

文章编号:1673-2049(2014)03-0052-06

# 再生混凝土砌块砌体力学性能试验

朱丽华,戴 军,白国良,张锋剑

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**通过对再生混凝土砌块砌体的抗压强度和抗剪强度试验,探讨了砌体的破坏过程和破坏形态,并根据试验结果分析了再生混凝土砌块砌体强度与砌块强度和砂浆强度的关系。基于试验数据计算了再生混凝土砌块砌体的强度标准值和设计值。研究表明:再生混凝土砌块砌体与普通混凝土砌块砌体的力学性能基本一致,且具有较好的抗压稳定性;普通混凝土砌块砌体的抗压强度和抗剪强度计算公式适用于再生混凝土砌块砌体。

**关键词:**再生混凝土砌块砌体;力学性能;抗压强度;抗剪强度

**中图分类号:**TU365 **文献标志码:**A

## Experiment on Mechanical Properties of Recycled Concrete Hollow Block Masonry

ZHU Li-hua, DAI Jun, BAI Guo-liang, ZHANG Feng-jian

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** The experiment of compressive strength and shear strength of the recycled concrete hollow block masonry was conducted to investigate the failure process and failure mode of the masonry. Based on the experiment results, the relations between the strength of recycled concrete hollow block masonry and the strength of block and mortar were analyzed. The standard value and design value of strength for recycled concrete hollow block masonry were calculated based on the experiment data. The results show that the mechanical properties of recycled concrete hollow block masonry are basically in accordance with those of the normal one, and the quality stability is satisfactory. The calculation formulae of compressive strength and shear strength of normal concrete hollow block masonry can be applied to the recycled concrete hollow block masonry.

**Key words:** recycled concrete hollow block masonry; mechanical property; compressive strength; shear strength

## 0 引言

将废弃混凝土加工成再生骨料从而生产再生混凝土是发展绿色混凝土的重要方向<sup>[1]</sup>。再生集料长期服役的积累损伤和破碎时的二次损伤,会造成其材性退化,其中吸水率和压碎指标的上升最为显著。

在满足经济性的条件下,很难同时提高再生混凝土的工作性能和力学性能,而且再生混凝土强度的离散性较大,因此再生混凝土制品的应用范围受到了很大制约<sup>[2]</sup>。梁、柱作为结构主要承重构件,应保持较高的可靠性水平。由于很难了解再生骨料损伤对梁、柱安全性的时间效应,再生混凝土用于梁、柱构

收稿日期:2014-05-10

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ04B01-02);西安市工业应用技术研发项目(CX12187-7)

作者简介:朱丽华(1979-),男,江苏溧阳人,副教授,工学博士,E-mail:zhulihuaxa@163.com。

件时受到了很大限制<sup>[3]</sup>。在现有理论和工艺条件下,将再生混凝土砌块砌体作为再生混凝土的主要制品,无疑具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

目前,各国对再生混凝土砌块砌体力学性能的研究还较少。肖建庄等<sup>[4]</sup>的研究发现,再生混凝土砌块砌体的破坏过程与普通混凝土砌块砌体相似,其抗压强度低于普通混凝土砌块砌体强度。文献<sup>[5],[6]</sup>中的研究表明,再生混凝土空心砌块砌体抗剪强度低于普通混凝土砌块砌体抗剪强度,并回归了其抗剪强度的计算公式。本文中笔者采用三排孔再生混凝土砌块,选择合理的砌块强度和砂浆强度组合,研究再生混凝土砌块砌体的力学性能,并为再生混凝土砌块砌体的应用提供了试验基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验所用的再生混凝土砌块均为 390 mm × 240 mm × 590 mm 三排孔砌块<sup>[7]</sup>,见图 1。该类砌块充分利用废弃材料,A,B类砌块中的再生骨料为破碎的废弃混凝土,再生粗骨料的取代率达到了 100%,再生细骨料分别选用取代率为 0%和 40%制成强度等级 MU10 和 MU7.5 的承重砌块;C类砌块中的再生骨料为废弃砖渣,其配合比与 B类砌块相同,强度等级为 MU5,三排孔再生混凝土砌块强度如表 1 所示。

