

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.003



CFRP 筋-钢筋混凝土剪力墙自复位性能 试验研究

赵军¹, 赵齐¹, 陈纪伟²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省建筑设计研究院有限公司, 郑州 450000)

摘要:通过对 1 片钢筋混凝土剪力墙和 4 片配有碳纤维增强聚合物(CFRP)筋的剪力墙的低周反复荷载试验,在分析试验中测得的裂缝宽度、裂缝的发展和分布形态、侧向变形的基础上,研究了在钢筋混凝土剪力墙的适当位置部分或全部配置 CFRP 筋对剪力墙的残余裂缝和残余变形等自复位性能的影响规律。研究表明:与普通钢筋混凝土剪力墙相比,配有 CFRP 筋的剪力墙的开裂荷载较低,裂缝较多,裂缝分布分布范围较广,墙体的最大裂缝宽度、残余裂缝宽度和侧向残余变形分别降低了 60%、70% 和 90%,说明在剪力墙中合理配置 CFRP 筋能使剪力墙具有优异的自复位性能。

关键词:剪力墙;碳纤维增强聚合物筋;自复位;裂缝宽度;残余裂缝;残余变形

中图分类号:TU352 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)03-0018-07

Experimental analysis of the self-centering performance of shear walls reinforced by CFRP and steel bars

Zhao Jun¹, Zhao Qi¹, Chen Jiwei²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China;

2 Architectural Design and Research Institute of Henan Province Co. LTD, Zhengzhou 450000, P. R. China)

Abstract: One shear wall totally reinforced with steel bars and the other four shear walls partly or totally reinforced by CFRP bars in the longitudinal direction were tested under the reversed cyclic loading. Based on the analysis of the crack width, crack distribution and lateral deformation of the five shear walls, the influence rules of the reinforcement methods of partly or totally reinforced by CFRP bars on the self-centering performance such as residual crack and residual deformation of reinforced concrete shear walls were researched. The results showed that the crack loads of the shear walls with CFRP bars were lower than that of reinforced concrete shear wall. The shear walls with CFRP bars had more cracks and more extensive crack distribution. The maximum crack widths, residual crack widths and residual deformations decreased by 60%, 70%, and 90%, respectively, which indicated the shear walls reinforced by CFRP bars

收稿日期:2015-06-19

基金项目:河南省重点科技攻关计划(152102210034);河南省高校科技创新团队(15IRTSTHN026)

作者简介:赵军(1971-),男,教授,博士,主要从事新型建筑材料与结构研究,(E-mail)zhaoj@zzu.edu.cn.

Received:2015-06-19

Foundation item:Key Scientific and Technological Project in Henan Province(No. 152102210034);The Program Funded by the Innovation Team of University in Henan Province(No. 15IRTSTHN026)

Author brief:Zhao Jun (1971-), professor, main research interests; new construction materials and structures, (E-mail) zhaoj@zzu.edu.cn.

had excellent self-centering performance.

Keywords: shear wall; CFRP bar; self-centering; crack width; residual crack; residual deformation

钢筋混凝土剪力墙是高层建筑中常用的抗侧力构件,其力学性能对整体结构的抗震性能至关重要。目前,中国高层建筑结构抗震设计遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”的原则,由于地震作用具有明显的不确定性,结构在地震作用下的受力情况也比较复杂,结构的抗震设计仍然不够完善。按照现行设计规范设计的房屋建筑在遭遇罕遇地震后虽然主体结构不会发生倒塌造成大量的人员伤亡,但结构在强烈的地震作用下必然会产生一定程度的损伤^[1-2]。长期以来,中国在剪力墙结构设计时,要求剪力墙具有良好的变形能力,使结构在遭受地震作用时,通过产生足够的变形来提高其抗震能力。这就造成了剪力墙结构在地震作用后将产生较大的残余变形,使结构抵抗后期地震的能力大大降低,同时,也不利于结构的维修加固。因此,国内外学者提出了具有自复位能力的钢筋混凝土结构,并对此开展了研究^[3-5],致力于使结构具有较好的承载能力和抗震能力,同时还能在受到地震损伤后具有一定的自复位功能。其核心目的是尽量减小结构经历地震作用后的残余变形。近年来的研究表明,通过改变结构形式、配筋方式等能够有效地减小结构的残余变形,如增设阻尼器、施加预应力或开设水平缝等。但是,上述措施存在施工复杂、削弱结构截面、影响结构整体性等缺点。

