

# 钢筋与 BFRP 筋混凝土剪力墙抗震性能对比分析

苗丽越, 金 浏, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为了探究钢筋与 BFRP 筋混凝土剪力墙抗震性能的同异, 开展了配置不同水平配筋率 (0.25% 和 0.50%) 的钢筋和 BFRP 筋混凝土剪力墙抗震性能试验; 并采用细观数值模拟的方法, 将水平配筋率拓展到 0% 和 1.00%。主要讨论了筋材类型对剪力墙抗震性能的影响, 对比了 RC 剪力墙和 BFRP-RC 剪力墙的抗剪承载力、变形能力、耗能能力、刚度及恢复性能。试验结果表明: 在水平循环荷载作用下, 水平配筋率为 0%~0.25% 和 0.50%~1.00% 的剪力墙分别发生了剪切破坏和压剪破坏。水平配筋率对钢筋混凝土 (RC) 剪力墙和 BFRP 筋混凝土 (BFRP-RC) 剪力墙的破坏模式、抗剪承载力、变形能力和耗能能力影响相同, 即增大水平配筋率可以增强剪力墙的抗震性能。然而, 两种剪力墙的抗震性能存在差异: 在不同水平配筋率下, BFRP-RC 剪力墙的抗剪承载力约为 RC 剪力墙的 74%~78%, 变形能力约为 RC 剪力墙的 47%~84%, 初始刚度约为 RC 剪力墙的 77%~84%。由于加载过程中 BFRP 筋一直处于弹性变形阶段, BFRP-RC 剪力墙的恢复能力显著强于 RC 剪力墙。水平配筋率为 0.25% 和 0.50% 时, BFRP-RC 剪力墙的残余变形分别为 RC 剪力墙的 62% 和 13%, BFRP-RC 剪力墙的恢复性能更加符合实际工程中可恢复功能抗震结构的要求。

**关键词:** 混凝土剪力墙; 钢筋/BFRP 筋; 水平配筋率; 剪切破坏; 抗震性能

**中图分类号:** TU312 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202307014

## Comparative analysis of seismic performance of concrete shear walls reinforced with steel bars and BFRP bars

MIAO Liyue, JIN Liu, DU Xiuli

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

**Abstract:** The seismic performance tests of reinforced concrete (RC) shear walls and BFRP bars reinforced concrete (BFRP-RC) shear walls with different horizontal reinforcement ratios (0.25% and 0.50%) were carried out to explore the similarities and differences in seismic performance between RC and BFRP-RC shear walls. And the horizontal reinforcement ratio was expanded to 0% and 1.00% in meso-scale numerical simulation. The influence of reinforced materials type on the seismic performance of shear walls was discussed, and the shear capacity, deformation capacity, energy dissipation capacity, stiffness and recovery performance of RC and BFRP-RC shear walls were compared. The test results show that the shear failure and compressive shear failure occurred respectively in the shear walls with horizontal reinforcement ratios of 0%~0.25% and 0.50%~1.00% under horizontal cyclic load. The horizontal reinforcement ratio has the same effect on the failure mode, shear capacity, deformation capacity and energy dissipation capacity of RC shear wall and BFRP-RC shear wall; that is, increasing the horizontal reinforcement ratio can enhance the seismic performance of shear walls. However, the seismic performance of RC and BFRP-RC shear walls is different. Under the two horizontal reinforcement ratios, the shear capacity of the BFRP-RC shear wall is about 74%~78% of that of the RC shear wall, the deformation capacity is about 47%~84%, and the initial stiffness is about 77%~84%. Because the BFRP bar is always in the elastic deformation stage during loading, the recoverability of the BFRP-RC shear wall is significantly stronger than that of the RC shear wall. When the horizontal reinforcement ratio is 0.25% and 0.50%, the residual deformation of BFRP-RC shear walls is 62% and 13% of that of RC shear walls, respectively. The recoverability of the BFRP-RC shear wall is more in line with the requirement of recoverable functional aseismic structure in practical engineering.

**Keywords:** concrete shear wall; steel bar/BFRP bar; horizontal reinforcement ratio; shear failure; seismic performance

剪力墙是钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 建筑结构中抵抗水平荷载的主要结构构件。其设计目

标是提供足够的强度、刚度和延性, 以避免地震时结构发生脆性破坏<sup>[1]</sup>。普遍认为低水平配筋率的钢

收稿日期: 2023-07-03; 修订日期: 2023-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978022); 北京市自然科学基金资助项目 (JQ22025)

筋混凝土剪力墙易发生脆性剪切破坏,抗震性能较差<sup>[2]</sup>。为了抵抗地震作用,在实际工程结构中均采用水平配筋率足够的钢筋混凝土剪力墙<sup>[3-6]</sup>。HIDALGO等<sup>[7]</sup>认为适当提高水平配筋率不仅可以增强剪力墙的抗剪强度,还可以减小裂缝宽度。

此外,在极端潮湿和恶劣环境条件下,结构中的钢筋会发生锈蚀,使得钢筋强度下降,进而导致结构承载力降低<sup>[8]</sup>。纤维增强聚合物(FRP)材料具有重量轻、强度高、线弹性和耐锈蚀等特点,可以成为一种有效替代钢筋的加固材料,以实现结构的修复并避免锈蚀<sup>[9-11]</sup>。目前,FRP筋的使用越来越多,其使用范围包括梁、单向和双向板以及柱等建筑构件<sup>[12-16]</sup>。已有许多学者关注FRP筋加固剪力墙的抗震性能。MOHAMED等<sup>[17-18]</sup>针对玻璃纤维增强聚合物筋混凝土(GFRP-RC)剪力墙和钢筋混凝土(RC)剪力墙的变形能力和变形特性的差异进行了分析,提出了验证GFRP-RC结构变形能力的方法。ARAFA等<sup>[19-22]</sup>对9个剪力墙进行了循环荷载试验。与RC剪力墙相比,GFRP-RC剪力墙的残余变形较小,更利于震后修复。HOSSEINI等<sup>[8]</sup>对RC和GFRP-RC剪力墙破坏模式和抗震性能进行了试验研究,结果表明:与RC剪力墙相比,GFRP-RC剪力墙的极限侧向荷载、累积耗散能、变形能力均较高。ZHAO等<sup>[23]</sup>指出,碳纤维增强聚合物筋混凝土(CFRP-RC)剪力墙的耗能能力和残余变形均小于RC剪力墙。HUANG等<sup>[24]</sup>、SONG等<sup>[25]</sup>和SHEN等<sup>[26]</sup>对CFRP网格筋(与CFRP筋具有相同的性能)加固剪力墙进行了试验研究,研究发现:与RC剪力墙相比,CFRP网格筋加固剪力墙具有较好的抗震性能,承载能力较大,且残余变形较小。此外,赵军等<sup>[27-28]</sup>对钢筋/CFRP筋混合配筋混凝土剪力墙抗震性能进行了试验研究,发现混合配筋试件残余变形下降,自复位性能提高。与GFRP和CFRP相比,玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)具有良好的潜力,可以提供与其他FRP类型相当或更好的效益。如,与CFRP相比,BFRP的成本更低;与GFRP

