

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.03.022

再生砖粗骨料混凝土基本力学性能试验研究

赵爱华, 翟爱良, 韩健, 王成名, 戚勇帽

(山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为深入了解再生砖粗骨料混凝土的基本力学性能, 测试了5种再生砖粗骨料替代率的混凝土棱柱体抗压强度、应力-应变关系和静力受压弹性模量等基本力学指标。结果表明: 再生砖粗骨料混凝土棱柱体受压破坏过程与破坏形态与普通混凝土类似; 随着再生砖粗骨料替代率的增加, 棱柱体抗压强度先增大后减小、静力受压弹性模量逐渐降低、单轴受压应力-应变曲线的峰值应变逐渐增大; 提出了再生砖粗骨料混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的换算关系以及单轴受压应力-应变曲线的拟合公式, 为再生砖粗骨料混凝土的进一步研究提供了重要依据。

关键词: 再生砖粗骨料混凝土; 棱柱体抗压强度; 应力-应变曲线; 峰值应变; 静力受压弹性模量

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-0098-08

Experimental Research on Basic Mechanical Properties of Recycled-brick Coarse-aggregate Concrete

ZHAO Ai-hua, ZHAI Ai-liang, HAN Jian, WANG Cheng-ming, QI Yong-guo

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: In order to deeply understand the basic mechanical properties of recycled-brick coarse-aggregate concrete, the compressive strength of prism, stress-strain curves, elastic modulus in static compression and other basic mechanical indexes were tested with five sets of this concrete. The results showed that the compressive failure process and mode of the prism of this concrete was similar to that of ordinary concrete. In addition, with the increasing of the replacement ratio of this recycled-brick coarse-aggregate, the compressive strength of the prism firstly increased and then decreased, the elastic modulus in static compression decreased gradually, and the peak strain of uniaxial compressive stress-strain curve increased gradually. Finally, the conversion relation between the prism's compressive strength and cube's compressive strength of this concrete as well as the fitting formula of uniaxial compressive stress-strain curve are put forward, which could provide an important basis for further study on this recycled-brick coarse-aggregate concrete.

Keywords: recycled-brick coarse-aggregate concrete; compressive strength of prism; stress-strain curve; peak strain; elastic modulus in static compression

我国目前正全面开展大规模城乡建设, 众多建筑工程的建设需要以大量的混凝土原材料作为支撑, 而在混凝土的几种原材料中, 骨料的用量居于首位。混凝土骨料的制造需要开采大量的砂石等自然资源, 使得砂石骨料资源紧缺, 并且严重破坏了生态环境。与此同时, 大范围的旧村改造、房屋拆迁产生了大量的建筑垃圾, 其中碎砖废弃物初步估计将达

总量的30%~50%^[1]。传统建筑垃圾的处理不仅造成建筑原材料的浪费, 而且还破坏了自然环境。如将废弃资源再生利用, 将碎砖破碎处理使之成为再生骨料并用以配制中低强度的混凝土, 以上所提的两个问题便可得到很好的解决, 这在经济、环保和科学研究等方面都极具重要意义。近年来, 已有研究人员对再生砖粗骨料混凝土性能与应用进行了研

究和开发,但是,多数科研项目侧重于再生砖粗骨料混凝土物理性能的研究^[2-8],对其力学性能研究甚少^[9-11]。本课题对再生砖粗骨料混凝土棱柱体抗压强度、应力-应变关系以及静力受压弹性模量等力学性能进行了试验研究,为深入了解再生砖粗骨料混凝土的基本力学性能奠定基础。

1 试验准备

本试验所制作的再生砖粗骨料混凝土为再生砖粗骨料部分或全部替代普通粗骨料(石子),替代率分别为0、30%、50%、70%、100%,再生砖粗骨料与普通粗骨料的粒径值按从小到大分为5 mm~10 mm、10 mm~16 mm、16 mm~20 mm三个范围,并且为使试验更具有对比性,两者采用相同的级配组成,粒径5 mm~10 mm占15%,10 mm~16 mm占35%,16 mm~20 mm占50%。

1.1 试验材料

再生骨料:试验中将废弃砖(Mu10)人工破碎、筛分、水洗、晾晒,为增强骨料之间的粘结力,改善再生砖粗骨料内部微观结构,对再生砖粗骨料进行了

水泥浆包裹强化处理^[12]。

天然骨料:细骨料为泰安市河产中砂,粗骨料为泰安市建材公司生产的碎石。

经试验,再生砖粗骨料与天然粗骨料的基本物理性能见表1^[13]。

表1 粗骨料材料性能实验结果

粗骨料类型	堆积密度 /(kg·m ⁻³)	表观密度 /(kg·m ⁻³)	吸水率 /%	压碎指标 /%
再生粗骨料	1008	2400	14.10	38
天然粗骨料	1509	2670	0.80	20

