

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.006

T形RAC短肢剪力墙抗震性能试验研究

樊禹江^{1,3}, 余滨杉², 熊二刚³, 苗晓瑜³

(1. 长安大学建筑学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710065;
3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 通过对4个缩尺比例为1:2的不同再生粗骨料取代率、不同轴压比的T形再生混凝土(RAC)短肢剪力墙结构模型进行低周反复荷载作用下的抗震性能试验, 分析试验所得模型破坏形态、特征曲线、延性、刚度退化、耗能能力及正负向特征荷载的变化规律。分析结果表明:(a) T形RAC短肢剪力墙具有良好的抗震性能, 能够应用于轴压比较小的实际工程之中。(b) 随着再生粗骨料取代率的增加, T形RAC短肢剪力墙特征曲线、耗能能力等指标逐渐增强, 同时, 随着轴压比的增大, 各指标逐渐减小; 试件延性性能随着再生粗骨料取代率及轴压比的增加出现不同程度的降低。

关键词: 再生混凝土; T形短肢剪力墙; 抗震性能试验; 再生粗骨料取代率; 轴压比

中图分类号: TU37; TU317

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)04-0317-08

Experimental study on seismic performance of T-shaped RAC short-leg shear walls

FAN Yujiang^{1,3}, YU Binshan², XIONG Ergang³, MIAO Xiaoyu³

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710065, China;

3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on seismic performance tests on four T-shaped recycled aggregate concrete (RAC) short-leg shear walls at a reduced scale of 1:2, with different replacement rates of recycled coarse aggregate and axial compression ratios at low-cyclic loading frequencies, the variation patterns of the failure mode, characteristic curve, ductility, stiffness degradation, energy dissipation capacity, and characteristic loads in forward and backward directions are analyzed. The results indicate that T-shaped RAC short-leg shear walls show strong seismic performance, and can be applied to actual projects with a relatively low axial compression ratio; the performance of shear walls reflected by the characteristic curve and the indices, such as the energy dissipation capacity, gradually increase with the replacement rate of recycled coarse aggregate, and gradually decrease with the increase of the axial compression ratio; and the ductility of test specimens decreases in different degrees with the increase of the replacement rate of recycled coarse aggregate and axial compression ratio.

Key words: recycled aggregate concrete (RAC); T-shaped short-leg shear wall; seismic performance test; replacement rate of recycled coarse aggregate; axial compression ratio

短肢剪力墙结构严格的定义是指墙肢截面高度与厚度之比在5~8之间的剪力墙^[1-2]。针对此类结构, 国内外诸多学者进行了大量的理论分析和试验研究, 如: 同济大学李杰等^[3-4]对4个缩尺比例为1:3的相同短肢剪力墙结构模型进行了低周反复荷载作用下的试验研究, 分析侧向刚度、位移延性等, 并对其非线性行为进行了分析。但目前相关研究主要集中于普通混凝土短肢剪力墙, 而针对再生混凝土(RAC)剪力墙的研究。

收稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(51178388); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(13JS050); 陕西省工业攻关项目(2013K07-07); 陕西省博士后基金(SX2014120057)

作者简介: 樊禹江(1987—), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士, 主要从事混凝土结构基本理论、新型智能材料及其在结构振动控制中的应用研究。E-mail: fanyujiangchd@163.com

究则多集中于普通高剪力墙的抗震性能方面。如:曹万林等^[5-6]针对 RAC 普通剪力墙进行了低周反复荷载作用下的抗震性能试验,结果表明,普通 RAC 高剪力墙的抗震性能比普通混凝土高剪力墙略差;肖飞^[7]则针对普通 RAC 高剪力墙在不同轴压比作用下的抗震性能进行了试验研究,结果表明,随着轴压比的增加,RAC 高剪力墙的承载力有所增加,但其延性和耗能能力却随之降低。在进行 RAC 高剪力墙研究的同时,国内外对于 RAC 短肢剪力墙的研究几乎处于空白。因此,结合课题组前期所做 RAC 材料基本力学性能的特点^[8-9],以 1 个普通混凝土 T 形短肢剪力墙为基准,同时考虑再生粗骨料取代率及轴压比,设计制作了 4 个缩尺比例为 1:2 的 T 形 RAC 短肢剪力墙,并进行了低周反复荷载作用下的抗震性能试验研究,分析各因素对于 T 形 RAC 短肢剪力墙抗震性能的影响规律。