相比,BFRP具有更高的强度、弹性模量和化学稳定性,但两者成本相近<sup>[29]</sup>。然而,关于BFRP筋混凝土(BFRP-RC)剪力墙的研究极少。目前,仅RAHMAN等<sup>[30]</sup>通过试验初步分析了BFRP筋和钢筋混凝土剪力墙在循环荷载作用下的承载力、刚度、耗能能力的异同。

本文在循环荷载作用下开展了钢筋和BFRP筋混凝土剪力墙的抗震性能试验;并采用细观数值模拟方法,拓展了剪力墙水平配筋率范围。定量分析了水平配筋率和筋材类型对混凝土剪力墙的抗震性能和破坏特征的影响,包括裂缝的分布与发展、水平筋应变、滞回特性、变形能力、能量耗散、残余变形。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本试验设计了4个剪力墙试件。其中,试件的尺寸(长度×高度×厚度)为1800 mm×1800 mm×240 mm。为探究水平配筋率 $\rho_h$ 和筋材类型对剪力墙抗震性能的影响,设计了两种水平配筋率(0.25%和0.50%)和两种筋材类型(钢筋和BFRP筋)。其中,0.25%为《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[31]</sup>中规定剪力墙的最小水平配筋率,0.50%为考虑到加载装置的量程、钢筋间距及试件制作时操作的简便性而设置。另外,为控制变量,试件的轴力、竖向配筋及边缘构造柱配筋等力学参数均保持一致。各个试件的配筋和应变片的布置情况分别如表1和图1所示。表1中, $L$ 为墙长, $H$ 为墙高, $T$ 为墙厚。为便于区分各试件,将4个试件分别以“筋材-水平配筋率”命名。例如,试件钢筋(BFRP筋)-0.25%代表水平配筋率为0.25%的钢筋(BFRP筋)混凝土剪力墙。

表1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	尺寸 ( $L \times H \times T$ )/mm <sup>3</sup>	墙体配筋		轴力 $N$ /kN
		水平	竖向	
钢筋-0.25%	1800×1800×240	Φ10@260	Φ10@100	618
钢筋-0.50%	1800×1800×240	Φ10@130	Φ10@100	618
BFRP筋-0.25%	1800×1800×240	Φ10@260	Φ10@100	618
BFRP筋-0.50%	1800×1800×240	Φ10@130	Φ10@100	618

注:Φ10( $\phi$ 10)@260含义为直径10 mm的HRB400级钢筋(直径为10 mm的BFRP筋),间距为260 mm。

### 1.2 材料力学性能

钢筋混凝土试件的水平分布筋、竖向分布筋、拉筋以及边缘构造柱的纵筋和箍筋均采用

HRB400级钢筋,BFRP筋混凝土试件的水平分布筋、竖向分布筋、拉筋以及边缘构造柱的纵筋和箍筋均采用BFRP筋。表2和3分别总结了钢筋和

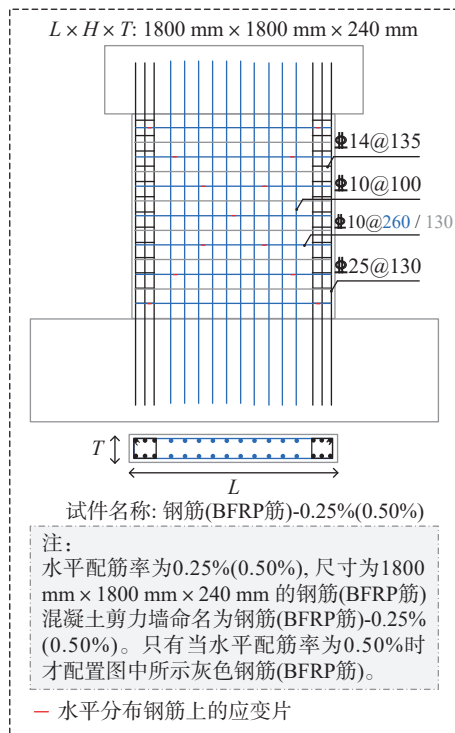


图1 剪力墙试件尺寸及细节(单位: mm)

Fig. 1 Dimension and detailing of shear wall specimens(Unit: mm)

BFRP筋的力学性能。表4给出了混凝土的力学性能, 主要包括: 混凝土的立方体抗压强度为53.25 MPa, 轴心抗压强度为50.9 MPa, 劈裂抗拉强度为5.55 MPa, 弹性模量为42.26 GPa。

表2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel bar

直径 $D$ /mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E_s$ /GPa
10	435	630	208
14	494	674	221
25	458	636	182

表3 BFRP筋力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of BFRP bar

直径 $D$ /mm	抗拉强度 $f_{tu}$ /MPa	弹性模量 $E_f$ /GPa
10	784	56.2
14	770	51.5
25	825	48.0

表4 混凝土力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of concrete

轴心抗压强度 $f_{ck}$ /MPa	立方体抗压强度 $f_{cu}$ /MPa	劈裂抗拉强度 $f_{ts}$ /MPa	弹性模量 $E_c$ /GPa
50.9	53.25	5.55	42.26

### 1.3 试验加载装置及加载制度

试验加载装置如图2(a)所示。本次试验主要测量了墙体试件顶部的水平荷载及试件不同位置处的位移, 位移计的布置情况如图2(b)所示。在试验过程中, 首先施加恒定的轴力 $N(N=618\text{ kN})$ , 然后施加水平循环荷载对试件进行加载。其中, 水平循环加载采用位移控制, 具体加载过程如图3所示。

