

文章编号:1673-2049(2012)01-0021-06

全再生骨料混凝土高剪力墙的振动台试验

张建伟,池彦忠,曹万林,董宏英

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124)

摘要:为了解全再生骨料混凝土高剪力墙的抗震能力,并与普通混凝土高剪力墙的抗震能力进行比较,进行了 2 个高剪力墙模型的振动台试验研究。2 个试验模型中,1 个为普通混凝土高剪力墙,1 个为粗骨料、细骨料均为再生骨料的混凝土高剪力墙。通过对实测数据的对比分析,研究了全再生骨料混凝土高剪力墙在弹性和开裂后弹塑性阶段的动力特性、动力响应及其最终破坏形态。结果表明:全再生骨料混凝土高剪力墙的抗震能力低于普通混凝土高剪力墙的抗震能力,建议实际工程中采用抗震性能相对较好的再生粗骨料混凝土剪力墙。

关键词:全再生骨料混凝土;高剪力墙;抗震能力;振动台试验;自振频率;时程

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Shaking Table Test on Recycled Aggregate Concrete High-rise Shear Walls

ZHANG Jian-wei, CHI Yan-zhong, CAO Wan-lin, DONG Hong-ying

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to ascertain the seismic performance of the recycled aggregate concrete high-rise shear walls and compare with the normal concrete high-rise shear walls, the study of shaking table tests on two models of high-rise shear walls were carried out. One of the models was made by normal concrete, and the other one was made by recycled coarse aggregate, fine aggregate concrete. The dynamic characteristics at elastic and elasto-plastic stage after cracking, the dynamic response and its final failure mode were studied by analyzing and comparing the results from the tests. The results show that the seismic performance of recycled aggregate concrete high-rise shear walls is worse than that of the normal concrete high-rise shear walls. It is suggested that recycled coarse aggregate concrete shear walls with better seismic performance can be applied in practical engineering.

Key words: recycled aggregate concrete; high-rise shear wall; seismic performance; shaking table test; self-vibration frequency; time history

0 引言

随着城市化进程的加快,2010 年中国的混凝土产量已超过 10^9 m^3 ,消耗了大量的砂石等原生资源;

同时,由于城市建筑的更新、改造等原因,大量的混凝土被拆除,形成了数量惊人的废弃混凝土建筑垃圾,其数量已达到城市垃圾的 $30\% \sim 40\%$ ^[1-2]。怎样处理和利用废弃混凝土建筑垃圾成为关系到环境

收稿日期:2011-12-05

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAJ08B14);北京市自然科学基金项目(8102010);

北京市高校中青年骨干人才培养计划项目(PHR201108009)

作者简介:张建伟(1971-),男,河北丰润人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zhangjw@bjut.edu.cn。

保护和社会可持续发展的重大问题。在土木工程新建结构中应用再生混凝土,不但可以节约砂石等原生资源,而且也是解决废弃混凝土建筑垃圾问题的主要途径。所谓再生混凝土即指将废弃混凝土经过清洗、破碎、分级后并按一定比例相互配合后得到的再生骨料作为部分或者全部骨料配置的混凝土^[3]。近年来,对再生混凝土材料力学性能的研究已取得一定的成果^[4-5],同时对再生混凝土构件及结构的抗震性能研究也取得了一定成果^[6-10]。但对再生骨料混凝土构件及结构的动力特性研究尚少,为了解再生混凝土高剪力墙的动力特性,本文中笔者进行了 1 个全再生骨料混凝土高剪力墙和 1 个普通混凝土高剪力墙的模拟地震振动台试验研究。

