

# CFRP 加固钢绞线—钢筋混凝土剪力墙性能

袁维光<sup>1</sup>, 赵 军<sup>2</sup>, 孙玉平<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001;

3. 神戸大学 大学院工学研究科, 兵库县神戸 657-8501)

**摘要:** 为了探讨采用碳纤维布加固塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响, 制作了 2 个钢绞线—钢筋混凝土剪力墙试件, 通过拟静力加载试验, 研究了碳纤维布加固塑性铰区的钢绞线—钢筋混凝土剪力墙的抗震性能及其可恢复性能。研究结果表明: 采用碳纤维布加固剪力墙塑性铰区可以有效提高钢绞线—剪力墙的承载能力和侧向变形能力, 而且在高轴压比作用下对其承载能力效果更好, 滞回环更加饱满, 耗能能力有一定的提高, 但对其残余变形没有明显影响。

**关键词:** 碳纤维布; 剪力墙; 抗震性能; 可恢复性能

**中图分类号:** TU398. 203

**文献标志码:** A

## Performance of Concrete Shear Wall Reinforced by Steel Strand and Steel Bar and Confined by CFRP

YUAN Weiguang<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, SUN Yuping<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of using carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in the plastic hinge to control the failure mode and further improve the seismic performance of concrete shear wall reinforced by steel strand and steel bar, two specimens of concrete shear wall reinforced by steel strand and steel bar were made. The seismic and resilient performance of concrete shear wall reinforced by steel strand and steel bar and confined by CFRP in plastic hinge was studied by quasi-static loading test. The results show that the plastic hinge of concrete shear walls reinforced by steel strand and steel bar and confined by CFRP can effectively improve

both bearing capacity and lateral deformation capacity, and the effect of improving its bearing capacity is better under high axial compression ratio, the hysteretic loops of the specimens confined by CFRP are fuller, and the energy dissipation capacity is improved to a certain extent, but it has no obvious effect on its residual drift.

**Key words:** CFRP; shear wall; seismic performance; resilient performance

钢筋混凝土剪力墙是一种广泛应用于高层和超高层建筑的抗侧力构件, 作为建筑结构的重要抗震防线, 其抗震性能的优劣对整个建筑物的抗震能力产生巨大的影响。近年来可恢复性结构的研究已经成为研究热点, 文献[1]提出了一种新型可恢复性混凝土剪力墙, 钢绞线—钢筋混凝土剪力墙。研究表明, 其具有抗震性能好和残余变形小的特点, 既能满足结构抗震要求, 又具有快速恢复结构性能的优点<sup>[1-3]</sup>。

早在 20 世纪初期, 国外学者已经对约束混凝土进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>, 表明约束混凝土可以有效地提高混凝土的抗压强度和极限变形。根据约束方式和材料的不同, 常见的约束混凝土可以分为横向钢筋约束混凝土、钢管约束混凝土、FRP 约束混凝土以及以上组合方式的约束混凝土。FRP 复合材料是由纤维材料与基体材料按一定的比例混合后形成的高性能型材料。结构工程中常用的 FRP 复合材料有 CFRP、GFRP、AFRP、BFRP 等, 主要以 CFRP 为主。CFRP 加固混凝土结构已经成为国内外被广泛采用的一项新技术, 适用于各种类型的结构, 可以提高混凝土构件的延性和抗剪承载力, 相比其他方法, CFRP 约束混凝土具有明显的优势, 主要体现在<sup>[7]</sup>:

收稿日期: 2022-03-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0125600); 教育部创新团队发展计划(IRT\_16R67); 中原千人计划项目(204200510024); 四川省重点研发项目(2020YFS0061)。

第一作者: 袁维光(1986—), 男, 讲师, 工学博士, 主要从事工程结构抗震研究。Email: yuanweiguang19@cdut.edu.cn

通信作者: 赵军(1971—), 男, 教授, 工学博士, 主要从事混凝土结构抗震性能。Email: zhaoj@zzu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

抗拉强度高;耐腐蚀性、耐疲劳性能好;比强度较高,即轻质高强。因此,应用CFRP材料能够使结构自重小,施工简单,其重量大约为钢材的20%。目前,CFRP主要应用于梁、板和柱的加固,CFRP加固混凝土构件可以有效地改善其抗震性能:提高受压区混凝土的变形能力;提高耗能能力和其抗弯、抗剪承载力。近年来,国内外已经开始对采用CFRP加固混凝土剪力墙进行研究<sup>[8-11]</sup>,研究发现,经过CFRP加固的混凝土剪力墙的承载能力和变形能力都得到了明显的提高。

对于剪力墙结构,在遭遇大地震时一般在墙体底部塑性铰区域破坏较严重,不利于震后修复。为了有效提高塑性铰区钢绞线—钢筋混凝土剪力墙的变形能力,并基于约束混凝土的机理,本文作者预制2片钢绞线—钢筋混凝土剪力墙,通过低周往复水平加载试验,研究采用碳纤维布加固塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙抗震性能和可恢复性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件的设计

本次试验预制了2个足尺一字型悬臂钢绞线—钢筋混凝土剪力墙试件,试件的编号分别为CFRPSSW—N17和CFRPCSW—N26(编号中的CFRP、S/C、SW、Nxx分别代表采用了碳纤维布、暗柱箍筋形式、剪力墙、轴压比)。相比文献[1]中试件SSW—N17和CSW—N26,试件CFRPSSW—N17和CFRPCSW—N26在墙体塑性铰区域包裹了单层的碳纤维布(CFRP),根据现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[12]</sup>、《高层建筑混凝土结构设计规程》(JGJ 3—2010)<sup>[13]</sup>以及本次试验的目的和要求,本试验剪力墙构件的几何尺寸和配筋情况如图1所示,试件的主要参数见表1,其中 $\rho_h$ 、 $\rho_v$ 分别为水平钢筋、纵筋的配筋率; $\rho_{cv}$ 为暗柱纵筋的配筋率; $\rho_{ch}$ 为暗柱的体积; $n=N/(Af_c)$ , $N$ 为轴向荷载, $A$ 为墙体截面面积, $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度; $\lambda=H_w/B$ ;括号中的值为试件的钢筋分布。