碳纤维增强聚合物(CFRP)筋是一种新型复合材料,具有抗拉强度高、耐腐蚀性能好和抗疲劳等特点。与钢筋不同的是,CFRP筋在达到其极限抗拉强度发生破坏之前不表现任何塑性,应力-应变关系呈线弹性^[6]。一般认为,具有线弹性性质的材料如CFRP筋、GFRP筋等不太适用于延性性能要求较高的抗震结构。但是,正是由于纤维聚合物筋的线弹性性质和可设计性的特点,使其有望在控制抗震结构的残余变形方面具有明显优势^[7-11]。因此,本文通过CFRP筋-钢筋混凝土剪力墙在低周反复荷载下的试验,研究在钢筋混凝土剪力墙中配置CFRP筋对剪力墙的裂缝分布和侧向残余变形的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[12]、《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[13]、《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)^[14]和《结构工程用纤维增强复合材料筋》(GB/T 26743—2011)^[15]等相关规范要求,共制作了5个剪力墙试件,编号分别为RCSW-1, CFRPSW-2, CFRPSW-3, CFRPSW-4, CFRPSW-5,所有剪力墙的尺寸和水平配筋都相同,仅竖向配筋方式有所不同。其中,RCSW-1为竖向配筋全部为HRB400级钢筋的钢筋混凝土剪力墙,作为基准对比试件;CFRPSW-2为墙肢最外侧两个边缘配置一排CFRP筋,而其他竖向配筋均为钢筋的剪力墙;CFRPSW-3为墙肢最外侧两个边缘分别配置两排CFRP筋,而其他竖向配筋均为钢筋的剪力墙;CFRPSW-4为墙肢最外侧两个边缘各配置3排CFRP筋,而其他竖向配筋均为钢筋的剪力墙;CFRPSW-5为全部配置竖向CFRP筋的剪力墙。各试件尺寸和配筋如图1所示。

1.2 试验装置

试验采用拟静力加载方式,正式加载前先将墙体吊装至预定位置,在基梁下方用水泥砂浆找平,用铅锤调整好试件的垂直度后,用地脚螺栓和钢梁将剪力墙锚固在地面上,为确保基梁在水平加载的过程中不发生侧移,在其两侧沿水平方向上分别设置一个500 kN液压千斤顶反向施加压力。试验过程中试件主要承受水平荷载和顶部竖向恒定荷载,水平荷载由液压伺服系统施加,作动器与顶部加载梁连接固定,作动器的轴心与加载梁的轴心重合;竖向荷载采用两个同步缸在顶部加载梁三分点处加载,同步缸与反力架和加载梁之间分别设置由两块厚度为20 mm钢板和3个滚轴组成的滚动支座。在加载过程中,竖向力通过厚钢板均匀分布在加载梁上,滚轴可以保证墙肢在水平方向自由滑动。此外为消除底部基梁可能发生的微小滑动带来的位移测量误差,将位移计表架用膨胀螺栓固定在基梁两侧。试验加载装置如图2所示。

