

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.013



# 橡胶混凝土断裂性能试验研究

曹国瑞<sup>1</sup>, 王娟<sup>2</sup>, 卿龙邦<sup>1</sup>, 杨朝霞<sup>2</sup>, 姜军<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:**开展了橡胶混凝土三点弯曲梁断裂试验, 获得了不同试件尺寸和橡胶掺量下的裂缝断裂全过程曲线, 对橡胶混凝土断裂能  $G_F$  及裂缝扩展  $K-R$  阻力曲线进行研究。基于数字图像相关方法, 获得了橡胶混凝土试件垂直于裂缝扩展方向的全场位移和应变信息, 对裂缝扩展的损伤断裂演化过程进行研究。结果表明: 随试件尺寸增加和橡胶掺量提高, 断裂能均呈现出上升趋势;  $K-R$  阻力曲线随试件尺寸变化表现出明显尺寸效应, 橡胶掺量在 0%~14% 设计范围内时,  $K-R$  阻力曲线与橡胶掺量无关。

**关键词:**橡胶混凝土; 断裂能;  $K-R$  阻力曲线; 数字图像相关; 裂缝扩展过程

**中图分类号:** TU528.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0091-07

## Experimental study on the fracture characteristics of crumb rubber concrete

Cao Guorui<sup>1</sup>, Wang Juan<sup>2</sup>, Qing Longbang<sup>1</sup>, Yang Zhaoxia<sup>2</sup>, Jiang Jun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. College of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

**Abstract:** Based on the three-point bending beam fracture tests on the crumb rubber concrete with different specimen geometries and rubber volumes, the experimental curve of the whole fracture crack process was obtained, and the fracture energy and  $K-R$  resistance curve were studied. Through the digital image correlation method, the whole field displacement and strain distribution perpendicular to the direction of crack propagation were determined, from which the crack propagation and evolution process of fracture and damage can thus be examined. The results indicate that the fracture energy displays an increasing tendency with specimen geometry and rubber volume. The  $K-R$  resistance curve reveals the size effect by change of specimen geometries and shows no indicative relationship with 0%~14% rubber volume which was designed in this study.

**Keywords:** crumb rubber concrete; fracture energy;  $K-R$  resistance curve; digital image correlation; crack propagation process

**收稿日期:** 2018-01-24

**基金项目:** 长江水利委员会长江科学院开放研究基金(CKWV2017517/KY); 河南省高等学校重点科研项目计划(15A570010)

**作者简介:** 曹国瑞(1989-), 男, 主要从事混凝土断裂与损伤研究, E-mail: 201531603006@stu.hebut.edu.cn.

王娟(通信作者), 女, 副教授, 博士, E-mail: wangjuan@zzu.edu.cn.

**Received:** 2018-01-24

**Foundation item:** CRSRI Open Research Program(No. CKWV2017517/KY); Key Project of Henan Provincial University (No. 15A570010)

**Author brief:** Cao Guorui(1989-), main research interests: concrete fracture and damage, E-mail: 201531603006@stu.hebut.edu.cn.

Wang Juan(corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: wangjuan@zzu.edu.cn.

混凝土材料因具有抗拉强度低、脆性大等特点,一般处于带裂缝工作状态。研究表明<sup>[1-5]</sup>,在混凝土中掺入橡胶,可以增大裂缝面上的扩展阻力,起到抑制裂缝扩展的作用。由于橡胶材料的掺入,使得混凝土断裂破坏的过程更加复杂,因此,开展有关橡胶混凝土断裂性能方面的试验研究,有助于从断裂力学角度对这一“阻裂”作用给出解释。

