文章编号：1674－9057(2016)03－0488－05 doi:10.3969/j.issn.1674－9057.2016.03.011

HRB500级纵筋钢纤维RPC梁受剪抗裂性能试验

金凌志[1]，温 晴[1]，杨 蕊[2]，李文兴[1]

(1. 桂林理工大学 a. 广西岩土力学与工程重点实验室；b. 土木与建筑工程学院，广西 桂林 541004；
2. 浙江长征职业技术学院，杭州 310023)

摘 要：为了研究HRB500级纵筋钢纤维活性粉末混凝土梁的受剪抗裂性能，对4根不同钢纤维体积率的RPC简支梁进行试验研究，并将试验数据与断裂力学裂纹张开位移(COD)公式计算结果进行比对分析。研究结果表明：钢纤维能够较好地阻碍无腹筋RPC梁受剪斜裂缝的开展，其开裂荷载和极限荷载随钢纤维掺量增加而提高；最大斜裂缝宽度随钢纤维掺量的增加而减小，但钢纤维掺量超过2%以后这种影响不再明显；运用裂纹张开位移公式计算HRB500级纵筋钢纤维RPC梁的受剪初始裂纹具有较好的可信度。

关键词：HRB500级钢筋；RPC梁；钢纤维掺量；裂纹张开位移原理；抗裂性能；斜裂缝宽度

中图分类号：TU528.572 **文献标志码：**A

0 引 言

活性粉末混凝土(reactive powder concrete,RPC)是一种由DSP(densified system containing ultra-fine particles)材料与纤维材料相结合的水泥基复合材料，具有较高的强度、优异的韧性和耐久性，在RPC中掺入钢纤维，使RPC的卓越性能锦上添花，被广泛地应用于实际工程中。1911年，美国的Graham首先正式将钢纤维掺合到混凝土中，并初步验证了它的优越性[1]；1963年J P Romualdi和G B Batson针对钢纤维混凝土提出“纤维间距理论”的概念，运用线弹性断裂力学，阐述了钢纤维对混凝土裂缝产生和延伸的影响机理。至此之后，钢纤维混凝土开始由理论阶段转入工程实用研究阶段[2－5]。安明喆等[6]通过对不同钢纤维体积率活性粉末混凝土基本力学性能的试验分析，归纳出钢纤维体积率大于1.75%后，轴心抗拉强度、劈裂抗拉强度随钢纤维掺量增加呈线性增长，且劈裂抗拉强度与钢纤维掺量特征值有关等结论。张宏战[7]对钢纤维高强混凝土梁和剪力墙连梁进行抗剪试验研究，分析各因素对试验梁剪切强度和试验梁延性的影响，并得出适合其配比的钢纤维高强混凝土梁的抗裂强度和承载力计算公式等。但是国内外有关钢纤维掺量对HRB500级纵筋活性粉末混凝土梁受剪抗裂性能的研究目前还比较鲜见，尤其是斜裂缝宽度的研究更少。本文在高性能的RPC梁中配置高强度的HRB500级纵筋，对4根不同钢纤维掺量的HRB500级纵筋RPC简支梁展开受剪试验，运用断裂力学的裂纹张开位移(COD)原理计算初始裂纹，并将试验数据和计算结果进行比对分析，探讨钢纤维HRB500级纵筋RPC梁的受剪抗裂性能。

1 试验概况

试验设计4根HRB500级纵筋活性粉末混凝土简支梁，RPC的材料配合比见表1。普通硅酸盐水泥强度等级为52.5，硅粉平均粒度为0.1～0.2 μm，SiO_2含量94.7%以上；石英砂颗粒呈球形，级配连续良好，平均粒度0.4～0.6 mm；硅微粉平均粒度0.1 μm，火山灰效应较好；高效减水剂为淡黄色透明液体，减水率25%；细短钢纤，细圆形，表面镀铜，直径0.22 mm，长度12～15 mm，

收稿日期：2015－11－11
基金项目：国家自然科学基金项目（51368013）；广西矿冶与环境科学实验中心项目（KH2013ZD008）
作者简介：金凌志（1959—），女，教授，研究方向：预应力与新型混凝土材料结构，jlz-5904@163.com。
引文格式：金凌志，温晴，杨蕊，等. HRB500级纵筋钢纤维RPC梁受剪抗裂性能试验［J］. 桂林理工大学学报，2016，36(3)：488－492.