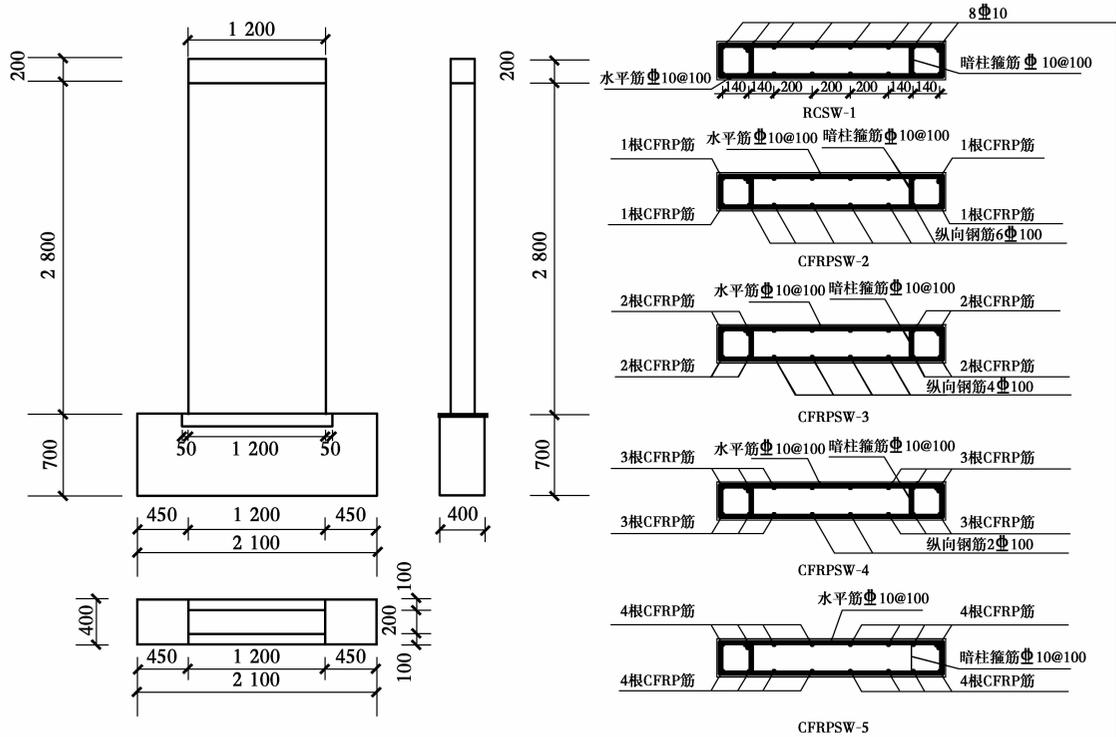


图 1 试件尺寸和配筋图

Fig. 1 Dimension and details of reinforcement configuration

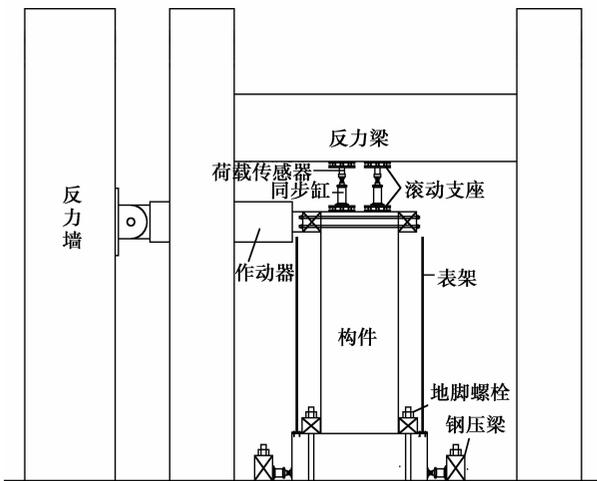


图 2 加载装置简图

Fig. 2 Test setup of the wall specimens

1.3 加载制度

按照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—96)^[16]中规定的拟静力低周反复加载方式,水平荷载由水平作动器施加,竖向荷载通过加载梁上的同步缸施加,在试验过程中随时调整和同步缸连接的油泵,控制竖向荷载在试验的过程中保持不变。加载分为预加载和正式加载两个阶段。试件安装就位

后,为验证各仪器设备是否工作良好,并消除试件与设备之间的空隙,试验开始前先进行预加载,竖向荷载加至预定荷载的 50% 并重复 3 次,水平荷载加至计算开裂荷载的 30% 循环往复 2 次;正式加载采用荷载-位移混合控制方法,试验开始后竖向荷载分 2 次加载到预定值,然后施加水平反复荷载。剪力墙屈服前采用荷载控制,分级加载,每级荷载循环一次;构件屈服后采用位移控制,取试件屈服位移 Δ 的倍数为级差控制加载,即加载过程为 $\pm 1\Delta$, $\pm 2\Delta$, $\pm 3\Delta$, $\pm 4\Delta$..., 每级荷载循环 3 次,直至承载力下降至极限荷载的 85% 以下或试件破坏。