水泥:选用泰安鲁润水泥制造有限公司生产的32.5强度等级的复合硅酸盐水泥。

1.2 配合比设计

由于再生砖粗骨料表面粗糙、孔隙率大,且在破碎过程中其内部往往会产生大量的裂纹,因此与普通混凝土相比,再生砖粗骨料吸水率要大得多,所以不同再生砖粗骨料替代率的各组混凝土的配合比有所不同。本试验以文献^[13-14]所建议的配合比为基准,设计并制作试件以深入研究再生砖粗骨料混凝土的基本力学性能。配合比设计见表2。

表2 再生砖粗骨料混凝土配合比

试件 编号	再生砖粗骨 料替代率/%	水胶比 (B/C)	砂率	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)				
				水	水泥	砂	天然骨料	再生砖骨料
LF1	0	0.621	0.37	189.3	305.4	709.5	1204.7	0
LS1	0	0.566	0.37	198.7	333.5	709.5	1204.7	0
LF2	30	0.638	0.37	212.3	332.9	654.8	843.3	268.5
LS2	30	0.621	0.37	220.3	354.7	654.8	843.3	268.5
LF3	50	0.648	0.37	227.6	351.2	618.3	602.4	447.5
LS3	50	0.636	0.37	234.7	368.9	618.3	602.4	447.5
LF4	70	0.657	0.37	242.9	369.5	581.8	361.4	626.5
LS4	70	0.651	0.37	249.2	383.0	581.8	361.4	626.5
LF5	100	0.670	0.37	265.9	397.0	527.1	0	894.9
LS5	100	0.670	0.37	270.8	404.2	527.1	0	894.9

1.3 试件的制作与养护

本试验设计并制作了两批尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的标准棱柱体试件,每批次按5种再生砖粗骨料替代率分为5组,每组六块,共计60块。其中第一批次30块用于测试棱柱体抗压强度和单轴应力-应变曲线,第二批次30块用于测试静力受压弹性模量。采用人工拌合,标准钢模成型,振动台振捣密实,静置24 h后编号、拆模,拆模后的试件放在相对温度为20±2℃、相对湿度为95%的标准养护室养护至龄期28 d。

2 试验过程与结果

2.1 试验设备与方法

本研究采用山东农业大学结构力学实验室TYA-3000型微机控制电液伺服压力试验机,参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[15](GB/T50081-2002)中“轴心抗压强度试验”、“静力受压弹性模量试验”的试验步骤、相关规定及试验结果数据分析计算公式,进行棱柱体抗压强度、单轴应力-应变曲线和静力受压弹性模量的测定。加载速率均为4 kN/s,

试验过程中对试件所施加的轴向荷载和混凝土纵向位移均由计算机自动采集,微变形测量仪标距 150 mm,人工记录每测点变形读数。

2.2 棱柱体抗压强度

试验所测 5 种再生砖粗骨料替代率下 10 组混

凝土棱柱体抗压强度值如表 3 所示。参考文献[13-14]所测得的相同配合比的再生砖粗骨料混凝土立方体抗压强度,以各组平均值作为代表值,并计算混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值 f_c/f_{cu} 一并列于表 3。

表 3 再生砖粗骨料混凝土的立方体抗压强度与棱柱体抗压强度

试件编号	坍落度/mm	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa		棱柱体抗压强度实测值/kN			棱柱体抗压强度 f_c /MPa		f_c/f_{cu}
		实测值	平均值				实测值	平均值	
LF1	23	26.4	26.9	254.4	230.2	230.1	22.6	23.0	0.86
LS1	32	27.3		238.0	253.3	249.0	23.4		
LF2	26	26.2	25.8	262.0	258.5	252.8	24.5	25.8	1.00
LS2	24	25.3		271.7	288.8	296.7	27.1		
LF3	19	28.6	27.7	264.4	254.2	268.3	24.9	24.3	0.88
LS3	20	26.8		242.2	252.8	249.8	23.6		
LF4	17	29.4	28.8	239.0	258.0	258.0	23.9	24.0	0.84
LS4	28	28.1		248.6	263.8	249.4	24.1		
LF5	13	29.0	27.8	250.7	229.3	240.0	22.8	23.0	0.83
LS5	18	26.6		247.9	237.0	243.8	23.1		

