

文章编号:1673-2049(2018)05-0046-08

CFRP筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验

赵 军¹, 沈富强^{2,3}, 司晨哲¹, 孙玉平³

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 日本神户大学 工学研究科, 兵庫 神戸 657-8501)

摘要:为研究不同轴压比和边缘构件中的箍筋形式对碳纤维增强复合材料(CFRP)筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响,设计了6个剪跨比为2.0的CFRP筋/钢筋混凝土剪力墙,其中3个剪力墙的边缘构件中配置矩形复合箍筋,另外3个剪力墙的边缘构件中配置圆形箍筋,完成了轴压比分别为0.17, 0.26, 0.33的剪力墙低周反复荷载试验,研究了剪力墙滞回曲线和骨架曲线的特征、强度和刚度退化规律及耗能能力等。结果表明:轴压比和边缘构件中的箍筋形式对剪力墙抗震性能影响较大,随着轴压比的增大,剪力墙承载能力和耗能能力增大,刚度退化程度减缓,但是极限荷载对应的变形和极限变形有所降低;箍筋形式对剪力墙的极限承载力影响较小,但是配置矩形复合箍筋的剪力墙比配置圆形箍筋剪力墙有较大的极限变形,累积耗能能力也较高;轴压比较大时,剪力墙的裂缝发展高度减小,墙角混凝土破坏区域增大,配置圆形箍筋剪力墙墙角混凝土破坏区域和破坏程度比配置矩形复合箍筋的剪力墙大;所有剪力墙的残余变形较小,自复位性能良好。

关键词:剪力墙;CFRP筋;钢筋;抗震性能;残余变形

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A

Experiment on Seismic Performance of Shear Wall Reinforced with CFRP Bars and Steel Bars

ZHAO Jun¹, SHEN Fu-qiang^{2,3}, SI Chen-zhe¹, SUN Yu-ping³

(1. School of Mechanics and Engineering Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;
2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;
3. Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, Hyogo, Japan)

Abstract: In order to study the impact of axial compression ratio and the form of stirrup in the edge column on seismic performance of shear walls reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars and steel bars, 6 shear walls reinforced with CFRP bars and steel bars with the aspect ratio of 2.0 were designed. The 3 shear walls had rectangular stirrups, while the other 3 shear walls had circular stirrups. These specimens with axial compression ratio of 0.17, 0.26 and 0.33 were tested under reversed cyclic lateral loading. The characteristics of hysteretic curves and skeleton curves, laws of stiffness and strength degradation and energy dissipation capacity of shear walls were researched. The results show that the axial compression ratio and the form of stirrup have significant impacts on the seismic performance of shear walls. When the axial compression ratio increases, the bearing capacity and dissipation capacity are enhanced and the extent of stiffness degradation is mitigated, however the deformations corresponding to the

收稿日期:2018-06-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0125600)

作者简介:赵 军(1971-),男,河南漯河人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhaoj@zzu.edu.cn。

ultimate load and the ultimate deformation go down. The form of stirrup has less influence on the ultimate bearing capacity, but the shear walls with rectangular stirrups have larger ultimate deformation and better cumulative energy dissipation capacity than those with hoops. When the axial compression ratios are bigger, the shear walls have lower depth of cracks and bigger failure regions. The failure region and failure degree with circular stirrup are bigger than those with rectangular stirrups. All shear walls have small residual deformation and good self-centering performance.

Key words: shear wall; CFRP bar; steel bar; seismic performance; residual deformation

0 引 言

中国现行建筑结构抗震设计遵循的基本准则是“小震不坏,中震可修,大震不倒”,当建筑物遭遇相当于或超过抗震设防烈度的地震时会发生严重的损坏甚至破坏^[1-2]。对于医院、发电厂、道路、桥梁、通信基站等生命线工程,其使用功能在地震时及震后抢险救援中的作用举足轻重,发生地震时仅仅是“不倒塌”这样的抗震设防要求已不能满足需要,而且经历中、大震后建筑即使不倒塌,也会产生较大的残余变形,混凝土中的钢筋可能发生屈服、断裂,修复成本巨大,多数情况下只能拆除重建,极大地耗费人力和物力。因此,能够抵抗较大地震作用,震后残余变形小,能够快速恢复使用功能的可恢复功能结构成为结构抗震工程领域研究的热点^[3-5]。