1 试验概况

基于西安北郊某实际短肢剪力墙结构原型,取其中一 T 形断面短肢剪力墙为研究对象,按照相似理论- π 定理^[10],按照缩尺比例 1:2 进行模型缩尺与配筋。

1.1 试验基本材料

模型采用秦岭牌 P.O42.5R 级水泥,再生粗骨料采用西安龙首村拆迁所得建筑垃圾,经人工破碎、鄂式破碎机粉碎、清洗、筛分而成。普通粗骨料采用陕西泾阳天然碎石,细骨料则采用灞河中粗河沙。模型工况组合按照表 1 进行。其中,C40RAC 配合比参考课题组前期进行的材料性能试验所得结果^[11-12]。

1.2 模型基本尺寸及配筋

T 形 RAC 短肢剪力墙模型纵向高度为 1400 mm,地梁的高度为 500 mm(主要起固定作用),顶部平台高度为 200 mm、截面厚度为 100 mm(方便加载及模拟边界条件而设置)。模型基本尺寸见图 1。

RAC 短肢剪力墙模型截面配筋参照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[13]和 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[14]等有关条文进行设计。墙肢中竖向钢筋的间距均为 100 mm,水平钢筋的间距均为 80 mm,竖向钢筋双层布置(模型墙肢竖向钢筋的配筋率均为 1.2%,水平钢筋的配筋率均为 0.6%)。模型的箍筋在竖向高度上全部加密,并按照构造要求在墙端翼缘处、墙肢交叉处加设暗柱,暗柱采用构造配筋。模型配筋如图 2 所示,试验实际加载装置如图 3 所示。

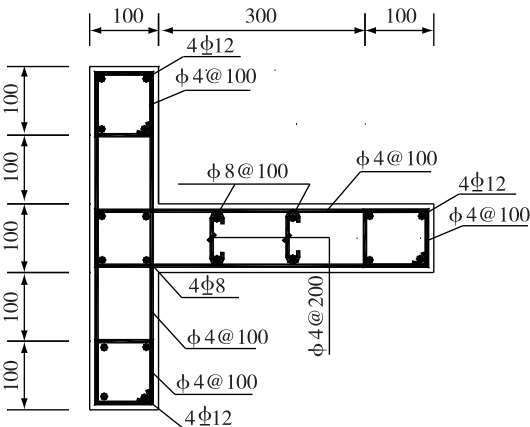


图 2 T 形 RAC 短肢剪力墙配筋(单位:mm)
Fig. 2 Reinforcement of T-shaped RAC short-leg shear wall(units:mm)

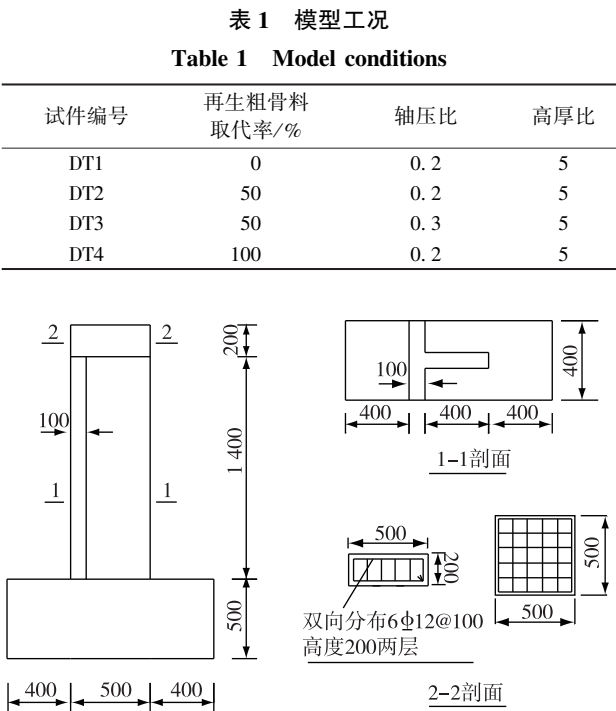


图 1 模型基本尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Basic dimensions of model(units:mm)



图 3 试验加载装置
Fig. 3 Loading device for testing

1.3 材料的基本力学性能

试验前进行钢筋取样,同时预留 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块和 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体试块各 1 组,分别进行基本力学性能试验,所得结果如表 2、表 3 所示。