表 1　RPC 配合比

Table 1　RPC mix ratio

材料	52.5 硅酸盐水泥	石英砂	硅灰	石英粉	硅微粉	10 mm 钢纤维	小组分	减水剂	水
配合比	1	0.9	0.35	0.2	0.35	0.2	0.1	0.015	0.25

注：钢纤维为体积比，其他均为质量比。

长径比 55 ~ 68，抗拉强度不小于 2 000 MPa。

试验梁截面 $b \times h = 150\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$，跨度 1 800 mm，试验梁为无腹筋梁，剪跨比均为 2.25，配置 4 ⌀25 纵筋，钢纤维体积含量分别为 0、1%、2% 和 3%，具体参数见表 2。

试验采用四分点方式进行加载，加载设备采用量程为 100 t 的液压千斤顶加载系统，主要由储油箱、高压油泵、液压加载器、测力装置和阀门等配件通过高压油管连接而成，试验装置如图 1 所示。

2　试验现象分析

脆性破坏特征是当前混凝土材料不可回避的缺陷，活性粉末混凝土去除了粗骨料，配置材料的颗粒比较细小，基体内部骨料之间的咬合力随之降低，也可能产生脆性破坏。在活性粉末混凝土中掺入一定量的钢纤维，可以增强骨料间的粘结力，填充其内部缺陷和空气气泡，减少界面上的初始微裂缝，有效提高抗裂性能，延缓裂缝的产生[8]；斜裂缝发生后，钢纤维发挥“桥架”作用，承担部分剪力，抑制斜裂缝的开展；钢纤维的掺入还可以增强 RPC 与高强纵向钢筋之间的握裹力，提高纵向钢筋的销栓作用。

2.1　开裂荷载和极限荷载

钢筋混凝土弯剪构件的斜裂缝通常分为弯剪型和腹剪型两种斜裂缝：弯剪型裂缝由梁底部弯曲拉应力引起的竖向裂缝发展而来；腹剪型裂缝主要由梁中和轴附近的剪应力产生。观察试验现象：加荷初期，试验梁一般都是在纯弯段受力纵筋位置处首先出现受弯垂直微裂缝，这种裂缝微小而间距大，沿高度方向发展非常缓慢；荷载增加

表 2　试验梁配筋参数

Table 2　Reinforcement parameters of test beams

试件编号	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	钢纤维体积率/%	有效高度 h_0/mm	剪跨比 λ	受拉钢筋
JZL1	93.4	80.80	4.78	0	200	2.25	4 ⌀25
JZL2	107.03	96.27	6.71	1	200	2.25	4 ⌀25
JZL3	127.13	117.2	9.19	2	200	2.25	4 ⌀25
JZL4	131.1	101.23	9.17	3	200	2.25	4 ⌀25