1 试验设计

1.1 模型设计与试验装置

该试验共设计 2 个模型,缩尺比例均为 1 : 3,高宽比均为 2.3,其中普通混凝土剪力墙 1 个,编号为 SW,全再生骨料(粗骨料、细骨料取代率均为 100%)的混凝土剪力墙 1 个,编号为 QGSW;为了便于对比,2 个试件的配筋、几何尺寸相同,试件的配筋情况见图 1。试件的混凝土强度设计等级均为 C30,由细石混凝土浇筑,即粗骨料的最大粒径为 10 mm。再生骨料由北京元泰达环保建材有限公司加工,其废弃混凝土来源于北京西单某钢筋混凝土框架结构商场拆除工程,废弃混凝土的原结构强度设计等级为 C20。混凝土配合比及力学性能:①对于模型 SW,水泥、天然砂、天然石子、水的配合比为 1 : 1.25 : 2.5 : 0.5,混凝土立方体抗压强度为 35.5 MPa;②对于模型 QGSW,水泥、再生细骨料、再生粗骨料、水的配合比为 1 : 1.25 : 2.5 : 0.55,混凝土立方体抗压强度为 31.2 MPa。试件的几何相似关系见表 1。由图 1 可见,在墙板两端设置暗柱,暗柱纵筋采用 HPB235 级直径 8 mm 的钢筋,在墙板内的水平和竖向分布钢筋均采用直径 4 mm 的 8# 镀锌铁丝,2 种钢筋的力学性能见表 2。试验在北京工业大学工程结构试验中心进行,试验装置如图 2 所示,其上部荷重槽与模型通过螺栓固定,试验过程中无相对位移。荷重槽与 4 根支杆采用滑动螺栓连接,在地震作用方向无约束,仅提供平面外的支撑作用。模型的设计轴压比为 0.12,上部荷重槽及配重的总质量为 7 t。

1.2 试验过程与测试内容

试验选用 El Centro N-S 地震波(x 方向)激振。

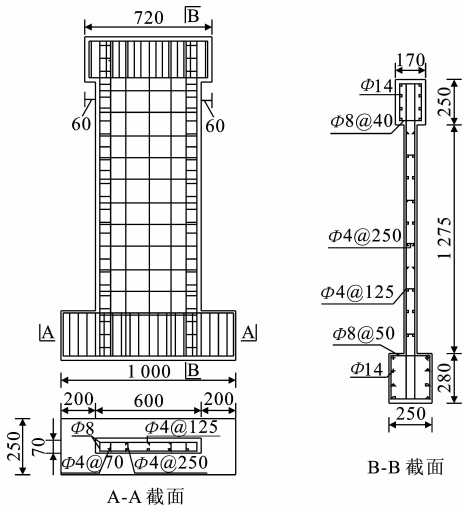


图 1 模型配筋(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcements of Models (Unit: mm)

表 1 模型与原型相似系数

Tab. 1 Similitude Coefficients of Models and Prototypes

参数	相似比	参数	相似比
应变 ϵ	1	加速度 a	1
应力 σ	1	时间 t	$(1/3)^{1/2}$
线位移 x'	1/3	质量 m	1/9

表 2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Steel Bar

直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/ 10^5 MPa
4	312.42	351.68	1.79
8	338.20	492.88	1.98



图 2 试验装置

Fig. 2 Test Set-up

由时间相似关系可得,振动台 El Centro 波输入的持续时间为 30.581 s,时间间隔为 0.011 54 s。试验过程中实际输入的地震波强度见表 3,表 3 中的数据以试验过程中台面上加速度计的实测值为准。

墙体的质量约为 0.13 t,而其上部荷重的质量为 7 t,墙体质量约占全部质量的 1.82%,因此可近

表 3 台面实际输入过程
Tab.3 Real Input Procedures of Table

序号	地震烈度	台面输入加速度峰值	
		模型 SW	模型 QGSW
1	7 度基本烈度	0.113g	0.101g
2	7 度罕遇烈度	0.174g	0.167g
3		0.193g	0.202g
4	8 度罕遇烈度	0.283g	0.254g
5		0.393g	0.422g
6	9 度罕遇烈度	0.476g	0.494g
7		0.579g	0.567g
8		0.691g	0.681g
9		0.805g	0.805g
10		0.944g	0.884g
11		1.066g	0.967g
12		1.141g	1.077g
13		1.233g	1.188g
14		1.300g	
15		1.420g	