根据表 3 绘制的再生砖粗骨料混凝土棱柱体抗压强度 f_c/f_{cu} 与再生砖粗骨料替代率的关系分别如图 1、图 2 所示。

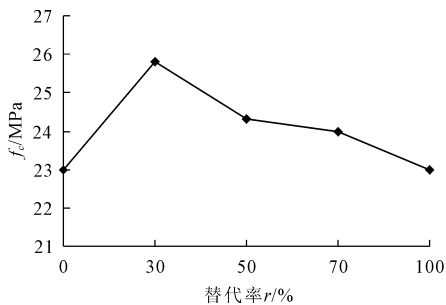


图 1 棱柱体抗压强度与替代率的关系

2.3 破坏过程与形态

再生砖粗骨料混凝土棱柱体试件的破坏过程与破坏形态与普通混凝土相似,无明显差异。普通混凝土棱柱体在达到峰值应力之前,试件上逐渐出现

少量竖向细微裂缝,达到峰值应力之后,承载力下降较慢,出现多条不连续的纵向短裂缝,然后形成斜裂缝。再生砖粗骨料混凝土棱柱体在加载初期无明显裂缝,接近或超过峰值应力后,试件中部短时间内出现若干条平行于受力方向的纵向可见裂缝,继续试验,裂缝迅速发展,互相贯通,试件突然破坏,丧失承载能力,部分试件破坏时伴随劈裂声响。试件的典型破坏形态与剖开后的断面分别如图 3、图 4 所示。

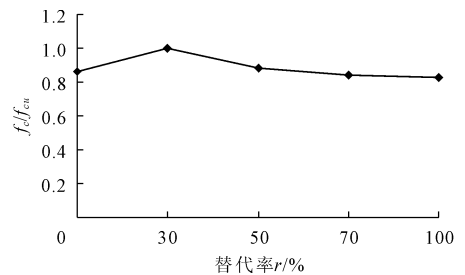


图 2 f_c/f_{cu} 与替代率的关系

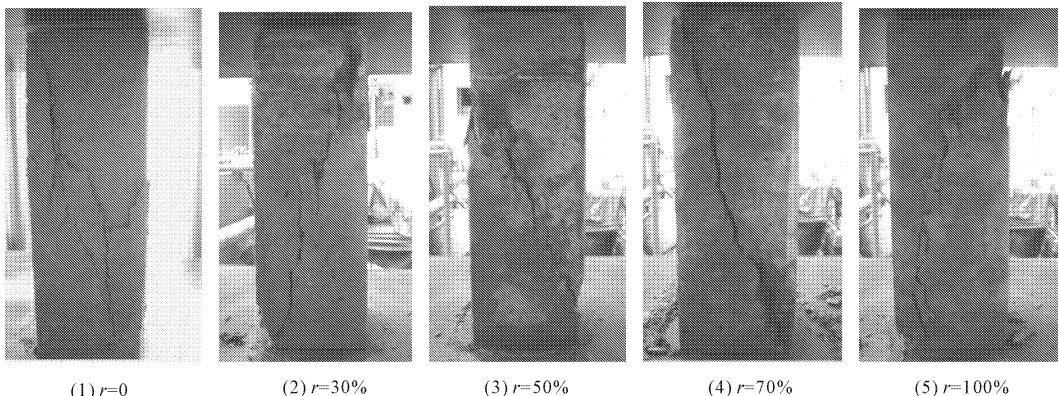


图 3 再生砖粗骨料混凝土棱柱体试件的破坏形态

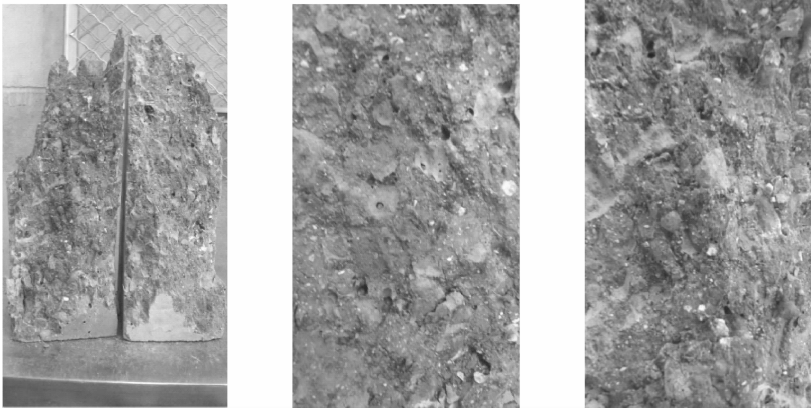


图 4 再生砖粗骨料混凝土棱柱体试件破坏后剖开断面

2.4 应力 - 应变曲线

通过试验实测荷载、位移数据利用式(1)进行转化,得到了 10 组试件受力过程单轴应力 - 应变曲线,如图 5 所示。

$$\sigma = \frac{N}{A}, \epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

式中: N 为试件的轴向压力; A 为再生砖粗骨料混凝土试件的全截面面积; Δl 为试件受力过程中的压缩位移; l 为试件的总高度。

图 6 给出了 5 种再生砖粗骨料替代率下混凝土的应力 - 应变曲线。为了便于分析比较,每条曲线均取自实测的相同再生砖粗骨料替代率下的 6 个棱柱体试件应力 - 应变数据的平均值。

