v} (\tan \theta + \cot \theta) \quad (5)$$

式中: $v$ 为混凝土剪应力; $V$ 为受剪承载力; $b_w$ 为构件宽度; $d_v$ 为有效受剪高度, $d_v = 0.9h_0$ , $h_0$ 为截面有效高度.

由竖向力的平衡得:

$$A_{sv}f_{sy} = (f_r \sin^2 \theta - f_l \cos^2 \theta)b_w s \quad (6)$$

式中: $A_{sv}$ 为箍筋面积; $f_{sy}$ 为箍筋屈服强度; $s$ 为箍筋间距.

由式(5)(6)可得:

$$V = f_l b_w d_v \cot \theta + \frac{A_{sv} f_{sv}}{s} d_v \cot \theta \quad (7)$$

### 3.2 受剪承载力计算对比与分析

基于上述受剪承载力计算公式对本文及文献[18-20]共26个试件进行受剪承载力计算并与试验值对比,以验证采用修正压力场理论计算聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力的准确性.各试件的理论计算结果、试验结果以及两者之间的比值见表7.由表

表7 受剪承载力计算结果与试验结果对比

Tab.7 Comparison of shear capacity between theoretical and experimental values

文献	试件编号	$T_l$ /kN	$V_{cal}$ /kN	$V_{exp}$ /kN	$\frac{V_{cal}}{V_{exp}}$
本文	L01	48.54	97.05	96.6	1.01
	L02	40.03	88.54	88.2	1.01
	L03	43.72	92.23	90.3	1.02
	L04	46.69	97.05	99.8	0.97
	L05	38.63	77.80	73.5	1.06
	L06	48.54	97.05	100.8	0.96
	L07	49.79	106.14	105.0	1.01
	L08	49.83	98.04	117.6	0.83
	L09	48.73	107.24	107.1	1.01
文献[18]	B0	47.08	128.10	110.0	1.16
	B0.5	48.21	129.23	116.0	1.11
	B0.7	48.60	129.62	122.0	1.06
	B0.9	49.01	130.03	125.0	1.04
	B1.1	49.42	130.44	126.0	1.03
	B1.3	49.84	130.86	123.0	1.06
	B1.6	50.51	131.53	121.0	1.09
文献[19]	LQA1	208.52	414.07	354.6	1.17
	LQA2	209.18	424.73	398.7	1.06
	LQA3	224.13	439.68	398.7	1.10
	LQA4	208.52	414.07	339.3	1.22
	LQA5	221.74	437.29	349.1	1.25
	LQA6	224.13	439.68	371.7	1.18
文献[20]	P1A	20.05	42.79	40.0	1.07
	P1B	20.05	31.42	35.0	0.90
	P2A	17.11	49.86	45.2	1.10
	P2B	27.11	27.11	35.0	0.77

注: $T_l$ 为聚丙烯纤维混凝土拉力; $V_{cal}$ 为受剪承载力计算值; $V_{exp}$ 为受剪承载力试验值.

7可知,聚丙烯纤维混凝土拉力对受剪承载力的贡献约占总剪力的30%~50%,混凝土开裂后混凝土基体不再承受剪力,但裂缝间的聚丙烯纤维混凝土存在残余抗拉强度继续参与抗剪,直至纤维被拔出或剪断才退出抗剪.试验梁计算值与试验值比值的平均值为1.049,标准差为0.107,变异系数为0.102.图8为理论计算值与试验值的对比结果.由表7和图8可知,采用基于修正压力场理论提出的公式计算聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力时,其计算值与试验值比值接近于1.0,且离散性较小,故适用于聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力计算.

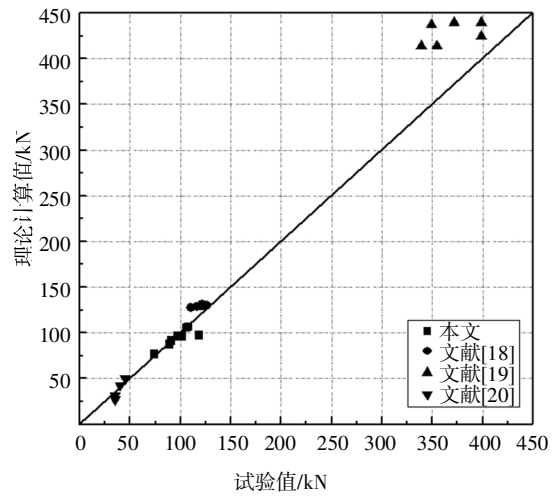


图8 受剪承载力计算值与试验值对比图

Fig.8 Comparison of calculated and experimental values of shear bearing capacity

## 4 结论

经过对聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力的试验验证与理论分析,得到以下结论:

1)聚丙烯纤维的掺入能有效地抑制试验梁裂缝的发展,减小斜裂缝倾斜角度,提高梁的剪切延性和极限承载力,与普通混凝土梁相比具有较好的变形能力和承载能力.