1.4 测试内容与测点布置

试验中测试的主要内容有:水平荷载、竖向恒定荷载、试件不同高度处的水平侧移、钢筋和 CFRP 筋应变、混凝土应变、裂缝出现及开展等。

2 材性试验

2.1 混凝土

混凝土强度等级为 C50,浇筑试件时预留同条件养护试块,测得混凝土的力学性能指标如表 1 所示。

表1 混凝土的力学性能

Table 1 Mechanical properties of concrete

立方体抗压 强度 f_{cu}/MPa	轴心抗压 强度 f_c/MPa	立方体劈拉 强度 f_t/MPa	弹性模量 E_c/MPa
56.75	43.47	3.4	4.52×10^4

2.2 钢筋和CFRP筋

分别取试件所用钢筋和CFRP筋进行拉伸试验。本次试验使用的是直径为10 mm的HRB400级钢筋和直径为10 mm的CFRP筋,具体指标见表2。

表2 钢筋和CFRP筋实测力学指标

Table 2 Mechanical properties of steel and CFRP bars

规格/ mm	屈服强 度/MPa	极限抗拉 强度/MPa	伸长 率/%	弹性模 量/MPa
HRB400	424	658	30	2.24×10^5
CFRP筋		1 102		9.7×10^4

3 试验现象

钢筋混凝土剪力墙和配有CFRP筋的剪力墙在加载过程中的裂缝发展和破坏形态如图3所示。在加载初期,水平荷载较小,试件处于弹性工作阶段,墙体表面没有出现裂缝。随着水平荷载继续增大,墙肢根部混凝土应变明显增大,裂缝在此处首先出现,然后随着荷载的增加沿水平方向发展。继续加载,边缘约束构件中的最外侧纵筋应变增加明显,直至钢筋发生屈服时,裂缝数量少量增加,且主要分布在墙肢底部300 mm以下高度区域,基本呈规则的水平状分布,加载后期,左右两侧裂缝大多在墙体宽度中线位置相交形成贯通缝,裂缝宽度增大较快。进入位移控制阶段后,裂缝数量明显增多,且发展较长,裂缝区的高度逐渐增加。随着位移的逐渐增大,新出的裂缝多为斜裂缝,墙肢根部弯曲裂缝发展成主裂缝,墙肢受压区混凝土被压酥而发生大量脱落,边缘约束构件中的纵筋发生断裂,试件承载力急剧下降,试件最终破坏。

与钢筋混凝土剪力墙试件相比,随着CFRP筋配置数量的增加,试件中的裂缝数量也有所增加,同时,裂缝区域也逐渐向上发展,分布范围随之增加。而且,平均裂缝间距较小,分布比较均匀。另外,试件屈服之前,同级荷载下钢筋混凝土剪力墙的裂缝