1.4 加载方案

试验开始后首先在顶部平台施加竖向轴力,达到预定轴压比后保持不变,之后根据 JGJ 101—1996《建筑抗震试验方法规程》^[15]的规定,采用荷载-位移混合控制的方法进行加载。其中,弹性阶段采用力控制加载,以 20 kN 为一级,逐级加载;弹塑性阶段采用位移控制加载,位移值取屈服位移 Δ,并以 Δ 的整数倍为级差进行位移加载控制。施加反复荷载的次数为:屈服前每级荷载加载 1 次,屈服后加载 3 次。当试件所受荷载达到其峰值荷载的 85%时,认为试件破坏。

2 试验现象

限于篇幅,以 DT2 模型为例,其最终破坏形态如图 4 所示。

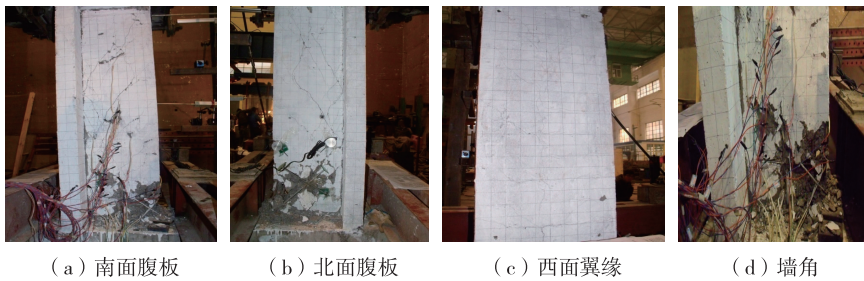


图 4 DT2 破坏形态
Fig. 4 Failure modes of DT2

T 形 RAC 短肢剪力墙与普通混凝土短肢剪力墙的破坏模式相同,均为弯剪破坏,且经过初裂、裂缝贯通、钢筋屈服、极限状态和最终破坏 5 个阶段。在荷载控制阶段,当水平荷载较小时,各短肢剪力墙构件均处于弹性状态,此时短肢剪力墙没有裂缝出现,随着荷载的增大,当达到开裂荷载时水平裂缝首先出现在墙角,此后随着荷载不断增大,墙身水平裂缝数量不断增多,宽度不断开展,此时短肢剪力墙墙身斜裂缝数量较少;荷载继续增大,短肢剪力墙中受力纵筋屈服,加载进入位移控制阶段,水平裂缝数量迅速增多,裂缝宽度增大,墙身斜裂缝的数量明显增多,墙角混凝土开始出现掉渣现象,随着加载位移的继续增大,墙身斜裂缝大量交汇,墙角混凝土外鼓、压碎并大块掉落,承载力急剧下降,模型最终破坏。

3 试验分析

3.1 滞回曲线分析

试验得到各 T 形 RAC 短肢剪力墙滞回曲线如图 5 所示,图中 P 表示水平荷载,Δ 表示加载点(与顶点位移相同)处相应的水平位移。

T 形 RAC 短肢剪力墙与普通短肢剪力墙(DT1)具有相似的滞回曲线特点。加载初期,模型处于弹性阶段,水平力和水平位移基本呈线性关系,滞回曲线的斜率较大,刚度退化不明显,滞回环呈现明显的“弓形”;随着水平荷载增加,模型墙身以水平裂缝为主,随后斜裂缝开始发展,模型的塑形变形逐渐增大,残余变形逐渐增加,对应的滞回曲线斜率也逐渐减小,卸载刚度亦逐渐减小。当荷载增大至纵向钢筋屈服后,模型开始按位移加载进行控制,裂缝增加明显,竖向裂缝大量出现,裂缝宽度不断增大,模型的滞回曲线开始呈现“反 S 形”。对应的斜率随着位移的增大而减小,且斜率减小的速度要明显大于力控制阶段,刚度退化速度加快。

表 2 钢筋材料力学性能实测值

Table 2 Measured values of mechanical properties of steel bars

规格	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	延伸率/ %	弹性模量/ 10 ⁵ MPa
8# 铁丝	300	345	31	2.07
Φ8 钢筋	480	495	20	1.98
Φ12 钢筋	480	495	20	1.98

表 3 RAC 材料力学性能实测值

Table 3 Measured values of mechanical properties of RAC

试件编号	立方体 抗压强度 MPa	轴心 抗压强度 MPa	弹性模量 MPa
DT1	45.51	41.54	4.09
DT2	47.02	40.76	3.59
DT3	47.28	41.56	3.56
DT4	46.09	42.29	3.49