再生混凝土砌块砌体按照《砌体基本力学性能



图 1 三排孔再生混凝土砌块

Fig. 1 Recycled Concrete Block with Three-rows Holes

表 1 三排孔再生混凝土砌块强度

Tab. 1 Strength of Recycled Concrete Block with Three-rows Blocks

砌块类别	平均抗压强度/MPa	最小抗压强度/MPa	强度等级
A	10.50	8.21	MU10
B	7.53	6.16	MU7.5
C	5.31	4.20	MU5

试验方法标准》(GBJ 129—90)<sup>[8]</sup> 砌筑,砌体由 4 块再生混凝土三排孔砌块砌成。砌块砌体抗压试件如图 2(a),(b)所示;抗剪试件在抗压试件不同位置处用 10 mm 厚 1:3 水泥砂浆抹面,如图 2(c)所示。考虑砌体质量的稳定性和试验数据的离散性,在抗压强度试验中 A 类砌块每组 3 个试件,B,C 类砌块每组 5 个试件;在抗剪强度试验中各类砌块每组均为 6 个试件,共设计 93 个试件,如表 2 所示。

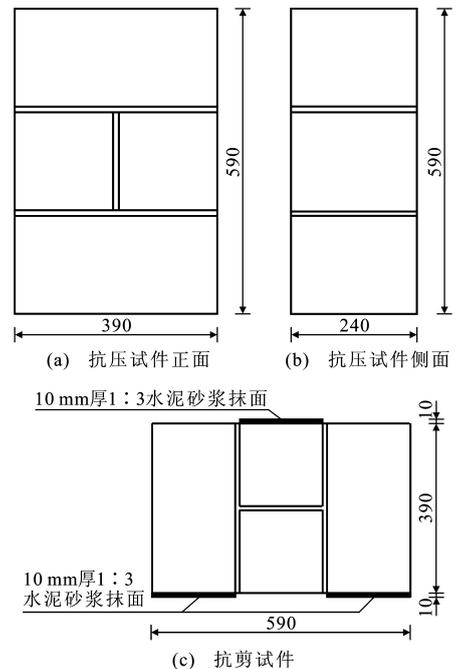


图 2 再生混凝土砌块砌体(单位:mm)

Fig. 2 Recycled Concrete Hollow Block Masonry (Unit:mm)

表 2 再生混凝土砌块砌体试件组合

Tab. 2 Combination of Recycled Concrete Hollow Block Masonry

试件组号	砌块强度等级	砂浆强度等级	试件数目
A1	MU10	M7.5	9
A2	MU10	M10	9
A3	MU10	M15	9
B1	MU7.5	M5	11
B2	MU7.5	M7.5	11
B3	MU7.5	M10	11
C1	MU5	M2.5	11
C2	MU5	M5	11
C3	MU5	M7.5	11

### 1.2 试验现象与结果

再生混凝土砌块砌体的抗压试验在 YE-200A 压力试验机上进行。试件采用分级加载,每级荷载为预估破坏荷载的 10%。加载初期,砌体表面未出

现裂缝,用于测量变形的机械千分表的读数稳步增长;试件出现第1条裂缝后,砌体进入裂缝发展阶段,其中砌体较窄的侧面陆续出现细微竖向裂缝,较宽的侧面陆续出现竖向裂缝或斜裂缝,千分表的读数大幅度增长;随着荷载的进一步增大,砌体较窄侧面的裂缝逐渐贯通,砌体被分割成几个小柱体,承载力逐渐丧失,最终压溃破坏。