宽度比配有CFRP筋的剪力墙小,但是屈服后至破坏阶段,钢筋混凝土剪力墙的裂缝宽度则远大于配置有CFRP筋的剪力墙。

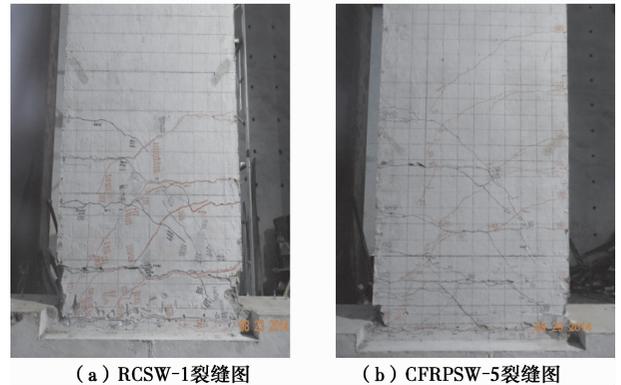


图3 试件裂缝形态图

Fig. 3 The crack mode of shear wall

4 试验结果分析

4.1 开裂荷载

各试件的开裂荷载如表3所示。

表3 试件开裂荷载

Table 3 Cracking load of the specimens

试件编号	开裂荷载/kN
RCSW-1	80
CFRPSW-2	60
CFRPSW-3	50
CFRPSW-4	40
CFRPSW-5	40

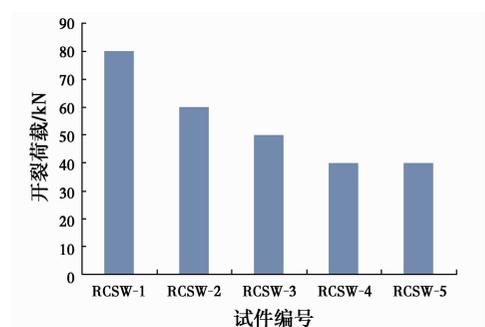


图4 试件开裂荷载

Fig. 4 Cracking load of the specimens

由表3和图4可以看出,开裂荷载随着试件中CFRP筋数量的增加呈现出逐渐减小的趋势,其中,竖向筋全部配置CFRP筋的试件CFRPSW-5开裂荷载下降明显,较钢筋混凝土剪力墙降低了50%。

这主要是由于采用的 CFRP 筋的弹性模量比钢筋小,使试件的初始整体刚度下降,因此,在加载初期同一加载等级下配有 CFRP 筋剪力墙的受拉区会产生更大的变形,从而导致试件更早开裂。

4.2 最大裂缝宽度

试件各级荷载循环和位移循环下的最大裂缝宽度如图 5 所示。

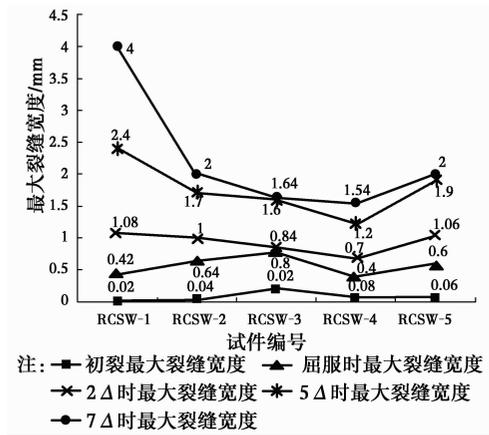


图 5 各级加载循环时的最大裂缝宽度

Fig. 5 The maximum crack width under the cyclic loading

由图 5 可以得出,试件各级荷载循环和位移循环下的最大裂缝宽度随着荷载和位移的增加而逐渐增大,各试件裂缝宽度增长的速率不同。荷载较小时,钢筋混凝土剪力墙的裂缝宽度比配有 CFRP 筋的剪力墙裂缝宽度小;随着荷载的逐渐增大,直至试件屈服时,钢筋混凝土剪力墙的最大裂缝宽度小于同一加载级的配有 CFRP 筋的剪力墙的最大裂缝宽度;试件屈服以后,钢筋混凝土剪力墙的最大裂缝宽度则明显大于同一位移循环下的配有 CFRP 筋的剪力墙试件,CFRP 筋表现出很好的限制裂缝的效果。如图 5 所示,对于试件 CFRPSW-4,当位移循环为 7Δ 时,配有 CFRP 筋剪力墙的最大裂缝宽度显著低于钢筋混凝土剪力墙,最大裂缝宽度仅为钢筋混凝土剪力墙最大裂缝宽度的 40% 左右。

