

# 玻璃纤维增强塑料约束再生混凝土轴压试验

肖建庄<sup>1,2</sup>, 杨洁<sup>1</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 主要以再生粗集料取代率为试验研究参数, 完成了 9 个玻璃纤维增强塑料(GFRP)约束再生混凝土圆柱试件的轴压试验, 重点分析了试件的受压破坏特性、轴向力—纵向位移关系、横向应变发展以及约束再生混凝土的横向变形系数的变化规律. 试验和分析结果表明: GFRP 约束再生混凝土纵向应力—应变关系呈弹性上升、弹塑性上升、下降、应变强化等 4 个阶段, 其强度得到明显提高, 变形性能得到改善, 核心再生混凝土和 GFRP 管之间滑移较小, 含再生粗集料试件的横向变形系数普遍低于不含再生粗集料的试件.

**关键词:** 再生混凝土; 玻璃纤维增强塑料(GFRP); 约束; 轴压试验

**中图分类号:** TU 528

**文献标识码:** A

## On Recycled Concrete Confined by GFRP Tube Under Axial Compression

XIAO Jianzhuang<sup>1,2</sup>, Yang Jie<sup>1</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Material of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on tests of 9 recycled concrete specimens confined by glass fiber reinforced plastics (GFRP) tube with different recycled coarse aggregate replacement percentages under axial compression, an investigation was made into the failure properties under compression, axial force-longitudinal displacement relationship, lateral strain development and variation rule of lateral deformation ratio of the test specimens. It is found that the stress-strain relationship of GFRP confined recycled concrete can be divided into four branches, i. e., the elastic ascending branch, the elastoplastic ascending branch, the descending branch and strain-strengthening branch. The strength and deformation ability of confined recycled concrete are obviously improved than those of unconfined recycled concrete. The slip between the inner

recycled concrete and the GFRP tube is negligible, and the lateral deformation ratio of specimens containing recycled aggregates is lower than those without recycled aggregates.

**Key words:** recycled concrete; glass fiber reinforced plastics (GFRP); confinement; axial compression test

近年来, 在人们对环境问题和土木工程可持续发展的重视下, 针对再生混凝土的研究已成为了各国研究的热点<sup>[1]</sup>. 研究表明, 相对普通混凝土, 再生混凝土有抗压强度低, 徐变收缩大等缺陷<sup>[2]</sup>. 对于这些缺陷, 有学者从材料性能方面对其进行了改善, 如对再生粗集料进行表面处理, 在再生混凝土中添加外加剂等<sup>[2]</sup>, 而从复合和组合角度研究再生混凝土性能改善的文献并不多. 约束作用能提高核心混凝土的强度并降低其收缩, 有利于提高再生混凝土的性能. 杨有福等对钢管约束再生混凝土构件进行了研究<sup>[3-4]</sup>, 研究表明再生混凝土在钢管约束作用下不但强度得到了提高, 塑性性能也大为改善. 本试验研究了再生混凝土在玻璃纤维增强塑料(GFRP)管约束条件下的轴压力学性能, 从组合的角度探求再生混凝土性能的改善.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验所用水泥为海螺牌 42.5R 普通硅酸盐水泥, 砂为普通黄砂, 拌合水为自来水. 各试件再生混凝土采用相同质量配合比, 即水泥: 砂: 粗集料: 水 = 430: 559: 1 118: 85, 再生粗集料由上海民宝建材有限公司生产, 其性能测试按照 JGJ 53—92《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》. 外包 GFRP 管由上海意登复合材料有限公司出品, 管厚 4

收稿日期: 2008-10-15

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-06-0383); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAK48B03)

作者简介: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土材料与结构. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

mm,由玻璃纤维铺设而成,基体为不饱和聚酯树脂,GFRP 管相关参数由上海测试中心玻璃钢/复合材料行业测试点测定,环向拉伸强度为 204 MPa.

再生粗集料筛分析结果见表 1. 根据各筛的累计筛余百分率评定该试样的颗粒级配:为连续粒级 5~31.5 mm. 实测再生粗集料的物理指标如表 2.