橡胶材料的掺入可以增强混凝土的韧性,提高混凝土试件的断裂能<sup>[6]</sup>。Taha 等<sup>[7]</sup>采用将两种粒径橡胶替代混凝土中粗、细骨料的方式,对断裂韧度进行了研究,结果表明,存在一最佳取代率,使得混凝土断裂韧度值达到最大。Mustafa 等<sup>[8]</sup>研究表明,采用两种不同粒径橡胶按比例取代细骨料的方式,断裂能提高幅度更为明显。Guo 等<sup>[9]</sup>研究了不同橡胶掺量情况下钢纤维混凝土的断裂特性,结果表明,随橡胶掺量的提高,断裂韧度与断裂能均呈现出先增后减的趋势。罗素蓉等<sup>[10]</sup>研究了橡胶种类、橡胶掺量对自密实混凝土的断裂韧度以及断裂能的影响,结果表明,随橡胶掺量提高,两个断裂参数均表现出增加趋势,且增加的幅度与橡胶种类和掺量有关。以上所述研究大部分主要围绕断裂能、断裂韧度等断裂参数展开,对不同试件尺寸下橡胶混凝土断裂  $K-R$  阻力曲线方面的研究较少。

数字图像相关(DIC)方法是通过预先采集试验加载过程中物体表面图像观测区域变形前后散斑图案,结合特定算法进行灰度分析,进而获得图像观测区域内所有计算点变形信息,具有全场、非接触且易于在实验室内完成等优点,可以作为研究混凝土裂缝扩展过程的一种有效技术手段,该方法已在混凝土断裂测试中得到广泛应用<sup>[11-13]</sup>。

本文利用三点弯曲梁断裂试验,研究试件尺寸和橡胶掺量对混凝土断裂能以及裂缝扩展  $K-R$  阻力曲线的影响,同时,采用 DIC 方法计算测量裂缝尖端全场位移和应变信息,对外荷载作用下混凝土试件裂缝扩展的损伤断裂过程进行研究。

## 1 DIC 原理

DIC 方法是一种通过读取带有试件表面自然纹理或者人工散斑信息的数字化图像,结合特定算法,对灰度矩阵进行处理,进而获取变形信息的一种新型光学测量方法。其基本原理示意如图 1 所示,假设  $Q$  点为参考图像中任意一像素点,经过平移、剪切、拉压<sup>[14]</sup>等变形后, $Q$  点移动到  $Q'$  点。相应地,以  $Q$  点为中心的样本子区移动到以  $Q'$  点为中心的目标子区。DIC 方法依据样本子区灰度信息,采用相

关函数<sup>[15]</sup>对当前图像逐张进行匹配运算,准确定位当前图像目标子区位置,进而获得  $Q$  点的位移和应变信息,其他像素点变形信息的计算采用与  $Q$  点相同的方法。

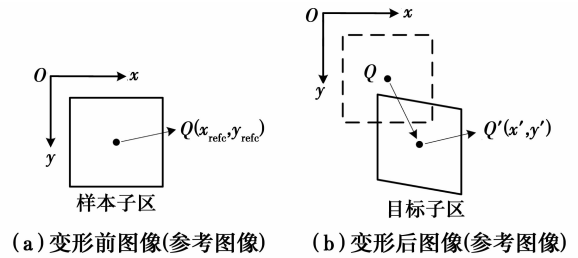


图 1 数字图像方法原理示意图

Fig. 1 Schematic of DIC principle

## 2 试验概况

### 2.1 原材料

试验采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.53;普通碎石,粒径范围为 5~10 mm,密度为 2 750 kg/m<sup>3</sup>;天然河砂,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>;采用两种粒径橡胶颗粒,粒径范围分别为 1~3 mm 和 4~6 mm,密度为 1 040 kg/m<sup>3</sup>。以素混凝土试件配合比为基准,橡胶颗粒按等体积取代石子的方式进行添加,掺量分别为 6%、10%、14%。其中,素混凝土试件配合比见表 1。

表 1 素混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of plain concrete kg/m<sup>3</sup>

水	水泥	砂子	石子
190	360	660	1 190

### 2.2 试件制作与散斑制备

图 2 给出了三点弯曲梁试件的尺寸信息,其中: $S$ 、 $B$ 、 $H$  分别表示有效跨度、试件宽度和高度; $a_0$  和  $L$  分别表示初始裂缝长度和韧带长度。每组试件  $a_0/H$  均取为 0.4,  $S/H$  均取为 4,  $d$  表示两端预留长度,为保证试件与两支座完好搭接,在制作时  $d$  取为 20 mm。试验共分 8 组,每组制作 3 块试件,所有试件标准条件下养护 28 d 后,相继开展断裂试验,试件参数信息见表 2。