4.3 残余裂缝宽度

试验过程中测得每级加载循环结束后所有裂缝的残余宽度,得到每级加载循环结束对应的最大残余裂缝宽度以及试验结束完全卸载后墙体的最大残余裂缝宽度如图 6 所示。

对于所有剪力墙试件,随着加载循环的增加,墙体的残余裂缝宽度逐渐增大。与钢筋混凝土剪力墙相比,配有 CFRP 筋的剪力墙的残余裂缝宽度都有

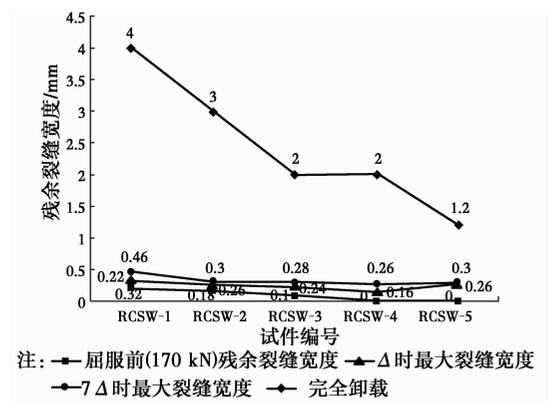


图 6 各级加载循环后的最大残余裂缝宽度

Fig. 6 The maximum residual crack width under the cyclic loading

不同程度的降低。在试件屈服前,随着 CFRP 筋配置数量的增多,墙体的残余裂缝宽度明显降低,当 CFRP 筋配置 3 排以上时,墙体内部的裂缝已经完全闭合,表现出优异的恢复能力。试验结束后完全卸载,墙体的残余裂缝宽度随着 CFRP 筋数量的增加而近似呈线性减小,当墙体内部全部配置 CFRP 筋时,残余裂缝宽度从钢筋混凝土剪力墙的 4.0 mm 减小到 1.2 mm。以上试验结果表明:由于 CFRP 筋良好的线弹性性质,在剪力墙中合理配置一定数量的 CFRP 筋可以有效地控制剪力墙的残余裂缝宽度。

4.4 侧向残余变形

通过实测试件的滞回曲线,可以得到每级加载循环结束后各试件的侧向残余变形值,如图 7 所示,该图显示出 CFRP 筋对剪力墙侧向残余变形的影响规律。

由图 7 可以发现,所有试件在屈服之前,侧向残余变形都很小,除钢筋混凝土剪力墙试件 RCSW-1 之外,配有 CFRP 筋的剪力墙屈服前的侧向残余变形为 0,说明在试件屈服之前,配置有 CFRP 筋的剪力墙的自复位效果非常显著。随着荷载和位移循环次数的增加,剪力墙的残余变形逐渐增大,但配置有 CFRP 筋的剪力墙的侧向残余变形增加的幅度远小于钢筋混凝土剪力墙。同一加载循环时,不同试件之间,随着 CFRP 筋配置数量的增加,试件的侧向残余变形越来越小。

加载结束后,5 个试件的侧向残余变形分别为 20、10、6、4.5 和 2.0 mm。由此可见,从试件两端依次增加 CFRP 筋的数量,可使试件的残余变形明显减小,而且仅在剪力墙的两端配置少量的 CFRP 筋

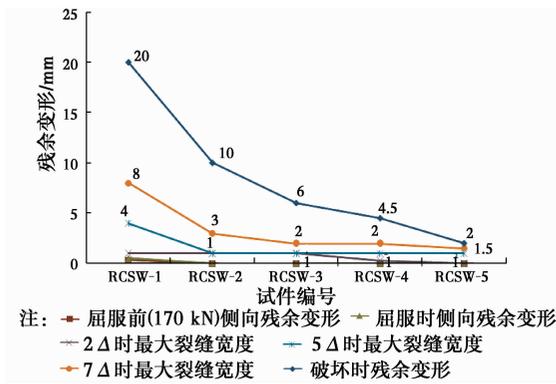


图7 各级加载循环后的侧向残余变形

Fig. 7 The residual lateral deformation under the cyclic loading

即可使试件的残余变形降低 50%。当竖向受力筋全部为 CFRP 筋时,侧向残余变形减小至钢筋混凝土剪力墙的 10%。

综上所述,在钢筋混凝土剪力墙中合理地配置 CFRP 筋能够有效地减小剪力墙的侧向残余变形。这主要是由于钢筋混凝土剪力墙中的钢筋屈服后产生了较大的塑性变形,卸载后已产生的塑形变形不能恢复,而 CFRP 筋作为一种线弹性能很好的材料,在破坏之前不发生塑性变形,卸载以后通过其优异的性弹性性能使剪力墙的残余变形得到有效恢复。

5 结论

通过对 5 个剪力墙试件在低周反复荷载下的试验,研究了配置 CFRP 筋的剪力墙的自复位性能,得出如下主要结论:

1) 加入 CFRP 筋后,剪力墙的开裂荷载逐渐降低。随着 CFRP 筋配置数量的增加,试件裂缝数量也有所增加,裂缝的分布范围也比钢筋混凝土剪力墙有所增大。试件屈服前的各级荷载下,钢筋混凝土剪力墙的裂缝宽度较配有 CFRP 筋的剪力墙小;试件屈服后至破坏阶段的位移加载阶段,钢筋混凝土剪力墙的裂缝宽度则远大于配有 CFRP 筋的剪力墙。