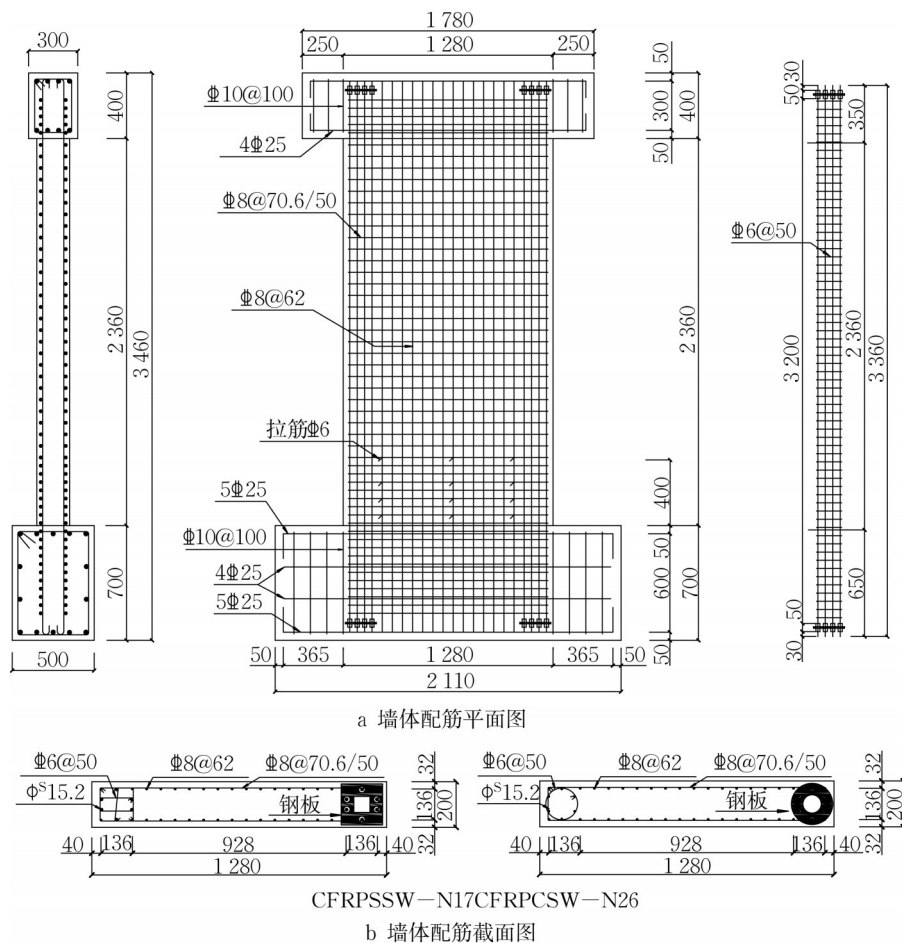


图1 剪力墙构件的截面尺寸及配筋详图(mm)

Fig. 1 Reinforcement details and dimensions of test walls (in mm)

表 1 试件的主要参数

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	剪跨比 $\lambda$	轴压比 $n$	墙体配筋率/%			暗柱配筋率/%	
			$\rho_h$	$\rho_v$	加密区 $\rho_h$	$\rho_{cv}$	$\rho_{ch}$
CFRPSSW—N17	2.0	0.17	0.71	0.71	1.0	0.34	3.01
CFRPCSW—N26		0.26	(8@70.6)	(36 $\Phi$ 8)	(8@50)	( $\Phi$ 15.2)	(6@50)

1.2 试件的制作

根据已有研究表明,剪力墙塑性铰区大致在墙下部600mm(约 $0.5l_w$ ( $l_w$ 为墙体截面宽度))范围内,选用200mm幅宽的碳纤维布CFRP绕墙体环向粘贴,根据我国《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS 146—2003)<sup>[14]</sup>中的有关说明,碳纤维布加

固剪力墙的施工工艺流程如下:施工准备→混凝土表面处理→涂刷底层树脂→找平处理→粘贴碳纤维布→表面养护→检查与验收。为了提升约束效率,在剪力墙截面角部进行了倒角处理,并增加了搭接长度。图2展示了粘贴碳纤维布CFRP的主要过程。

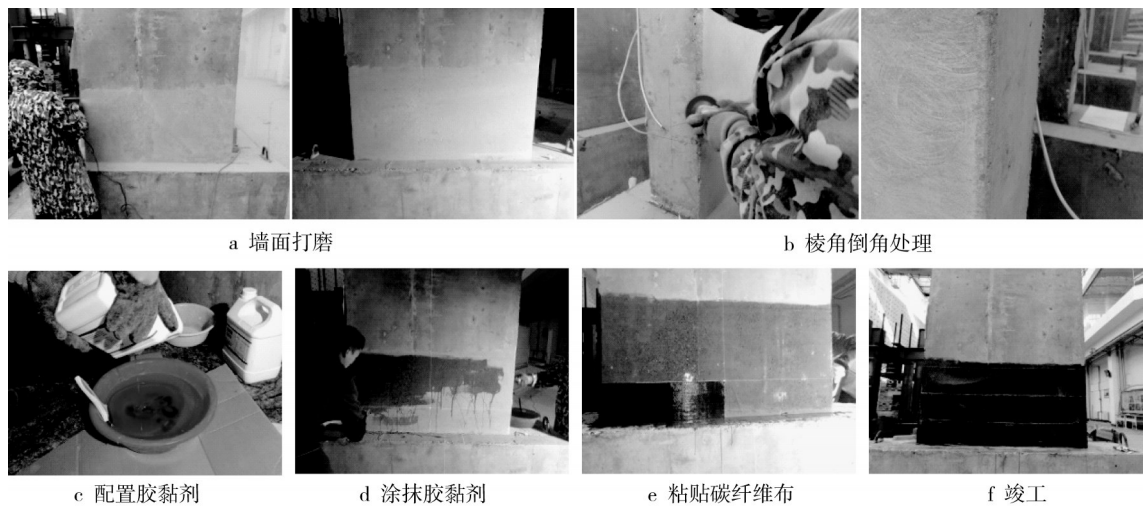


图2 剪力墙试件粘贴碳纤维布的主要过程

Fig.2 Main process of pasting carbon fiber cloth on shear wall specimens

本次试验的剪力墙试件CFRPSSW—N17、CFRPCSW—N26的示意图如图3所示。

1.3 材料力学性能

(1)混凝土

混凝土强度等级为C40,与试件同条件下养护,分别对试件养护28d和试验前混凝土标准试块的强度(100d)进行了测试,混凝土力学性能见表2。

(2)钢筋与钢绞线

试件中钢筋的分布如图2所示,剪力墙暗柱中的纵向受力钢筋为钢绞线(无预应力),直径为15.2mm,其他纵向受力钢筋和分布钢筋均为HRB400普通钢筋,直径为8mm,钢筋与钢绞线的实测力学性能如表3所示。