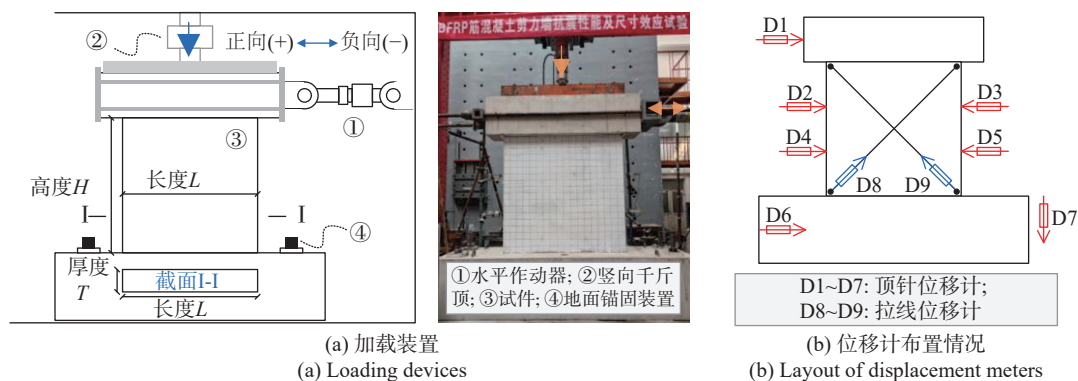


图2 加载装置和位移计布置情况

Fig. 2 Loading devices and layout of displacement meters

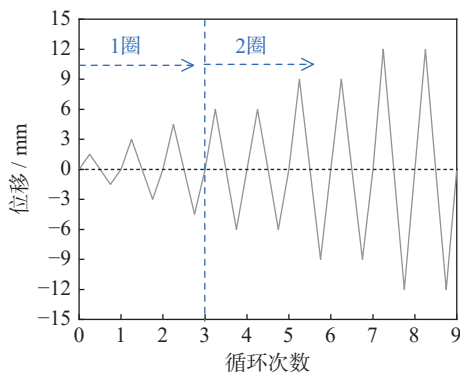


图3 加载制度

Fig. 3 Loading system

## 2 细观数值模型

与文献[32]相似, 剪力墙抗震性能分析可视为平面应力问题。考虑到计算量问题, 本文采用二维(2D)细观数值模型对剪力墙抗震性能进行研究。

### 2.1 模型建立

一般来说, 混凝土可以看作是由砂浆基质、骨料和界面过渡区(ITZs)组成的三相复合材料[33]。骨料的形状简化为圆形[34]。骨料粒径为5~30 mm, 体积分数为0.40[35], 通过“取-放”的方法投放骨料[36], 生成如

图 4 所示的二维混凝土细观随机骨料模型。模型的边界条件为底部固定。ITZs 真实的厚度为 30~80  $\mu\text{m}$ , 考虑到计算量, 本文的 ITZs 厚度设置为 1 mm<sup>[37]</sup>。混凝土各细观组成主要采用四边形单元进行网格划分, 过渡区域可采用三角形单元, 由于采用线性减缩积分单元, 两种单元形状积分点数均为 1; 采用梁单元离散钢筋 (BFRP 筋), 网格单元尺寸为均 4 mm。如: 对于剪力墙试件, 约划分为 35 万个单元, 基于显示算法, 所需计算时间约为 20 h。各相材料之间采用共节点方式连接, 保证各单元节点位移连续, 相邻单元之间位移可协调。

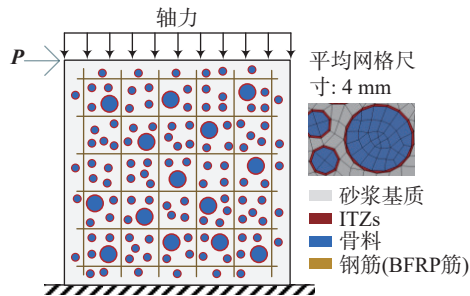


图 4 剪力墙二维细观模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 2D meso-scale model of shear wall

在低应变率荷载作用下, 由于骨料具有较高的抗拉/压强度, 一般不会产生破坏。因此, 将骨料设为弹性。采用 LUBLINER 等<sup>[38]</sup>提出并由 LEE 等<sup>[39]</sup>发展的弹塑性损伤本构模型来描述砂浆基质及界面相力学行为, 如图 5(a) 所示。该本构关系模型中, 假定混凝土的破坏分为拉伸开裂和压碎两种, 由各向同性的损伤变量来表征混凝土的拉伸断裂和压缩破坏导致的刚度退化。钢筋采用理想弹塑性本构模型<sup>[40]</sup>, BFRP 筋达到有效应变前采用弹性本构<sup>[41]</sup>描述筋材的力学行为, 如图 5(b) 所示。本文采用非线性弹簧单元来描述钢筋/BFRP 筋与混凝土之间的相互作用。钢筋与混凝土之间的相互作用采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[31]</sup>推荐的钢筋与混凝土粘结-滑移本构模型, 如图 5(c) 所示。采用 COSENZA 等<sup>[42]</sup>提出的粘结-滑移本构模型来描述 BFRP 筋与混凝土之间的粘结-滑移关系, 如图 5(d) 所示。

需要说明的是: 本文在混凝土达到其强度后采用拉伸应力-位移形式来替代常见的应力-应变关系曲线, 从而保证了单元破坏时断裂能的唯一性<sup>[43]</sup>。该处理方法可有效减缓网格敏感性问题。