碳纤维增强复合材料(CFRP)筋是一种新型混凝土结构配筋材料,具有抗拉强度高和线弹性特性,将其布置在钢筋混凝土结构中,能够提高结构的承载能力,其在混凝土结构中的应用已有广泛的研究^[6-10]。文献[11]~[14]将 CFRP 筋与钢筋混合配置在混凝土柱中进行了拟静力试验,配置 CFRP 筋的混凝土柱具有较强的承载能力,CFRP 筋可以提高柱屈服后的刚度比,减小残余变形。此外,配置 CFRP 筋混凝土柱的极限位移转角超过了 2.4%。轴压比和箍筋配筋率是影响 CFRP 筋混凝土柱抗震性能的重要因素。文献[15],[16]对纤维增强复合材料(FRP)筋混凝土剪力墙进行了试验研究,结果表明,FRP 筋混凝土剪力墙的裂缝宽度和残余变形明显小于普通钢筋混凝土剪力墙,当荷载小于极限荷载的 80%时,FRP 筋混凝土剪力墙的残余变形基本为 0,具有良好的恢复性能。笔者所在研究团队对 CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙进行了试验研究,发现在钢筋混凝土剪力墙的适当位置配置 CFRP 筋能够提高剪力墙的承载能力,有效减小剪力墙的残余变形^[17-19],但对于 CFRP 筋/钢筋混

土剪力墙的抗震性能仍需进一步的研究。

为了研究轴压比和剪力墙边缘构件中箍筋对 CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响,本文设计了 6 个边缘构件配置 2 种不同箍筋形式的 CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙,在 0.17,0.26,0.33 三种轴压比下进行低周反复荷载试验,研究配置 CFRP 筋对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了 6 个矩形截面(尺寸为 200 mm×1 280 mm)剪力墙试件,剪跨比为 2.0。试件由加载梁、墙体、基础梁三部分组成。加载梁为矩形截面(尺寸为 300 mm×400 mm),长 1 780 mm。基础梁为矩形截面(尺寸为 500 mm×700 mm),长 2 110 mm。6 个剪力墙试件根据墙体边缘构件配置的箍筋形式不同分为 2 类,第 1 类试件共 3 个,墙体边缘构件配置矩形复合箍筋,编号分别为 CFRPRW1, CFRPRW2, CFRPRW3,分别对应 0.17,0.26,0.33 的轴压比。第 2 类试件共 3 个,墙体边缘构件配置圆形箍筋,编号为 CFRPHW1, CFRPHW2, CFRPHW3,分别对应 0.17,0.26,0.33 的轴压比。

CFRP 筋配置在剪力墙边缘构件中作为纵向受力筋,每个边缘构件配置 12 根纵向筋,其中 4 根直径 8 mm 的 HRB335 钢筋位于边缘构件四角,8 根直径 12 mm 的 CFRP 筋均匀分布于边缘构件四边。边缘构件中箍筋为直径 6 mm 的 HPB300 钢筋,间距 50 mm。CFRPRW1~CFRPRW3 中采用矩形复合箍筋,配箍率为 1.7%;CFRPHW1~CFRPHW3 中采用圆形箍筋,配箍率为 0.6%。试件配筋如图 1 所示。剪力墙的墙体竖向分布钢筋和水平分布钢筋均为直径 8 mm 的 HRB335 钢筋,竖向分布钢筋的间距为 60 mm,配筋率为 0.7%。墙体 600 mm 高度以下范围内水平分布钢筋的间距为 50 mm,配筋率为 1.0%;600 mm 高度以上范围的水平钢筋间距