表 1 再生粗集料筛分析试验计算表

Tab.1 Sieve analysis of recycled coarse aggregates

孔径/mm	质量/g	分计筛余/%	累计筛余 /%
31.5	41.0	0.82	0.82
25.0	1028.5	20.57	21.29
20.0	1772.9	35.45	56.84
16.5	1088.9	21.77	78.61
10.0	736.1	14.72	93.33
5.0	111.6	2.23	95.56
2.5	30.9	0.61	96.17
<2.5	191.6	3.83	100.00

表 2 再生粗集料基本性质

Tab.2 Basic properties of recycled coarse aggregates

堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	含泥量/%	吸水率/%	压碎指标/%
1 257	2 578	1.385	4.50	16.1

1.2 试件设计

设计了 3 组再生粗集料取代率分别为 0,50%,100%的 GFRP 管约束轴压圆柱. 构件直径 200 mm,高 400 mm,按照再生粗集料取代率不同分为 3 组,共 9 个试件. 主要研究再生粗集料取代率不同情况下约束再生混凝土的力学性能. 试件设计参数如表 3. 试件的命名方法:以 RCFF-50-2 为例,RCFF 表示 recycled concrete filled in FRP tube,50 表示再生粗集料取代率为 50%,2 表示同组的 3 个试件中的第 2 个.  $D$  为截面直径, $d$  为 GFRP 管厚度, $L$  为试件长度, $f_{cu}$ 为混凝土立方体抗压强度值.

表 3 各试件参数

Tab.3 Parameters of each specimen

分类	编号	再生粗集料取代率/%	$D$ /mm	$d$ /mm	$L$ /mm	$f_{cu}$ /MPa
RCFF-0	RCFF-0-1	0	200	4	400	49.94
	RCFF-0-2					
	RCFF-0-3					
RCFF-50	RCFF-50-1	50	200	4	400	42.73
	RCFF-50-2					
	RCFF-50-3					
RCFF-100	RCFF-100-1	100	200	4	400	39.15
	RCFF-100-2					
	RCFF-100-3					

1.3 加载及测点布置

GFRP 约束再生混凝土轴压试验加载装置见图 1,核心混凝土上下各放置 1 只直径 190 mm 的钢垫块,试验机的作用力由钢垫块传到核心混凝土上. 图 2 为应变片布置图,试件中部设 5 cm 纵向和环向应

变片各 4 片,试件两端每端设 5 cm 纵向和环向应变片各 2 片,分别测量 GFRP 管表面的应变,并在试件两端设 2 只 30 cm 量程的位移计,位移计设置于垫块之间. 图中  $S$  表示周长.

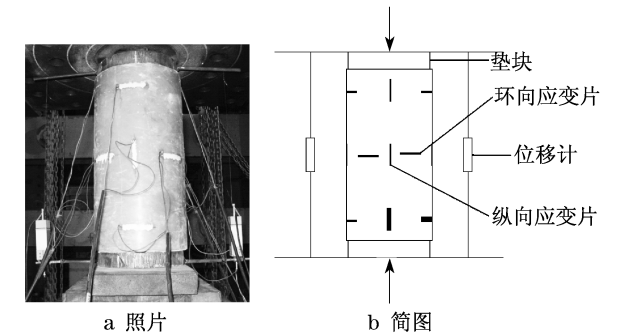


图 1 试件加载图  
Fig.1 Test devices

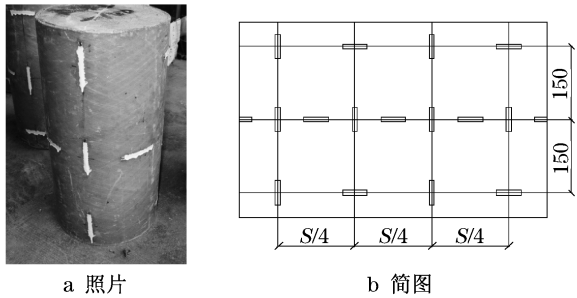


图 2 测点布置(单位:mm)  
Fig.2 Test setup of specimens(unit: mm)

### 1.4 加载方案

试验在同济大学建筑结构实验室 10 MN 大型多功能电液伺服结构试验机上进行. 试验全过程以位移控制, 90% 预估极限荷载以前, 加载速率为  $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 90% 预估极限荷载以后, 加载速率为  $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . 位移、应变、荷载均由计算机采集系统自动采集.