2.5 峰值应变

根据图 6 中 5 种再生砖粗骨料替代率下混凝土的应力 - 应变曲线可得到各曲线的峰值应力和峰值应变,具体数值见表 4。

表 4 各再生砖粗骨料替代率下混凝土的峰值应力与峰值应变

再生砖粗骨料替代率/%	峰值应力 σ_0 /MPa	峰值应变 ϵ_0
0	23.92483	0.0020000
30	26.97717	0.0021656
50	25.52617	0.0021656
70	25.27967	0.0024995
100	24.14600	0.0026655

2.6 静力受压弹性模量

静力受压弹性模量试验数据及计算值如表 5 所示。

表 5 静力受压弹性模量试验实测数据与计算

试件编号	F_0 /kN	F_a /kN	Δn /mm	E_c /($N \cdot mm^{-2}$)	
LF1	LF1-4	5	80	0.0388	28553.3
	LF1-5	5	80	0.0405	
	LF1-6	5	80	0.0389	
LS1	LS1-4	5	83	0.0342	32773.1
	LS1-5	5	83	0.0389	
	LS1-6	5	83	0.0340	
LF2	LF2-4	5	87	0.0503	22962.0
	LF2-5	5	87	0.0545	
	LF2-6	5	87	0.0559	
LS2	LS2-4	5	95	0.0495	26627.2
	LS2-5	5	95	0.0515	
	LS2-6	5	95	0.0511	
LF3	LF3-4	5	88	0.0597	20877.6
	LF3-5	5	88	0.0591	
	LF3-6	5	88	0.0601	
LS3	LS3-4	5	83	0.0515	22601.4
	LS3-5	5	83	0.0520	
	LS3-6	5	83	0.0518	
LF4	LF4-4	5	84	0.0743	15814.1
	LF4-5	5	84	0.0751	
	LF4-6	5	84	0.0754	
LS4	LS4-4	5	85	0.0674	17955.1
	LS4-5	5	85	0.0657	
	LS4-6	5	85	0.0674	
LF5	LF5-4	5	80	0.0851	13371.6
	LF5-5	5	80	0.0825	
	LF5-6	5	80	0.0848	
LS5	LS5-4	5	81	0.0770	15738.6
	LS5-5	5	81	0.0699	
	LS5-6	5	81	0.0704	