注: g 为重力加速度。

似将模型看作单质点体系。试验过程中每一次震动完成后,均采用白噪声激振的方法测试模型的自振频率。除自振频率外,试验中主要的测试内容还包括:墙体两侧暗柱根部的钢筋应变,模型顶点质心和台面的加速度时程反应,模型顶点质心的位移时程反应。

2 试验结果分析

2.1 自振频率

在试验过程中,测得的各阶段自振频率 f 见表 4。从表 4 可见:2 个模型的初始自振频率基本相同,在试件初裂后,其自振频率均开始下降,但全再生骨料混凝土高剪力墙 QGSW 的自振频率下降较快;另外,在初裂以后二者达到相同的自振频率时,模型 QGSW 的台面输入加速度峰值较模型 SW 小 0.2g 左右。

表 4 自振频率测试结果

Tab.4 Testing Results of Self-vibration Frequencies

模型 SW		模型 QGSW	
试验阶段	f/Hz	试验阶段	f/Hz
地震波激振前	6.71	地震波激振前	6.67
0.393g 地震波后(初裂)	6.05	0.254g 地震波后(初裂)	6.07
0.597g 地震波后	5.21	0.422g 地震波后	5.25
0.805g 地震波后	4.30	0.567g 地震波后	4.25
1.066g 地震波后	3.52	0.805g 地震波后	3.15
1.223g 地震波后	2.80	0.967g 地震波后	3.03

2.2 加速度反应

试验结果表明,模型 QGSW 的开裂台面加速度峰值比模型 SW 降低了 35.4%,模型层间位移角达到 1/120 时,QGSW 的台面输入加速度峰值较模型 SW 降低了 15.4%,且顶点质心处的加速度峰值较模型 SW 降低了 34.0%,顶点加速度时程曲线比较见图 3。

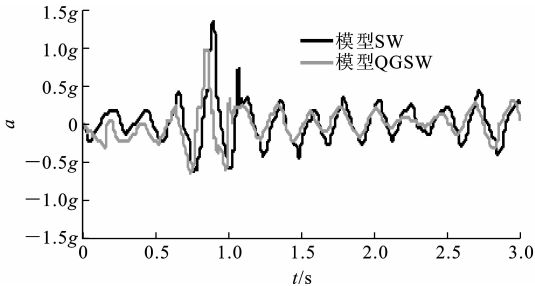


图 3 层间位移角为 1/120 时的顶点加速度时程曲线比较
Fig.3 Comparisons of Top Acceleration Time History Curves when Interlayer Displacement Angle is 1/120

2.3 位移反应

在试验中,随着模型 SW 和模型 QGSW 加速度峰值输入的增大,层间位移角也增大;台面输入的加速度峰值与其对应的顶点最大位移见表 5。2 个模型在开裂后的台面输入加速度峰值 a_i 基本相同时其顶点位移时程曲线比较见图 4,其中, u 为位移。由表 5 和图 4 可知:全再生骨料混凝土高剪力墙的顶点位移反应较普通混凝土高剪力墙有所增大;在 2 个模型顶点位移反应基本相同的情况下,全再生骨料混凝土高剪力墙对应的台面加速度峰值输入较普通混凝土剪力墙要小 0.1g~0.2g。

2.4 破坏形态

2 个模型在顶点位移达到现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[11]中规定的弹塑性层间位移角限值 1/120 时所对应的裂缝开展情况见图 5,试验结束后模型的最终破坏形态见图 6。