### 1.5 试验过程及主要现象

试验前进行预加载调整, 预加荷载为计算极限荷载的 15%. 试件加载到 70% 的破坏荷载时, 出现

纤维断裂的响声; 达到破坏荷载时, 破坏伴有很大的响声, 纤维管在某一位置形成纵向倾斜断裂裂缝, 内部混凝土压碎, 荷载突然下降. 破坏后照片见图 3.

去掉外包 GFRP 管, 可看到试件内部的破坏状态, 如图 4 所示. 由于端部约束大, 应变较试件中部小, 以至于中部混凝土压碎, 顶部残留混凝土成倒锥形, 底部残留混凝土形成倾斜剪切面. 后续的纤维环向应变纵向分布也表明, 随着应力增加, 试件中部混凝土应变增长幅度大, 极限应变亦较端部大.

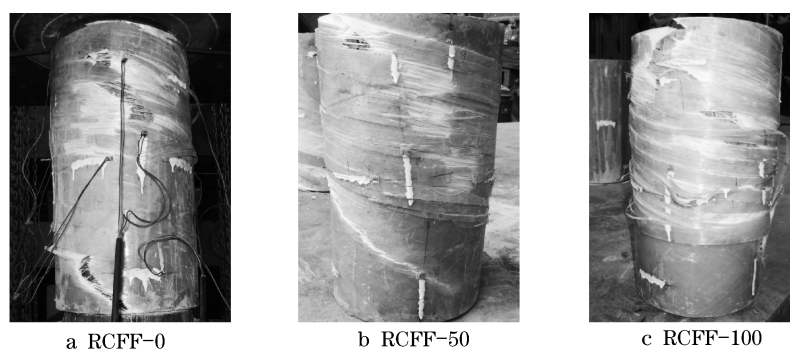


图 3 试件典型破坏图

Fig.3 Typical failure

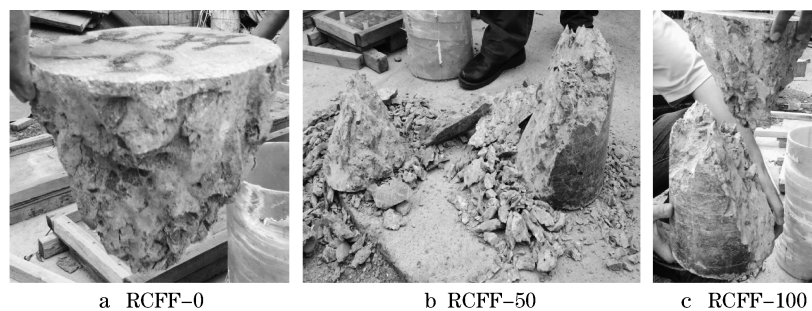


图 4 试件内部破坏状态

Fig.4 Inner failure

## 2 主要试验结果

### 2.1 试验数据

主要试验结果列入表 4, 其中:  $f_c$  为核心混凝土 28 d 抗压强度值,  $f_{cc}$  为约束再生混凝土峰值应力,  $\epsilon_0$  为试件峰值应力对应的再生混凝土纵向应变,  $\epsilon_{cu}$  为核心再生混凝土的极限应变,  $\epsilon_{h, \text{rup}}$  为试件中部环向极限应变.

从表 4 可以看出, 除取代率为 50% 和 100% 各有 1 个试件异常外, 取代率为 0, 50%, 100% 的

GFRP 约束再生混凝土试件的强度呈下降趋势. 取代率为 50% 比取代率为 0, 取代率 100% 比取代率 50% 的试件强度各下降 10% 左右. 但  $f_{cc}/f_c$  比值普遍较取代率为 0 的约束混凝土高. 取代率为 100% 的试件强度虽然较取代率 50% 的低 10%, 但强度所对应的变形却比取代率 50% 的试件高 20%, 体现出良好的变形性能. 约束再生混凝土试件变形较约束普通混凝土试件大, 其纵向极限应变和环向极限应变均比约束普通混凝土试件高, 而取代率 50% 和取代率 100% 的试件各极限应变接近.