试验开始前,选取三点弯曲梁试件较光洁面作为散斑制作面,首先在图像观测区域内均匀喷涂一层哑光白漆作为背景,再反复喷洒哑光黑漆形成高反差人工散斑图案,便于后期采用 DIC 方法进行图像处理,获取图像观测区域内所有计算点变形信息。

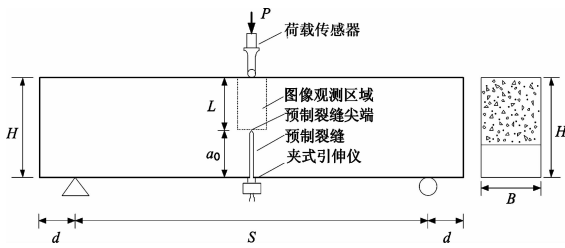


图 2 三点弯曲梁尺寸示意图  
Fig. 2 Specimen geometry of TPB

表 2 试件参数

Table 2 Specimen parameters

试件号	橡胶粒径/mm	橡胶掺量/%	试件 $B \times H \times S$
A0		0	80 mm × 80 mm × 320 mm
A1	1~3	6	80 mm × 80 mm × 320 mm
A2	4~6	6	80 mm × 80 mm × 320 mm
A3	4~6	6	40 mm × 40 mm × 160 mm
A4	4~6	6	60 mm × 60 mm × 240 mm
A5	4~6	6	100 mm × 100 mm × 400 mm
A6	4~6	10	80 mm × 80 mm × 320 mm
A7	4~6	14	80 mm × 80 mm × 320 mm

### 2.3 试验加载与图像采集

断裂试验在量程为 20 kN 的万能试验机上开展,整个加载过程速率控制为 0.05 mm/min。试验过程中荷载  $P$ 、裂缝口张开位移 CMOD 及挠度  $\delta$  数据的采集使用 WKD3816A 多功能静态应变采集仪。

实验采用德国 Basler acA 1600-20gm 工业相机,其分辨率为 1 600 pixel × 1 200 pixel。试验开始前,通过调整相机支架及镜头焦距,使相机位于图像观测区域正前方且成像清晰,试验过程中图像采集速率设定为 1 帧/s。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

图 3 给出了各组试件实测  $P$ -CMOD 曲线以及  $P$ - $\delta$  曲线(为方便对比,每组各挑选一条代表性试验曲线),表 3 给出了断裂试验测得的部分试验数据。可以看出:试件尺寸增加时,各组  $P$ -CMOD 曲线上上升段几乎重合,峰值荷载及该时刻对应裂缝口张开位移、挠度均表现出明显上升趋势;橡胶掺量改变对  $P$ -CMOD 曲线的影响主要集中于下降段,对峰值荷载的影响较小,在达到相同的裂缝口张开位移时,所需荷载随橡胶掺量增加而增加。另外还可看出,随橡胶掺量增加,峰值荷载时刻对应挠度均表现出上

升趋势,由以上分析结果可以得出,混凝土中适量橡胶的掺入,在不对强度造成明显降低的前提下可提高混凝土试件的延性,充分发挥橡胶、混凝土两种材料的性能。由图 3(c)、(f)可知,橡胶粒径改变对  $P$ -CMOD 曲线和  $P$ - $\delta$  曲线影响较小。