模型 SW 在经历台面输入加速度峰值为 0.393g 的地震波后,在墙体中部出现 1 条不完整的水平裂缝,且在墙体右上角部暗柱处,出现 1 条较短斜裂缝;在经历台面输入加速度峰值为 0.579g 的地震波后,在墙体底部出现 1 条与底边成约 20°夹角的裂缝;在经历台面输入加速度峰值为 0.691g 的地震波后,在墙体中部出现 1 条明显的斜裂缝,其震后宽度约为 0.2 mm;在经历台面输入加速度峰值为 0.805g 的地震波后,在墙体中部出现 1 条贯穿的斜裂缝,震后宽度为 0.4 mm,且该次地震波施加过程中,墙体 2 个方向的主斜裂缝张合已较明显;在经

表 5 模型顶点最大位移

Tab. 5 Maximum Top Displacements of Models

模型 SW			模型 QGSW		
台面输入 加速度 峰值	顶点最大 位移/mm	层间位 移角	台面输入 加速度 峰值	顶点最大 位移/mm	层间位 移角
0.113g	0.234	1/2 030	0.101g	0.310	1/1 532
0.174g	0.407	1/1 167	0.167g	0.504	1/942
0.193g	0.543	1/875	0.202g	0.678	1/701
0.283g	0.910	1/522	0.254g	0.968	1/491
0.393g	1.394	1/341	0.422g	1.550	1/306
0.476g	1.704	1/279	0.494g	2.382	1/199
0.579g	2.556	1/186	0.567g	3.389	1/140
0.691g	3.215	1/148	0.681g	4.260	1/112
0.805g	4.060	1/117	0.805g	5.228	1/91
0.944g	4.492	1/106	0.884g	5.616	1/85
1.066g	4.977	1/95	0.967g	6.293	1/75
1.141g	5.403	1/88	1.077g	7.069	1/67
1.223g	5.886	1/81	1.188g	8.215	1/58
1.300g	7.282	1/65			
1.420g	12.393	1/38			

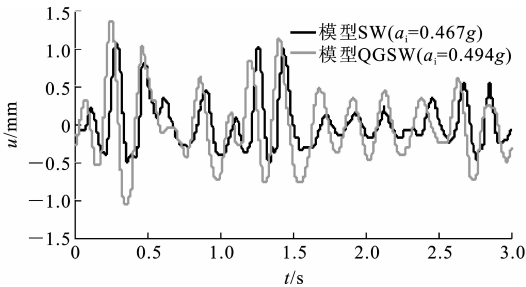


图 4 开裂后模型顶点位移时程曲线比较

Fig. 4 Comparisons of Top Displacement Time History Curves of Models After Cracking

历台面输入加速度峰值为 1.066g 的地震波后,裂缝张合非常明显,且局部有混凝土掉渣现象,局部震后裂缝宽度达 1 mm;在经历台面输入的加速度峰值为 1.223g 的地震波后,墙体左下角部暗柱处混凝土出现压碎现象;在经历台面输入的加速度峰值为 1.420g 的地震波后,墙体的斜裂缝完全贯穿,局部震后裂缝宽度在 10 mm 以上,在墙体中部斜裂缝交叉处钢筋露出且有明显变形,在墙体右侧暗柱柱脚处钢筋露出且被压弯曲,此时墙体层间位移角达到 1/38,墙体丧失承载能力。

模型 QGSW 在经历了台面输入加速度峰值为 0.254g 的地震波后,在墙体左上角暗柱处出现较短斜裂缝,且在墙体中上部出现 1 条水平裂缝;在经历台面输入加速度峰值为 0.422g 的地震波后,墙体