表 4 主要试验结果列表  
Tab.4 List of main test results

编号	$f_c/\text{MPa}$	$f_{cc}/\text{MPa}$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_{cu}$	$\varepsilon_{h, \text{rup}}$	$\varepsilon_{h, \text{rup}}/\varepsilon_{cu}$	$f_{cc}/f_c$
RCFF-0-1	49.94	63.423	0.016 596	0.023 904	0.028 422	1.189 006	1.270
RCFF-0-2	49.94	65.667	0.018 240	0.026 535	0.021 168	0.797 739	1.315
RCFF-0-3	49.94	62.595	0.018 464	0.024 941	0.023 914	0.958 823	1.253
平均值	49.94	63.895	0.017 767	0.025 127	0.024 501	0.981 856	1.279
RCFF-50-1	42.73	58.298	0.014 166	0.022 754	0.020 118	0.884 152	1.364
RCFF-50-2	42.73	58.505	0.021 840	0.032 273	0.024 085	0.746 289	1.369
RCFF-50-3 <sup>1)</sup>	42.73	84.798	0.033 126	0.041 915	0.026 062	0.621 782	1.985
平均值	42.73	58.401	0.018 003	0.027 514	0.022 102	0.815 221	1.366
RCFF-100-1	39.15	50.150	0.020 604	0.028 984	0.022 914	0.790 574	1.281
RCFF-100-2	39.15	53.508	0.023 826	0.029 962	0.021 289	0.710 533	1.367
RCFF-100-3 <sup>1)</sup>	39.15	78.463	0.039 672	0.050 286	0.031 212	0.620 69	2.004
平均值	39.15	51.829	0.022 215	0.029 473	0.022 102	0.750 554	1.324

1)在取平均值时分别不计这 2 个数据.

2.2 轴向力—纵向位移关系

由各试件的力—位移关系图 5 可以看出,GFRP 约束再生混凝土与约束普通混凝土一样,其过程除了分为弹性、弹塑性和塑性发展阶段,在到达极限应力下降 10%左右后,还有一段可继续受载的平台.从图中也可以看出,破坏严重的 RCFF-50-3 和 RCFF-100-3 试件的承载和变形能力远高于其他试件,这 2 个试件破坏特别严重,均在压力值较高的状态下才发出 GFRP 管爆裂的声音,外包 GFRP 管大面积拉坏,核心混凝土飞出,其外包 GFRP 管约束整体性较强,破坏为突然的整体性破坏.而其他试件均为在 GFRP 管某处出现撕裂而导致裂缝逐渐贯穿全管,初步断定数据异常是由于约束作用的离散性引起的.这 2 个数据偏高

的试件也表明,约束程度对试件的强度和变形有很大的影响,能显著改善试件的受力性能.

从各组 2 号试件应力—应变关系对比(图 6)可以看出,再生粗集料取代率的变化影响试件的最大承载力,再生粗集料含量越多,承载力越小.同时,相对普通混凝土,GFRP 约束再生混凝土的变形能力较大,极限应力对应的应变较约束普通混凝土大.

通过对比约束再生混凝土和未约束再生混凝土(RC-100,RC-50,NC)之间的应力—应变关系<sup>[5]</sup>,虽然图中未约束再生混凝土强度较本试验低,但仍可明显看出,相对“单峰”状未约束再生混凝土应力—应变关系,约束再生混凝土的应力—应变曲线更加饱满,强度和变形得到很大的发展和提高.