通过观察再生混凝土砌块砌体的破坏形态发现,破坏裂缝主要集中在砌块顶面、两肋连接处,水泥砂浆基本处于完好状态[图3(a),(b)]。可见,再生混凝土砌块对再生混凝土砌块砌体的抗压强度具有显著影响,对砂浆的影响较小。

再生混凝土砌块砌体的抗剪强度试验采用匀速连续加载方式,加载时间控制在1~3 min。砌体由开始加载到破坏,没有明显的征兆,属于典型的脆性破坏。砌体剪切破坏都发生在水泥砂浆面处,砌块保持完好[图3(c),(d)],可以认为砂浆强度对再生混凝土砌块砌体的抗剪强度起主要作用,且砌体单剪破坏多于双剪破坏。

根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GBJ 129—90),计算出再生混凝土砌块砌体的抗压强度和抗剪强度,结果如表3所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 再生混凝土砌块砌体强度

大量研究表明,混凝土砌块砌体的抗压强度随着砌块强度的提高而增大,而砌体的抗剪强度随着砂浆强度的提高而增大。再生混凝土砌块砌体的材料组分和制作与普通混凝土砌块砌体相似,只是再生混凝土砌块砌体中的再生骨料性能比天然骨料差。根据表3中的数据,绘制出砌块强度、砂浆强度与再生混凝土砌块砌体抗压强度和抗剪强度的关

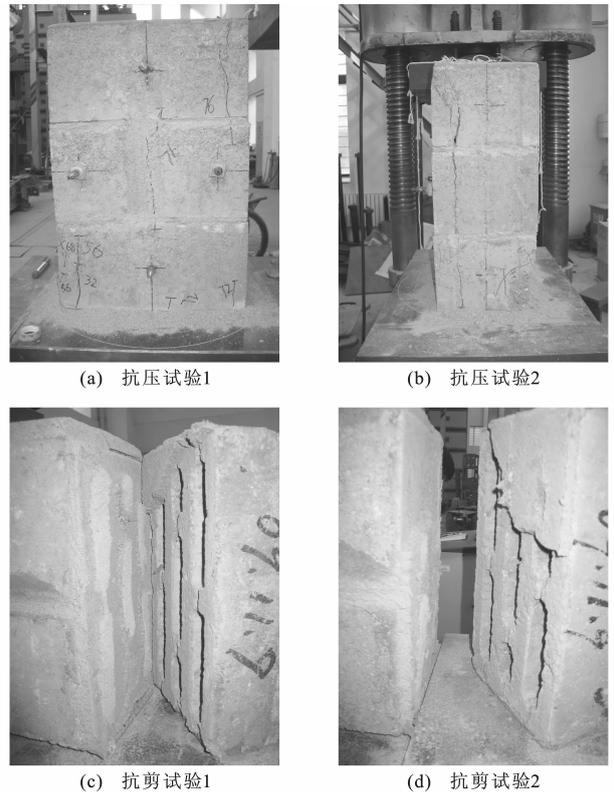


图3 再生混凝土砌块砌体破坏形态

Fig. 3 Failure Modes of Recycled Concrete Hollow Block Masonry

系,如图4所示,由此可以大致分析再生混凝土砌块砌体力学强度与砌块强度和砂浆强度的关系。

由图4(a)可以看出:再生混凝土砌块砌体的抗压强度主要受砌块强度的影响,砌体的抗压强度随着砌块强度的提高而显著增加;不同砂浆强度的组合下,砌块强度对砌体的抗压强度的敏感性相当。由图4(b)可知,再生混凝土砌块砌体抗压强度随着砂浆强度的提高而增大,并且在不同砌块强度组合下,砂浆强度对砌体抗压强度的影响程度也不一样,

表3 再生混凝土砌块砌体抗压强度和抗剪强度

Tab. 3 Compressive Strength and Shear Strength of Recycled Concrete Hollow Block Masonry

