

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704005



# 高强钢筋活性粉末混凝土梁的 抗剪承载力试验

李月霞<sup>1</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 金凌志<sup>3</sup>

- (1. 桂林理工大学 博文管理学院, 广西 桂林 541004;  
2. 桂林市建筑设计研究院, 广西 桂林 541002;  
3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 在对称集中荷载作用下,对 8 根高强钢筋活性粉末混凝土矩形截面简支梁进行抗剪试验,研究剪跨比、配箍率、纵筋配筋率对试验梁抗剪承载力的影响规律.结果表明:高强钢筋活性粉末混凝土构件的破坏形态与普通钢筋混凝土构件相似,高强钢筋和活性粉末混凝土具有较好的协同工作能力;在无腹筋情况下,随剪跨比的提高,梁抗剪承载力随纵筋率的增大抗剪承载力略有提高,但变形能力降低;采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》计算高强钢筋活性粉末混凝土梁的抗剪承载力值比实验值小,说明规范计算结果偏于保守,建议采用适用于纤维高强钢筋活性粉末混凝土的抗剪计算公式,使理论计算结果和实测值更接近.

**关键词:** 高强钢筋; 活性粉末混凝土; 简支梁; 抗剪承载力; 变形性能

**中图分类号:** TU 312.1 TU 317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)04-0464-06

## Experimental Study on Shear Capacity of High Strength Reinforced Reactive Powder Concrete Beam

LI Yuexia<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, JIN Lingzhi<sup>3</sup>

- (1. Bowen College of Management, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
2. Institute of Guilin Building Design and Research, Guilin 541002, China;  
3. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to study the influence of shear span ratio, stirrup ratio and longitudinal reinforcement ratio on the shear capacity, 8 rectangular simple beams of high strength reinforced reactive powder concrete (HSR-RPC) were investigated. The results show that damage form of HSRRPC beams is similar to normal reinforced concrete beams, the co-work between high strength steel and reactive powder concrete is benign; for the beam without stirrups, with the increase of shear span ratio, shear capacity reduces; with the increase of longitudinal reinforcement ratio, the shear capacity improves slightly, but deformation capacity reduces. The calculation value of HSRRPC shear capacity by GB 50010-2010 *Concrete Structure Design Code* is less than the experimental one, which shows that the code calculation is conservative. The shear capacity calculation formula of HSRRPC is proposed, which makes the theoretical calculation result more close to the experimental value.

**Keywords:** high strength steel; reactive powder concrete; simply supported beam; shear strength; deformation capacity

收稿日期: 2016-11-06

通信作者: 金凌志(1959-),女,教授,主要从事新型混凝土材料结构的研究. E-mail:jlz-5904@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368013); 广西高等学校特色专业及课程一体化建设项目(GXTSZY232)