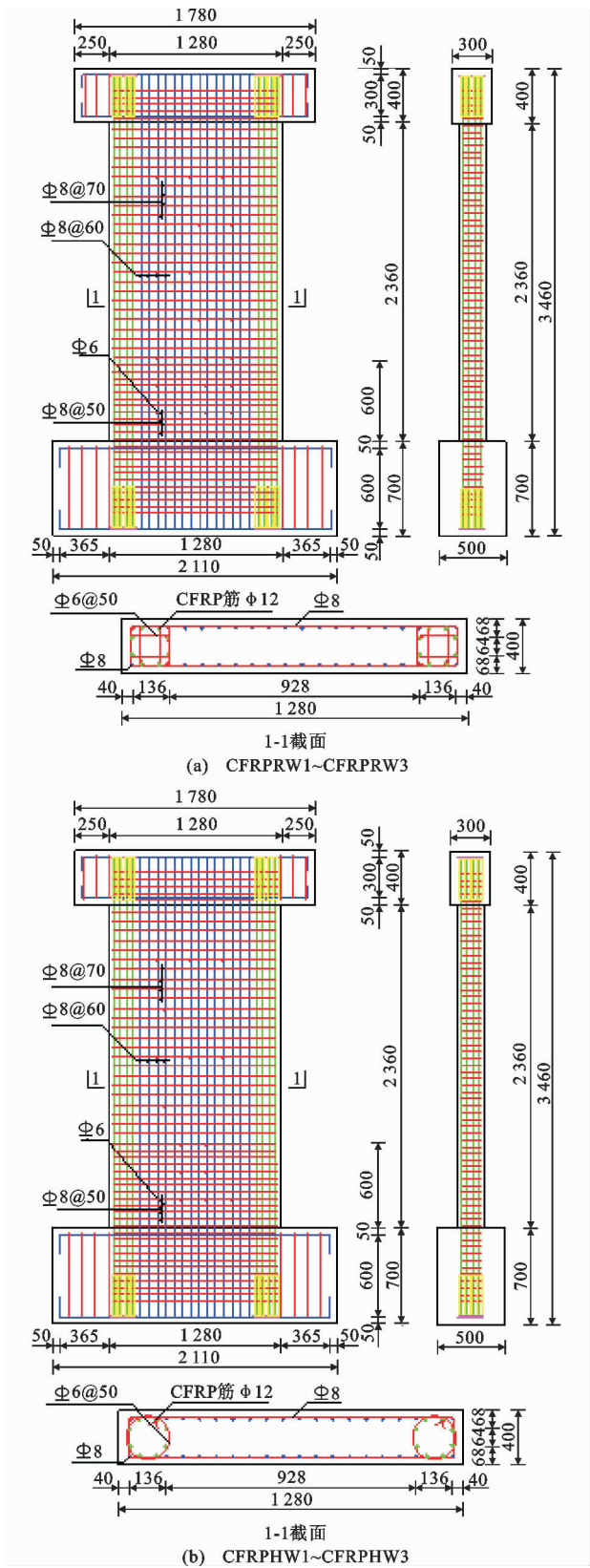


图 1 试件配筋(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement of Specimens (Unit:mm)
为 70 mm,配筋率为 0.7%。为保证 CFRP 筋在混凝土中的黏结,充分发挥 CFRP 筋的性能,设计了

一种锚固装置对 CFRP 筋端部进行锚固,如图 2 所示。锚固装置由 8 根长 330 mm、外径 32 mm、壁厚 3 mm 的钢管焊接到一块边长 190 mm、厚 10 mm 的钢板上组成。将 CFRP 筋插入钢管中心,灌入高强、无收缩的灌浆料即完成了对 CFRP 筋端部的锚固。



图 2 CFRP 筋锚固装置

Fig. 2 Anchorage Setup for CFRP Bars

1.2 材料性能

试件所用筋材性能如表 1 所示。试件所用混凝土为 C40 混凝土,28 d 立方体抗压强度为 57.2 MPa,轴心抗压强度为 36.8 MPa。

表 1 筋材性能

Tab. 1 Properties of Bars

筋材类别	直径/ mm	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	屈服应 变/ 10^{-6}	伸长 率/%	弹性模量/ 10^5 MPa
HPB300	6	414.8	529.4	1 860	19.4	2.23
HRB335	8	361.3	502.6	1 599	19.2	2.26
CFRP 筋	12		2 310.3			1.43

1.3 加载方案

CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验为竖向荷载作用下的水平反复荷载试验,加载装置如图 3 所示。竖向加载由液压千斤顶完成,按照试验轴压比确定 6 个剪力墙试件所承受的竖向荷载大小,轴压比 0.17 对应的竖向荷载为 1 580 kN,轴压比 0.26 对应的竖向荷载为 2 431 kN,轴压比 0.33 对应的竖向荷载为 3 160 kN。竖向千斤顶上方装有滑道,可使竖向千斤顶能够随着墙体变形作水平移动,保持其加载位置不变。水平反复加载由 MTS 作动器完成,采用位移控制,加载制度如图 4 所示。