(3)碳纤维布和胶黏剂

本次试验采用的碳纤维片材为卡本CFS碳纤维布,是以PAN基12K小丝束碳纤维为原料生产加工而成。CFRP的力学性能指标见表4。

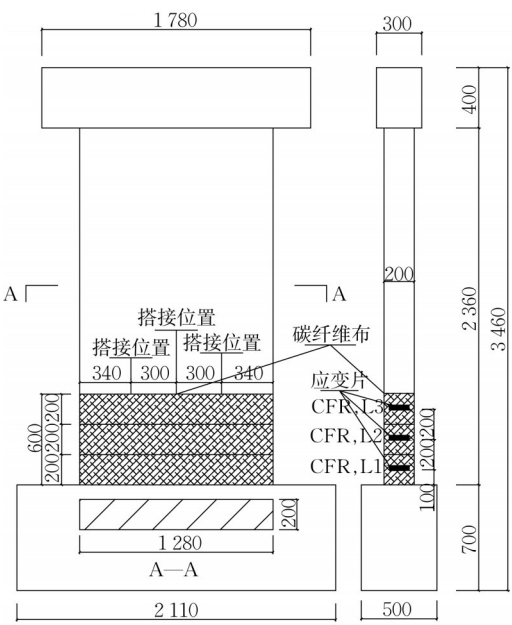


图3 剪力墙试件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimens



表 2 混凝土的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of concrete

强度等级	28d立方体抗压强度/MPa	100d立方体抗压强度/MPa	100d轴心抗压强度/MPa	100d弹性模量/MPa
C40	47.4	51.0	33.2	$3.08 \times 10^4$

表 3 钢筋及钢绞线的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of steel bars and steel strands

规格	屈服强度/MPa	屈服应变/ $10^{-6}$	极限抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	弹性模量/MPa
Φ6	392	1 950	534.5	17	24.9	$2.01 \times 10^5$
Φ8	420	2 100	634.2	21.4	60.3	$2.0 \times 10^5$
Φ <sup>s</sup> 15.2	1 754	8 859	1 916.2	4.3	—	$1.98 \times 10^5$

碳纤维布配套树脂采用CFSR—A/B型号的卡本浸渍胶,其是以改性环氧树脂为主要原料生产而成,是碳纤维粘贴专用胶黏剂,分为A、B两组份,A、B两组份按2:1的重量比混合均匀使用,各项力学性能指标见表5。

1.4 试验装置及加载方案

(1)试验装置

图4展示了试件加载装置图,本次试验荷载加载的方式为拟静力加载。利用250t的电液伺服系统MTS(Material Test System)施加水平荷载,水平荷载施加在各构件加载梁的两端加载点与加载梁的轴心重合,MTS一端固定在反力墙上,一端与剪力墙上部的加载梁利用4根螺杆紧密连接。竖向荷载采用两点加载的方式,由2个200t的液压千斤顶提供,分别作用于剪力墙截面的四等分点处,通过油压控制,其值在试件加载过程中保持恒定不变。

(2)加载制度

本次拟静力试验的加载程序采用位移控制的加载制度,以层间位移角来施加水平作用力。本试验的加载制度如图5所示,直至剪力墙的承载力下降到峰值荷载的85%时停止加载。

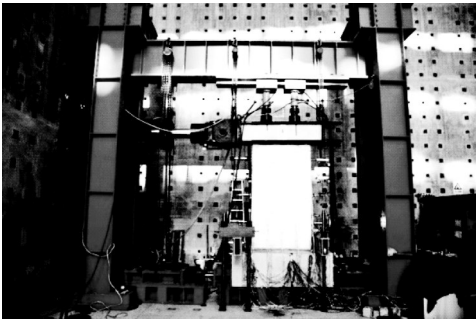
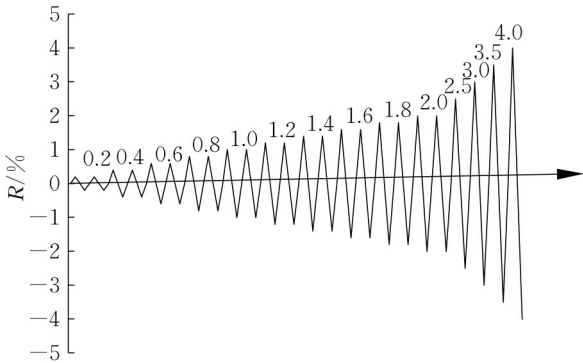


图 4 试件加载装置

Fig. 4 Test setup



加载循环

图 5 加载制度

Fig. 5 Loading program

1.5 测量内容和测点布置

本次试验测量内容主要包括试件的侧向位移和水平作用力,钢筋、钢绞线和CFRP的应变以及墙体表面裂缝宽度和开展情况。MTS自动采集水平作用力;位移计记录试件的水平位移和竖向位移,裂缝测宽仪测量裂缝宽度,精度为0.01mm,位移计的分布见图7,钢筋、钢绞线和CFRP的应变片具体布置位置分别如图7与图3所示。

2 试验现象

由图8可看出,CFRPSSW—N17与CFRPCSW—N26破坏过程基本相似,首先在墙底部碳纤维布上出

表 4 碳纤维布的主要力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of CFRP

CFRP 型号	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变/ $10^{-6}$	伸长率/%	理论厚度/mm	单位质量/( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$ )
卡本CFS	3 548	232	11 293	1.63	0.167	294

表 5 卡本浸渍胶的主要力学性能

Tab. 5 Mechanical properties of CFSR

卡本浸渍胶型号	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa
CFSR—A/B	58	2 584	3.0	82	85

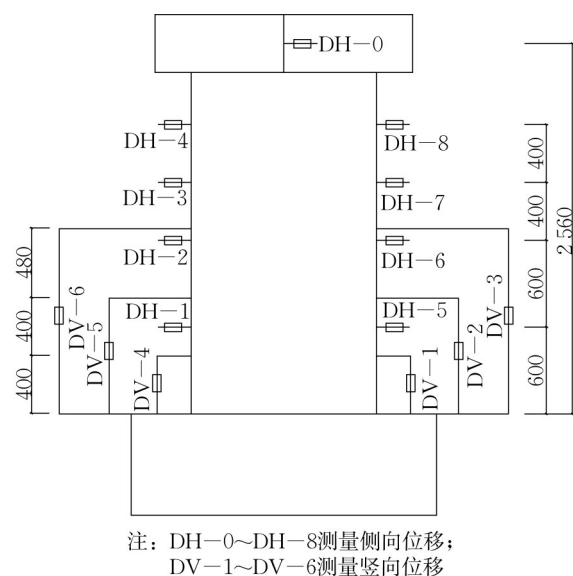


图6 位移计布置

**Fig. 6 Location of displacement transducers**

现第一条水平裂缝,随着侧向位移的增大,水平裂缝沿墙高方向逐渐增加,左右水平裂缝不断延伸,直至贯通,碳纤维布以上斜裂缝不断增加,最终墙中部碳纤维布出现空鼓,与混凝土脱离,20cm高度范围内的碳纤维布水平撕裂,受压侧墙角部混凝土被压碎,20cm高度范围内的碳纤维布纵向断裂,承载力急剧下降,试件最终破坏。图9展示了试件CFRPSSW—N17墙体去除碳纤维布后的破坏状态,被碳纤维布包裹部分墙体有