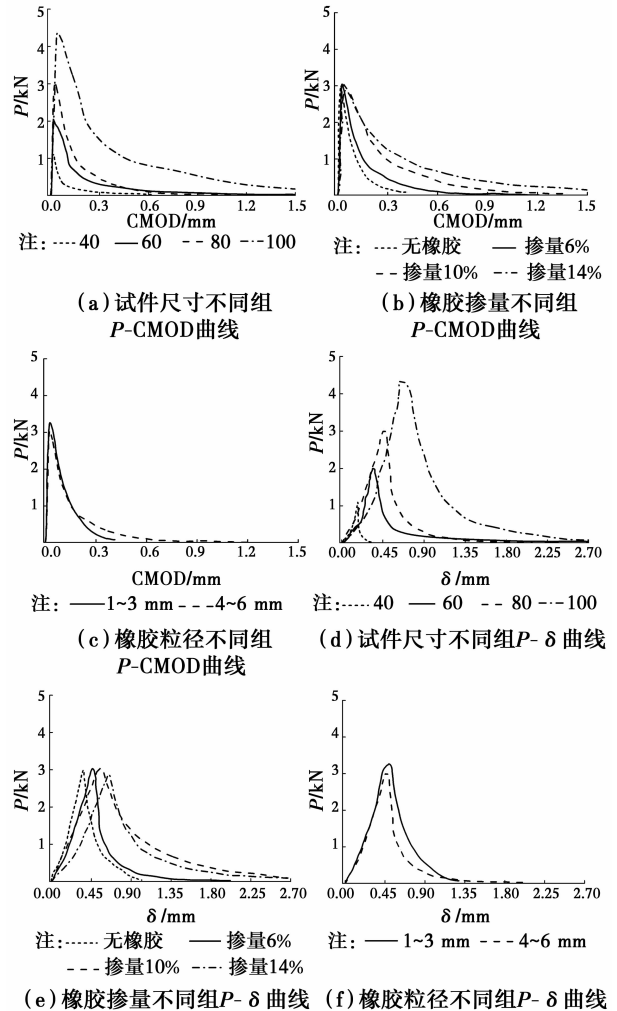


图 3 各组  $P$ -CMOD 曲线和  $P$ - $\delta$  曲线

Fig. 3  $P$ -CMOD and  $P$ - $\delta$  curves

### 3.2 断裂能 $G_F$ 研究

断裂能定义为裂缝扩展单位面积所需外力做的功(这里假定外力做的功全部用于裂缝的扩展),是用于表征材料抵抗裂缝扩展能力的一个断裂力学参数。根据试验实测  $P$ - $\delta$  曲线,采用式(1)<sup>[16]</sup>对断裂能  $G_F$  进行求解。

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_{\max}}{A_{\text{lig}}} \quad (1)$$

式中: $W_0$  为外荷载沿试件跨中加载方向所做的功,即  $P$ - $\delta$  曲线所包围面积; $mg$  为三点弯曲梁有效跨度范围内自重; $A_{\text{lig}}$  为梁韧带面积,其表达式为  $A_{\text{lig}} = BL$ 。

表 4 给出了各组试件由式(1)计算得到的断裂

表 3 断裂试验结果  
Table 3 Results from fracture test

试件编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$\text{CMOD}_C/\text{mm}$	$\delta_{\max}/\text{mm}$
A0-1	2.867	0.019	0.362
A0-2	3.112	0.022	0.360
A0-3	3.029	0.017	0.367
Mean	3.002	0.019	0.363
A1-1	3.371	0.024	0.412
A1-2	3.181	0.027	0.610
A1-3	3.390	0.023	0.457
Mean	3.314	0.024	0.493
A2-1	3.127	0.019	0.445
A2-2	2.907	0.019	0.467
A2-3	3.137	0.019	0.471
Mean	3.057	0.025	0.461
A3-1	1.108	0.012	0.101
A3-2	1.224	0.014	0.178
A3-3	1.026	0.016	0.255
Mean	1.119	0.013	0.178
A4-1	2.171	0.017	0.301
A4-2	1.818	0.012	0.244
A4-3	2.044	0.019	0.466
Mean	2.011	0.016	0.337
A5-1	4.140	0.014	0.671
A5-2	4.091	0.013	0.619
A5-3	4.867	0.013	0.645
Mean	4.366	0.036	0.645
A6-1	3.068	0.037	0.497
A6-2	3.096	0.033	0.598
A6-3	2.988	0.035	0.528
Mean	3.051	0.034	0.541
A7-1	2.913	0.047	0.622
A7-2	2.827	0.040	0.622
A7-3	2.886	0.044	0.685
Mean	2.875	0.043	0.643