活性粉末混凝土(RPC)是一种力学性能长期保持稳定,早期强度高、韧性高和体积稳定性好,在恶劣条件下寿命长的高性能混凝土<sup>[1-4]</sup>.近年来,国内外对高强钢筋 RPC 构件斜截面抗剪性能等问题已有一定的研究.Vool 等<sup>[5]</sup>通过改变预应力的大小、钢纤维的种类及掺量,对 7 根预应力 RPC 无腹筋梁进行抗剪承载力试验研究.Cladera 等<sup>[6]</sup>基于软化桁架理论模型的基础上,对 18 根高强混凝土梁进行了抗剪破坏试验.金陵志等<sup>[7-8]</sup>通过对 6 根高强钢筋 RPC 简支梁进行试验,分析剪跨比、配箍率、纵筋配筋率和纵筋钢筋等级等因素对试验梁其破坏形态、剪切延性和受剪承载力的影响.郑辉等<sup>[9]</sup>对预应力高性能活性粉末混凝土(RPC)薄壁箱梁进行了荷载试验,研究配箍率、剪跨比等参数对 RPC 箱梁抗剪性能的影响.如何充分发挥高强钢筋、高强混凝土的强度,如何控制在正常使用状态下的变形能力,以及如何估算构件的承载能力及理论研究等仍需要更深入的探讨.本文主要通过 8 根高强钢筋 RPC 简支梁,探讨剪跨比、配箍率、纵筋率等参数对破坏形态、抗剪承载力、变形能力等的影响.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验设计了 3 批共 8 根高强钢筋 RPC 矩形截面梁,其截面尺寸( $b\times h$ )均为 150 mm $\times$ 250 mm,梁长 2 200 mm,钢筋锚固长度为 200 mm,计算长度为 1 800 mm.混凝土强度等级为 C120,试验梁中间不设架立筋.RPC 的原材料有 P. O42.5 硅酸盐水泥、硅粉(粒度为 0.1~0.2  $\mu\text{m}$ , $\text{SiO}_2$  质量分数为 94.7%以上)、石英砂(颗粒呈球形,级配连续良好,平均粒度为 0.4~0.6 mm)、硅微粉(平均粒度为 0.1  $\mu\text{m}$ ,火山灰效应较好)、粉煤灰(形状呈球形,粒径小于 100  $\mu\text{m}$ )、高效减水剂(淡黄色透明液体,减水率为 25%)、钢纤维(表面细圆形镀铜,直径为 0.22 mm,长度为 12~15 mm,长径比为 55~68)和水.考虑到 RPC 的活性在高温热水才能得到更好的发挥,试验梁均在 65  $^{\circ}\text{C}$  的高温热水中养护 7 d.为防止受弯破坏先于受剪破坏,采用 HRB 500 纵筋,各试验梁参数如表 1 所示.表 1 中: $\varphi$  为钢纤维体积掺量; $\lambda$  为剪跨比; $\rho_v$ 、 $\rho$  分别为配箍率和纵筋配筋率.

表 1 试验梁的主要设计参数  
Tab.1 Main design parameters of test beam

试件编号	$\varphi/\%$	$\lambda$	配筋情况			
			箍筋	$\rho_v/\%$	纵筋	$\rho/\%$
L1-1	2	1.51	C6@450	$\approx 0$	4D25	6.58
L1-2	2	2.26	C6@450	$\approx 0$	4D25	6.58
L1-3	2	3.02	C6@450	$\approx 0$	4D25	6.58
L2-1	2	2.26	C6@450	$\approx 0$	3D25	4.43
L2-2	2	2.26	C6@450	$\approx 0$	5D25	8.04
L3-1	2	2.26	C6@225	0.17	4D25	6.58
L3-2	2	2.26	C6@150	0.25	4D25	6.58
L3-3	2	2.26	C6@65	0.58	4D25	6.58

1.2 加载方式和测量方案

试验采用静力加载方法,加载装置和主要测点布置如图 1 所示.加载设备采用液压加载系统,最大加载为 100 t.通过分配型钢梁在试验梁上的对称位置得到两个等值、同步的集中力.为确保设备工作正常,在正式加载前先进进行预压,然后分级缓慢加载,直至破坏.

测试内容有如下 4 个主要方面.1) 挠度量测.挠度测点采用位移计,通过位移传感器测量梁两端支座处下沉和跨中的挠度变形,获取试验梁的荷载-挠度曲线.2) 钢筋应变量测.箍筋应变通过沿斜裂缝最可能出现处粘贴的箍筋应变片,读取每级荷载下的应变值,测试箍筋对抗剪承载能

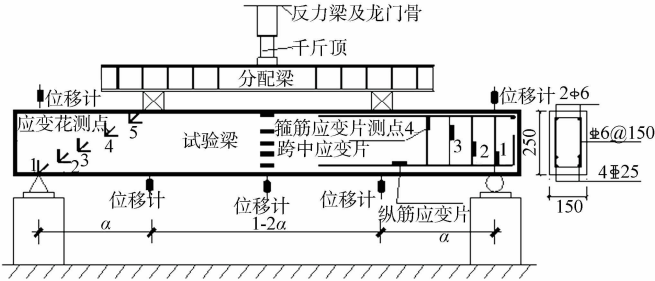


图 1 试验加载装置和测点布置示意图

Fig.1 Loading setup and measuring point arrangement

力.3) 混凝土应变量测.混凝土应变通过沿斜裂缝最可能出现处粘贴的混凝土应变片,读取每级荷载下的应变值,测试混凝土对抗剪承载能力.4) 裂缝观测.通过肉眼观察梁的破坏形态,记录裂缝的分布、走向、宽度、长度等.