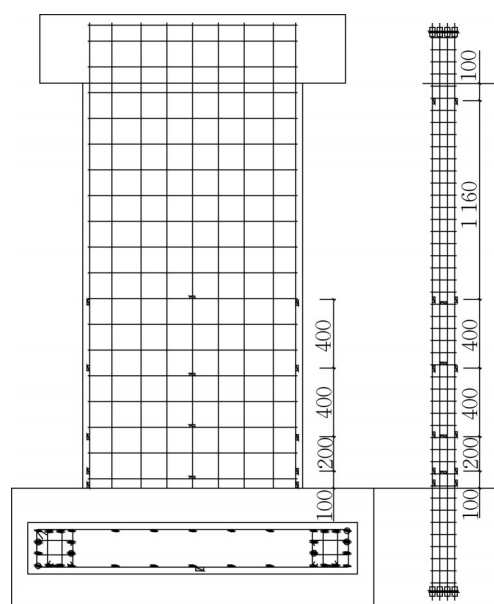


图7 钢筋应变片位置

**Fig. 7 Location of strain gauges**

明显的斜裂缝,裂缝宽度较大,右侧边缘约束构件中的纵筋被压曲,墙体部分纵向钢筋也被压曲。由于试件 CFRPCSW—N26 轴压比较大,从图 11 可以看出,被碳纤维布包裹部分墙体出现斜向大面积混凝土剥落,右侧边缘约束构件中的钢绞线和部分纵向普通钢筋被压曲,100cm、300cm 高度处箍筋出现断裂。