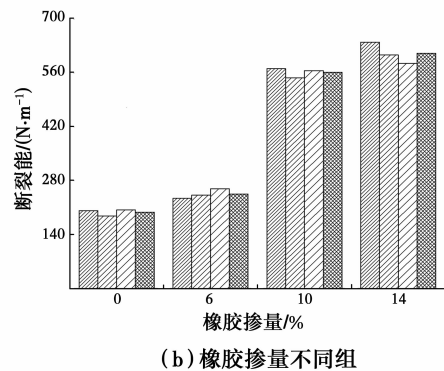
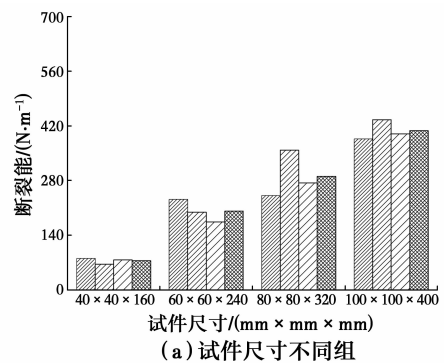
注:表 3 中  $A_i-j$  表示  $A_i$  组第  $j$  块试件;  $P_{\max}$  表示峰值荷载,  $\text{CMOD}_C$  表示  $P_{\max}$  时刻对应裂缝口张开位移值;  $\delta_{\max}$  表示  $P_{\max}$  时刻沿试件跨中方向的挠度值。

能信息(单位:  $\text{N}/\text{m}$ ), 试件尺寸和橡胶掺量不同组试件断裂能变化趋势如图 4 所示, 由图 4(a)可以看出, 断裂能随试件尺寸增加而增加, 产生上述结果的原因随三点弯曲梁尺寸增加, 其韧带面积增加, 混凝

土试件从开始起裂达到完全开裂状态时, 需要从外界吸收更多的能量, 进而随试件尺寸增加, 断裂能呈逐渐上升趋势。由图 4(b)可以看出, 与不掺橡胶颗粒 A0 组试件相比, 橡胶颗粒的掺入提高了混凝土试件的断裂能, 且随橡胶掺量增加, 断裂能呈明显上升趋势, 其中, 橡胶掺量由 6% 提高至 10% 时, 上升幅度更为明显, 其原因是随着橡胶掺量的增加, 裂缝扩展面上橡胶颗粒数目增多, 除水泥基体和骨料对裂缝扩展起到阻碍作用外, 橡胶颗粒同时通过自身产生变形吸收了部分外荷载对梁做的功, 使得断裂能增加。

表 4 断裂能信息  
Table 4 Information of fracture energy

第 $N$ 块	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
1	202	242	234	81	232	387	571	640
2	188	358	242	66	199	436	547	607
3	204	274	259	77	174	400	566	585
Mean	198	291	245	75	202	408	562	611



注: 第 1 块 第 2 块 第 3 块 平均值

图 4 各组试件断裂能

Fig. 4 Fracture energy

### 3.3 K-R 阻力曲线研究

K-R 阻力曲线用于表征混凝土材料在整个断裂过程中抵制裂缝扩展的能力的变化, 其值随外荷载和裂缝扩展长度的改变而改变。

根据起裂韧度扩展准则<sup>[17]</sup>, $K$ - $R$  阻力曲线可用外荷载在有效裂缝尖端的应力强度因子公式表示。对于三点弯梁<sup>[18]</sup>,可采用式(2)的形式。

$$K_I = \frac{3PS}{2BH^2} \sqrt{a} f_1 \left( \frac{a}{H} \right) \quad (2)$$

式中: $a$  为任意时刻有效裂缝长度<sup>[13]</sup>;  $f_1$  为与裂缝扩展有关的参数,其各自表达式为

$$a = \frac{2}{\pi} (H + h) \arctan \sqrt{\frac{EBCMOD}{32.6P} - 0.1135} - h \quad (3)$$