1.4 测量方案

通过应变片和位移计对试验过程中剪力墙筋材的应变以及墙体位移进行测量。应变片和位移计的布置如图 5 所示。



图 3 加载装置
Fig. 3 Loading Setup

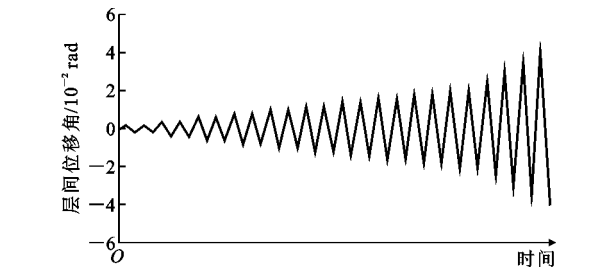


图 4 加载制度
Fig. 4 Loading System

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

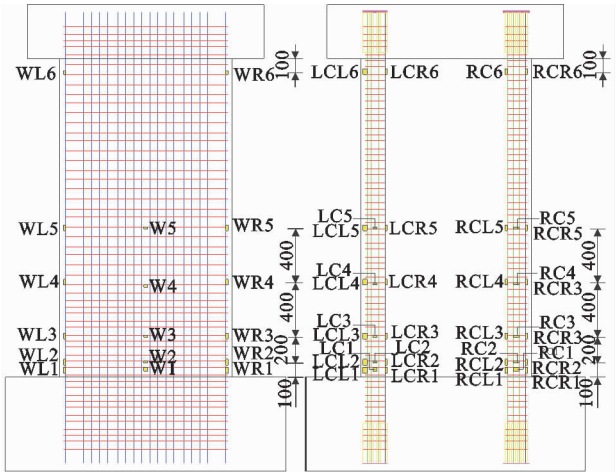
6 个剪力墙均呈现以弯曲破坏为主的弯剪型破坏,图 6 为轴压比 0.33 的剪力墙破坏形态。加载前期墙角出现水平裂缝,随着加载等级的提高,水平裂缝沿水平向延伸,并逐渐斜向发展,最终墙体受拉侧纵向钢筋屈服,受压侧墙角混凝土压坏,剪力墙破坏。轴压比较小时,剪力墙破坏时混凝土破坏区域不大,而且配置不同形式的箍筋影响较小。随着轴压比增大,墙体裂缝发展高度减小,墙角混凝土剥落范围增大。当轴压比为 0.33 时,配置圆形箍筋的剪力墙墙角混凝土破坏区域和程度比配置矩形复合箍筋的剪力墙大,如图 6 所示。

2.2 滞回曲线

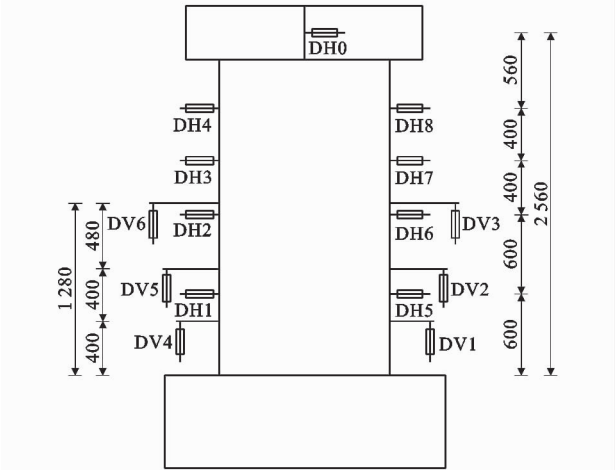
试件的滞回曲线是在水平反复荷载 F 作用下,试件承受的水平荷载随位移计 DH0 测得的试件加载梁中部水平位移 Δ 的变化曲线,如图 7 所示。

轴压比相同时,不同箍筋形式对剪力墙的承载能力影响较小,但对剪力墙的极限变形影响较大,配置复合矩形箍筋的剪力墙比圆形箍筋剪力墙的极限变形大。

轴压比对剪力墙的影响比较明显。随着轴压比的增大,剪力墙峰值荷载增大,且峰值荷载对应的水平位移减小。当轴压比为 0.17 时,CFRPRW1 和



(a) 应变片布置



(b) 位移计布置

图 5 应变片和位移计布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangements of Strain Gages and Displacement Transducers (Unit:mm)