力的贡献;纵筋应变通过梁跨中位置纵筋上粘贴电阻应变片,估算梁的受弯承载力. 3) 裂缝量测. 用裂缝比对卡及放大镜观察和测量每级荷载作用下的裂缝发展情况,以及裂缝宽度、裂缝间距和斜裂缝倾角. 4) 荷载量测. 记录梁开裂荷载和极限抗剪承载力.

1.3 材料性能的试验

通过 RPC 的力学性能试验,得到其立方体强度( $f_{cu}$ )、棱柱体强度( $f_c$ )、抗折强度( $f_t$ )、劈裂强度( $f_i$ )和弹性模量( $E$ )分别为 127.13,117.20,25.80,9.19,4.09 MPa. 通过钢筋的拉拔试验,得到钢筋型号为 D25 和 C6 的屈服强度分别为 522.3,441.0 kN,极限抗拉强度分别为 676.80,635.85 kN,弹性模量均为 0.2 TPa.

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

高强钢筋 RPC 矩形截面简支梁的破坏特征与普通梁相似. 当荷载较小时,主要由 RPC 的抗拉强度抵抗剪力,混凝土表面未出现裂缝;当加载到 200 kN 左右时,剪跨区梁底出现微小的受剪裂缝. 随着荷载的增加,剪跨区受剪裂缝发展为弯曲斜裂缝;荷载继续增加,斜裂缝沿梁高方向不断延伸,裂缝宽度不断加大,新的斜裂缝也随之出现. 最终因混凝土被压酥剥落而使梁的承载力迅速下降而退出工作.

2.2 破坏形态

高强钢筋 RPC 梁斜截面的破坏形式与普通混凝土梁略有不同. RPC 中掺入适量的钢纤维可以改善 RPC 破坏特征,起到桥接裂缝,阻碍裂缝发展的作用. 高强钢筋 RPC 斜截面的破坏形式主要分为剪压破坏、斜压破坏、弯剪破坏. 高强钢筋 RPC 梁一般不发生斜裂缝,一旦出现,裂缝宽度迅速发展,开裂荷载与极限荷载相近. 试验梁的破坏形态,如图 2 所示.