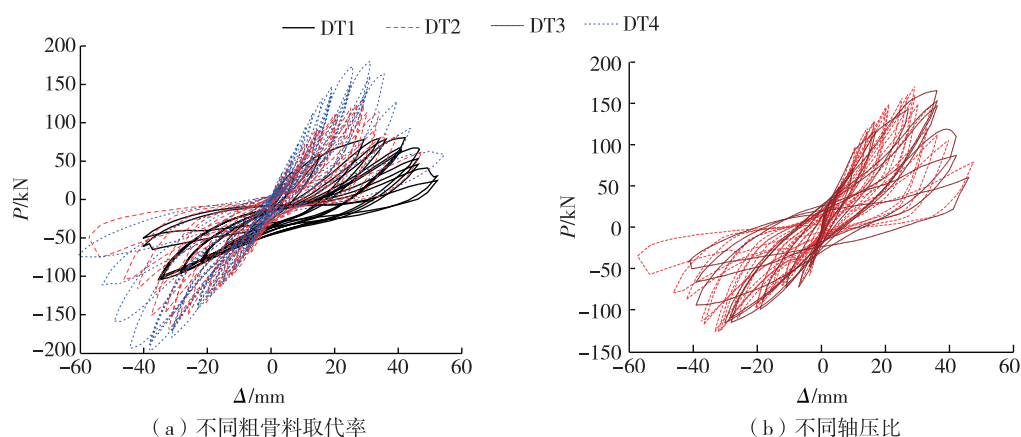


图5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves

由图5(a)可得:DT2(取代率50%)、DT4(取代率100%)与DT1(取代率0%)相比,滞回曲线形状基本相同,但滞回环面积明显大于DT1,且DT4的滞回环面积略大于DT2的滞回环面积。故随着再生粗骨料取代率的增大,T形RAC短肢剪力墙的滞回性能逐渐增强。

由图5(b)可得:DT2(轴压比0.2)和DT3(轴压比0.3)滞回曲线形状基本相同,DT3的滞回曲线下降段比DT2陡峭,构件延性明显较差;同时,DT2的极限荷载比DT3大,承载力高,滞回环面积大。故随着轴压比的增大,T形RAC短肢剪力墙的滞回性能逐渐降低。

3.2 骨架曲线分析

T形RAC短肢剪力墙与普通混凝土T形短肢剪力墙骨架曲线形状相似,各T形RAC短肢剪力墙骨架曲线均具有类似的发展规律,其主要包括3个阶段——弹性阶段、弹塑性阶段、强度退化阶段。T形RAC短肢剪力墙在达到屈服荷载后,骨架曲线下下降较平缓,表明T形RAC短肢剪力墙具有较好的延性。

由图6(a)可得:DT2、DT4较之DT1,其屈服荷载和极限荷载比DT1高且DT4大于DT2。上述结果表明,随着再生粗骨料取代率的增加,T形RAC短肢剪力墙构件承载力逐渐增大。

由图6(b)可得:当进行正向加载时(拉为正),DT2与DT3屈服荷载和极限荷载基本相当,但当达到极限荷载后。DT2下降较为平缓;当进行负向加载时(推为负),DT2屈服荷载与极限荷载均大于DT3。同时,当达到极限荷载后DT2的下陷亦明显平缓于DT3。上述结果表明,随着轴压比的增大,T形RAC短肢剪力墙承载能力减小,延性降低。