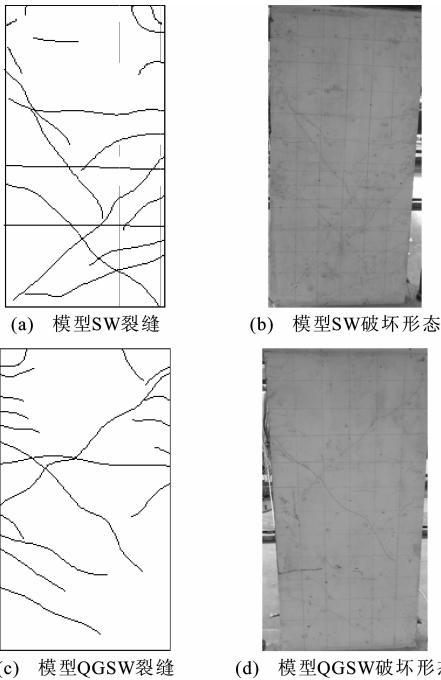


图 5 模型层间位移角为 1/120 时的破坏特征

Fig. 5 Failure Characteristics of Models with Interlayer Displacement Angle of 1/120

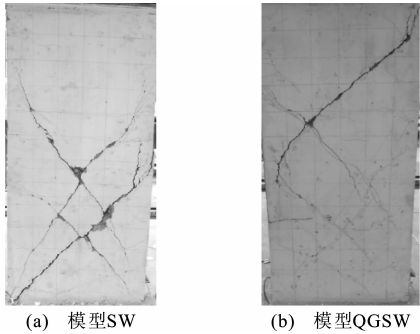


图 6 模型最终破坏形态

Fig. 6 Final Failure Modes of Models

中上部出现第 1 条斜裂缝,裂缝未贯穿;在经历台面输入加速度峰值为 0.494g 的地震波后,墙体的另一个方向出现较完整的斜裂缝,震后裂缝宽度达到 0.2 mm;在经历台面输入加速度峰值为 0.681g 的地震波后,墙体斜裂缝进一步开展,局部震后裂缝宽度达 0.4 mm,且在该次试验中裂缝有较明显的张合现象;在经历台面输入加速度峰值为 0.805g 的地震波后,裂缝明显张合,且局部有掉渣现象;在经历台面输入加速度峰值为 1.077g 的地震波后,裂缝进一步开展,局部震后裂缝宽度达 1.0 mm,且在墙体右侧暗柱柱脚有混凝土压碎现象;在经历台面输入加速度峰值为 1.188g 的地震波后,墙体裂缝交叉点的钢筋露出,局部震后裂缝宽度在 10 mm 以上,层间位移角为 1/58,墙体丧失承载能力。

由试验现象和图 5,6 可见,模型由于弯矩作用,首先出现水平裂缝,随着地震作用的增加,逐渐出现剪切斜裂缝,模型 SW 和模型 QGSW 的最终破坏形态为弯剪破坏,但模型 QGSW 裂缝开展较稀疏,与模型 SW 相比,在基本相同的地震输入下,其破坏较严重,层间位移角也有所增大。

2.5 有限元分析

利用有限元软件 ABAQUS 6.9,对模型 SW 和模型 QGSW 进行建模和分析。

采用 ABAQUS 6.9 线性摄动分析步^[12]对模型进行频率提取,对模型 SW 的初始自振频率提取为 7.51 Hz,与其实测值 6.71 Hz 相比,相对误差为 11.8%;对模型 QGSW 的初始自振频率提取为 7.18 Hz,与其实测值 6.67 Hz 相比,相对误差为 7.6%。

在弹性阶段,对模型 SW 选取开裂前台面加速度峰值为 0.193g 的输入地震波进行计算,此时加载荷重槽质心的实测加速度峰值为 0.377g,计算加速度峰值为 0.366g,相对误差为 2.9%;对模型 QGSW 选取开裂前台面加速度峰值为 0.167g 的输入地震波进行计算,此时荷重槽质心处的实测加速度峰值为 0.311g,计算加速度峰值为 0.308g,相对误差为 1.0%;2 个模型加速度反应时程的实测值与计算值的比较见图 7。当模型开裂后进入弹塑性阶段,此时自振频率衰减明显,剪力墙的刚度减小,在考虑刚度退化的情况下,对模型 SW 选取台面加速度峰值为 0.476g 的输入地震波进行计算,此时荷重槽质心处的实测加速度峰值为 0.922g,计算加速度峰值为 0.804g,相对误差为 12.8%;对模型 QGSW 选取台面加速度峰值为 0.422g 的输入地震波进行计算,此时荷重槽质心处的实测加速度峰值为 0.745g,计算加速度峰值为 0.721g,相对误差为 3.3%;2 个模型的实测与计算加速度时程曲线比较见图 8。