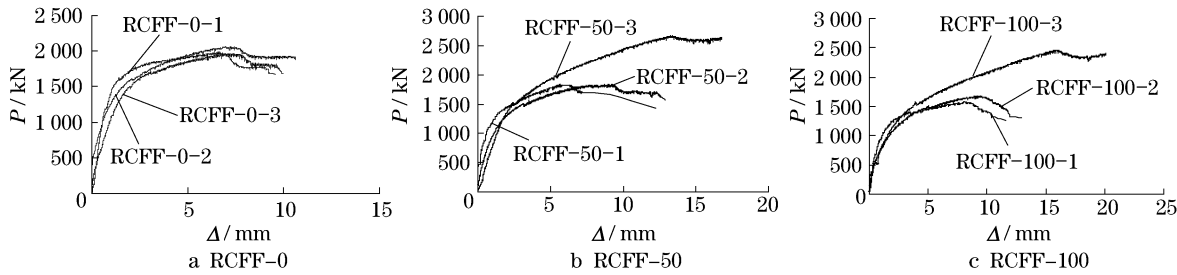


图 5 核心再生混凝土纵向力 P—位移 Δ 关系

Fig.5 Longitudinal force-displacement relationship of inner recycled concrete

2.3 纤维环向应变纵向分布

图 7 为纤维环向应变的纵向分布曲线,从上、中、下 3 部分的应变分布可看出,环向应变沿着试件纵向发生变化,试件上部和下部的应变较一致,中部环向应变开始较两端小,随着应力增长,中部应变增长幅度增大,试件中部的环向应变大于两端的环向应变.

2.4 位移计数据与应变片数据对比

将 GFRP 外侧中部纵向应变片数据与位移计测得位移换算的应变相比较(图 8),可发现各试件二者都十分接近,有部分试件在加载开始阶段和接近破坏阶段比较吻合,在弹塑性发展阶段数据有一定差异.可能是因为加载初期核心混凝土和 GFRP 变形

均较小,随着轴压力的增大,核心混凝土内部微裂缝逐渐发展,变形逐渐增大,二者之间产生了一定变形

差异,而到加载后期,由于核心混凝土膨胀,和外部 GFRP 管结合紧密而共同变形.

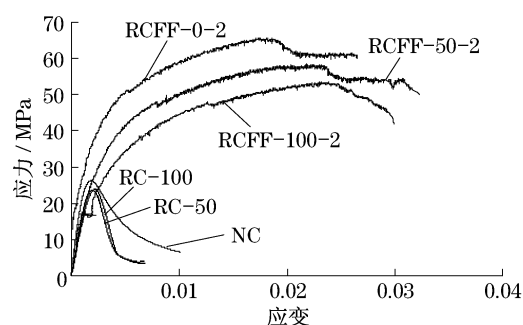


图 6 约束再生混凝土与未约束再生混凝土试件对比

Fig.6 Comparison between confined recycled concrete and unconfined recycled concrete