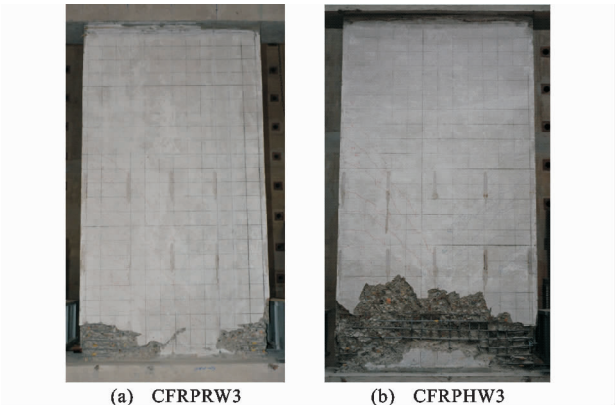


图 6 0.33 轴压比下试件破坏形态

Fig. 6 Failure Modes of Specimens with Axial Compression Ratio of 0.33

CFRPRW2 在层间位移角 2.5% 的加载等级下达到峰值荷载。当轴压比为 0.26,0.33 时,试件达到峰值荷载对应的加载等级分别为 1.8%,1.6%。达到

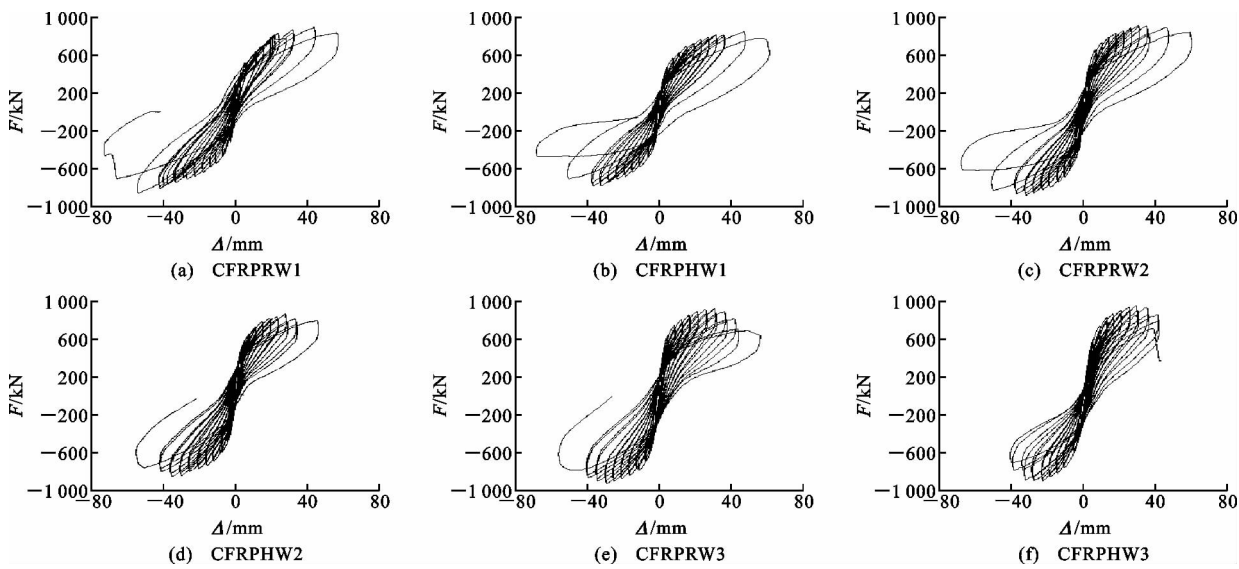


图 7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic Curves

峰值荷载后,随着轴压比的增加,试件的承载力下降幅度也增大。此外,轴压比对剪力墙的变形能力也有影响,试件的极限位移随轴压比的增大而减小。

当层间位移角小于 $1/60$ rad,对应的层间位移小于 42.7 mm 时,6 个试件的承载力均没有出现显著的降低,表明 CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙有较好的持载能力。另外,6 个试件的残余变形也比较小,均有较好的自复位能力。这说明在剪力墙边缘构件中配置 CFRP 筋可以有效地减小剪力墙的残余变形,为墙体提供良好的恢复能力。相比来看,配置矩形复合箍筋的剪力墙残余变形比配置圆形箍筋剪力墙要小,自复位性能更好。