2) 配置 CFRP 筋能够有效地减小试件屈服后、加载循环结束时和完全卸载后的残余裂缝宽度,可使全部配置或配置 6 根 CFRP 筋的剪力墙,屈服前的残余裂缝宽度完全闭合,完全卸载后的残余裂缝宽度可降至钢筋混凝土剪力墙的 30% 左右。

3) 配置 CFRP 筋能够显著地减小试件屈服后、加载循环结束时和试件破坏后的侧向残余变形。试件屈服前,CFRP 筋可使剪力墙的侧向残余变形为 0;试件屈服后配置 CFRP 筋的剪力墙的侧向残余变形远小于钢筋混凝土剪力墙;试件破坏后,配置 CFRP 筋的试件的侧向残余变形大幅度降低;当竖向受力筋全部配置 CFRP 筋时,试件的侧向残余变形仅为钢筋混凝土剪力墙的 10%。

参考文献:

- [1] 马宏旺,吕西林. 建筑结构基于性能的抗震设计的几个问题[J]. 同济大学学报(自然科学版),2002,30(12): 1429-1434.
MA H W, LYU X L. Some problems about performance-based seismic design [J]. Journal of Tongji University (Science and Technology), 2002, 30 (12):1429-1434. (in Chinese)
- [2] 钱稼茹,徐福江. 钢筋混凝土剪力墙基于位移的变形能力设计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(3):305-308.
QIAN J R, XU F J. Displacement-based deformation capacity design method of RC cantilever walls [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(3):305-308. (in Chinese)
- [3] 吕西林,陈云,毛苑君. 结构抗震设计的新概念:可恢复功能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):941-948.
LYU X L, CHEN Y, MAO Y J. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of Tongji University (Science and Technology), 2011, 39(7):941-948. (in Chinese)
- [4] 党像梁,吕西林,周颖. 底部开水平缝摇摆剪力墙抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(5): 182-190.
DANG X L, LYU X L, ZHOU Y. Study on seismic performance of a rocking wall with bottom horizontal slits [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33 (5): 182-190. (in Chinese)
- [5] 马昕,吕西林. 软钢阻尼器对自复位剪力墙性能影响研究[J]. 结构工程师,2013,29(4):63-70.
MA Xin, LYU X L. Effects of the mild steel damper on the self-centering wall performance [J]. Structural Engineers, 2013, 29(4):63-70. (in Chinese)
- [6] 高丹盈,赵军. 玻璃纤维聚合物(FRP)筋混凝土梁裂缝

- 和挠度的特点及计算方法[J]. 水利学报, 2001, 32(8): 53-58.
- GAO D Y, ZHAO J. The characteristics of crack and deflection and its calculating method of concrete beam reinforced with glass fiber polymer bars [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32 (8): 53-58. (in Chinese)
- [7] NAYERA M, AHMED-SABRA F, BRAHIM 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: 1-11.
- [8] NAYERA M, AHMED-SABRA F, BRAHIM B, et al. Numerical simulation of mid-rise concrete shear walls reinforced with GFRP bars subjected to lateral displacement reversals [J]. Engineering Structures, 2014, 73: 62-71.
- [9] NAYERA M, AHMED-SABRA F, BRAHIM B. Evaluation of GFRP-reinforced shear walls [J]. General Conference, CSCE, 2013: 188-198.
- [10] NAYERA M, AHMED-SABRA F, BRAHIM B. Flexure and shear deformation of GFRP-reinforced shear walls [J]. Composite Construction, 2014, 18: 1-8.
- [11] NAYERA M, AHMED-SABRA F. Strength and drift capacity of GFRP-reinforced concrete shear walls [D]. Sherbrook: Sherbrook University, 2013.
- [12] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [14] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 结构工程用纤维增强复合材料筋: GB/T 26743—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Fiber reinforced composite bars for civil engineering: GB/T 26743—2011 [S]. Beijing: China Standard Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震试验方法规程: JGJ101—96[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ101—96 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)