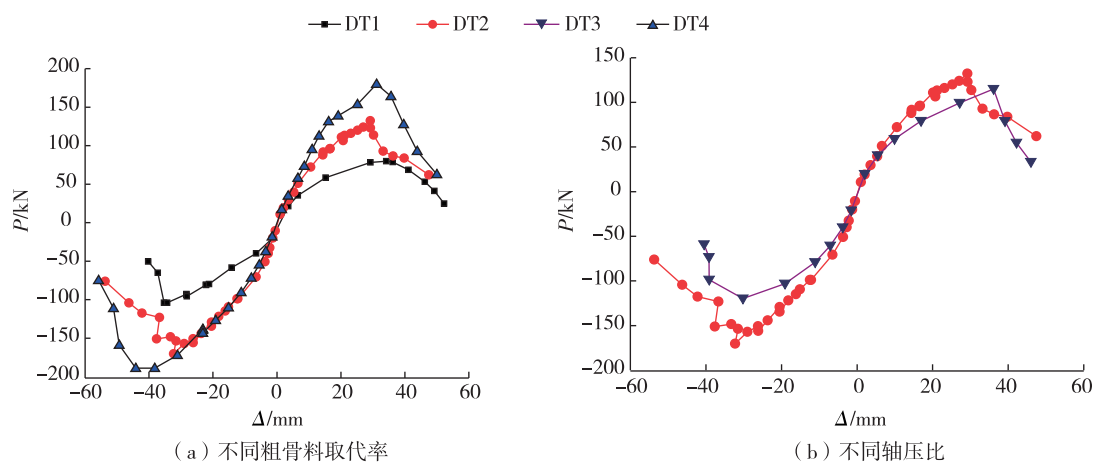


图6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves

3.3 延性分析

文中采用位移延性系数来衡量再生混凝土短肢剪力墙的延性性能,其定义式如下^[16]:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_u ——极限位移; Δ_y ——屈服位移。

利用式(1)对各 T 形 RAC 短肢剪力墙结构进行延性计算,各短肢剪力墙位移及延性系数计算值结果如表 4 所示。

表 4 T 形 RAC 短肢剪力墙特征位移及延性系数

Table 4 Characteristic displacement and ductility factor of T-shaped RAC short-leg shear wall

试件编号	正向				负向			
	Δ_c/mm	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ	Δ_c/mm	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ
DT1	5.7	9.9	42.7	4.31	3.2	7.4	36.6	4.95
DT2	6.2	8.3	33.4	3.98	2.8	6.2	30.1	4.85
DT3	7.1	11.7	39.6	3.38	3.4	9.4	41.3	4.39
DT4	5.4	16.0	38.3	2.39	2.6	14.9	49.7	3.33

注: Δ_c 为开裂位移, μ 为延性系数。

由表 4 可得:

a. 正向加载时:DT2、DT4 与 DT1 相比,延性系数分别下降了 7.66%、44.55%;DT4 与 DT2 相比,延性系数下降了 39.95%。负向加载时:DT2、DT4 与 DT1 相比,延性系数分别下降了 2.02%、32.73%;DT4 与 DT2 相比,延性系数下降了 31.34%。故随着再生粗骨料取代率的增加,T 形 RAC 短肢剪力墙结构的延性系数降低。

b. 随着轴压比的增大,当正向加载时,DT3 与 DT2 相比,延性系数下降了 15.08%;负向加载时,DT3 与 DT2 相比,延性系数下降了 9.48%。即随着轴压比的增大,T 形 RAC 短肢剪力墙结构延性系数降低。

3.4 刚度退化分析

采用折算割线刚度对 T 形 RAC 短肢剪力墙各模型进行刚度计算,割线刚度 K_i 利用式(2)计算^[5]:

$$K_i = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|} \quad (2)$$

式中: P_i^+ 、 P_i^- 、 Δ_i^+ 、 Δ_i^- ——第 i 次循环滞回曲线峰值点对应荷载和位移。

根据式(2)计算结果得到各试件刚度退化曲线,见图 7。

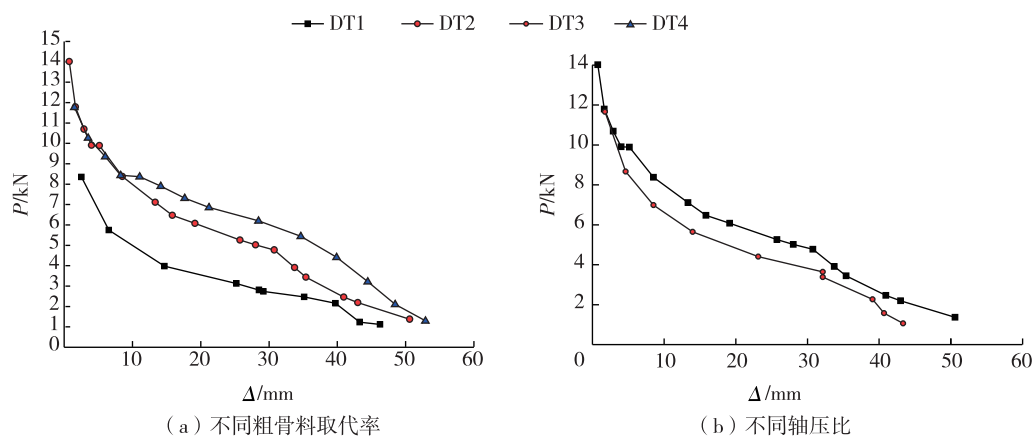


图 7 刚度退化曲线

Fig. 7 Curves of stiffness degradation

各模型在低周反复荷载作用下的刚度退化都很明显,刚度均随着位移的增大而减小。在加载初期,刚度退化速度较快;进入屈服阶段后,随着加载位移的增加,刚度退化速度变缓。但是由于不同再生粗骨料取代率与不同轴压比的影响,各模型刚度退化曲线又呈现出不同的规律。