2.3 骨架曲线

试件的骨架曲线为滞回曲线各级加载第 1 次循环的峰值点所连成的包络线,见图 8。

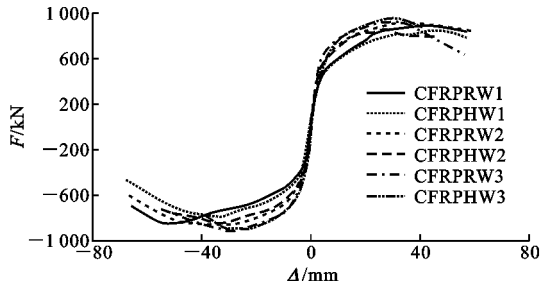


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curves

相同轴压比下,配置矩形复合箍筋剪力墙的峰值荷载稍高于配置圆形箍筋的剪力墙。当轴压比为 0.17 时,CFRPRW1 和 CFRPHW1 的变形基本一致。当轴压比为 0.26 和 0.33 时,CFRPRW2 和

CFRPRW3 的变形能力要优于 CFRPHW2 和 CFRPHW3,说明配置矩形箍筋的剪力墙变形能力优于配置圆形箍筋的剪力墙。可见配置矩形复合箍筋比配置圆形箍筋对边缘构件核心区混凝土有着更好的约束作用,从而提高受压侧核心区混凝土的抗压能力和变形能力,这种作用在较大的轴压比下显得更加明显。随着轴压比的增大,荷载峰值点有所提高,荷载峰值点对应的位移减小,而且试件的最大位移值也有所降低,说明试件的极限荷载随轴压比的增大而增大,而变形能力随轴压比的增大而减小。

2.4 刚度和强度退化

刚度反映了试件抵抗变形的能力。在水平反复荷载作用下,剪力墙的刚度呈现出下降的趋势。剪力墙试件的刚度可用割线刚度表示,割线刚度 K_i 按式(1)计算^[20]

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \tag{1}$$

式中: $+F_i$, $-F_i$ 分别为第 i 次正、反向峰值点的荷载值; $+X_i$, $-X_i$ 分别为第 i 次正、反向峰值点的位移值。

由式(1)计算出各试件在每个加载等级下的刚度,绘制出刚度随位移的变化曲线,即为试件的刚度 K 退化曲线,如图 9 所示。6 个试件刚度退化的趋势相似,割线刚度在位移值 6 mm 以内时下降迅速。随后刚度退化的速率放缓,在位移值 $20 \sim 60$ mm 阶段退化速率逐渐趋于平稳。随着轴压比的增大,试件刚度退化的速率减小,尤其在位移 20 mm 以内的阶段最为明显。位移大于 40 mm 之后,刚度退化曲

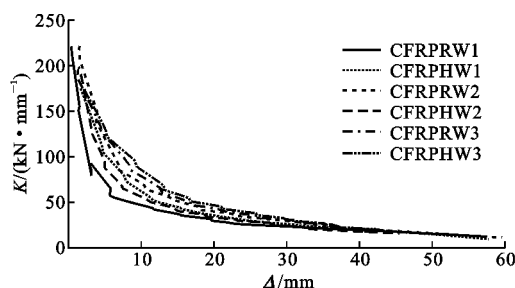


图 9 刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness Degradation Curves

线基本重合。箍筋形式对剪力墙的刚度退化规律有一定的影响,从开始加载到变形增大到 40 mm 的加载阶段内,配置矩形复合箍筋剪力墙的刚度小于配置圆形箍筋的剪力墙,但随着轴压比的增大,二者的差别逐渐减小,当轴压比达到 0.33 时,刚度退化曲线基本重合。

剪力墙在反复荷载作用下会产生不可逆的损伤,造成强度下降。在同一加载等级下,把第 2 次循环峰值点荷载值与第 1 次循环峰值点荷载值的比值定义为该加载等级的强度退化系数 λ ,以此反映剪力墙的强度退化情况。