试件组号	砌块强度/MPa	砂浆强度/MPa	初裂荷载/kN	抗压极限荷载/kN	抗剪极限荷载/kN	抗压试验		抗剪试验	
						抗压强度/MPa	变异系数	抗剪强度/MPa	变异系数
A1	10.50	8.0	480.3	712.3	22.46	7.61	0.15	0.24	0.14
A2	10.50	12.0	513.2	771.3	26.21	8.24	0.03	0.28	0.16
A3	10.50	14.8	623.1	802.3	29.02	8.57	0.11	0.31	0.18
B1	7.53	6.2	299.7	422.1	17.78	4.51	0.24	0.19	0.23
B2	7.53	8.0	373.8	479.2	20.59	5.12	0.17	0.22	0.20
B3	7.53	12.0	401.1	581.2	25.27	6.21	0.21	0.27	0.25
C1	5.31	3.1	231.5	330.1	13.24	3.53	0.26	0.15	0.12
C2	5.31	6.2	250.7	347.9	16.43	3.72	0.20	0.18	0.17
C3	5.31	8.0	255.6	387.1	21.89	4.13	0.22	0.24	0.20

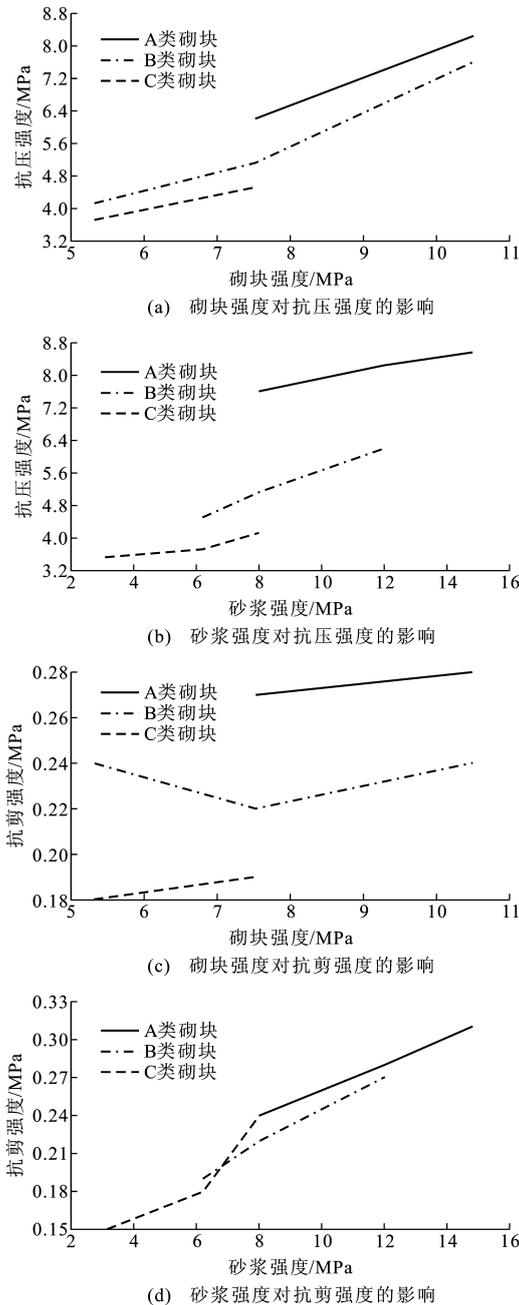


图4 再生混凝土砌块砌体强度与砂浆和砌块强度的关系

Fig. 4 Relations Between Strengths of Recycled Concrete Hollow Block Masonry and Strengths of Mortar, Block

B类砌块砌体抗压强度对砂浆强度的敏感性明显高于A,C类砌块砌体,这种现象有别于普通混凝土砌块砌体。其原因可能是大掺量再生混凝土骨料制成的再生混凝土砌块强度较低且不稳定,弱化了砌块强度对砌体抗压强度的贡献程度,相对地提高了砂浆强度对砌体抗压强度的作用。