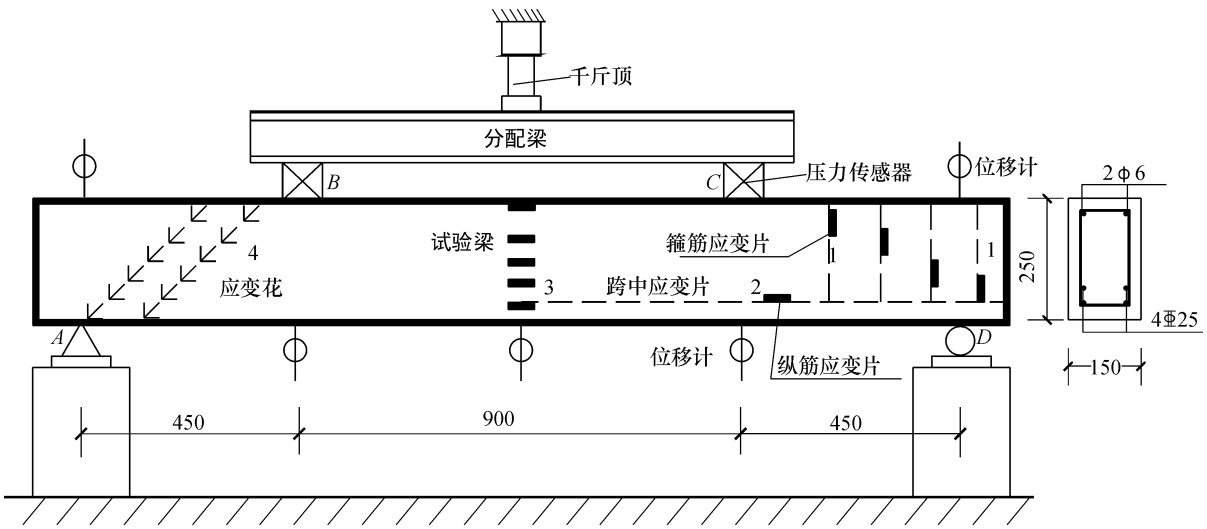


图 1　试验梁装置及截面配筋图

Fig. 1　Test beam device and section reinforcement

到一定阶段后，在剪跨区出现垂直微裂缝，并随着荷载的增加发展为弯剪斜裂缝。图 2 为钢纤维体积率 – 开裂荷载和极限荷载影响曲线。

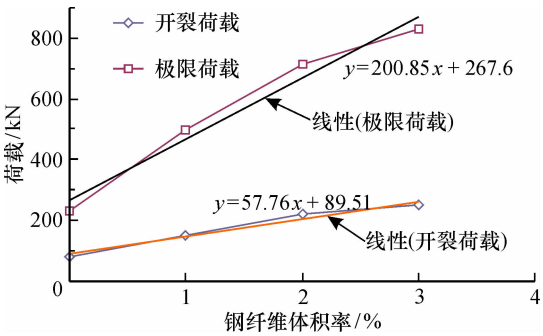


图 2 钢纤维体积率 – 开裂荷载和极限荷载影响曲线

Fig. 2 Effect of steel fiber volume fraction on cracking load and ultimate load

可以看出：钢纤维体积率从 0 增加到 1%、2% 和 3%，RPC 梁极限荷载的增长速率比开裂荷载增长速率快。其原因可能是在加载初期，剪跨区腹部的主拉应力主要由 RPC 承担，钢纤维体积掺量对开裂荷载的影响不大，随着荷载的增加，RPC 开裂并逐渐退出工作，拉应力逐渐由钢纤维和纵向钢筋承担，荷载超过开裂荷载后，横跨裂缝的钢纤维有效阻止了裂缝的发展，协同纵向钢筋一起承担拉应力，尚未出现裂缝的区域也由于钢纤维的存在，裂缝的开展得到有效抑制。所以，增大钢纤维掺量能够大大改善构件的抗裂性能，明显提高试验梁的极限承载能力。

2.2 斜裂缝宽度

试验表明，随着钢纤维体积掺量的增大，试验梁的开裂荷载呈明显递增的趋势，钢纤维体积率不仅影响RPC梁的开裂荷载值，而且对其斜裂缝宽度的影响也比较明显。图 3 为试验梁的荷载 – 最大斜裂缝宽度关系曲线图，对比 4 根梁的斜裂缝发展趋势可以发现，试验梁的荷载 – 最大斜裂缝宽度关系曲线与普通钢纤维混凝土梁的曲线类似，斜裂缝的发展也分为两个阶段，不同的是由于 RPC 基材优越的抗裂性能，使得其开裂荷载延迟，斜裂缝开展速度减缓。