图 10 为强度退化曲线。由图 10 可知:当水平位移小于 20 mm 时,所有试件的强度退化系数稳定在 5% 以内,此时剪力墙的强度退化程度较低,箍筋形式对强度退化规律影响较小;当层间位移大于 20 mm 时,轴压比为 0.17 的 2 个剪力墙强度退化系数仍然稳定,降低幅度较小;轴压比为 0.26 和 0.33 的剪力墙强度退化系数产生了较大的下降。这说明轴压比和变形对试件的强度退化有着较大影响,在大轴压比和大变形条件下,反复荷载作用对剪力墙造成了较大的损伤,使其强度产生了较大的降低。

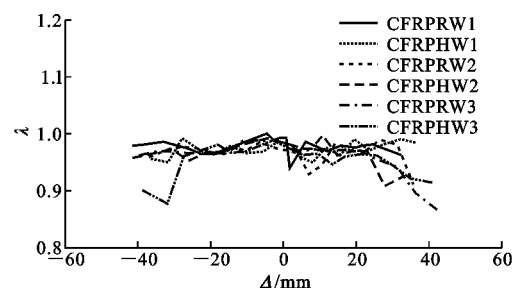


图 10 强度退化曲线

Fig. 10 Strength Degradation Curves

2.5 耗能能力

试件的耗能能力以滞回曲线所包围的面积衡量。图 11 为根据试验数据计算得到的累积耗能曲线。由图 11 可知,箍筋形式和轴压比对剪力墙的耗

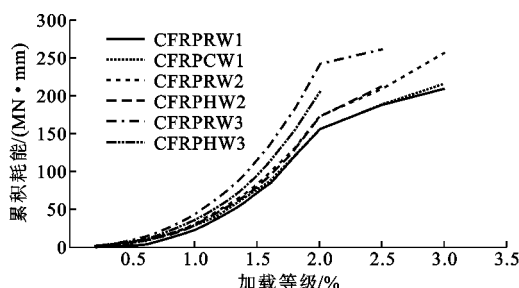


图 11 累积耗能曲线

Fig. 11 Cumulative Energy Dissipation Curves

能能力有一定的影响。随着轴压比的增加,试件的耗能能力逐渐增强。当轴压比为 0.17 和 0.26 时,边缘构件中配置矩形复合箍筋和圆形箍筋的 2 种剪力墙累积耗能曲线基本一致,两者的累积耗能相差不大。当轴压比为 0.33 时,边缘构件配置矩形复合箍筋的剪力墙累积耗能大于配置圆形箍筋的剪力墙,而且层间位移角越大,二者的差别越大。这表明在该轴压比条件下,配置的箍筋形式对剪力墙的耗能能力有较大影响,配置矩形复合箍筋的剪力墙耗能能力优于配置圆形箍筋的剪力墙。

3 结 语

(1)随着轴压比的增大,滞回曲线中的峰值荷载增大,峰值荷载对应的变形有所减小,极限变形也相应降低。

(2)在剪力墙边缘构件中配置 CFRP 筋,剪力墙的残余变形很小,具有良好的自复位能力。

(3)随着轴压比的增加,剪力墙的刚度退化有所减缓,配置矩形复合箍筋的剪力墙刚度小于配置圆形箍筋剪力墙。

(4)轴压比较小时,边缘构件中的箍筋形式对剪力墙的耗能能力影响较小。当轴压比较大时,配置矩形复合箍筋剪力墙的耗能能力大于配置圆形箍筋剪力墙。

参考文献:

References:

- [1] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008,29(4):10-19.
LI Hong-nan, XIAO Shi-yun, HUO Lin-sheng. Damage Investigation and Analysis of Engineering Structures in the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 10-19.
- [2] 陈 通,郑通彦.2015 年中国大陆地震灾害损失述评[J].灾害学,2016,31(3):133-137.
CHEN Tong, ZHENG Tong-yan. Review of Earth-