从图4(c)可以看出,砌块强度对于再生混凝土砌块砌体的抗剪强度的影响很小,可以忽略,这种现象和普通混凝土砌块砌体类似。从图4(d)可以看

出,再生混凝土砌块砌体的抗剪强度主要受砂浆强度的影响,砂浆强度越大,再生混凝土砌块砌体的抗剪强度越大,即便在不同砌块强度的组合下,砌体的抗剪强度变化幅度基本相同,这说明再生混凝土砌块砌体抗剪强度对砌块强度的敏感性较弱。

图5为再生混凝土砌块砌体抗压试验中初裂荷载和极限荷载的关系,其中, $R^2$ 为判定系数。从图5可以看出,初裂荷载和极限荷载的相关性很高,随着初裂荷载的提高,砌体的极限荷载几乎均匀提高。也就是说,不管再生混凝土砌块砌体中砌块强度和砂浆强度如何,砌体抗压的初裂荷载和极限荷载的比例基本不变,这与普通混凝土砌块砌体一致<sup>[9]</sup>,这也说明再生混凝土砌块砌体的抗压性能具有较好的稳定性,可在实际工程中广泛采用。

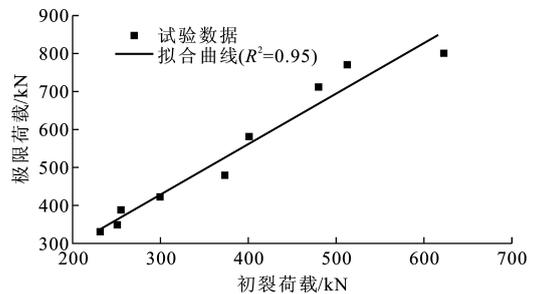


图5 抗压试验中初裂荷载和极限荷载的关系

Fig. 5 Relations Between Initial Cracking Load and Ultimate Load in Compressive Experiment

## 2.2 再生混凝土砌块砌体的强度计算

考虑到C类再生混凝土砌块砌体的强度较低且离散性较大,用于重要性较低的砌体结构更为合理。对于A,B类砌块砌体,有必要进一步研究其力学强度的计算公式。上述分析表明,再生混凝土砌块砌体抗压强度及抗剪强度的发展规律和内在机理与普通混凝土砌块砌体基本一致,故可采用普通混凝土砌块砌体的抗压强度及抗剪强度公式进行计算,其公式为

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (1)$$

$$f_{v,m} = k_5 \sqrt{f_2} \quad (2)$$

式中: $f_m, f_{v,m}$ 分别为砌体抗压强度和抗剪强度计算值; $f_1, f_2$ 分别为砌块和砂浆的抗压强度平均值; $\alpha, k_1$ 均为不同类型砌体的块材形状、尺寸及砌筑方法等因素的影响系数,对于混凝土砌块, $\alpha = 0.9, k_1 = 0.46$ ;  $k_2$ 为砂浆强度不同对砌体抗压强度的影响系数,对于混凝土砌块,当 $f_2 \neq 0$ 时, $k_2 = 1.0$ ;  $k_5$ 为与砌体种类有关的系数,对于混凝土砌块, $k_5 = 0.069$ 。

考虑到本试验再生混凝土砌块的尺寸和普通砌

块相同,  $\alpha$  仍取 0.9; 将再生混凝土砌块砌体的强度试验值进行回归分析, 得出  $k_1 = 0.538$ , 高于规范中给出的 0.46, 文献[10]中也有类似的结果;  $k_5$  回归的取值为 0.0797, 同样高于规范中给出的 0.069。

表 4 再生混凝土砌块砌体的强度试验值和计算值的比较

Tab. 4 Comparison of Experiment Values and Calculated Values of Strength for Recycled Concrete Hollow Block Masonry