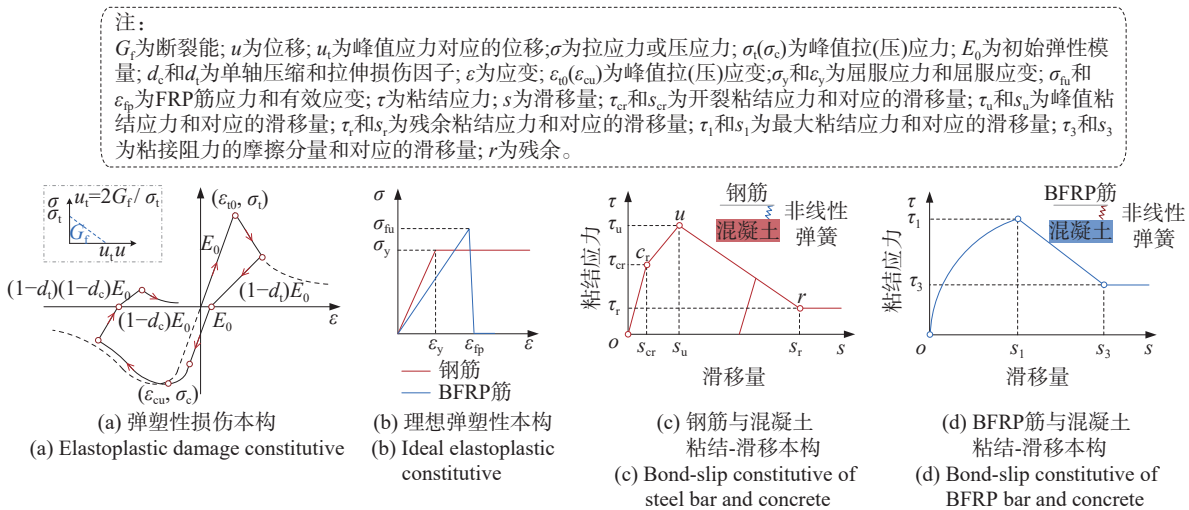


图 5 模型采用的本构

Fig. 5 Constitutive adopted by the model

2.2 模型验证

为验证所建模型的合理性, 以前文所述试验为

基准, 对试件在循环荷载作用下的力学响应进行模拟。混凝土各细观组分的力学参数如表 5 所示。其中, 砂浆基质的力学参数采用试验测得混凝土力学

表 5 混凝土细观组分子力学参数

Tab. 5 Mechanical parameters of meso-components of concrete

细观组分	抗压强度/MPa	劈拉强度/MPa	断裂能/(J·m <sup>-2</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	剪胀角/(°)
骨料	—	—	—	<sup>d</sup> 70	<sup>d</sup> 0.2	—
砂浆基质	<sup>a</sup> 53.25	<sup>a</sup> 5.55	<sup>c</sup> 50	<sup>a</sup> 42.26	<sup>d</sup> 0.2	18
界面过渡区	<sup>b</sup> 40.0	<sup>b</sup> 4.16	<sup>c</sup> 30	<sup>b</sup> 31.70	<sup>d</sup> 0.2	15

注: 带有“a”的数据来自本文试验; 带有“b”的数据是在反复试算下所得; 带有“c”的数据引用于 YILMAZ 等<sup>[44]</sup>的研究; 带有“d”的数据参考了 NADERI 等<sup>[45]</sup>的研究。

参数, ITZs 的力学参数无法通过试验测得, 可将其看作弱化了的砂浆基质, 通过反复试算得到。

首先将混凝土材料的力学参数模拟值与试验值相比, 模拟所得混凝土立方体抗压强度  $f_{\text{cuk}}$  与劈裂抗拉强度  $f_{\text{ts}}$  分别为 52.50 和 5.51 MPa, 试验值为 53.25 和 5.55 MPa, 两者基本吻合, 证明了模拟所选用的混凝土力学参数的合理性。然后以试验中试件钢筋-0.25% 和 BFRP 筋-0.25% 为例, 进行模型验证。

图 6 为模拟结果与试验结果的对比情况, 包括破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化情况和耗能能力。与试验中的剪力墙试件相比, 细观模型进行了简化, 导致模拟结果与试验有一定差异。但通过观察对比结果可知, 模拟结果与试验结果整体吻合较好, 两种方法所得峰值荷载和初始刚度误差均在 10% 以内。这说明目前的建模方法可以很好地模拟循环荷载作用下钢筋和 BFRP 筋混凝土剪力墙的力学行为。

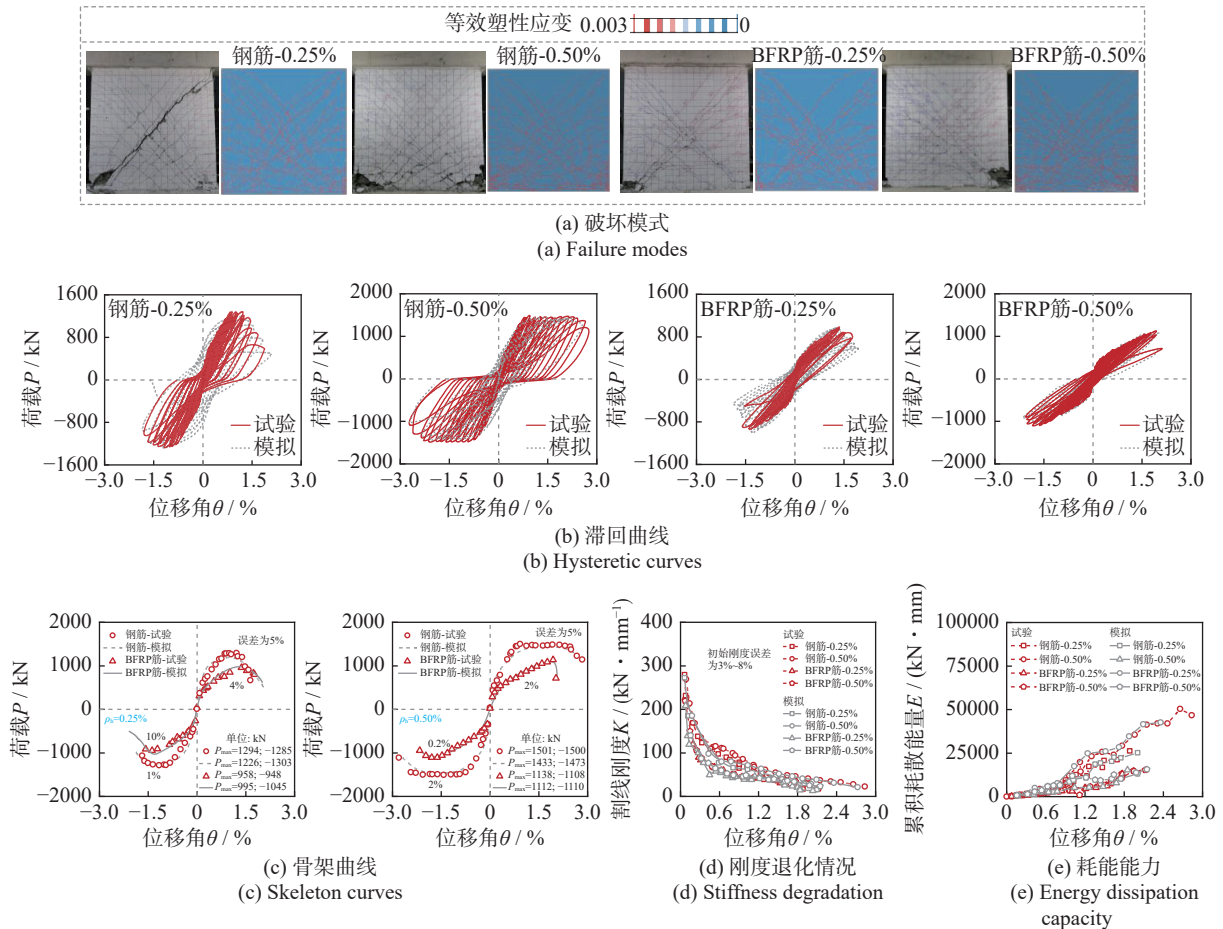


图 6 模型验证

Fig. 6 Model validation

基于开展的配置不同水平配筋率(0.25% 和 0.50%) 的钢筋和 BFRP 筋混凝土剪力墙抗震性能试验, 采用细观数值模拟的方法, 将水平配筋率拓展到 0% 和 1.00%。通过试验与数值模拟的方法, 对比 RC 剪力墙和 BFRP-RC 剪力墙的抗剪承载力、变形能力、耗能能力、刚度及恢复性能。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 破坏过程和破坏形态