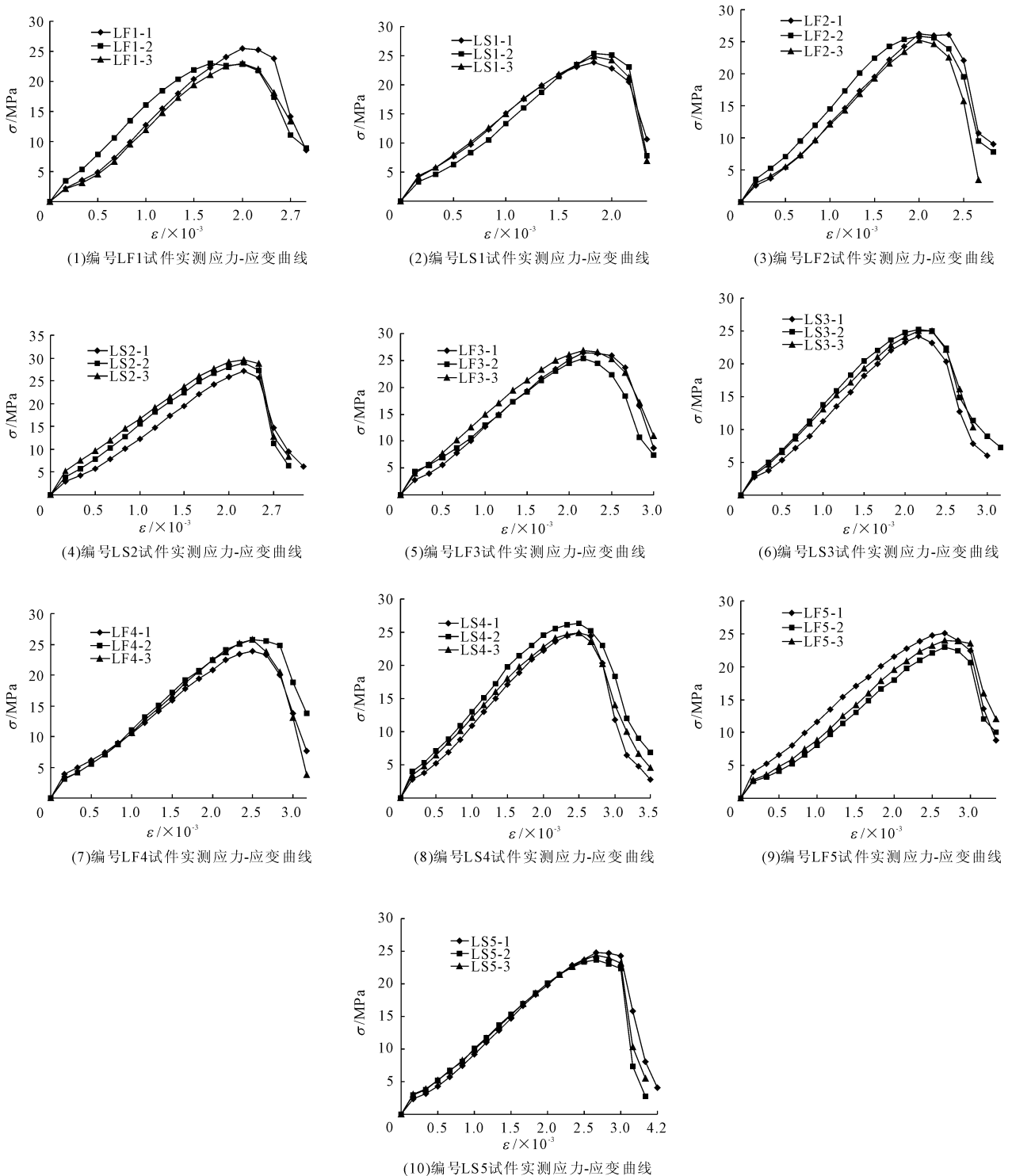


图5 再生砖粗骨料混凝土实测应力-应变曲线

3 试验结果分析

(1) 由图 2 可见,随着再生砖粗骨料替代率的增加,混凝土的 f_c/f_{cu} 值先增大后减小,总体较平均,大致呈一条直线,两者比例在 0.83 ~ 1.00 之间变化。这可能是因为再生砖粗骨料本身弹性模量较低,致使混凝土弹性模量低、试件横向变形能力强,试

件中部应变滞后于应力,使得轴心抗压强度测试值提高。参照中国混凝土规范^[16]中相关的公式模型,通过统计回归,建议再生砖粗骨料混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的换算关系如式(2)所示。

$$f_c = 0.88f_{cu} \quad (2)$$

式中: f_c 为再生砖粗骨料混凝土棱柱体抗压强度; f_{cu} 为再生砖粗骨料混凝土立方体抗压强度。

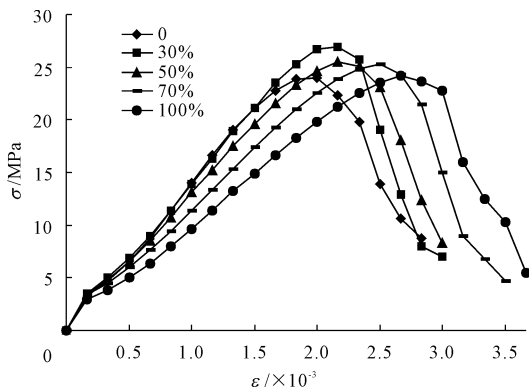


图 6 各再生砖粗骨料替代率下混凝土的应力-应变曲线

由图 3 可见,试件的破坏形态为斜剪破坏。从再生砖粗骨料混凝土棱柱体试件破坏后剖开的断面细致观察发现,破坏部分表现为黏结各粗骨料的水泥胶界面的裂开,部分为再生砖粗骨料本身的断裂,但是天然粗骨料没有发生断裂。这一点和普通混凝土有所不同,后者仅仅表现为黏结各粗骨料的水泥胶界面的裂开。

(2) 图 5 显示,每一组试验材料和试验条件完全相同的 3 个混凝土试件的应力-应变发展变化趋势基本一致,总体上能够反映试件受力变化的特性,但存在一定的离散性。

由图 6 可以看出,再生砖粗骨料替代率对混凝土的应力-应变曲线有较大影响,尤其表现在峰值应变随着替代率的增加而增大,但总体上均由上升段和下降段组成,且存在比例极限点、临界应力点和峰值点等特征点。随着再生砖粗骨料替代率的增加,应力-应变曲线上升段的斜率逐渐减小,表明混凝土的弹性模量逐渐减小。