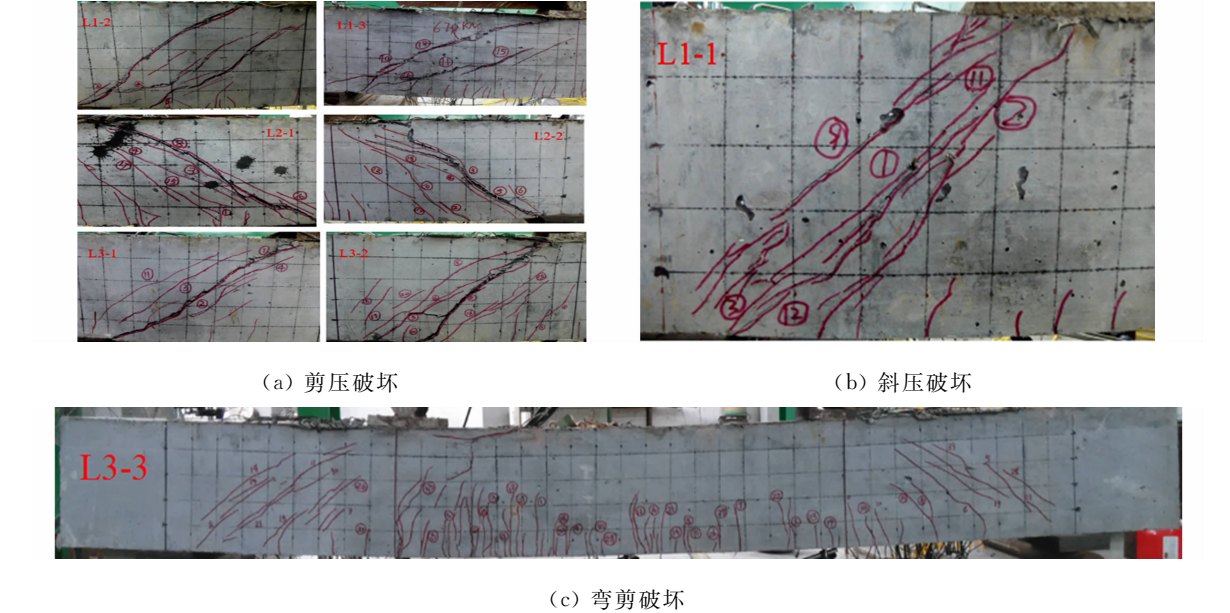


图 2 试验梁的破坏形态

Fig. 2 Failure mode of test beam

由图 2(a)可知:发生剪压破坏的为无腹筋梁 L1-2,L1-3,L2-1,L2-2 和有腹筋梁 L3-1,L3-2,L3-3. 在加载过程中,试验梁跨中首先出现弯曲裂缝,继而在剪跨区出现斜裂缝,最后因斜裂缝宽度过大而破坏. 在有腹筋梁中,进入下降段时箍筋屈服,纵筋均不屈服,沿主斜裂缝混凝土和受压区混凝土被压碎而宣告整根梁失去承载能力而破坏.

由图 2(b)可知:试验中,L1-1 剪跨比为 1.51,试验梁腹部斜裂缝间混凝土出现较多的细小裂缝,从而表现出一定的斜压破坏特征. 由图 2(c)可见:由于 L3-3 配置了较多的箍筋而发生弯剪破坏,其余发生斜截面的剪压破坏. L3-3 发生斜截面弯曲破坏时,不仅部分屈服箍筋,而且剪跨区靠近加载点处的纵筋也达到屈服. 试验梁将要破坏时,荷载基本不变,梁挠度持续大幅增加.

2.3 承载能力分析

承载能力试验结果,如表 2 所示.由表 2 可知:剪跨比、配箍率对梁的斜截面开裂荷载影响不大,开裂荷载在 100 kN 左右.这是因为抗剪斜裂缝主要由混凝土弯曲拉应力  $\sigma$  和剪切应力  $\tau$  共同作用所构成的主拉应力  $\sigma_{tp}$  超过混凝土的抗拉强度  $f_t$  所致.但是,纵筋率对斜截面开裂荷载有一定的影响,无腹筋梁 L2-1( $\rho=4.43\%$ ),L1-2( $\rho=6.58\%$ ),L2-2( $\rho=8.04\%$ )的开裂荷载分别为 70.4,110.0,110.9 kN.这是因为纵筋增大时,斜裂缝出现的高度得到更好的控制,使得贡献抗拉强度的混凝土面积增加,故而初始斜裂缝荷载增大.

表 2 承载能力试验结果  
Tab.2 Test results of bearing capacity

试件编号	$\lambda$	$\rho_v/\%$	$\rho/\%$	$P_{cr}/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_r/\text{mm}$	$u_\Delta/\text{mm}$	破坏类型
L1-1	1.51	0	6.58	101.00	656.00	1.103	21.137	斜压破坏
L1-2	2.26	0	6.58	110.00	356.00	2.438	21.391	剪压破坏
L1-3	3.02	0	6.58	108.00	335.00	2.261	29.989	剪压破坏
L2-1	2.26	0	4.43	70.40	300.50	2.882	14.161	剪压破坏
L2-2	2.26	0	8.04	110.90	425.00	1.872	14.233	剪压破坏
L3-1	2.26	0.17	6.58	100.70	419.25	1.913	21.234	剪压破坏
L3-2	2.26	0.25	6.58	100.25	430.85	2.209	21.436	剪压破坏
L3-3	2.26	0.58	6.58	100.25	426.25	1.962	26.850	弯剪破坏

剪跨比( $\lambda$ )对抗剪承载力( $f$ )的变化,如图 3 所示.由图 3 可知:RPC 梁的抗剪承载力与普通梁相似,随着剪跨比的增大而减小.L1-1( $\lambda=1.51$ ),L1-2( $\lambda=2.26$ ),L1-3( $\lambda=3.02$ ) 在配箍率为 0% 时,剪跨比由 1.51 提高到 3.02,承载力降低了 49%.这是因为支座反力及加载点处集中荷载产生的竖向压应力会削弱梁的主拉应力,从而提高抗剪承载力.剪跨比较小时,这种削弱较为明显,因而承载力提高较大;剪跨比较大时,竖向压应力削弱梁主拉应力的能力较小,承载力提高较小.