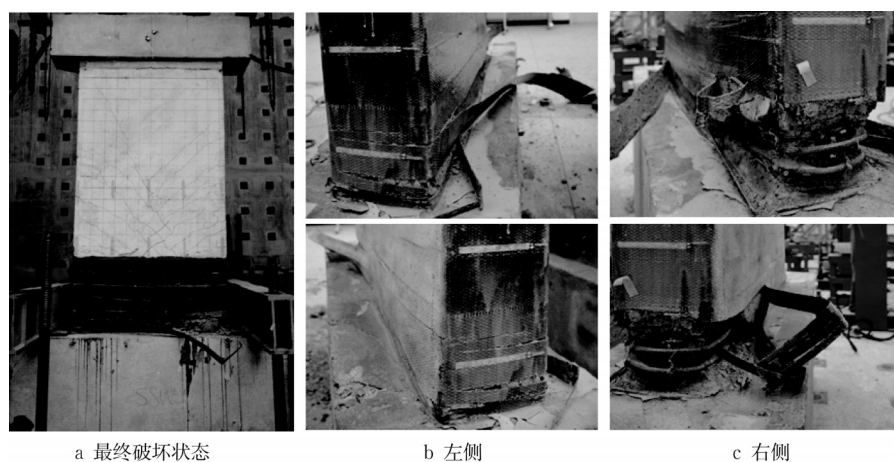


图8 试件CFRPSSW-N17最终破坏状态

**Fig. 8 Failure patterns of CFRPSSW—N17**

### 3 试验结果分析

### 3.1 荷载一位移滞回曲线

本次试验进行了基于位移控制的拟静力试验,在位移循环往复作用下,得到了各试件的荷载一位

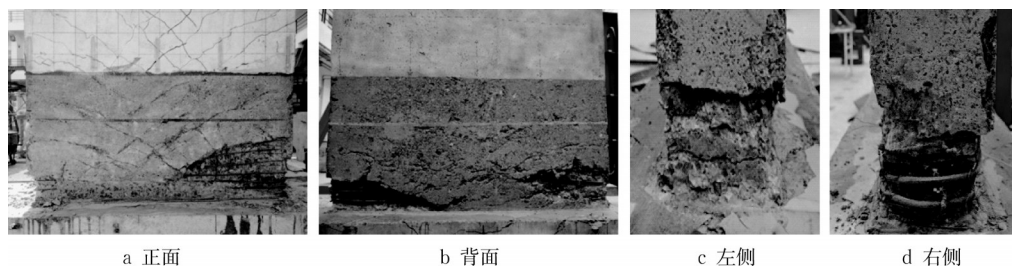


图9 试件CFRPSSW—N17墙体去除碳纤维布后的破坏状态

Fig. 9 Failure patterns of CFRPSSW—N17 after removing CFRP

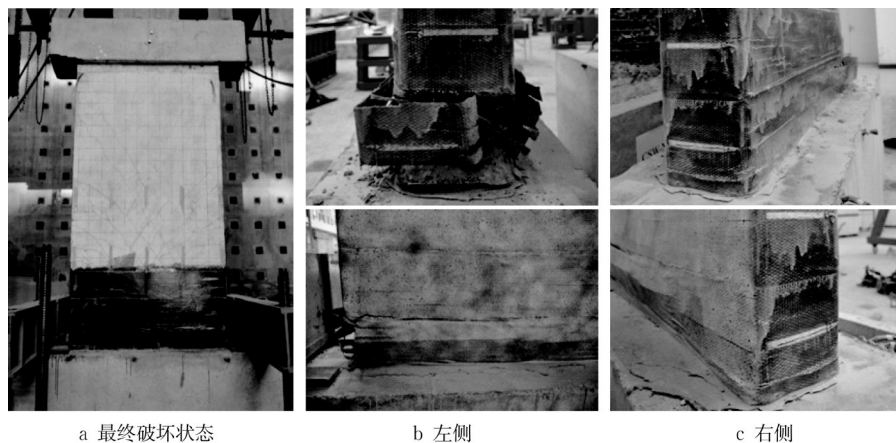


图10 试件CFRPCSW—N26最终破坏状态

Fig. 10 Failure patterns of CFRPCSW—N26

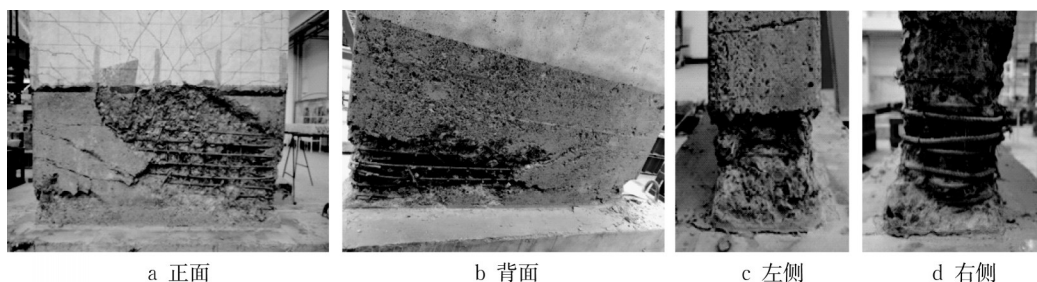


图11 试件CFRPCSW—N26墙体去除碳纤维布后的破坏状态

Fig. 11 Failure patterns of CFRPCSW—N26 after removing CFRP

移曲线,如图12所示。图12也给出了前期与之对应未约束碳纤维布剪力墙SSW—N17、CSW—N26的滞回曲线。从试件CFRPSSW—N17、CFRPCSW—N26的滞回曲线可以看出,在墙体表面未出现裂缝前,试件基本处于弹性状态,滞回曲线近似直线。随着位移角的增加,墙体内部出现损伤,在其屈服之前,滞回环细长,刚度退化、残余变形以及耗能都较小。墙体屈服以后,滞回环呈“S”型,其面积逐渐增大,耗能增加,试件的刚度退化明显,残余变形不大,表现出很好的自复位性,水平承载力随侧向位移角的增大而持续增加,直至试件破坏。

通过比较各试件塑性铰区包裹碳纤维布前后的

滞回曲线,可以得出以下结论:

- (1)在大变形时,试件受碳纤维布加固之后的滞回环更加饱满,说明其耗能能力有一定的提高;
- (2)碳纤维布加固的试件的最大承载力有一定的提高,侧向变形能力更好;
- (3)在同一位移角下,试件受碳纤维布加固前后对其残余变形影响不大。

### 3.2 骨架曲线

骨架曲线是指荷载—变形滞回环曲线中的每一级荷载的第一次循环的峰点所连成的外包络曲线,反映了试件刚度随侧向位移变化而变化的过程。图13为各试件的荷载—位移角骨架曲线,其更直观地



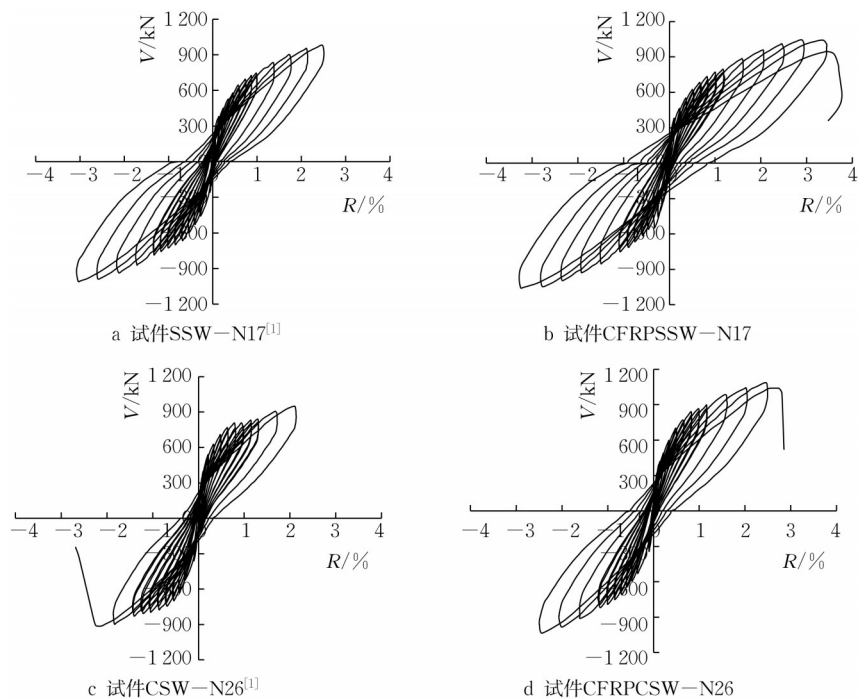


图 12 荷载-位移角滞回曲线  
Fig. 12 Load-drift hysteretic loops

反应了碳纤维布约束塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响。

由图 13 可以看出,在同一位移角下,试件 CFRPSSW—N17 与 SSW—N17 的骨架曲线几乎重合,由于只包裹了一层碳纤维布和尺寸效应的影响,塑性铰区碳纤维布对试件整体刚度的无明显差别,但其极限承载力和侧向变形能力得到了一定的提高。如表 6 所示,其中  $V_{\text{exp}}^+$  为推方向最大水平承载力,  $R_{\text{exp}}^+$  为  $V_{\text{exp}}^+$  对应的位移角,  $V_{\text{exp}}^-$  为推方向最大水平承载力,  $R_{\text{exp}}^-$  为  $V_{\text{exp}}^-$  对应的位移角,  $V_{\text{exp}}$  为  $V_{\text{exp}}^+$  和  $V_{\text{exp}}^-$  的平均值,试件 CFRPSSW—N17 的承载能力比试件 SSW—N17 高 6%,其侧向变形能力提高 18%。对比试件 CFRPCSW—N26 与 CSW—N26 可知,在位移角约 1.2% 之前,两者的滞回曲线几乎重合,由于高轴压比的影响,之后随着位移角的增大,试件

CFRPCSW—N26 的承载力明显提高,其侧向变形能力更好。如表 6 所示,试件 CFRPCSW—N26 的承载能力比试件 CSW—N26 高 13%,其侧向变形能力提高 11%。

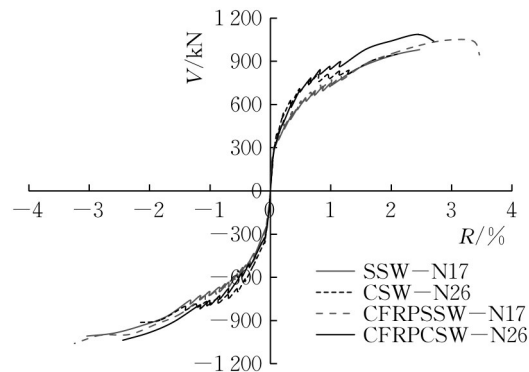


图 13 试件的骨架曲线  
Fig. 13 Skeleton curves of specimens

表 6 各试件的极限荷载和极限位移  
Tab. 6 Ultimate loads and deformations of specimens

试件名称	试验结果							
	$V_{\text{exp}}^+/\text{kN}$	$R_{\text{exp}}^+/\%$	$V_{\text{exp}}^-/\text{kN}$	$R_{\text{exp}}^-/\%$	$V_{\text{exp}}/\text{kN}$	$V_{\text{exp}}$ 相对值	$R_{\text{exp}}/\%$	$R_{\text{exp}}$ 相对值
SSW—N17	981	2.51	— 1 007	— 3.07	994	1	2.79	1
CFRPSSW—N17	1 041	3.35	— 1 059	— 3.25	1 050	1.06	3.30	1.18
CSW—N26	949	2.13	914	— 2.19	933	0.94	2.16	0.77
CFRPCSW—N26	1 086	2.45	— 1036	— 2.45	1 061	1.07	2.45	0.88