$$f_1 \left( \frac{a}{H} \right) = \frac{1.99 - \frac{a}{H} \left( 1 - \frac{a}{H} \right) \left( 2.15 - 3.93 \frac{a}{H} + 2.7 \left( \frac{a}{H} \right)^2 \right)}{\left( 1 + 2 \frac{a}{H} \right) \left( 1 - \frac{a}{H} \right)^{3/2}} \quad (4)$$

式中: $h$  为夹式引伸仪刀口厚度; $E$  为弹性模量;有效裂缝长度  $a$  与预制裂缝长度  $a_0$  之差即为任意时刻有效裂缝扩展长度  $\Delta a_{eff}$ 。

图 5 给出了不同试件尺寸及橡胶掺量组试件断裂全过程  $K$ - $R$  阻力曲线的对比结果,可以看出:对于两组试件,应力强度因子曲线整体呈上升趋势。由图 5(a)可以看出,随试件尺寸增加, $K$ - $R$  阻力曲线表现出明显尺寸效应,在相同应力强度因子值下,有效裂缝扩展长度随试件尺寸增加而增加,其原因为在相同缝高比前提下,试件高度不同对应不同的韧带长度,裂缝扩展至接近试件顶部时由于边界效应,导致  $K$ - $R$  阻力曲线随尺寸变化表现出明显不同。在本文橡胶掺量设计范围(0%~14%)内, $K$ - $R$  阻力曲线形状未表现出明显差异,说明  $K$ - $R$  阻力曲线与橡胶掺量无关。产生上述现象是由于在加载过程中,基体混凝土的骨料咬合力对裂缝扩展起到了主要的阻裂作用,因此, $K$ - $R$  阻力曲线随橡胶掺量改变无明显差异。

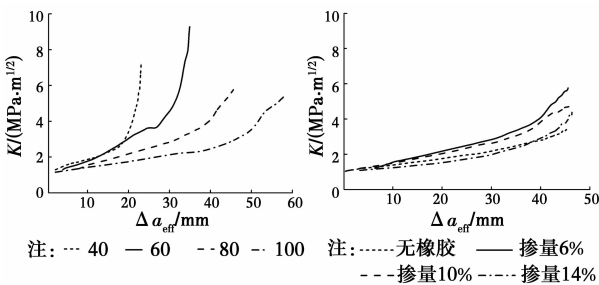
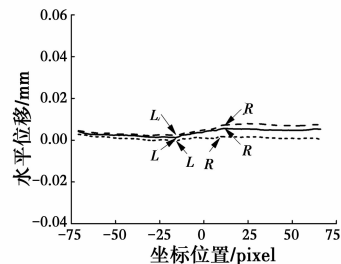


图 5 各组  $K$ - $R$  曲线  
Fig. 5  $K$ - $R$  curves

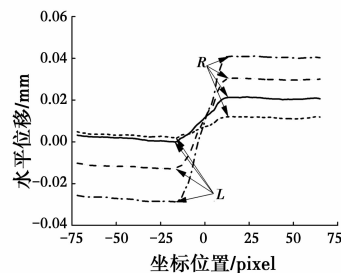
### 3.4 裂缝扩展过程研究

以掺量为 10% 橡胶混凝土三点弯梁试件为例,采用 DIC 方法对图像观测区域裂缝扩展过程进行研究。实验中裂缝扩展属 I 型断裂问题,因此,主要关注垂直于裂缝扩展方向的位移和应变信息。