图 7 为 8 个试件在极限荷载时的破坏模式。从图中可以看出, 8 个试件均产生了沿对角线方向分布

的斜裂缝。其中, 水平配筋率为 0% 和 0.25% 试件的主斜裂缝发展充分, 而水平配筋率为 0.50% 和 1.00% 的试件底部混凝土损伤更为严重。

图 8 给出了 4 个试件的水平筋(水平配筋率为 0% 的 2 个试件无水平筋)在加载过程中达到的最大应变。通过钢筋的材性试验确定了其屈服应变为 0.0016, 根据美国规范 ACI CODE-440.11—22<sup>[46]</sup> 中的规定, FRP 筋有效应变取为 0.004。结果表明, 对于 4 个 RC 剪力墙, 80% 的水平钢筋应变达到了屈服应变 0.0016; 对于 4 个 BFRP-RC 剪力墙试件, 67% 的水平 BFRP 筋产生的应变也达到了有效应变 0.004。

综上, 通过剪力墙的裂缝分布情况、混凝土的损伤情况及水平钢筋(BFRP 筋)最大应变达到屈服

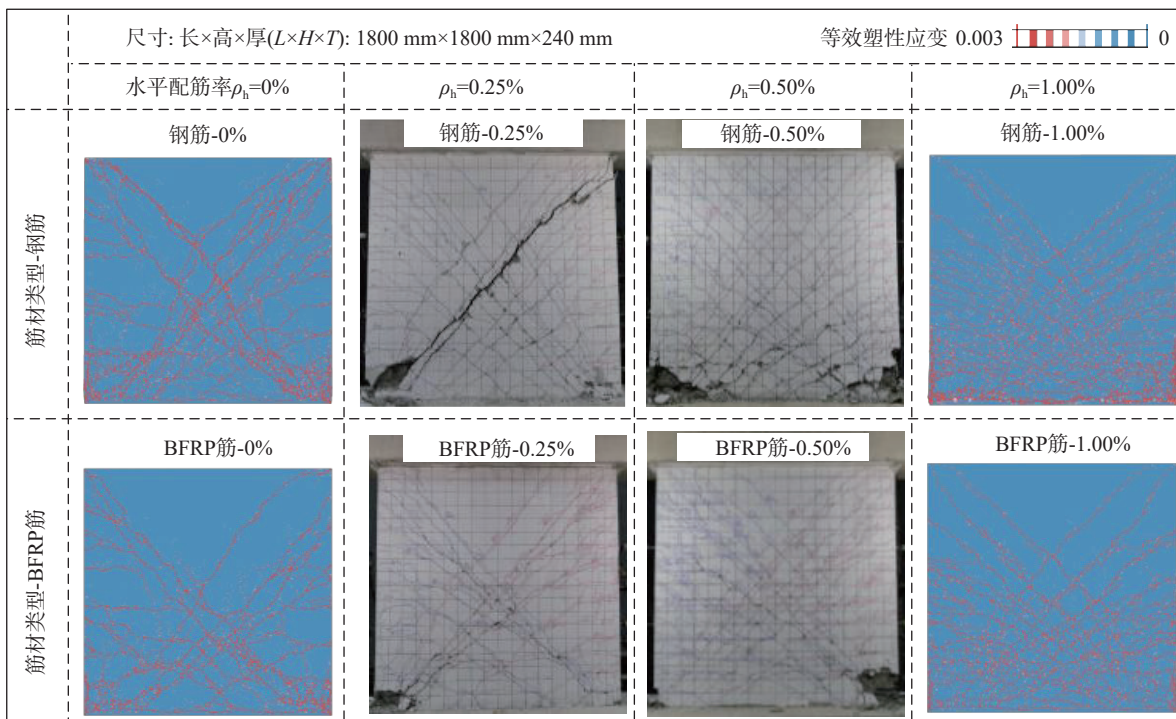


图 7 剪力墙的最终破坏模式

Fig. 7 Final failure modes of shear walls

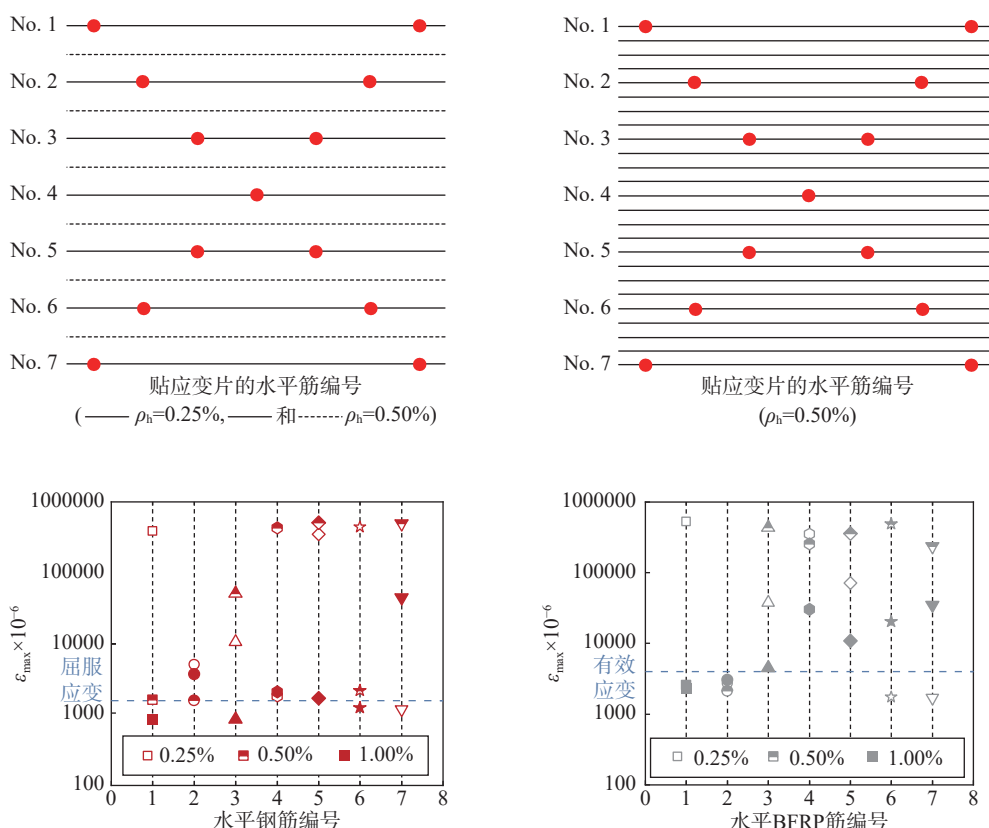


图 8 水平钢筋/BFRP 筋最大应变

Fig. 8 Maximum strain of horizontal steel bar/BFRP bar

(有效)应变情况, 可知试件钢筋-0%、钢筋-0.25%、BFRP 筋-0% 和 BFRP 筋-0.25% 为剪切破坏, 试件钢筋-0.50%、钢筋-1.00%、BFRP 筋-0.50% 和 BFRP 筋-1.00% 为压剪破坏。