以上结果表明,在一定范围内,在剪力墙塑性铰区受碳纤维布约束对其承载能力和侧向变形能力均有提高,说明其对剪力墙腹板有一定的约束效果,在高轴压比作用下对提高其承载能力效果更好。

### 3.3 刚度退化

试件刚度随侧向位移角的增大而衰减的全过程如图 14 所示,图中  $K/K_0$  为试件的割线刚度  $K$  与初始刚度  $K_0$  之比。

由图 14 可以看出,各试件在整个加载过程中刚度退化连续、均匀;试件 SSW-N17 与 CFRPSSW-N17 的刚度退化曲线几乎重合,由于包裹单层和约束尺寸效应的影响,在剪力墙塑性铰区约束碳纤维布对其刚度退化的影响较小;在高轴压比作用下,与 CSW-N26 相比,试件 CFRPCSW-N26 的刚度退化程度相对降低。

### 3.4 钢筋与碳纤维布的应变

为了直观的分析在拟静力作用下试件的受力情况,分别沿墙体不同高度处的纵向受力筋和箍筋、横

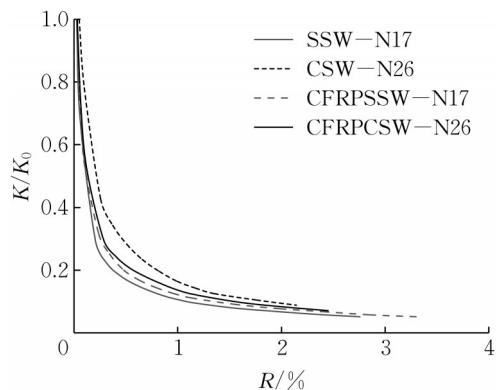


图 14 刚度退化曲线

Fig. 14 Stiffness degradation curves of specimens

向钢筋以及碳纤维布体粘贴了应变片,其布置分别如图 7 和 3 所示,通过钢筋和碳纤维布的应变—位移曲线,观察其在加载过程中的应变变化规律。

图 15 分别给出了墙体关键部位(距离墙底 100mm 高度)暗柱最外边缘纵筋的应变—位移曲线,图中粗虚线代表了各型号钢筋的屈服应变。

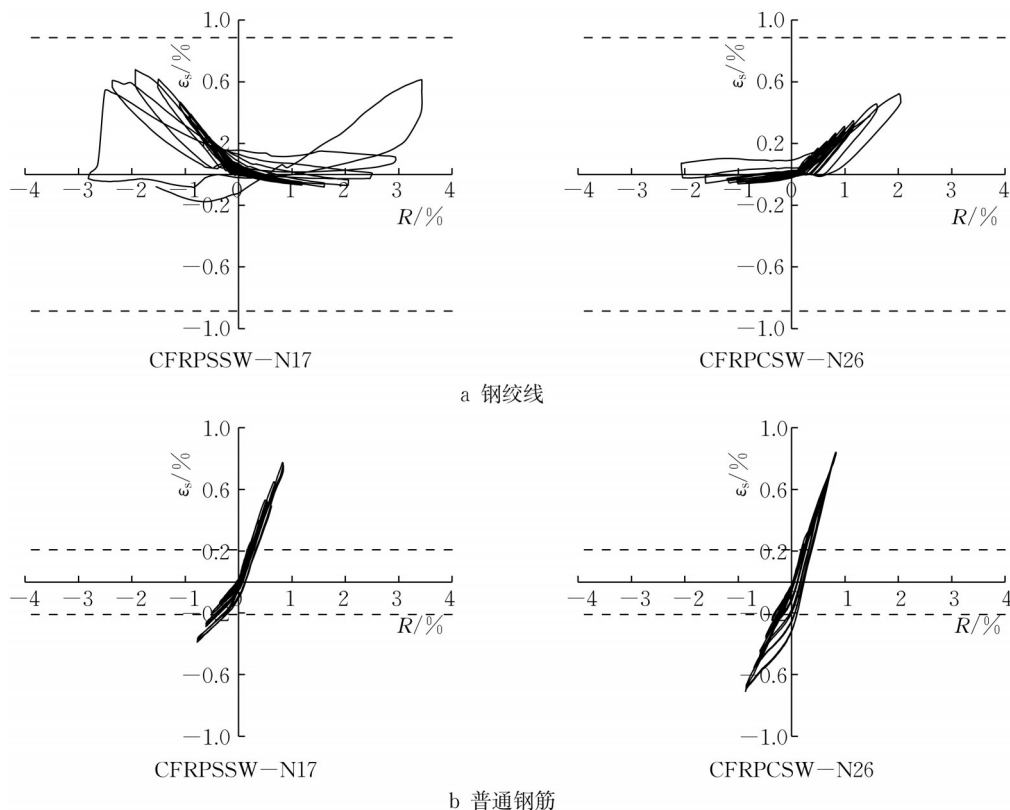


图 15 边缘构件的纵筋应变( $h=100\text{mm}$ )

Fig. 15 Measured strains of steel strands and steel bars

由图 15b 可以看出,各试件暗柱中最外边缘的普通钢筋(C12)早早的就屈服进入塑性阶段。而对于试件暗柱中配置的高强钢绞线(PC15.2)直至构件破

坏都没有屈服,各试件在位移角 2.0% 左右时,钢绞线的应变片失效,此时的钢绞线在反复拉压力作用而开始松散。



图 16 给出了暗柱钢绞线的应变纵向分布。由图可知,随之位移角的增大,钢绞线应变沿墙高趋于均匀分布,这是由于钢绞线与混凝土之间的黏结强度

较低,从而产生了滑移效应,CFRP 约束墙体对其黏结强度影响较小。

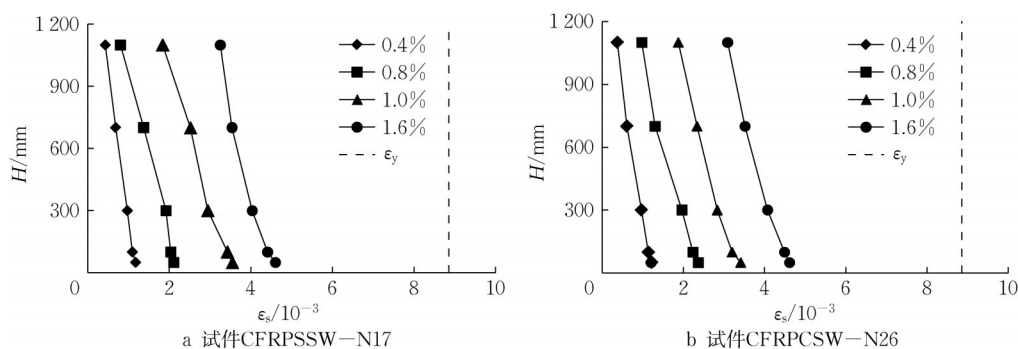


图 16 钢绞线的应变纵向分布

Fig. 16 The distributions of measured strains of steel strands

图 17 给出了试件 CFRPSSW-N17 和 CFRPCSW-N26 墙体侧面碳纤维布的应变。图中“L300”和“R300”分别表示墙体左侧和右侧距墙底 300mm 高度处。从图 17 可以明显看出,在整个加载