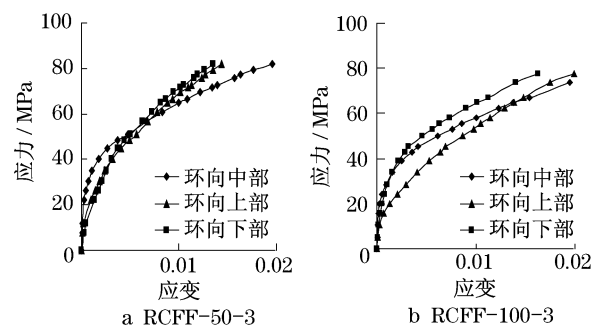


图 7 环向应力—应变纵向分布

Fig.7 Hoop stress—strain curve

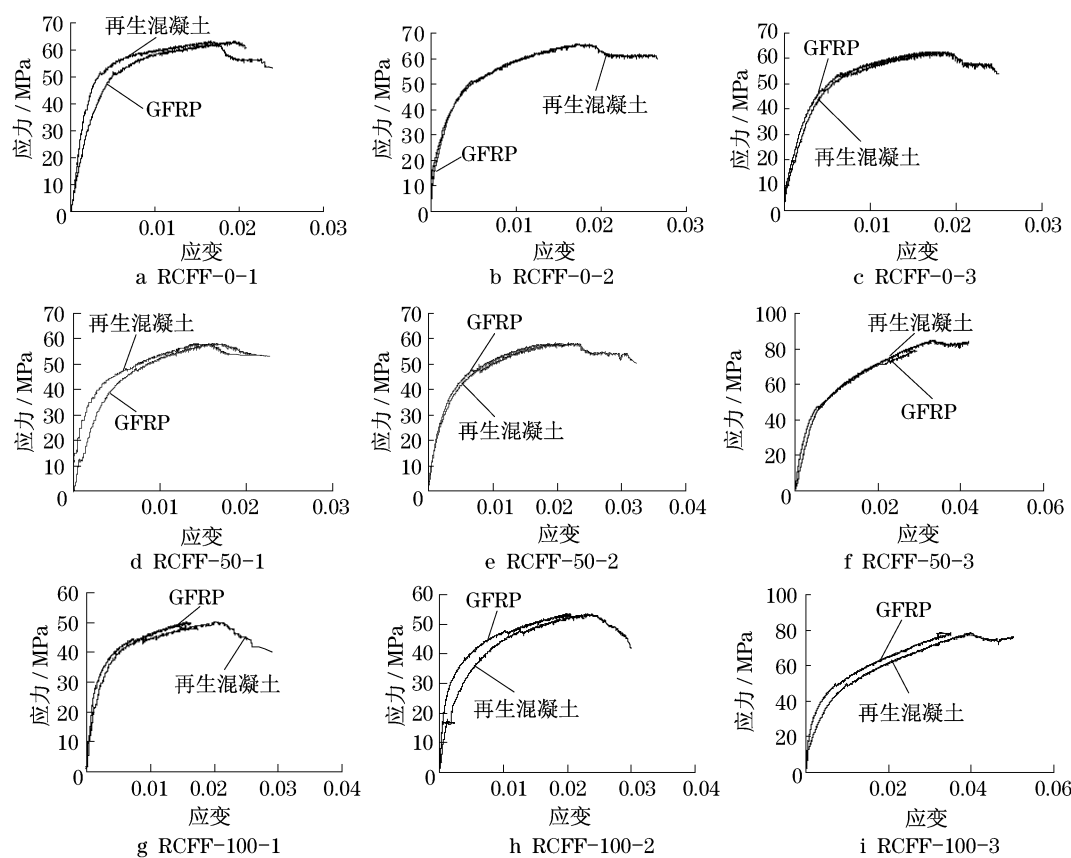


图 8 纵向应力—应变关系

Fig.8 Longitudinal stress—strain relationship

从图 8 应力—应变图上也可以看出,各试件在到达极限强度,应力稍有下降后,外包 GFRP 管仍然能提供有效的约束,使得试件具有良好的变形性能,在应力—应变图上体现出应变强化.由于二者数据接近,核心混凝土的纵向变形可以用 GFRP 管上应变片测得的数据来表征.

## 2.5 横向变形系数

图 9 为各试件横向变形系数和轴向应力的对应图.横向变形系数数值由 GFRP 管中部横向应变片测得的数值除以纵向应变片测得的应变值得出.从图中可看出,随着轴压力的提高,横向变形系数也逐渐增大,开始变化比较缓慢,基本在 0.3~0.5 左右.

在应力为 30 MPa 左右时横向变形系数增加幅度显著加快,说明试件横向变形幅度开始增大,核心再生混凝土中裂缝开始扩展;在增加到 50 MPa 左右时试件接近极限强度,横向变形系数呈现下降趋势。随着再生粗集料取代率的增加,各阶段横向变形系