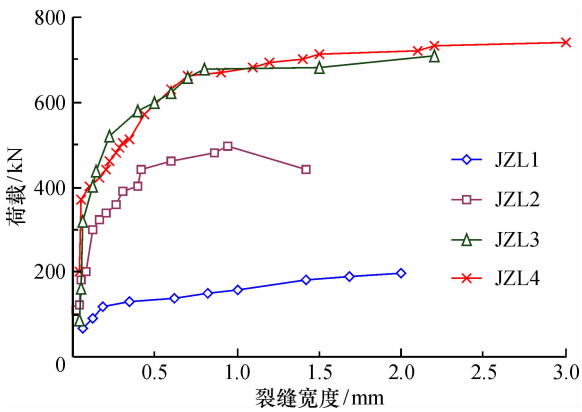


图 3 RPC 梁荷载 – 斜裂缝宽度关系曲线

Fig. 3 Effect of loading on the crack width of RPC beam

（1）稳定发展阶段：掺入钢纤维后，在开裂荷载后的一段时间内，JZL2 ~ 4 的斜裂缝宽度一直呈线性缓慢增长，曲线斜率随钢纤维体积率的增加而变大；而未掺钢纤维的 JZL1 出现斜裂缝后，裂缝宽度曲线没有产生明显的竖直上升段，说明钢纤维具有明显的阻裂作用，可以大大提高试验梁的开裂荷载。钢纤维体积率 2% 以上的 JZL3、JZL4 相对于钢纤维体积率 1% 的 JZL2 承载能力提高明显，但是 JZL3 和 JZL4 的曲线变化不大，表明钢纤维体积掺量达到 2% 以后，即使继续增加钢纤维也不能明显提高试验梁的承载能力，但最终的斜裂缝宽度则随钢纤维掺量的增加而增大。

（2）急速扩展阶段：加载至极限荷载的 75% ~ 85% 时，所有试验梁剪跨区的最大斜裂缝宽度几乎都达到 0.6 mm 以上；随着荷载的增大，裂缝迅速开展，开裂部位的钢纤维被拔出或拉断，钢纤维所提供的抗拉能力下降；裂缝宽度达到 1.5 mm 后，裂缝处的大部分钢纤维完全被拔出并逐渐退出工作，RPC 表面的骨料咬合力降低甚至丧失；继续增大荷载，斜裂缝急速发展，试验梁迅速破坏。

3 裂纹张开位移计算

3.1 裂纹张开位移计算公式

经典断裂力学理论原本主要应用于金属材料断裂领域，20 世纪 60 年代后 Neville[9]、Kaplan[10] 等将断裂力学理论应用于混凝土结构领域，以研究其断裂性能和韧度。该理论认为：在外力作用的初期，混凝土构件的裂纹尖端存在着较大的塑性变形，裂纹侧面会随着外荷载的不断增加而逐渐张开。这种由于构件受到外荷载作用，在裂纹的尖端且垂直于裂纹方向所产生的位移叫做裂纹张开位移（crack opening displacement，COD），用 δ 表示。其计算原理是：把构件受力作用后垂直于裂缝尖端的张开位移 δ 作为参量，把裂纹失稳扩展时的临界张开位移 δ_c 作为构件的断裂韧性指标，当 $\delta = \delta_c$ 时就

可以确定构件发生大范围断裂时构件应力值和裂纹尺寸间的关系，即裂纹张开位移法（简称 COD 法）。裂纹在 a 处的裂纹张开位移计算式为

$$\delta = \frac{8\sigma_s a}{\pi E}\ln\sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_s}\right), \tag{1}$$

式中：a—1/2 裂纹长度；σ_s— 混凝土抗拉强度；σ— 外加应力。

有关外加应力 σ 的计算，可以将试验梁在混凝土表面所测得的应变花值分别记为 ε_{n1}、ε_{n2}、ε_{n3}，通过式(2) 将其转化为该点处 x、y 方向的正应变和剪应变

$$\begin{cases}\varepsilon_x = \varepsilon_{n1};\\ \varepsilon_y = \varepsilon_{n2};\\ \varepsilon_{xy} = 2\varepsilon_{n3} - \varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}。\end{cases} \tag{2}$$

根据弹性力学的胡克定律物理方程，求出该点处 x、y 方向的正应力和剪应力：

$$\begin{cases}\sigma_x = \dfrac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y);\\ \sigma_y = \dfrac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_y);\\ \tau_{xy} = \dfrac{\gamma_{xy}}{2(1+\mu)}\cdot E。\end{cases} \tag{3}$$

通过式(4) 可以求出在一般受力状态下平面任意斜截面上应力的表达式，也即式(1) 的外加应力 σ 值

$$\sigma = \sigma_\alpha = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\alpha - \tau_{xy}\sin 2\alpha, \tag{4}$$