(3) 由表 4 绘制再生砖粗骨料混凝土峰值应变与替代率的关系如图 7 所示。从图 7 中可以看出,随着再生砖粗骨料替代率的增加,混凝土的峰值应变逐渐增大,当替代率为 100% 时,混凝土的峰值应变(ϵ_0)增加约 33%。混凝土峰值应变增大的主要原因是再生砖粗骨料的弹性模量较低。采用最小二乘法进行回归分析,得出混凝土的峰值应变与再生砖粗骨料替代率的关系如式(3)所示:

$$\epsilon_0 = 0.00195 + 6.88845 \times 10^{-6} r, R = 0.89182 \quad (3)$$

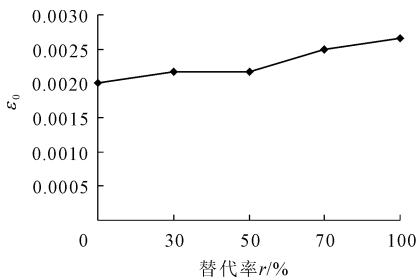


图 7 各再生砖粗骨料替代率下混凝土的峰值应变

(4) 从表 5 中可以看出,再生砖粗骨料混凝土的静力抗压弹性模量低于普通混凝土,并且再生砖粗骨料替代率对混凝土的弹性模量有较大影响,混凝土的弹性模量随着再生砖粗骨料替代率的增加而降低,当再生砖粗骨料替代率为 100% 时,弹性模量降低 52.5%。再生砖粗骨料混凝土弹性模量降低的原因主要是再生砖粗骨料本身弹性模量较低以及再生砖粗骨料混凝土的空隙率也较高。

《混凝土结构设计规范》中采用式(4)计算混凝土的弹性模量:

$$E_C = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (4)$$

式中: E_C 为混凝土弹性模量(MPa); f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度(MPa)。

表 6 给出了按式(4)计算得到的混凝土的弹性模量值。与试验结果相对比,可以看出按式(4)计算得到的 5 种再生砖粗骨料替代率的混凝土弹性模量值比试验实测值整体偏高,误差较大。在这里建议两组再生砖粗骨料混凝土的弹性模量计算公式,一是在式(4)的基础上对其中部分参数进行调整进而提出的计算公式,见式(5);一是线性回归弹性模量与再生砖粗骨料替代率的关系,见式(6)。分别计算两组公式的弹性模量计算值与相对误差,结果同列于表 6,两组公式拟合结果如图 8 所示。

$$E_C = \frac{10^5}{21.81322 - \frac{468.66473}{f_{cu}}}, R = 0.15681 \quad (5)$$

$$E_C = 30034.33966 - 166.13879r, R = 0.96703 \quad (6)$$

表 6 静力抗压弹性模量试验实测值与各组公式计算值

再生砖粗骨料替代率/%	弹性模量 /MPa	式(4)弹模计算值/MPa	相对误差 /%	式(5)弹模计算值/MPa	相对误差 /%	式(6)弹模计算值/MPa	相对误差 /%
0	30663.2	28653.6	-6.55	22775.2	-25.72	30034.3	-2.05
30	24794.6	28209.1	13.77	27412.9	10.56	25050.2	1.03
50	21739.5	28962.8	33.23	20433.5	-6.01	21727.4	-0.06
70	16884.6	29369.8	73.94	18050.1	6.90	18404.6	9.00
100	14555.1	29000.6	99.25	20182.5	38.66	13420.5	-7.80

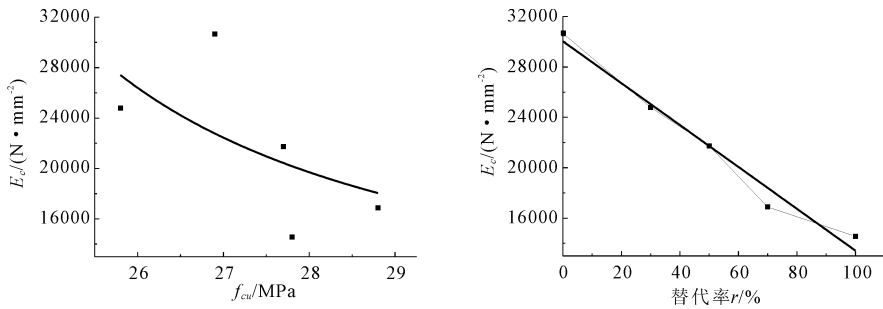


图 8 静力受压弹性模量拟合曲线

从表 6 可以看出,在《混凝土结构设计规范》所采用的混凝土弹性模量计算公式的基础上调整部分参数所提出的式(5)较原公式相对误差减小,但线性回归弹性模量与再生砖粗骨料替代率的关系所提出的式(6)精度更高,更贴近实际情况,表明再生砖粗骨料混凝土的静力受压弹性模量与再生砖粗骨料替