图 6 给出了不同荷载时刻下预制裂缝尖端切线位置处所有计算点水平位移变化趋势图(横轴单位为 pixel,其中,坐标值为 0 处表示初始裂缝尖端位置,纵轴表示各计算点的水平位移信息,单位为 mm;  $\uparrow$  代表荷载上升阶段,  $\downarrow$  代表荷载下降阶段)。图 7 给出了对应荷载阶段下图像观测区域内垂直于裂缝扩展方向的全场应变演化过程(其中:  $1 \mu\epsilon = 10^{-6}$ )。结合两图可以看出在 70%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) 阶段时,所有计算点水平位移值基本保持一致,预制裂缝尖端位置处应变值未产生明显变化,说明在该荷载阶段下混凝土未达到开裂状态;在 85%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) 阶段时,各计算点水平位移值出现波动情况,具体表现在点  $L$  和点  $R$  产生水平位移差值,同时,预制裂缝尖端位置处应变值开始增加,说明在该荷载阶段下混凝土已经处于开裂状态。在 85%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) ~  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) 阶段时,应变增大区域缓慢沿裂缝扩展方向推进,点  $L$  和点  $R$  水平位移差值逐渐增加,宏观上表现为裂缝稳定向前扩展。 $P_{max}$  阶段过后,应变增大区域及点  $L$ 、 $R$  水平位移差值继续增加,且与峰值荷载前荷载阶段相比增速较快,直至试件最终产生破坏。



注: --- 70%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) — 85%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ ) -- 90%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ )  
(a) 70%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ )~85%  $P_{max}$  ( $\uparrow$ )阶段



注: ---  $P_{max}$  — 90%  $P_{max}$  ( $\downarrow$ ) -- 70%  $P_{max}$  ( $\downarrow$ ) -- 50%  $P_{max}$  ( $\downarrow$ )  
(b)  $P_{max}$  ~50%  $P_{max}$  ( $\downarrow$ )阶段

图 6 预制裂缝尖端切线水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of precasted crack-tip tangential

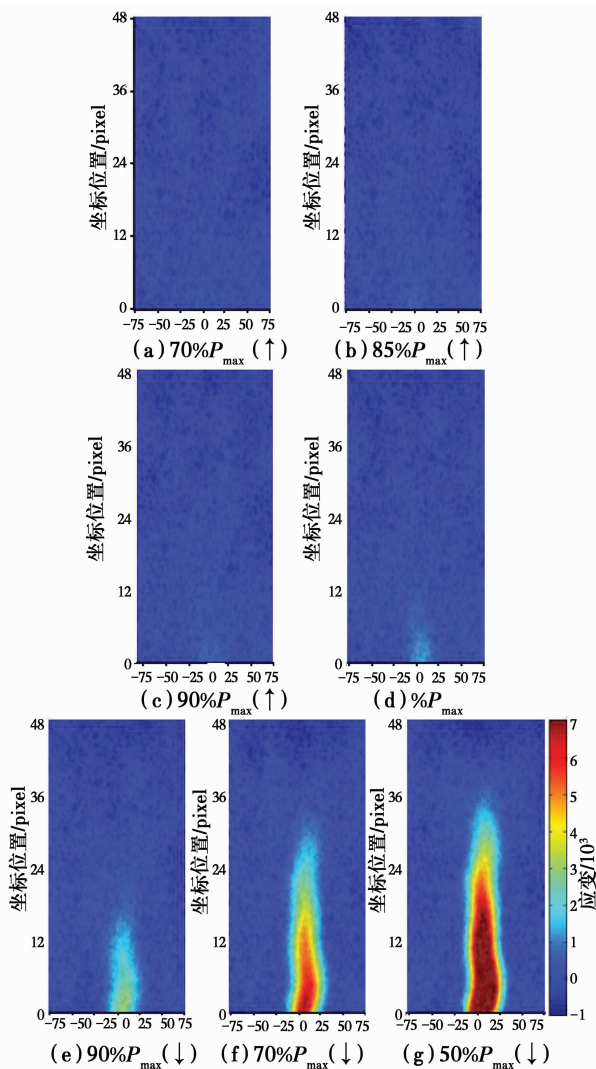


图7 橡胶掺量为10%混凝土试件垂直于  
裂缝扩展方向全场应变分布

Fig. 7 Full field strain distribution perpendicular to  
crack propagation with 10% rubber volume