式中：α 为裂纹尖端处的主拉应力与水平方向的夹角。

3.2　试验值与理论值的比较

运用式（1）计算试验梁在外加应力值≤混凝土抗拉强度时的裂纹张开位移（裂缝宽度）值，并与试验值进行比较分析，结果见表 3。

其中，计算值与试验值比值的平均值为 1.095，标准差 0.161，变异系数 14.74%，说明当外加应力值≤混凝土的抗拉强度时，采用裂纹张开位移公式(1)计算的裂纹宽度值与试验值离散型较小，吻合度较高，运用式(1)计算钢纤维无腹筋 RPC 梁受剪开裂荷载具有一定的可信度，由于 RPC 去粗骨料和致密的微观结构，塑性变形性能更好，比普通钢筋混凝土梁更加适合裂纹张开位移(COD)原理。

但是 δ 值对外加应力与混凝土抗拉强度的比值 σ/σ_s 比较敏感，$\sigma/\sigma_s < 0.6$，式(1) 的计算值与试验值比较吻合，$\sigma/\sigma_s > 0.6$ 后，比值的误差增大。式(1) 中如果 $\sigma/\sigma_s \to 1$，sec 函数值趋近无穷，$\sigma/\sigma_s > 1$ 则 sec 函数值为负数，ln 函数取值无意义，都不能计算出相应的裂纹张开位移 δ，说明加载值超过开裂荷载或外加应力值较大时，裂纹尖端可能整体屈服，式(1) 计算的裂纹张开位移值无效，这样就可以认为，当 $\sigma/\sigma_s \to 1$ 时，式(1) 的计算 δ 值即为构件裂纹失稳扩展时的临界张开位移 δ_c，也就是外加应力 σ 超过 σ_s 后，裂纹将处于失稳状态，并迅速扩展。

两边同除以 a，式(1) 可转化为

$$\frac{\delta}{a} = \frac{8\sigma_s}{\pi E}\ln\sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_s}\right)。 \tag{5}$$

上式很好地反映了外加应力 σ 与张开位移和长度比值 δ/a 之间的关系，依据试验数据，可绘出初始斜裂缝出现前后裂纹尖端处的主拉应力 σ 值与 δ/a 之间的关系曲线，如图 4 所示。

可以看出，各钢纤维掺量下的 $\sigma-\delta/a$ 曲线的形状大致相同，钢纤维体积掺量的变化只能延缓 RPC 梁裂缝的开展进程，但不能从本质上改变裂纹的发展趋势。在相同的外加应力下，随着钢纤维体积率的增大，构件裂纹的宽度与长度的比值减

表 3　初设裂纹张开位移试验值与计算值的比较

Table 3　Comparisons of experimental values and theoretical values of initial crack opening displacement

试件编号	ρ_f/%	E/(10^4 N·mm^{-2})	σ_s/MPa	$2a$/mm	裂纹宽度 δ_{cal}/mm	δ_{cal}对应荷载/kN	裂纹宽度 δ_{exp}/mm	δ_{exp}对应荷载/kN	$\delta_{cal}/\delta_{exp}$
JZL1	0	3.77	4.78	104	0.077	81.7	0.06	81.7	1.283
JZL2	1	3.93	6.71	70	0.047	141.3	0.04	151.5	1.175
JZL3	2	4.15	9.19	50	0.034	220	0.035	220	0.971
JZL4	3	4.19	9.17	40	0.019	251.4	0.02	251.4	0.95
平均值									1.095
标准差									0.161
变异系数									14.74%

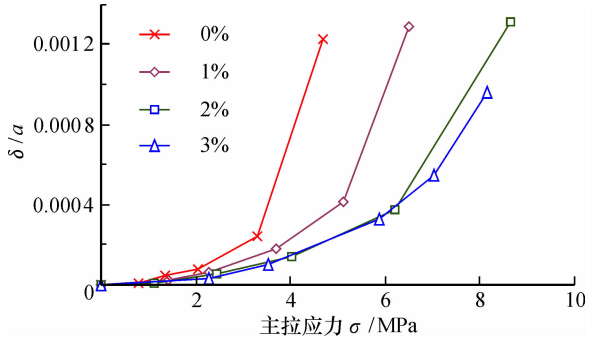


图 4 不同钢纤维体积率下 $\sigma-\delta/a$ 曲线

Fig. 4 $\sigma-\delta/a$ curves in different steel fiber volume ratios

小，验证了钢纤维能够阻碍 RPC 梁裂缝开展的结论。对于钢纤维掺量为 2% 和 3% 的试验梁，由于两种钢纤维掺量下的 RPC 抗拉强度和弹性模量都比较接近，故二者曲线的斜率非常接近。外加应力 σ 越接近 RPC 的抗拉强度 σ_s，曲线的倾角就越大，裂纹宽度与长度的比值变化也越来越快，说明当 $\sigma/\sigma_s \to 1$ 时，计算所得 σ 值即为构件裂纹扩展失稳时的临界张开位移 δ_c。