2)聚丙烯纤维混凝土拉力对受剪承载力的贡献较大,约占总剪力的30%~50%,不应忽略.

3)基于修正压力场理论建立的聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力计算公式,能合理分析和预测聚丙烯纤维混凝土梁的受力机理和受剪承载力,为完善聚丙烯纤维混凝土梁抗剪设计提供了理论参考.

## 参考文献

- [1] WANG D H, JU Y H, SHEN H, *et al.* Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 197(4): 464—473.
- [2] QIN Y, ZHANG X W, CHAI J R, *et al.* Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 194(1): 216—225.
- [3] 梁宁慧, 钟杨, 刘新荣. 多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗弯韧性试验研究 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 48(10): 2783—2789.
- LIANG N H, ZHONG Y, LIU X R. Experimental study of flexural toughness for multi-scale polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(10): 2783—2789. (In Chinese)
- [4] REZA A, HAMID P B, SHAHRAM J M. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165(8): 631—638.
- [5] 张发盛, 石云兴, 石敬斌, 等. 基于修正压力场理论的钢纤维混凝土无腹筋梁受剪承载力计算 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(2): 292—298.
- ZHANG F S, SHI Y X, SHI J B, *et al.* Shear capacity calculation of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups based on modified compression field theory [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(S2): 292—298. (In Chinese)
- [6] 刘胜兵, 徐礼华. 混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(3): 29—39.
- LIU S B, XU L H. Shear behavior of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(3): 29—39. (In Chinese)
- [7] YASEEN Z M, TRAN M T, KIM S, *et al.* Shear strength prediction of steel fiber reinforced concrete beam using hybrid intelligence models: A new approach [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 244—255.
- [8] VAKILI S E, HOMAMI P, ESFAHANI M R. Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. *Structures*, 2019, 20(4): 290—297.
- [9] 汪梦甫, 徐亚飞, 陈红波. PE-ECC 短梁抗剪性能研究[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 42(11): 10—16.
- WANG M F, XU Y F, CHEN H B. Research on shear behavior of PE-ECC short beam[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(11): 10—16. (In Chinese)
- [10] 姚大立, 贾金青, 余芳. 有腹筋预应力超高强混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 42(3): 23—30.
- YAO D L, JIA J Q, YU F. Experimental study of the shear capacity of prestressed ultra-high reinforced concrete beams with stirrups [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(3): 23—30. (In Chinese)
- [11] 金凌志, 李月霞, 祁凯能, 等. 高强钢筋 RPC 筒支梁抗剪承载力及延性研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(S1): 209—214, 225.
- JIN L Z, LI Y X, QI K N, *et al.* Research on shear bearing capacity and ductility of high strength reinforced RPC beam [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(S1): 209—214, 225. (In Chinese)
- [12] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. *ACI Structural Journal*, 1986, 83(2): 219—231.
- [13] VECCHIO F J, COLLINS M P. Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using modified compression field theory [J]. *ACI Structural Journal*, 1988, 85(3): 258—268.
- [14] 高丹盈, 史科. 基于 MCFT 理论的钢筋纤维混凝土梁柱节点受剪性能计算方法[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 41—48.
- GAO D Y, SHI K. Calculation method for shear behavior of steel fiber reinforced concrete beam-column joints based on modified compression field theory [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 41—48. (In Chinese)
- [15] COLLINS M P, MITCHELL D, ADEBAR P, *et al.* A general shear design method[J]. *ACI Structural Journal*, 1996, 93(1): 36—45.
- [16] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 17—18.
- GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 17—18. (In Chinese)
- [17] 陈金平. 聚丙烯纤维对混凝土抗拉性能的影响研究 [D]. 青岛: 中国石油大学储运与建筑工程学院, 2005: 84—85.
- CHEN J P. Study on influence of polypropylene fiber on the tensile properties of concrete [D]. Qingdao: College of Pipeling and Civil Engineering, China University of Petroleum, 2005: 84—85. (In Chinese)
- [18] 胡飞玲. 聚丙烯纤维混凝土梁的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2004: 22—34.
- HU F L. Experimental study of polypropylene fiber reinforced concrete beam [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering, Zhejiang University, 2004: 22—34. (In Chinese)
- [19] 刘平. 配置 HRB500 钢筋混凝土梁的试验及理论研究 [D]. 天津: 河北工业大学土木工程学院, 2012: 29—35.
- LIU P. Experimental and theoretical research on beams with HRB500 high strength steel bars [D]. Tianjin: College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, 2012: 29—35. (In Chinese)
- [20] JR S F, HANAI J B D. Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams[J]. *Cement & Concrete Composites*, 1997, 19(4): 359—366.