#### 4 结论

1) 随三点弯曲梁试件尺寸增加, 试件破坏时峰值荷载和断裂能均呈现出逐渐上升趋势,  $K-R$  阻力曲线表现出明显尺寸效应。

2) 橡胶掺量改变对试件破坏时峰值荷载影响较小, 对  $P-CMOD$  曲线下降段以及峰值荷载时刻对应挠度值影响较大, 说明在混凝土中掺入适量橡胶后延性得到提高。在本文橡胶掺量设计范围内,  $K-R$  阻力曲线与橡胶掺量无关。

3) 橡胶掺量在 0%~14% 范围内时, 断裂能随橡胶掺量增加而增加, 其中掺量由 6% 上升至 10% 时, 提高幅度更为明显。

4) 根据全场位移和应变演化过程可知, 与峰值荷载前荷载阶段相比, 峰值荷载后裂缝扩展速度有一定提高。

#### 参考文献:

- [1] 亢景付, 任海波, 张平祖. 橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 158-162.  
KANG J F, REN H B, ZHANG P Z. Cracking resistance and flexural property of rubberized concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 158-162. (in Chinese)
- [2] BATAYNEHM K, MARIE I, ASI I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries [J]. Waste Management, 2008, 28(11): 2171-2176.
- [3] SUKONTASUKKUL P, CHAIKAEW C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber [J]. Construction & Building Materials, 2006, 20(7): 450-457.
- [4] AL-TAYEB M M, BAKAR B H A, ISMAIL H, et al. Effect of partial replacement of sand by fine crumb rubber on impact load behavior of concrete beam: experiment and nonlinear dynamic analysis [J]. Materials and Structures, 2013, 46(8): 1299-1307.
- [5] 殷新龙, 孙洪泉, 薛祯钰, 等. 橡胶混凝土梁裂缝分形理论分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35: 157-159.  
YIN X L, SUN H Q, XUE Z Y, et al. Study of cracks on rubber concrete beams based on fractal theory [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35: 157-159. (in Chinese)
- [6] AUDRIUS G, HENRIKAS S, DARIUS P, et al. Fracture of concrete containing crumb rubber [J]. Journal of Civil Engineering & Management, 2013, 19(3): 447-455.
- [7] TAHA M M, ASCE M, EL-DIEB A S, et al. Mechanical, fracture, and micro structural investigations of rubber concrete [J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(10): 640-649.
- [8] MUSTAFA, MAHER A T, ABU B B H, et al. Effect of partial replacements of sand and cement by waste rubber on the fracture characteristics of concrete [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2012, 51(6): 583-589.
- [9] GUO Y C, ZHANG J H, CHEN G, et al. Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 32-39.
- [10] 罗素蓉, 陈伟妹, 王雪芳. 橡胶自密实混凝土断裂性能试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 217-222.  
LUO S R, CHEN W M, WANG X F. Fracture

- properties of rubberized self-compacting concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(2): 217-222. (in Chinese)
- [11] DAS S, AGUAYO M, DEY V, et al. The fracture response of blended formulations containing limestone powder: Evaluations using two-parameter fracture model and digital image correlation [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2014, 53(10):316-326.
- [12] DAS S, AGUAYO M, SANT G, et al. Fracture process zone and tensile behavior of blended binders containing limestone powder [J]. *Cement & Concrete Research*, 2015, 73:51-62.
- [13] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 2978-2990.
- [14] PAN B, QIAN K, XIE H, et al. Topical review: Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(6): 152-154.
- [15] PAN B. Recent progress in digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1223-1235.
- [16] RILEM Committee FMC50. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beam [J]. *Materials and Structures*, 1985, 18: 285-290.
- [17] DONG W, WU Z M, ZHOU X M. Calculating crack extension resistance of concrete based on a new crack propagation criterion [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 38(2):879-889.
- [18] TADA H, PARIS P C, IRWIN G R. *The stress analysis of cracks handbook* [M]. John Wiley & Sons, 1985: 614.

(编辑 王秀玲)