代率近似呈线性关系。所以,建议采用式(6)计算再生砖粗骨料混凝土的静力受压弹性模量。

4 应力 - 应变曲线方程拟合

取 $x = \varepsilon/\varepsilon_0$, $y = \sigma/f_0$, 以 σ/f_0 和 $\varepsilon/\varepsilon_0$ 为坐标的各替代率下归一化应力 - 应变曲线见图 9。

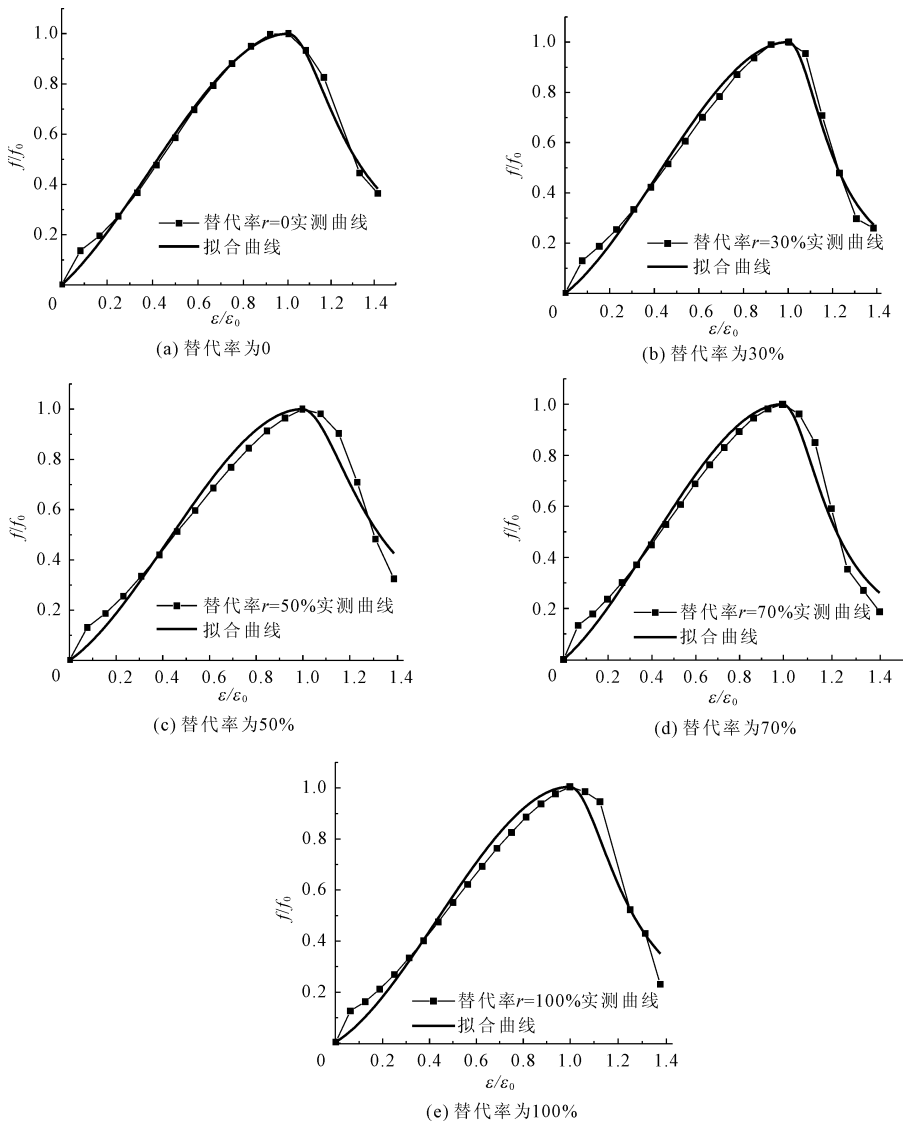


图 9 归一化的再生砖粗骨料混凝土应力 - 应变曲线与拟合曲线

由图9可见,各应力-应变曲线的上升段和下降段有较明显的区别。参考过镇海教授等提出的适合普通混凝土的应力-应变曲线方程^[17],利用Origin8软件进行拟合:

当 $0 \leq x < 1$ 时, $y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3$

当 $x \geq 1$ 时, $y = x/[b(x - 1)^2 + x]$

参数 a 值为混凝土的初始弹性模量与峰值割线模量的比值,反映出混凝土的脆性; b 的大小与无量纲下降段曲线下的面积有关,反映出混凝土的延性。利用最小二乘法对试验数据进行拟合,得到各再生砖粗骨料替代率的参数 a 、 b 值见表7。