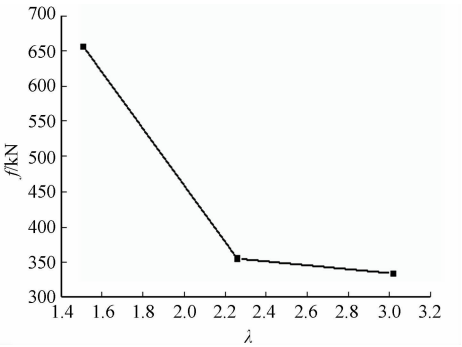


图 3 剪跨比与承载力的关系曲线  
Fig.3 Curve between shear span ratio and bearing capacity

抗剪承载力随纵筋配筋率的变化,如图 4 所示.由图 4 可知:随着纵筋率增大,RPC 梁的抗剪承载力增大,无腹筋梁 L2-1( $\rho=4.43\%$ ),L1-2( $\rho=6.58\%$ ),L2-2( $\rho=8.04\%$ ) 在剪跨比相同情况下,配筋率由 4.43% 增加到 8.04%,抗剪承载力提升了 41%.究其原因这是由于纵筋的销栓作用.纵筋可有效地控制弯曲裂缝宽度和高度,使贡献抗剪作用的混凝土面积增大,从而提高抗剪承载力.纵筋率越高,RPC 梁的销栓作用就越大,抗剪承载力就越高.

抗剪承载力随配箍率的变化规律,如图 5 所示.由图 5 可知:L1-2( $\rho_{sv}=0\%$ ),L3-1( $\rho_{sv}=0.17\%$ ),L3-1( $\rho_{sv}=0.25\%$ ) 和 L3-3( $\rho_{sv}=0.58\%$ ) 的极限承载力分别为 356.00,419.25,430.85,426.25.L3-1 与

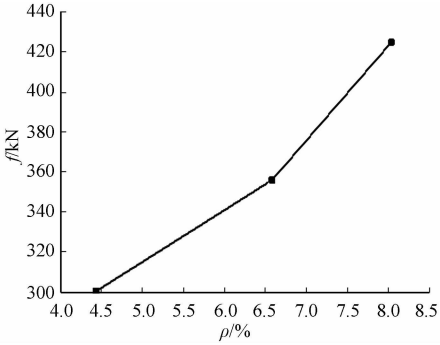


图 4 纵筋配筋率与承载力的关系曲线  
Fig.4 Curve between reinforcement ratio and bearing capacity

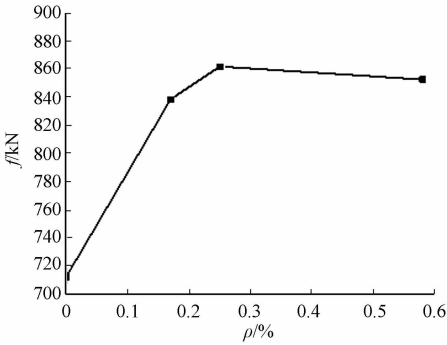


图 5 配箍率与承载力的关系曲线  
Fig.5 Curve between stirrup ratio bearing capacity and



L1-2 相比,其抗剪承载力提高 15%左右,说明配置箍筋可以有效地提高梁的斜截面抗剪承载力.斜截面的抗剪承载力随配箍率的增大而增大,但增加的幅度并不明显.特别注意的是,L3-3 随配箍率的增大,斜截面承载能力反而略有降低.这是因为在发生剪切破坏的同时也发生了弯曲破坏,箍筋有个别屈服,纵筋也屈服,导致了梁的承载力降低.