试件组号	抗压试验			抗剪试验		
	抗压强度实测值 $f'_m/\text{MPa}$	抗压强度计算值 $f_m/\text{MPa}$	$f'_m f_m^{-1}$	抗剪强度实测值 $f'_{v,m}/\text{MPa}$	抗剪强度计算值 $f_{v,m}/\text{MPa}$	$f'_{v,m} f_{v,m}^{-1}$
A1	7.61	5.96	1.28	0.24	0.20	1.23
A2	8.24	7.03	1.17	0.28	0.24	1.17
A3	8.57	7.78	1.10	0.31	0.27	1.17
B1	4.51	4.06	1.11	0.19	0.17	1.14
B2	5.12	4.42	1.16	0.22	0.20	1.08
B3	6.21	5.76	1.08	0.27	0.24	1.13

和抗剪强度实测值均高于规范中公式的计算值, 并且实测值与计算值的比值集中在 1.1~1.2, 这表明可以采用普通混凝土砌块砌体的抗压强度及抗剪强度公式计算再生混凝土砌块砌体相应的力学强度。

### 3 再生混凝土砌块砌体的强度表达

在砌体结构设计中, 需要知道材料强度的标准值和设计值。材料强度的概率分布宜采用正态分布, 材料强度标准值可按概率分布 0.05 分位值确定。根据文献[11], 砌体强度服从正态分布, 其抗压强度标准值  $f_k$  可以按下式计算

$$f_k = f_m - 1.645\sigma_f = f_m(1 - 1.645\delta_f) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_f$  为抗压强度的标准差;  $\delta_f$  为抗压强度的变异系数。

由此可见, A 类砌块砌体的平均变异系数为 0.1, B 类砌块砌体的平均变异系数为 0.21, 为了安全考虑, 将再生混凝土砌块砌体抗压强度的变异系数取为 0.21, 见表 3。

材料性能设计值是指材料性能标准值除以材料性能分项系数所得的值。砌体的强度设计值  $f$  是砌体结构构件按承载能力极限状态设计时所采用的强度代表值, 考虑几何参数变异、计算模式不确定性等因素对可靠度的影响, 其计算公式为

$$f = \frac{f_k}{\gamma_f} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_f$  为砌体结构的材料性能分项系数, 一般情况下宜按施工质量等级为 B 级考虑, 取  $\gamma_f = 1.6^{[12]}$ 。

由于再生混凝土砌块采用高吸水率、多孔隙的再生集料, 施工质量不易控制, 为保证获得可靠的强度设计值, 可将  $\gamma_f$  适当提高, 取  $\gamma_f = 1.7$ 。再生混凝土砌块砌体抗剪强度的标准值和设计值计算公式同

考虑再生混凝土砌块砌体强度的离散性, 使用规范中的参数取值更偏于安全。按式(1)和式(2)计算的结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 再生混凝土砌块砌体的抗压强度

公式(3), (4), 抗剪强度的变异系数取为 0.19。表 5 为再生混凝土砌块砌体抗压强度与抗剪强度的标准值及设计值。

表 5 抗压强度与抗剪强度的标准值及设计值

Tab. 5 Standard Values and Design Values of Compressive Strength and Shear Strength

试件组号	砌块强度/ MPa	砂浆强度/ MPa	抗压强度/MPa		抗剪强度/MPa	
			标准值	设计值	标准值	设计值
A1	10.50	8.0	4.98	2.93	0.133	0.078
A2	10.50	12.0	5.39	3.17	0.163	0.096
A3	10.50	14.8	5.61	3.30	0.181	0.106
B1	7.53	6.2	2.95	1.73	0.117	0.069
B2	7.53	8.0	3.35	1.97	0.133	0.078
B3	7.53	12.0	4.06	2.39	0.163	0.096