的过程中沿墙体不同高度处碳纤维布处于受拉状态,始终保持对墙体的约束作用,随着位移角的增大,碳纤维布的应变也随着增大,约束效应越明显。

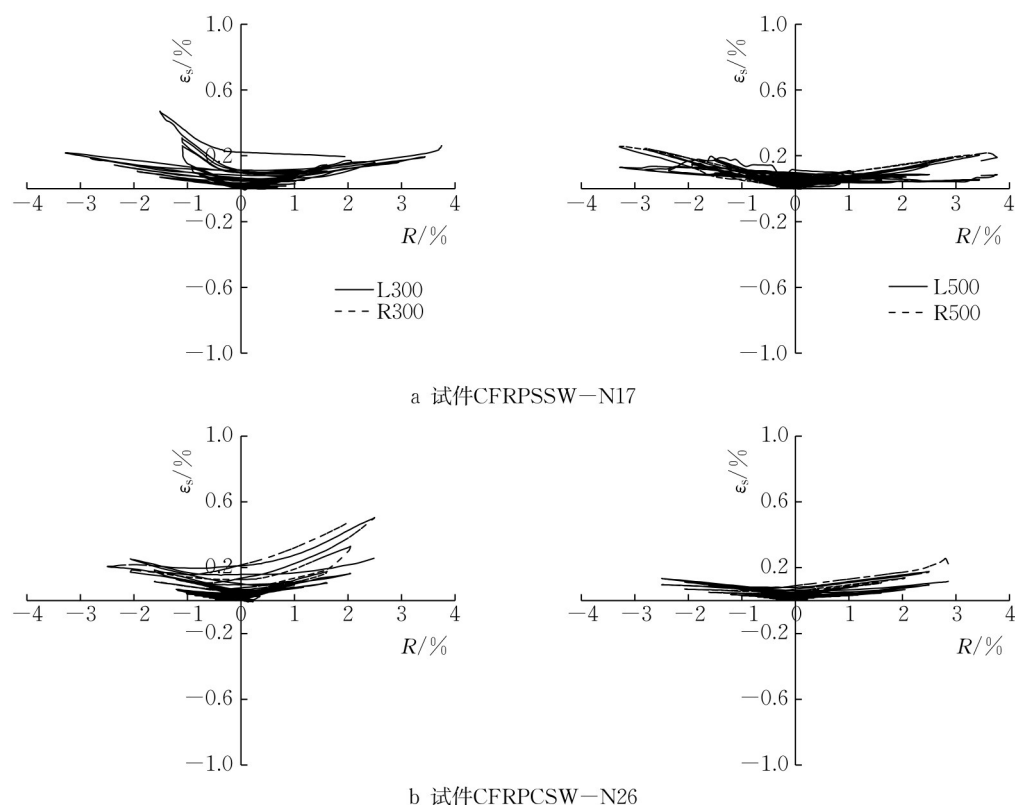


图 17 碳纤维布的应变 (mm)

Fig. 17 Measured strains of CFRP

### 3.5 耗能能力

试验各试件等效黏滞阻尼系数如图 18 所示。从

图 18 可以看出,由于钢绞线—钢筋混凝土剪力墙暗柱配置的高强钢绞线一直处于弹性阶段,因此随着位移角的增大其等效黏滞阻尼系数仍基本保持不

变,约为10%。从等效黏滞阻尼系数角度分析来看,在同一位移角下碳纤维布加固塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙的耗能能力的无明显影响。

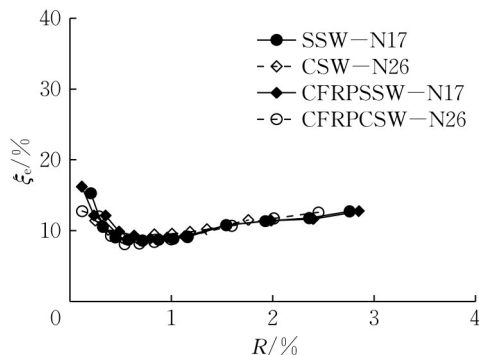


图18 试件的等效黏滞阻尼系数

Fig. 18 Comparison of the equivalent viscous damping ratio

## 4 可恢复性能

### 4.1 残余变形

残余变形是评价结构可恢复性能的一个重要的指标。图19给出了碳纤维布加固塑性铰区前后各试件的平均残余变形并进行了对比分析。从图19可以看出,位移角达到2.5%之前,试件的残余变形均小于0.5%;试件SSW-N17与CFRPSSW-N17的残余变形—位移角曲线基本重合;与试件CSW-N26相比,试件CFRPCSW-N26的残余变形较小,说明在低轴压比作用下碳纤维布加固塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙的残余变形无明显影响,但在低轴压比作用下可以有效减小其残余变形。

### 4.2 最大裂缝宽度和残余裂缝宽度

在地震作用下,裂缝宽度是衡量混凝土构件的

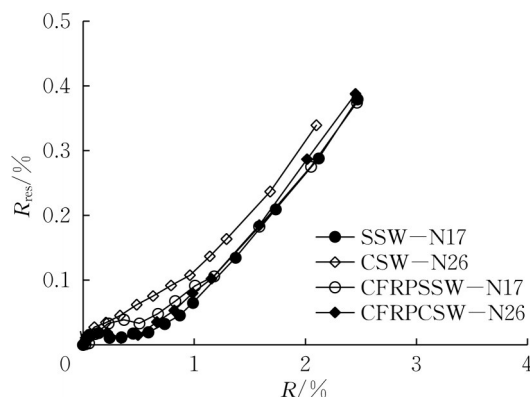


图19 残余变形

Fig. 19 Comparison of the measured residual drifts

损伤程度和可修复性的重要指标之一。我国规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、AIJ指南<sup>[15]</sup>和ACI 318-14规范<sup>[16]</sup>均规定了构件正常使用裂缝宽度限值分别为0.3mm、0.2mm、0.4mm。