- quake Damage Losses in Mainland China in 2015[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 133-137.
- [3] 吕西林, 全柳萌, 蒋欢军. 从 16 届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 1-9.
- LU Xi-lin, QUAN Liu-meng, JIANG Huan-jun. Research Trend of Earthquake Resilient Structures Seen from 16WCEE[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 1-9.
- [4] 蒋欢军, 刘其舟. 可恢复功能剪力墙结构研究进展[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 51-58.
- JIANG Huan-jun, LIU Qi-zhou. State-of-the-art of the Research Advances on Resilient Shear Walls[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 51-58.
- [5] 吕西林, 周颖, 陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 130-139.
- LU Xi-lin, ZHOU Ying, CHEN Cong. Research Progress on Innovative Earthquake-resilient Structural Systems[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 130-139.
- [6] 高丹盈, 房栋, 祝玉斌. 体外预应力 FRP 筋加固混凝土单向板受弯性能及承载力计算方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 115-126.
- GAO Dan-ying, FANG Dong, ZHU Yu-bin. Flexural Property and Calculation Method of One-way Reinforced Concrete Slabs Externally Prestressed with Unbonded FRP Tendons[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 115-126.
- [7] 杨则英, 谭婷婷, 刘阳宇东, 等. 预应力 CFRP 筋混凝土板试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(8): 76-82.
- YANG Ze-ying, TAN Ting-ting, LIU Yang-yudong, et al. Experimental Study on Prestressed CFRP Reinforced Concrete Slab[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(8): 76-82.
- [8] 杜修力, 王作虎, 詹界东. 预应力 CFRP 筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 80-86.
- DU Xiu-li, WANG Zuo-hu, ZHAN Jie-dong. Experimental Studies on Shear Behavior of Concrete Beams Prestressed with CFRP Tendons[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 80-86.
- [9] 黄丽华, 王召. FRP 筋增强混凝土受弯构件研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(1): 36-38.
- HUANG Li-hua, WANG Zhao. Review of Research Achievement of Flexural Concrete Members Reinforced with FRP[J]. Architecture Technology, 2016, 47(1): 36-38.
- [10] 江世永, 陶帅, 李雪阳. FRP 筋高韧性纤维混凝土复合结构抗震性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7): 92-99.
- JIANG Shi-yong, TAO Shuai, LI Xue-yang. Review on Seismic Performance of FRP Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members and Structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7): 92-99.
- [11] 龚永智, 张继文, 蒋丽忠, 等. 高性能 CFRP 筋混凝土柱的抗震性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1506-1513.
- GONG Yong-zhi, ZHANG Ji-wen, JIANG Li-zhong, et al. Aseismic Behavior of Concrete Columns Reinforced with CFRP[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(4): 1506-1513.
- [12] AFIFI M Z, MOHAMED H M, BENMOKRANE B. Strength and Axial Behavior of Circular Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars and Spirals[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(2): 68-70.
- [13] CAI Z, WANG D, WANG Z. Full-scale Seismic Testing of Concrete Building Columns Reinforced with Both Steel and CFRP Bars[J]. Composite Structures, 2017, 178: 195-209.
- [14] 邓宗才, 高磊. FRP 筋混凝土柱及框架抗震性能的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(4): 88-92, 63.
- DENG Zong-cai, GAO Lei. Research and Development in Seismic Performance of FRP Reinforced Concrete Columns and Structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(4): 88-92, 63.
- [15] 陈进, 江世永, 曾祥蓉, 等. 部分配置 FRP 筋框支剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 317-324, 335.
- CHEN Jin, JIANG Shi-yong, ZENG Xiang-rong, et al. Study on Seismic Performance of Frame-supported Shearwall Structure Partially Configured by FRP Bars[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 317-324, 335.
- [16] MOHAMED N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B, et al. Experimental Investigation of Concrete Shear Walls Reinforced with Glass Fiber-reinforced Bars Under Lateral Cyclic Loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(3): A4014001.
- [17] 陈纪伟. CFRP 筋-钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.

CHEN Ji-wei, Experimental Study on the Seismic Behavior of CFRP-reinforced Concrete Shear Wall[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2015.

[18] 曾令昕. 钢绞线混凝土剪力墙的抗震性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.

ZENG Ling-xin. Study on Seismic Behaviors of Shear-walls by Steel Strands Concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2017.

[19] 赵 齐. 纤维聚合物筋-钢筋混合配筋混凝土剪力墙的抗震性能[D]. 郑州:郑州大学,2016.

ZHAO Qi. The Seismic Behaviors of Shear Walls Reinforced by CFRP Bars and Steel Bars [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2016.

[20] JGJ/T 101—2015,建筑抗震试验规程[S].

JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].