### 4 结 语

(1) 再生混凝土砌块砌体在轴压下的破坏形态为砌体窄侧面出现贯通裂缝而被分割成柱体, 最终压溃破坏; 砌体的受剪破坏为砂浆层被剪坏, 为脆性破坏。

(2) 再生混凝土砌块砌体的抗压强度主要取决于砌块强度, 同时也受砂浆强度的一定影响; 砌体的抗剪强度随着砂浆强度的提高而增大, 这与普通混凝土砌块砌体基本一致。

(3) 再生混凝土砌块砌体抗压试验中的初裂荷载和极限荷载存在较高的相关性, 两者之间的比值基本保持不变, 使再生混凝土砌块砌体的抗压性能具有较好的稳定性。

(4) C 类再生混凝土砌块砌体可用于重要性低的砌体结构; 而普通混凝土砌块砌体的抗压强度和抗剪强度计算公式适用于 A 类和 B 类再生混凝土

砌块砌体。考虑再生混凝土砌块砌体的施工质量,应适当提高其材料性能分项系数;基于试验数据,本文中计算了再生混凝土砌块砌体的强度标准值和设计值。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘数华,冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.  
LIU Shu-hua, LENG Fa-guang. Technology of Recycled Aggregate Concrete[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2007.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2008.
- [3] 应敬伟,肖建庄. 再生骨料取代率对再生混凝土耐久性的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(1):56-62.  
YING Jing-wei, XIAO Jian-zhuang. Influence of Recycled Aggregate Replacement Ratio on Durability of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 56-62.
- [4] 肖建庄,王 幸,胡永忠,等. 再生混凝土空心砌块砌体受压性能[J]. 结构工程师,2006,22(3):68-71,19.  
XIAO Jian-zhuang, WANG Xing, HU Yong-zhong, et al. Compressive Performance of Concrete Hollow Block Masonry with Recycled Aggregates[J]. Structural Engineers, 2006, 22(3): 68-71, 19.
- [5] 郭樟根,孙伟民,彭 阳,等. 再生混凝土小型空心砌块砌体抗剪性能试验[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2010,32(5):12-15.  
GUO Zhang-gen, SUN Wei-min, PENG Yang, et al. Shear Behavior of Small Hollow Block Masonry with Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 32(5): 12-15.
- [6] 丁 帅,孙伟民,郭樟根,等. 再生混凝土小型空心砌块砌体基本力学性能研究[J]. 新型建筑材料,2010(4):38-40.  
DING Shuai, SUN Wei-min, GUO Zhang-gen, et al. Study on the Fundamental Mechanical Behavior of Recycled Concrete Small Hollow Block Masonry[J]. New Building Materials, 2010(4): 38-40.
- [7] 白国良,张锋剑,安昱峰,等. 再生混凝土承重砌块试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(1):7-12,17.  
BAI Guo-liang, ZHANG Feng-jian, AN Yu-yi, et al. The Research of Recycled Bearing Concrete Hollow Blocks[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2011, 43(1): 7-12, 17.
- [8] GBJ 129—90,砌体基本力学性能试验方法标准[S].  
GBJ 129—90, Testing Methods of Basic Mechanical Performance of Masonry Structures[S].
- [9] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.  
SHI Chu-xian. The Theory and Design of Masonry Structures[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2003.
- [10] 郭樟根,孙伟民,彭 阳,等. 再生混凝土小型空心砌块砌体受压性能试验研究[J]. 建筑结构,2011,41(8):127-128,91.  
GUO Zhang-gen, SUN Wei-min, PENG Yang, et al. Experimental Study on the Compression Behavior of Recycled Aggregates Concrete Small Hollow Block Masonry[J]. Building Structure, 2011, 41(8): 127-128, 91.
- [11] 徐淑芳,熊仲明,韦 俊. 砌体结构[M]. 北京:科学出版社,2004.  
XU Shu-fang, XIONG Zhong-ming, WEI Jun. Masonry Structures[M]. Beijing:Science Press,2004.
- [12] GB 50003—2011,砌体结构设计规范[S].  
GB 50003—2011, Code for Design of Masonry Structures[S].