图20给出了位移角2%之前在每一位移加载等级下测量的最大裂缝宽度及相应的残余裂缝宽度。对比试件SSW-N17与CFRPSSW-N17、CSW-N26与CFRPCSW-N26,碳纤维布加固剪力墙塑性铰区以后,试件的最大裂缝宽度及相应的残余裂缝宽度减小,并且最大裂缝宽度小于AIJ指南规定的可修复的裂缝宽度限值1.0mm,各试件残余裂缝宽度小于正常使用限值,这意味着如果地震作用下墙体侧向变形不超过2%,试件仍可继续使用,不需要任何修复。在地震作用下,剪力墙的破坏主要集中与墙体的塑性铰区,在其部位包裹碳纤维布,对混凝土有一定的约束效果,从而能提高混凝土的强度,能有效地抑制混凝土的开裂,进而可以更好地实现剪力墙的可恢复性。

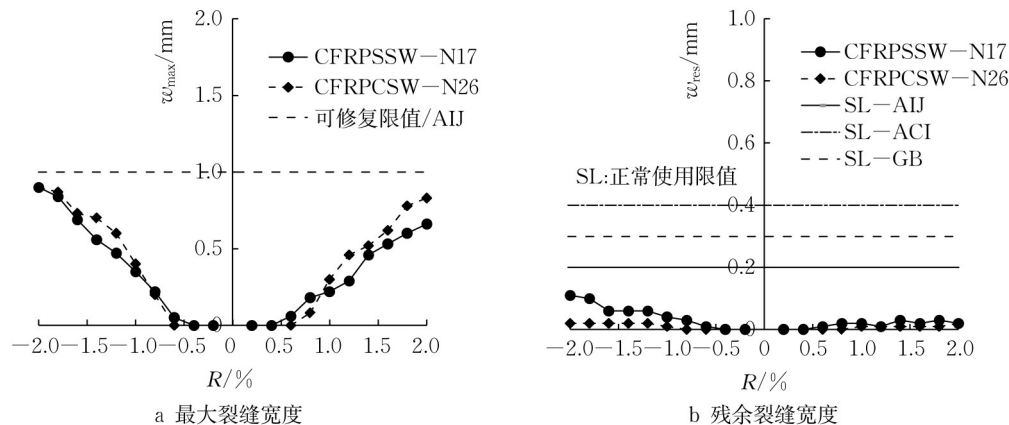


图20 裂缝宽度

Fig. 20 Comparison of the crack widths

## 5 结论

对 2 个碳纤维布加固塑性铰区钢绞线—钢筋混凝土剪力墙试件进行了低周反复水平加载试验,并与文献[1]中 2 个钢绞线—钢筋混凝土剪力墙试件进行对比,分析了碳纤维布加固塑性铰区对其抗震性能和可恢复性能的影响,研究结论如下:

(1)采用碳纤维布加固钢绞线—钢筋混凝土剪力墙塑性铰区可以有效提高其承载能力和侧向变形能力,在高轴压比作用下对提高其承载能力效果更好,但对其残余变形无明显影响。

(2)由于包裹单层和约束尺寸效应的影响,在低轴压比作用下,在碳纤维布加固塑性铰区对钢绞线—钢筋混凝土剪力墙刚度退化的影响较小;在高轴压作用下,其刚度退化程度相对降低。

(3)随着位移角的增大,钢绞线—钢筋混凝土剪力墙的等效黏滞阻尼系数仍基本保持不变,约为 10%。在同一位移角下碳纤维布加固塑性铰区对其耗能能力无明显影响。

(4)碳纤维布加固塑性铰区对混凝土有一定的约束效果,能有效地抑制混凝土的开裂,进而可以更好地实现剪力墙的可恢复性能。

### 作者贡献声明:

袁维光:设计试验构件、开展试验并撰写论文;

赵军:提供资金支持、修改论文;

孙玉平:提出研究思路、指导试验。

### 参考文献:

- [1] 赵军,袁维光,孙玉平,等. 钢绞线—钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(9):68.  
ZHAO Jun, YUAN Weiguang, SUN Yuping, *et al.* Experimental study on seismic behavior of shear wall reinforced by steel strand and steel bar[J]. Journal of Building Structures, 2020,41(9):68.
- [2] 袁维光. 可恢复功能混凝土剪力墙的抗震性能与评估方法[D]. 成都:西南交通大学,2019.  
YUAN Weiguang. Seismic performance and evaluation method of earthquake resilient shear walls [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [3] YUAN W, ZHAO J, SUN Y, *et al.* Experimental study on seismic behavior of concrete walls reinforced by PC strands [J]. Engineering Structures, 2018, 175: 577.
- [4] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1804.
- [5] SPOELSTRA B M R, MONTI G. FRP-confined concrete model [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1999, 3(3): 143.
- [6] SAMANI A K, ATTARD M M. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression [J]. Engineering Structures, 2012, 41: 335.
- [7] 刘廷全. CFRP约束混凝土材料特性及力学性能研究[D]. 北京:中国矿业大学,2012.  
LIU Tingquan. Study on material and mechanical properties of CFRP confined concrete [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.
- [8] LOMBARD J, LAU D T, HUMAR J L, *et al.* Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls [C/CD]//Proceedings of 12 WCEE. Auckland: WCEE, 2000.
- [9] PATERSON J, MITCHELL D M. ASCE, seismic retrofit of shear walls with headed bars and carbon fiber wrap [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 606.
- [10] 封卉梅,赵军. BFR与CFRP加固剪力墙抗震性能比较分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(8): 53.  
FENG Huimei, ZHAO Jun. Analysis on the two types of reinforcement effect with BFR and CFRP strengthening reinforced concrete shear wall [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(8): 53.
- [11] 刘明学. 碳纤维布提高剪力墙延性的试验研究[D]. 天津:天津大学,2004.  
LIU Mingxue. Experimental study on increasing the ductility of reinforced concrete shear walls strengthened by carbon fiber sheet [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [12] 国家质检总局. 混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S]. 北京,国家质检总局,2010.  
General Administration of Quality Supervision. Code for design of concrete structures: GB50010 — 2010 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, 2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2010.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, 2010.
- [14] 中国计划出版社. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程:CECS 146-2003(2007)[S]. 北京:中国计划出版社,2007  
China Planning Press. Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate: CECS 146-2003 (2007) [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [15] Architecture Institute of Japan. Guidelines for performance evaluation of earthquake-resistant reinforced concrete buildings [S]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 2004.
- [16] American Concrete Institute (ACI). Building code requirements for structural concrete: ACI318-14[S]. Farmington Hills: ACI, 2014.