### 3 RPC 梁抗剪计算公式

#### 3.1 我国规范抗剪承载力计算方法

目前,国内尚无计算 RPC 梁抗剪承载力的规范,RPC 简支梁的抗剪承载力计算参照混凝土规范,其计算公式为

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} (A_{sv} / S) h_0. \tag{1}$$

式(1)中: $V_{cs}$ 为试验梁抗剪承载力设计值; $\alpha_{cv}$ 为斜截面受剪系数,对集中荷载作用下,对集中荷载  $\alpha_{cv}$ 取  $1.75/(\lambda+1)$ ,当  $\lambda$  小于 1.5,取 1.5,当  $\lambda$  大于 3 取 3; $f_t$  为混凝土的劈裂抗拉强度; $b$  为混凝土截面宽度; $h_0$  为混凝土截面有效高度; $f_{yv}$  为箍筋抗拉强度, $A_{sv}$  为箍筋面积, $s$  为箍筋间距.

混凝土规范公式计算值与试验值对比,如表 3 所示.表 3 中: $V_{cal}$ , $V_{exp}$  分别为计算和试验所得剪力值.由表 3 可知:按我国规范的计算值与试验值比为 0.44,计算值严重偏离试验值,表明采用我国混凝土规范计算 RPC 斜截面抗剪承载力远小于实测值,计算结果偏于保守.究其原因,主要在于规范未考虑 RPC 中钢纤维的抗剪贡献,在研究其抗剪承载力时,钢纤维对斜裂缝的增强、阻裂作用不容忽视.此外,我国混凝土规范主要适用于 C80 以下混凝土,对高强 RPC 构件的抗剪承载力是低估了.

表 3 混凝土规范公式计算值与试验值对比

Tab. 3 Comparison between calculation results of code formula and test results

试件编号	$\lambda$	$\rho_v / \%$	$\rho / \%$	$f_t / \text{MPa}$	$h_0 / \text{mm}$	$V_{cal} / \text{kN}$	$V_{exp} / \text{kN}$	$V_{cal} / V_{exp}$
L1-1	1.51	0	6.58	9.19	205.0	197.03	656.00	0.300
L1-2	2.26	0	6.58	9.19	205.0	151.70	356.00	0.426
L1-3	3.02	0	6.58	9.19	205.0	123.02	335.00	0.367
L2-1	2.26	0	4.43	9.19	221.5	163.91	300.50	0.545
L2-2	2.26	0	8.04	9.19	199.0	147.26	425.00	0.346
L3-1	2.26	0.17	6.58	9.19	205.0	184.72	419.25	0.441
L3-2	2.26	0.25	6.58	9.19	205.0	201.23	430.85	0.467
L3-3	2.26	0.58	6.58	9.19	205.0	266.00	426.25	0.624

#### 3.2 考虑 RPC 桥架和阻裂作用的塑性理论抗剪承载力计算方法分析

RPC 构件开裂后跨越裂缝的钢纤维仍能承担一定的荷载,抑制斜裂缝的开展,塑性变形能力增加.Zhang<sup>[10]</sup>,Vool 等<sup>[5]</sup>和陈彬等<sup>[11]</sup>基于塑性理论提出了钢纤维 RPC 梁的抗剪承载力计算公式.即

$$V_u = \left[ \frac{1}{2} \mu f_c \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta} + \frac{1}{2} (1 - \mu) f_t \frac{1 + \cos \beta}{\sin \beta} + \rho_{sv} f_{yv} \text{ctg} \beta \right] b h. \tag{2}$$

由 $\partial(V_u/bh)/\partial\beta=0$ ,可解得

$$\cos \beta = \frac{\mu f_c - (1 - \mu) f_t - 2 \rho_{sv} f_{yv}}{\mu f_c + (1 - \mu) f_t}, \quad \sin \beta = \frac{\sqrt{(\mu f_c - \rho_{sv} f_{yv})((1 - \mu) f_t + \rho_{sv} f_{yv})}}{\mu f_c + (1 - \mu) f_t}.$$

$\beta$  值必须满足条件: $\text{artg}(h/a) \leq \beta \leq \pi/2$ .

钢纤维混凝土梁的塑性系数<sup>[12]</sup>的计算公式为

$$\mu = 1 - 0.009 f_{cu} + 0.155 P, \quad P = 100 \rho.$$

式(2)中: $V_u$  为梁抗剪承载力; $\mu$  为塑性系数; $f_c$ , $f_t$  分别为混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度; $\beta$  为塑性屈服面与水平轴夹角,满足  $\text{artg}(h/a) \leq \beta \leq \pi/2$ ; $f_{yv}$  为箍筋抗拉强度; $\rho_{sv}$  为配箍率; $f_{cu}$  为立方体强度.