### 3.2 滞回曲线和骨架曲线

图 9 所示的试件滞回曲线表明, 与 RC 剪力墙相比, BFRP-RC 剪力墙的滞回环面积较小, 耗能能力较差。加载前期, RC 剪力墙与 BFRP-RC 剪力墙处于

弹性变形阶段,试件的恢复性能较好,滞回环面积较小;随着加载的继续,RC 剪力墙的钢筋屈服,恢复

能力下降,滞回环面积明显增加,耗能能力显著增加。

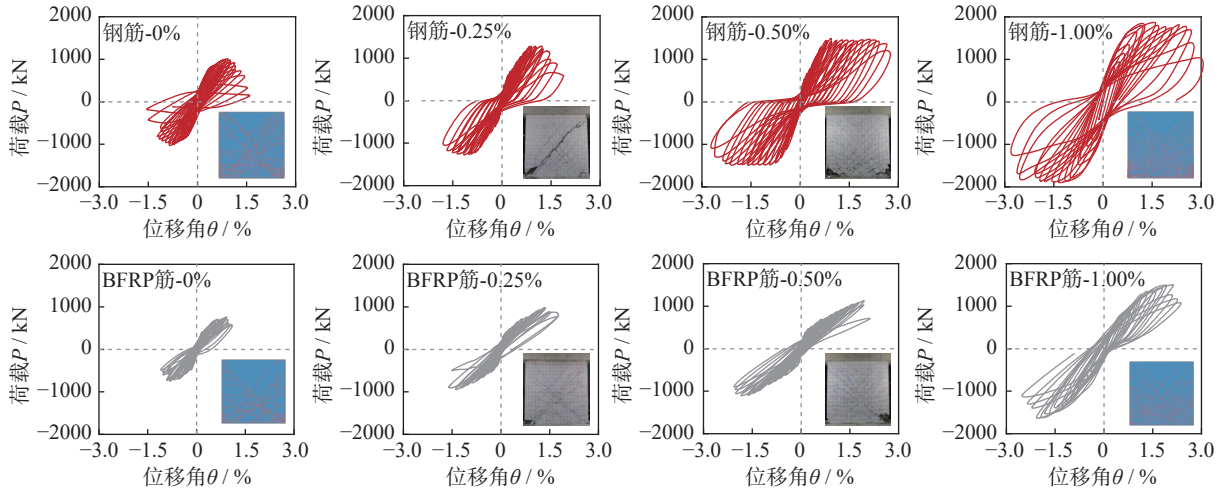


图 9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves

通过滞回曲线得到的承载力骨架曲线绘于图 10。骨架曲线上各特征点确定方法为:开裂点为第一条裂缝产生对应的荷载及位移;屈服点为第一条钢筋屈服时的荷载及位移;由于 FRP 筋没有屈服点,参考文献 [18, 47],弹性点为混凝土开始剥落时的荷载和位移,峰值点为最大水平荷载及对应的位移,极限点是水平荷载下降为最大荷载的 85% 时的荷载和位移。由图 10 可知,水平配筋率由 0% 增大到

1.00% 时,RC 剪力墙抗剪承载力约提高了 85%,BFRP-RC 剪力墙抗剪承载力约提高了 90%,同时,峰值点后平台段增加,试件变形能力增强。相同水平配筋率下,BFRP-RC 剪力墙抗剪承载力约为 RC 剪力墙的 74%~78%,且峰值点后荷载下降突然,即变形能力下降显著。

### 3.3 延性

构件的延性可用位移延性系数  $\mu$  来衡量,通常采用构件的极限位移与屈服(弹性)位移的比值来表示 [8, 48]:

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

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

式中,  $\Delta_u$  为试件的极限位移;  $\Delta_y$  为试件的屈服位移;  $\Delta_e$  为试件的弹性位移。

图 11 给出了不同水平配筋率下 8 个剪力墙试件的延性系数。结果表明,水平配筋率由 0% 提高到 1.00% 时,RC 剪力墙的延性系数提高了 142%;但

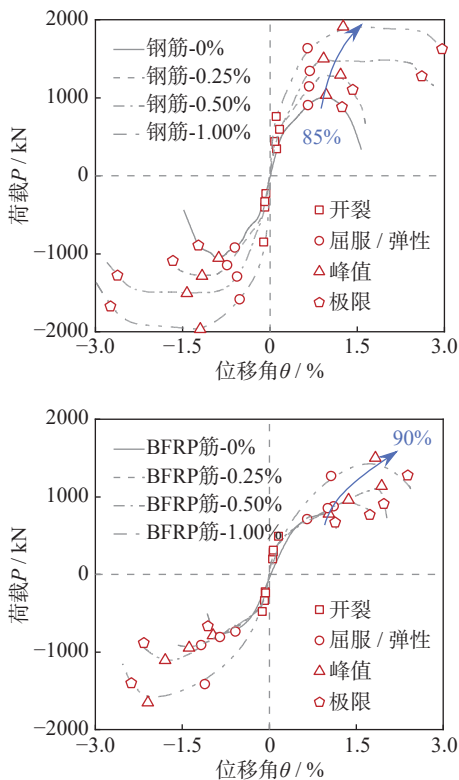


图 10 骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves

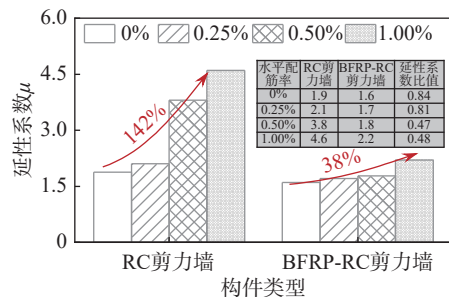


图 11 延性系数

Fig. 11 Ductility coefficient

BFRP-RC 剪力墙延性改善较小, 延性系数仅提高了 38%。同时, 与 RC 剪力墙相比, BFRP-RC 剪力墙变形能力下降, 当水平配筋率为 0%、0.25%、0.50% 和 1.00% 时, BFRP-RC 剪力墙的延性系数分别为 RC 剪力墙的 84%、81%、47% 和 48%。这是由于与钢筋相比, BFRP 筋弹性模量较小, 导致 BFRP 筋约束作用较弱, 对于裂缝开展的抑制作用也较弱, 则 BFRP-RC 剪力墙变形能力比 RC 剪力墙差。

### 3.4 软化率

峰值点后试件的变形能力采用软化率来描述。软化率  $k$  的计算方法<sup>[49]</sup> 为:

$$k = \left| \frac{P_{\max} - P_u}{\Delta_{\max} - \Delta_u} \right| \quad (2)$$

式中,  $k$  为试件的软化率;  $\Delta_{\max}$  为试件的峰值位移;  $P_{\max}$  为试件的峰值荷载;  $P_u$  为试件的极限荷载, 即为  $0.85P_{\max}$ 。

图 12 给出了 8 个试件的软化率随水平配筋率的变化情况。水平配筋率为 0%、0.25%、0.50% 和 1.00% 时, BFRP-RC 剪力墙的软化率分别为 RC 剪力墙的 1.9 倍、1.9 倍、2.2 倍和 2.4 倍, 变形能力下降显著, 即 BFRP-RC 剪力墙破坏更突然, 且脆性更为显著。但水平配筋率的提高改善了试件的变形能力, 水平配筋率由 0% 提高到 1.00% 时, RC 剪力墙和 BFRP-RC 剪力墙的软化率分别下降了 71% 和 63%。

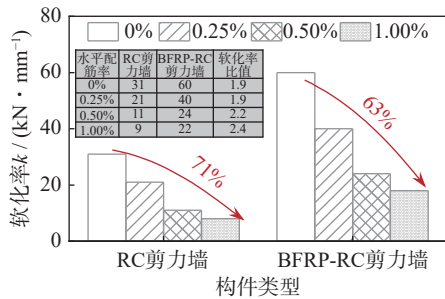


图 12 软化率

Fig. 12 Softening ratio

### 3.5 耗能能力

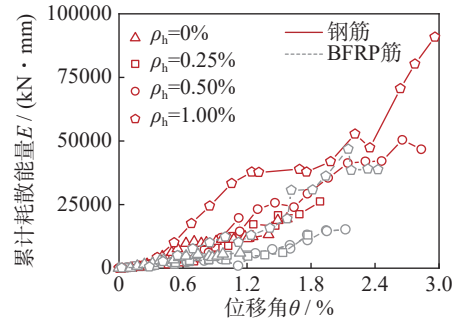
能量耗散系数  $\zeta$  由下式计算得到<sup>[50]</sup>:

$$\zeta = \frac{S_{ABC+CEA}}{S_{OBD+OEF}} = \frac{E}{S_{OBD+OEF}} \quad (3)$$

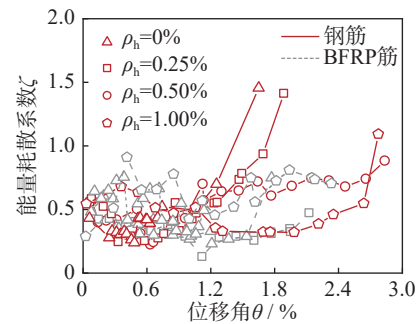
式中,  $S_{ABC+CEA}$  为滞回环的面积;  $E$  表示累计耗散能量;  $S_{OBD+OEF}$  为  $X$  轴与滞回环正向和负向峰值点和坐标轴原点连线所围成的三角形面积之和。

图 13 给出了试件的耗能能力。累积耗能量与能量耗散系数越大, 试件的耗能能力越强。由图 13 可知, 试件处于屈服(弹性)阶段前, 累积能量耗散和耗能系数较小, 耗能能力相对较差; 但达到屈服(弹性)阶段后, 试件主斜裂缝发展充分, 试件的耗能能力明

显增强。由于 BFRP 筋弹性模量小于钢筋, 对裂缝开展的抑制作用较弱, 导致 BFRP-RC 剪力墙耗能能力明显低于 RC 剪力墙。



(a) 累积耗散能量  
(a) Cumulative dissipated energy



(b) 能量耗散系数  
(b) Energy dissipation coefficient

图 13 耗能能力

Fig. 13 Energy dissipation capability

### 3.6 刚度

图 14 为试件的刚度退化情况。图 14 中,  $K_i$  为割线刚度,  $+P_i$  为正方向荷载,  $-P_i$  为负方向荷载,  $+\Delta$  为正方向位移,  $-\Delta$  为负方向位移,  $P$  为荷载,  $\Delta$  为位移。从图 14 中可以看出, BFRP-RC 剪力墙初始刚度小于 RC 剪力墙, 约为 RC 剪力墙的 77%~84%, 这主要是由 BFRP 筋弹性模量小于钢筋导致。加载初期, 裂缝发展迅速导致试件刚度下降明显, 随着水平位移的增大, 刚度退化速度开始减小, 8 个试件的最终残余