3 结 语

(1)全再生骨料混凝土高剪力墙的自振频率与普通混凝土高剪力墙相比,在未开裂的初始阶段基本相同;但随着裂缝的开展,全再生骨料混凝土高剪力墙的自振频率的下降速度相对较快。

(2)与普通混凝土高剪力墙相比,全再生骨料混凝土高剪力墙在初裂时,其台面输入加速度峰值降低了 35.4%;当剪力墙的弹塑性层间位移角达到 1/120 时,全再生骨料混凝土高剪力墙台面输入加速度峰值降低了 15.4%。

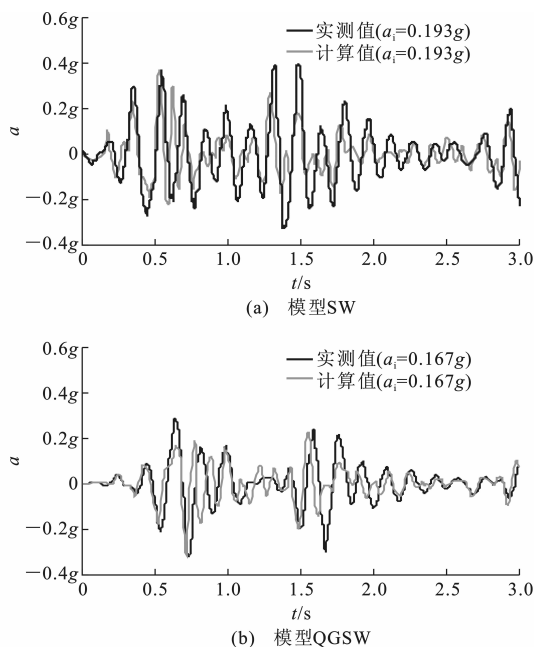


图 7 弹性阶段加速度时程的实测值与计算值比较
Fig. 7 Comparisons of Acceleration Time Histories Between Measured Values and Calculation Values in Elastic Stages

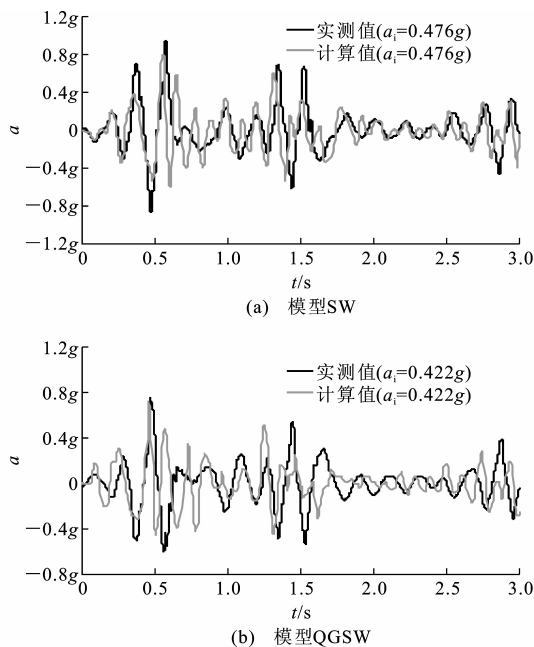


图 8 弹塑性阶段加速度时程的实测值与计算值比较
Fig. 8 Comparisons of Acceleration Time Histories Between Measured Values and Calculation Values in Elasto-plastic Stages