数有下降趋势。

在较高应力状态下,试件的横向变形明显,到达极限应力时横向变形程度接近或大于纵向变形,使得横向变形系数接近 1 或大于 1。

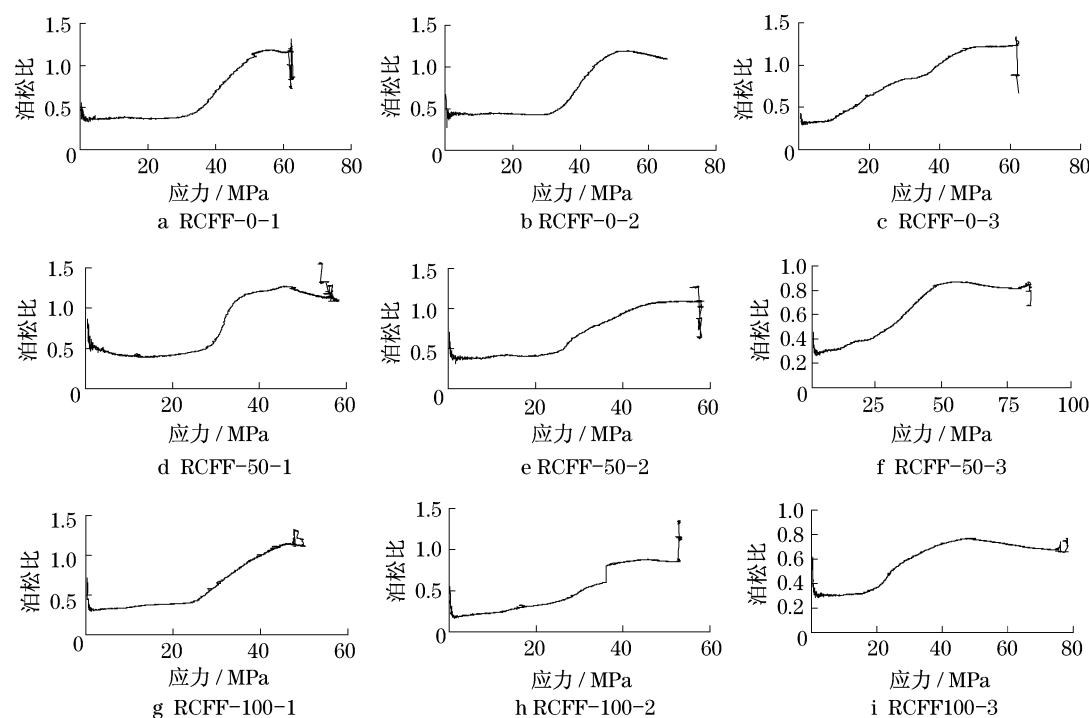


图9 试件横向变形系数

Fig.9 Coefficient of lateral to longitudinal deformation

### 3 结论

(1) 玻璃纤维增强塑料(GFRP)约束作用使再生混凝土的抗压强度提高了约 30%,同时再生混凝土的变形性能也有了显著增强。

(2) 约束再生混凝土受压强度随着再生粗集料取代率的增加而降低,但变形随着再生粗集料取代率的增加有提高的趋势。

(3) 约束再生混凝土受压应力—应变曲线分弹性上升、弹塑性上升、下降和应变强化等 4 个阶段。

(4) GFRP 上所贴纵向应变片测得数据和位移计测得数据接近,再生粗集料的存在对核心混凝土和外包 GFRP 管之间滑移影响较小,GFRP 管上应变片测得数据可以表征核心再生混凝土的相应变形。

(5) GRFP 约束再生混凝土的横向变形系数,在加载初期变化不大,在弹性阶段结束后横向变形系数增大,含再生粗集料试件的横向变形系数较普通混凝土试件低。

### 参考文献:

- [1] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003,26(10):17.  
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete—a review[J]. Concrete, 2003, 26(10): 17.
- [2] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 吴凤英,杨有福.钢管再生混凝土轴压短柱力学性能初探[J].福州大学学报:自然科学版,2005,33(增刊):305.  
WU Fengying, YANG Youfu. Preliminary research on behaviors of recycled concrete-filled steel stub columns[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2005, 33(sup): 305.
- [4] 杨有福.钢管再生混凝土构件力学性能和设计方法若干问题的探讨[J].工业建筑,2006,36(11):1.  
YANG Youfu. Discussion on several problems of mechanical behavior and design method of recycled concrete-filled steel tubular members[J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 1.
- [5] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力—应变全曲线试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(11):1445.  
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress—strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1445.