4 结 论

（1）在钢纤维掺量小于等于 2% 时，高强纵筋钢纤维无腹筋 RPC 梁的开裂荷载和极限荷载随钢纤维掺量的增加而提高，剪跨区的最大斜裂缝宽度随钢纤维掺量的增加而减小，但钢纤维掺量超过 2% 以后，这种影响不再明显。

（2）优越的抗裂性能使得 RPC 比较适应于断裂力学裂纹张开位移（COD）原理，在外加应力低于 RPC 抗拉强度时，运用裂纹张开位移公式（1）计算 HRB500 级纵筋 RPC 梁的斜裂缝初始裂纹具有较好的可信度，式（1）可以作为计算钢纤维无腹筋 RPC 梁受剪开裂荷载的一种参考方法。

（3）在钢纤维无腹筋 RPC 梁受剪裂纹扩展失稳前，在相同的外加应力下，试验梁裂纹宽度与长度的比值随钢纤维体积率的增大而减小，提高钢纤维体积含量能够增强 HRB500 级纵筋 RPC 梁的抗裂性能，有效阻碍斜裂缝的开展。

参考文献：

[1] 程庆国，徐蕴贤，卢祖文. 钢纤维混凝土本构理论的研究、工程应用及发展 [J]. 中国铁道科学，1999，20（2）：3－11.

[2] Soroushian P，Bayasi Z. Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal，1991，88（2）：129－134.

[3] Banthia N，Nanadakumar N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites [J]. Cement and Concrete Composites，2003，25（1）：3－9.

[4] Rossi P. High performance multimodal fiber reinforced cement composites（HPMFRCC）：The LCPC experience [J]. ACI Materials Journal，1997，94（6）：478－483.

[5] 杨润年，尹久仁，肖华明，等. 混杂尺寸钢纤维混凝土试验研究 [J]. 新型建筑材料，2006（6）：27－29.

[6] 安明喆，宋子辉，李宇，等. 不同钢纤维掺量 RPC 材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学，2009，30(5)：34－38.

[7] 张宏战. 钢纤维高强混凝土构件受剪性能试验研究 [D]. 大连：大连理工大学，2005.

[8] 金凌志，何培，付强，等. RPC 构件的宏观裂缝和微观结构关系分析 [J]. 江苏大学学报：自然科学版，2014，35（4）：452－456，462.

[9] Neville A M. Properties of Conerete [M]. 3rd ed. London：Pitman Publishing Limited，1981.

[10] Kaplan M F. Crack propagation and the facture of concrete [J]. Journal Proceedings，1961，58（11）：591－610.

Experiment on shear crack resistance property of HRB500 reinforced steel fiber RPC beam

JIN Ling-zhi[1]，WEN Qing[1]，YANG Rui[2]，LI Wen-xing[1]

（1. a. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering；b. College of Civil Engineering and Architecture，Guilin University of Technology，Guilin 541004，China；2. Zhejiang Changzheng Vocational and Technical College，Hangzhou 310023，China）

Abstract：In order to study the shear crack resistance property of HRB500 reinforcement steel fiber RPC beams，the experimental research on RPC simple surpported beams with 4 different steel fiber volume ratios was carried out，and then the experimental data were analyzed and compared with the results calculated by the principle of fracture mechanics crack opening displacement（COD）. Research and analysis show that steel fiber can effectively hinder the development of shear diagonal cracks in the RPC beams. The cracking load and ultimate load increase with the increase of fiber content，and the width of the maximum oblique crack decreases with the increase of fiber content. But the effect is not obvious after the steel fiber content is more than 2%. The formula based on（COD）principle has good reliability in calculating the shear initial crack of the reinforced steel fiber RPC beams.

Key words：HRB500；RPC beam；steel fiber content；principle of crack opening displacement；anti cracking performance；diagonal crack width