表7 数据拟合 a 、 b 值

替代率 $r/\%$	参数 a /相关系数 R	参数 b /相关系数 R
0	0.81861/0.99639	13.12466/0.98291
30	0.69208/0.99203	24.7908/0.97859
50	0.64890/0.98670	12.59275/0.92417
70	0.75851/0.98985	24.72219/0.94979
100	0.57511/0.98518	18.46190/0.93220

5种再生砖粗骨料替代率的混凝土实测应力-应变曲线与拟合曲线见图9。

由表7可看出,再生砖粗骨料混凝土的 a 值较普通混凝土小,且随着再生砖粗骨料取代率的增加基本呈不断降低的趋势,表明混凝土的脆性增加;再生砖粗骨料混凝土的 b 值整体上较普通混凝土大,说明了再生砖粗骨料混凝土破坏过程较迅速,延性较差,侧面印证了再生砖粗骨料混凝土棱柱体试件的破坏过程与形态。

5 结论

(1) 随着再生砖粗骨料替代率的增加,混凝土的棱柱体抗压强度先增大后减小,再生砖粗骨料混凝土的棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值高于普通混凝土。

(2) 再生砖粗骨料混凝土棱柱体受压破坏过程与破坏形态与普通混凝土类似,再生砖粗骨料混凝土材质较脆,破坏较迅速,延性较差;破坏断面部分表现为黏结各粗骨料的水泥胶界面裂开,部分为再生砖粗骨料本身的断裂。

(3) 再生砖粗骨料混凝土的单轴受压应力-应变曲线总体形状与普通混凝土相似,均由上升段和下降段组成。再生砖粗骨料替代率对混凝土的应力-应变曲线有较大影响,尤其表现在随着替代率的增加,峰值应变逐渐增大,应力-应变曲线上升段的斜率逐渐减小。应力-应变曲线可以分别用3次多项式和有理分式来拟合。5种替代率下参数 a 值和

b 值可按本文表7取值。

(4) 再生砖粗骨料混凝土静力受压弹性模量低于普通混凝土,且随着再生砖粗骨料替代率的增加逐渐降低,降低幅度较大。本文推荐采用线性回归弹性模量与再生砖粗骨料替代率的关系所提出的公式计算再生砖粗骨料混凝土的静力受压弹性模量,精度较高。

(5) 不同来源再生砖粗骨料对单轴受压作用的影响等问题,值得今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 张孟雄,张学良,王卫秋,等.建筑垃圾砖的开发及应用[J].粉煤灰综合利用,2006,(3):43-45.
- [2] 刘亚萍.建筑垃圾的处理:废砖、混凝土再生利用问题的探索[J].建筑科技情报,1998,(1):11-14.
- [3] 卢建忠,马 嵘.“体积取代法”碎砖再生混凝土性能的研究[J].嘉兴学院学报,2003,15(1):113-115.
- [4] 邢振贤,刘利军,赵玉青,等.碎砖骨料再生混凝土配合比研究[J].再生资源研究,2006,(2):38-40.
- [5] 刘子振,肖 斌,李晓龙,等.废旧烧结砖再生混凝土性能试验研究[J].混凝土,2011,(3):72-74.
- [6] 严捍东,陈秀峰.废弃黏土砖再生骨料对混凝土性能的影响研究[J].四川建筑科学研究,2009,35(5):179-182.
- [7] 刘 秦.再生废砖粗骨料混凝土配合比及物理性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2010.
- [8] 王长生.再生粘土砖混凝土性能试验[J].房材与应用,2001,29(1):44-45.
- [9] 谢玲君,翟爱良,翟文举,等.影响烧结砖瓦再生骨料混凝土强度主要因素的试验研究[J].混凝土,2012,(5):70-73.
- [10] 宗 兰,余 倩,张士萍.碎砖类骨料再生混凝土的力学性能研究[J].混凝土,2013,(6):52-54.
- [11] 伍 阳,张 敏,樊 蓉,等.低强度再生碎砖混凝土抗压强度试验研究[J].墙材革新与建筑节能,2013,(3):35-37.
- [12] 谢玲君,翟爱良,王 晖,等.烧结砖瓦再生骨料级配混凝土力学性能的影响[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):52-55,80.
- [13] 季昌良,翟爱良,翟文举,等.再生砖粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J].水利水运工程学报,2013,(6):59-64.
- [14] 王纯合,翟爱良,陈树建,等.再生砖骨料混凝土梁斜截面抗剪承载力分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):151-154.
- [15] 中华人民共和国建设部.GB/T50081-2002.普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [16] 中华人民共和国建设部.GB50010-2002.混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [17] 过镇海,张秀琴,张达成,等.混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J].建筑结构学报,1982,3(1):1-12.