(3)在台面输入加速度峰值基本相同的情况下,全再生骨料混凝土高剪力墙的顶点位移反应较普通混凝土高剪力墙有所增大。

(4)全再生骨料混凝土高剪力墙与普通混凝土高剪力墙的破坏形态基本相同,均是先出现受弯破

坏的水平裂缝,再出现受剪破坏的斜裂缝。但与普通混凝土高剪力墙相比,全再生骨料混凝土高剪力墙的裂缝相对较少,以几条主斜裂缝为主。

(5)建议实际工程中使用抗震性能相对较好的再生粗骨料混凝土高剪力墙^[13]。

参考文献:

References:

- [1] 邓寿昌,张学兵,罗迎社.废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J].混凝土,2006(11):20-24.
DENG Shou-chang, ZHANG Xue-bing, LUO Ying-she. Abandon the Concrete Present Condition of the Reborn Exploitation Analysis and the Research Outlook[J]. Concrete, 2006(11):20-24.
- [2] KATZ A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6):597-603.
- [3] DG/TJ 08-2018-2007,再生混凝土应用技术规程[S]. DG/TJ 08-2018-2007, Technical Code on the Application of Recycled Concrete[S].
- [4] 李佳彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2004,7(4):390-395.
LI Jia-bin, XIAO Jian-zhuang, SUN Zhen-ping. Properties of Recycled Coarse Aggregate and Its Influence on Recycled Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4):390-395.
- [5] 张波志,王社良,张博,等.再生混凝土基本力学性能试验研究[J].混凝土,2011(7):4-6.
ZHANG Bo-zhi, WANG She-liang, ZHANG Bo, et al. Experimental Analysis of the Basic Mechanical Properties of Recycled Concrete[J]. Concrete, 2011(7):4-6.
- [6] 曹万林,尹海鹏,张建伟,等.再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].北京工业大学学报,2011,37(2):191-198.
CAO Wan-lin, YIN Hai-peng, ZHANG Jian-wei, et al. Seismic Behavior Experiment of Recycled Concrete Frame Structures[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(2):191-198.
- [7] 张建伟,曹万林,朱珩,等.再生混凝土中高剪力墙抗震性能研究[J].工程力学,2010,27(增1):270-274,285.
ZHANG Jian-wei, CAO Wan-lin, ZHU Heng, et al. Study on Aseismic Behavior of Mid-rise Recycled Aggregate Concrete Shear Wall[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S1):270-274, 285.
- [8] 张建伟,曹万林,董宏英,等.再生骨料参量对中高剪力墙抗震性能影响试验研究[J].土木工程学报,2010,43(增2):55-61.
ZHANG Jian-wei, CAO Wan-lin, DONG Hong-ying, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Mid-rise Recycled Concrete Shear Walls with Different Percentage of Aggregate Replacement[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2):55-61.
- [9] 白国良,刘超,赵洪金,等.再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):61-66.
BAI Guo-liang, LIU Chao, ZHAO Hong-jin, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Recycled Concrete Frame Columns[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1):61-66.
- [10] 曹万林,张建伟,尹海鹏,等.再生混凝土框架-剪力墙结构抗震研究与应用[J].工程力学,2010,27(增2):135-141.
CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei, YIN Hai-peng, et al. Experimental Study on the Seismic Behavior of Recycled Concrete Frame-shear-wall Structure[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S2):135-141.
- [11] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [12] 庄茁,由小川,廖剑晖,等.基于ABAQUS的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009:273-276.
ZHUANG Zhuo, YOU Xiao-chuan, LIAO Jian-hui, et al. Finite Element Analysis and Application Based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:273-276.
- [13] DB 11/T 803—2011,再生混凝土结构设计规程[S].
DB 11/T 803—2011, Code for Design of Recycled Concrete Structures[S].