由图 7(a) 可得:DT2、DT4 初期刚度与 DT1 相比,下降略为缓慢。在加载至相同位移时,DT2、DT4 的刚度均大于 DT1。该结果表明,随着再生粗骨料取代率的增加,模型刚度退化速率较为缓慢,抗震性能越好。

由图 7(b) 可得:加载初期,DT2 比 DT3 刚度退化略为缓慢。在相同位移下,模型 DT2 的刚度始终大于 DT3 的刚度。该结果表明,随着轴压比的增大,模型刚度退化速率加快,抗震性能变差。

3.5 耗能能力分析

对于滞回曲线的分析,仅能针对模型的抗震性能进行定性分析,因而为了对模型抗震性能进行定量评估,本文采用了滞回累积面积、耗能系数(又称能量耗散系数)来衡量模型能量耗散的大小^[6]。耗能系数的计算公式如下:

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (3)$$

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ ——滞回环对应的面积; $S_{(OBE+ODF)}$ ——相应三角形的面积。

模型循环反复加载 1 次形成滞回环的面积越大, E 就越大,其耗能能力就越强,抗震性能越好。根据式(3)对各 T 形 RAC 短肢剪力墙构件滞回环面积累积面积、耗能系数进行计算,所得结果如图 8 和 9 所示。

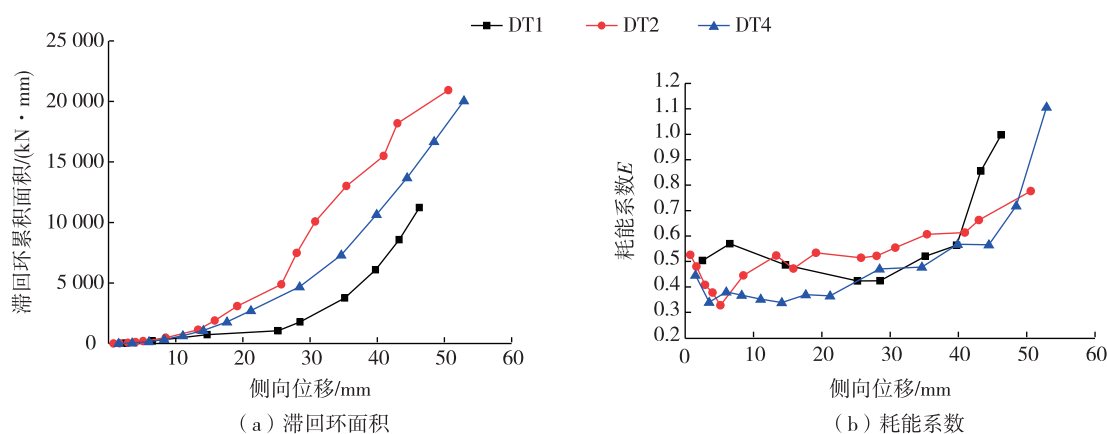


图 8 不同再生粗骨料取代率对应的滞回环面积和耗能系数

Fig. 8 Variations of area of hysteresis loop and energy dissipation factor with lateral displacement for different replacement rates of recycled coarse aggregate

由图 8 可得:DT1、DT2 和 DT4 的累积滞回环面积和耗能系数均随着位移的增加而增加。当侧向位移较小时(0 ~ 10 mm),DT1、DT2 和 DT4 滞回环面积相当;侧向位移超过 10 mm 后,相同位移下,DT2 的累积滞回环面积最大、DT4 次之、DT1 最小,当承载力达到 85% 峰值荷载时 DT4 相应的滞回环面积最大、DT2 次之、DT1 最小。同时,耗能系数所呈现的规律与累积滞回环面积的变化规律相似。故 T 形 RAC 短肢剪力墙的耗能性能要好于普通混凝土 T 形短肢剪力墙。