塑性理论公式的计算值与试验值对比,如表 4 所示.由表 4 可知: $V_{cal}/V_{exp}$  的均值为 1.191,标准差为 0.291 8,变异系数为 0.245 0,抗剪极限承载力的塑性理论计算结果与试验结果较为相近,可见塑性理论计算结果与试验值吻合良好.塑性剪切理论能较好地反映混杂纤维 RPC 梁的剪切破坏特征,可用于预测纤维 RPC 梁的抗剪承载力.

表 4 塑性理论的计算值与试验值对比

Tab. 4 Comparison between test values and calculated values by plastic theory

试件编号	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$\rho_{sv}/\%$	$\rho_f/\%$	$f_{yv}$ /MPa	$f_{cu}$ /MPa	$V_{cal}$ /kN	$V_{exp}$ /kN	$V_{cal}/V_{exp}$
L1-1	117.2	9.19	0	6.58	441	127.13	406.00	656.00	0.619
L1-2	117.2	9.19	0	6.58	441	127.13	406.00	356.00	1.140
L1-3	117.2	9.19	0	6.58	441	127.13	406.00	335.00	1.212
L2-1	117.2	9.19	0	4.43	441	127.13	613.13	300.50	1.351
L2-2	117.2	9.19	0	8.04	441	127.13	615.35	425.00	0.955
L3-1	117.2	9.19	0.17	6.58	441	127.13	520.62	419.25	1.242
L3-2	117.2	9.19	0.25	6.58	441	127.13	566.11	430.85	1.314
L3-3	117.2	9.19	0.58	6.58	441	127.13	721.59	426.25	1.693

4 结论

- 1) 高强钢筋 RPC 矩形截面简支梁的破坏形态与普通梁略有不同,主要为剪压破坏、斜压破坏和弯剪破坏,RPC 中掺入的钢纤维能改善剪跨比较大的无腹筋梁的破坏形态。
- 2) 随着剪跨比的增大,RPC 梁的抗剪承载力减小,而变形加快;而随着纵筋率增大,RPC 梁的抗剪承载力随之增大,但过高的纵筋配筋率,对提高梁的变形能力效果不明显;RPC 梁抗剪承载力随着配箍率的增大而增大,但配置过多的箍筋,承载力反而下降.这是因为在发生剪切破坏的同时也发生了弯曲破坏,个别箍筋屈服,纵筋也屈服,导致了梁的承载力降低。
- 3) 按现行国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》计算的高强钢筋 RPC 梁抗剪承载力与实测值存在较大差异;但按塑性理论抗剪承载力公式,承载力计算值与试验值吻合良好,变异系数小。

参考文献:

[1] DUGAT J,ROUX N,BERNIER G. Mechanical properties of reactive powder concretes[J]. Materials and Structures,1996,29(4):233-240.

[2] YANG S L,MILLARD S G,SOUTSOS M N,*et al.* Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(6):2291-2298.

[3] 李建平.超细矿粉活性粉末混凝土性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:3-14.

[4] 郑文忠,吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报,2015,36(10):44-58.

[5] VOOL J Y L,FOSTER S J,GILBERT R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete girders without stirrups[J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2006,4(1):123-132.

[6] CLADERA A,MARI A R. Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear[J]. Engineering Structures,2005,27(10):1519-1527.

[7] 金凌志,祁凯能,曹霞. 高强钢筋活性粉末混凝土简支梁受剪性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(8): 108-113.

[8] 金凌志,李月霞,祁凯能,等. 高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力及延性研究[J]. 工程力学,2015,32(增刊 1):209-214,225.

[9] 郑辉,方志,刘明. 预应力活性粉末混凝土箱梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015(6):51-63.

[10] ZHANG J P. Diagonal cracking and shear strength of reinforced concrete beams[J]. Magazine of Concrete Research,1997,49(178):55-65.

[11] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2007:39-44.

[12] 赵军,高丹盈. 钢纤维增强钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力塑性极限分析[J]. 力学季刊,2005,26(2):235-240.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)