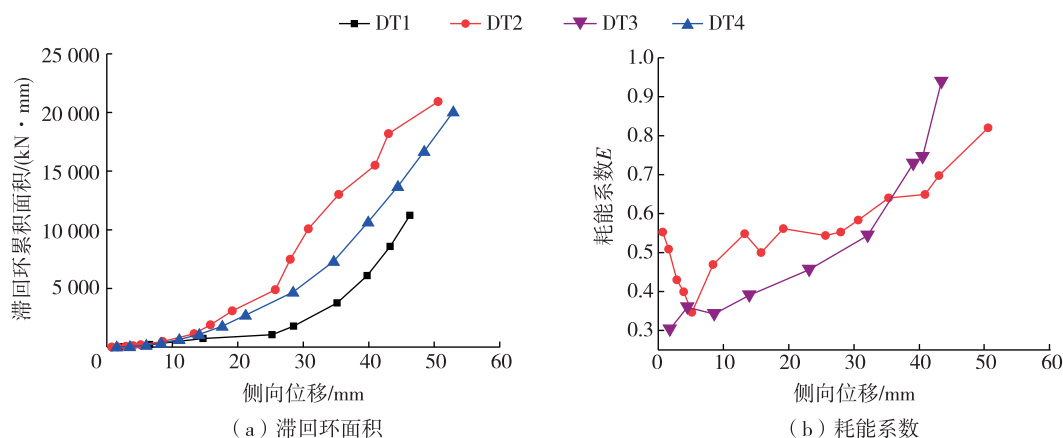


图 9 不同轴压比对应的滞回环面积和耗能系数

Fig. 9 Variations of area of hysteresis loop and energy dissipation factor with lateral displacement for different axial compression ratios

由图 9 可得:DT2 和 DT3 的累积滞回环面积和耗能系数亦随着位移的增加而增加。当侧向位移较小时(0 ~ 10 mm),DT2 和 DT3 的滞回环面积和耗能系数相当;侧向位移超过 10 mm 以后,在相同位移条件下,随着轴压比的增大,累积滞回环面积和耗能系数逐渐减小。即:轴压比越大,T 形 RAC 短肢剪力墙耗能性能越差。

3.6 承载力分析

由于本试验试件截面为 T 形,正向和负向不对称(拉为正,推为负),故将正向和负向承载力分开进行讨论,试验所得结果见表 5。

表 5 模型开裂荷载、屈服荷载和极限荷载实测值
Table 5 Measured values of cracking load, yield load, and ultimate load

试件编号	正向			$\mu_{yu} = F_y/F_u$	负向			$\mu_{yu} = F_y/F_u$
	F_c	F_y	F_u		F_c	F_y	F_u	
DT1	60.00	118.53	161.27	0.735	60.00	80.32	112.72	0.713
DT2	70.00	133.02	169.36	0.785	70.00	94.73	126.44	0.749
DT3	60.00	120.52	165.47	0.728	60.00	85.36	115.53	0.739
DT4	80.00	155.25	190.03	0.817	80.00	105.63	135.83	0.778

注: F_c 为试件的开裂水平荷载, F_y 为试件的屈服水平荷载, F_u 为试件的最大水平荷载。

由表 5 可得:

a. 与 DT1 相比,T 形 RAC 短肢剪力墙 DT2、DT4 的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载均有所提高。正向加载时,开裂荷载分别提高了 16.67% 和 33.33%,屈服荷载提高了 12.22% 和 30.98%,极限荷载分别提高了 5.02% 和 17.83%;负向加载时,开裂荷载分别提高了 16.67% 和 33.33%,屈服荷载提高了 6.23% 和 31.5%,极限荷载分别提高了 12.17% 和 20.51%。即:随着再生粗骨料取代率的增大,T 形 RAC 短肢剪力墙正向、反向各特征荷载逐渐增大。

b. 对于不同轴压比的 T 形 RAC 短肢剪力墙 DT2、DT3,随着轴压比的增大(DT3 大于 DT2),正向加载时,开裂荷载降低了 14.29%,屈服荷载降低了 9.40%,极限荷载降低了 2.37%;负向加载时,开裂荷载降低了 14.29%,屈服荷载降低了 9.89%,极限荷载降低了 8.63%。

4 结 语

本文通过对 4 个缩尺比例为 1:2 的 T 形 RAC 短肢剪力墙进行低周反复荷载作用下的抗震性能试验,对比分析了再生粗骨料取代率、轴压比对于 T 形 RAC 短肢剪力墙抗震性能的影响;结合试验现象,建立了相应的正截面及水平极限承载力计算公式,将所得计算结果与试验结果进行对比,所得结论如下:

a. 根据课题组前期所做 RAC 基本材料性能试验调整所得 C40RAC 配合比所制作的 T 形 RAC 短肢剪力墙与普通混凝土短肢剪力墙的破坏模式基本相同,均为弯剪破坏,且均经过了初裂、裂缝贯通、钢筋屈服、极限状态和最终破坏 5 个阶段。

b. 由 T 形 RAC 短肢剪力墙抗震性能试验结果表明:随着再生粗骨料取代率的增大,T 形 RAC 短肢剪力墙的特征曲线、刚度退化、耗能性能等抗震性能指标均有所提高;随着轴压比的增大,T 形 RAC 短肢剪力墙的特征曲线等指标有所降低。

c. T 形 RAC 短肢剪力墙延性随着再生粗骨料取代率及轴压比的提高均会出现不同程度的降低。

d. 文中针对 T 形 RAC 短肢剪力墙随轴压比变化的试验进行尚不充分;但通过与普通混凝土 T 形短肢剪力墙抗震性能的对比表明,T 形 RAC 短肢剪力墙能够应用于实际工程中轴压比较小的结构之中。

参考文献:

- [1] 李青宁,李晓蕾,闫艳伟,等.钢筋混凝土短肢剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(4):53-62.(LI Qingning, LI Xiaolei, YAN Yanwei, et al. Experimental research on seismic performance of reinforced concrete short-leg shear wall[J].Journal of Building Structures,2011,32(4): 53-62.(in Chinese))
- [2] 黄东升,程文襄,彭飞.对称双肢短肢剪力墙的低周反复荷载试验研究[J].建筑结构学报,2005,26(3):51-56.(HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. Low-cycle loading experiment study on symmetric double short-pier shear walls[J].

- Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 51-56. (in Chinese))
- [3] 李杰, 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 12-20. (LI Jie, LI Kuiming. Experiment on RC short-leg shear wall structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 12-20. (in Chinese))
- [4] 李杰, 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构非线性分析研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 23-30. (LI Jie, LI Kuiming. Nonlinear analysis of RC short-leg shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 23-30. (in Chinese))
- [5] 曹万林, 徐泰光, 刘强, 等. 再生混凝土高剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(2): 18-23. (CAO Wanlin, XU Taiguang, LIU Qiang, et al. Experimental study on seismic performance of high-rise recycled aggregate concrete shear wall [J]. World Earth Quake Engineering, 2009, 25(2): 18-23. (in Chinese))
- [6] 曹万林, 刘强, 张建伟, 等. 再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(1): 1-5. (CAO Wanlin, LIU Qiang, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on seismic performance of low-rise recycled aggregate concrete shear wall [J]. World Earth Quake Engineering, 2009, 25(1): 1-5. (in Chinese))
- [7] 肖飞. 不同轴压比下再生混凝土高剪力墙试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [8] 张博, 王社良, 樊禹江, 等. 压碎值指标对再生混凝土抗压强度的影响[J]. 工业建筑, 2013, 43(11): 1-6. (ZHANG Bo, WANG Sheliang, FAN Yujang, et al. Influence of crush value index for compression strength of recycled aggregate concrete[J]. Industrial construction, 2013, 43(11): 1-6. (in Chinese))
- [9] 杜园芳, 王社良, 樊禹江, 等. 混杂再生纤维对再生混凝土强度的影响研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(11): 12-15. (DU Yuanfang, WANG Sheliang, FAN Yujing, et al. Experimental study on hybrid renewable fiber effect on strength of recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2013, 43(11): 12-15. (in Chinese))
- [10] 迟世春, 林少书. 结构动力模型试验相似理论及其验证[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 25-30. (CHI Shichun, LIN Shaoshu. Validation of similitude laws for dynamic structural model test[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, 20(4): 25-30. (in Chinese))
- [11] 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 Bozhi, WANG Sheliang, ZHANG Bo, et al. Experimental analysis of the basic mechanical properties of recycled concrete[J]. Concrete, 2011(7): 4-6. (in Chinese))
- [12] 王占锋, 王社良, 翁光远. 不同粗骨料取代率再生混凝土力学性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(4): 32-35. (WANG Zhanfeng, WANG Sheliang, WENG Guangyuan. Experimental study on mechanical properties of concrete prepared with different recycled coarse aggregates replacement rate[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(4): 32-35. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [16] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 32-38. (WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on the behavior of recycled concrete segment/lump filled steel tubular stub columns subjected to concentrically axial load[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 32-38. (in Chinese))