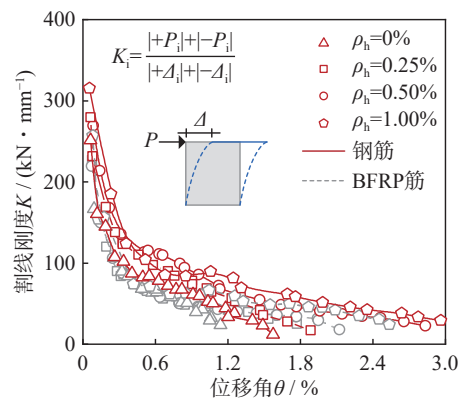


图 14 刚度退化情况

Fig. 14 Stiffness degeneration

刚度相差较小。此外,水平配筋率对剪力墙刚度退化的影响不明显。

### 3.7 残余变形

图15(a)为加载过程中试件的残余变形情况。在屈服和弹性阶段前,剪力墙的残余变形较小,可忽略不计。当钢筋屈服和混凝土剥落,试件进入塑性变形阶段,RC剪力墙的残余变形显著提高;由于BFRP筋不会屈服,一直处于弹性变形状态,因此卸载后BFRP-RC剪力墙大部分变形得以恢复。与RC剪力墙相比,BFRP-RC剪力墙残余变形显著减小。在极限阶段,水平配筋率0.25%和0.50%时,BFRP-RC剪力墙残余变形分别为RC剪力墙的62%和13%。

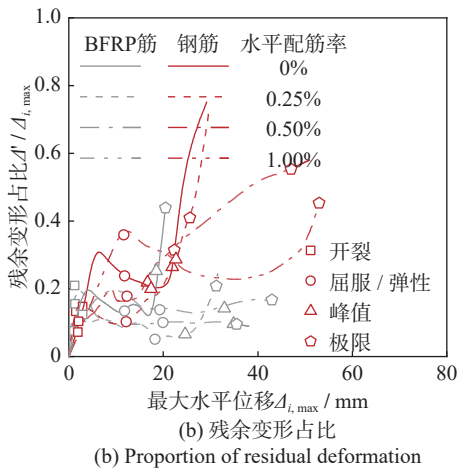
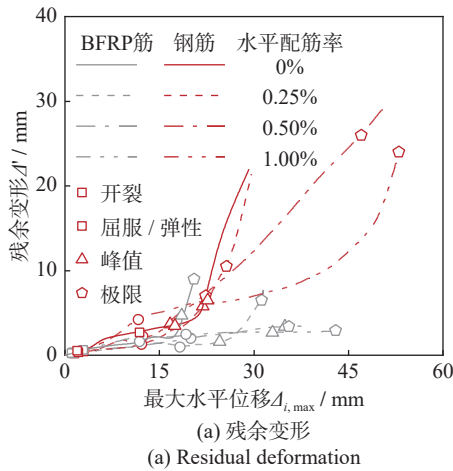


图15 残余变形情况

Fig. 15 Residual deformation

图15(b)给出了不同加载时刻残余变形占最大水平位移的比例。加载初期,试件处于弹性阶段,剪力墙残余变形占比较小,均低于40%。随着加载继续,试件进入塑性变形阶段,屈服阶段到峰值阶段,RC剪力墙残余变形占比明显增大,试件钢筋-0.25%残余变形占比增大20%左右;但BFRP-RC剪力墙残余变形占比较为稳定,均保持在10%左右。峰值阶

段到极限阶段,RC剪力墙的残余变形占比显著增大,试件钢筋-0.50%的残余变形占比约由20%增大到60%;然而除试件BFRP筋-0%外,BFRP-RC剪力墙的残余变形占比变化幅度均较小,试件BFRP筋-0.50%的残余变形占比一直在10%左右。

### 3.8 裂缝的发展与分布

由于模拟方法的限制,这里仅对试验试件的裂缝宽度和裂缝数量进行分析。图16(a)为最大裂缝宽度随加载过程的变化情况。可以看出,在试件处于弹性变形(钢筋未屈服,混凝土未剥落)阶段时,试件的裂缝宽度均较小。但由于钢筋的弹性模量较大,抵抗裂缝发展的能力较强,使得相同水平配筋率下RC剪力墙裂缝宽度小于BFRP-RC剪力墙。当试件进入塑性变形阶段,相同位移下,水平配筋率为0.25%时,RC剪力墙裂缝宽度为16.73 mm, BFRP-RC剪力墙裂缝宽度为6.5 mm,两者相差10.13 mm;当水平配筋率为0.50%时,RC剪力墙裂缝宽度为3 mm, BFRP-RC剪力墙裂缝宽度为2.5 mm,两者相差0.5 mm。可以看出,塑性变形阶段,无论水平配筋率为0.25%还是0.50%,在相同位移下,RC剪力墙裂缝宽度均大于BFRP-RC剪力墙。其可能的原因是钢

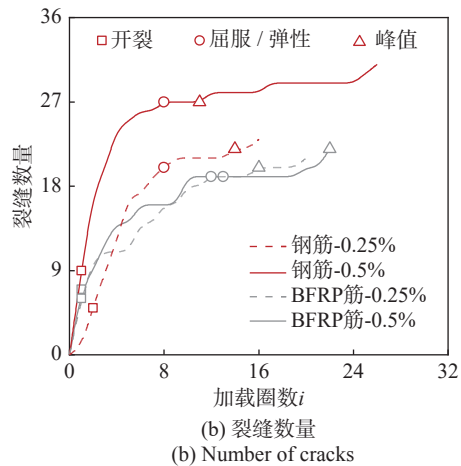
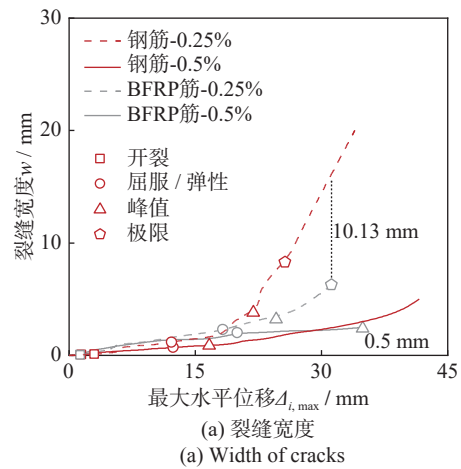


图16 裂缝的发展与分布

Fig. 16 Development and distribution of cracks

筋屈服后进入强化阶段,而BFRP筋仍处于线弹性变形阶段,应力水平仍可持续增加。

图16(b)为起到主要耗能作用(即宽度和长度均较为突出)的裂缝数量随加载过程的变化情况。可以看出,在屈服(弹性)阶段前,裂缝数量显著增加,在后续加载过程中仅有少数新增裂缝,但裂缝宽度有所增大。另外,可以看出RC剪力墙裂缝数量明显多于BFRP-RC剪力墙。这是由于与弹性模量较小的BFRP筋相比,钢筋可有效地抑制裂缝宽度发展,导致RC剪力墙产生了更多新裂缝来耗能。

综上,通过对残余变形、裂缝宽度与数量的分析可知,BFRP-RC剪力墙的恢复性能明显强于RC剪力墙。

## 4 结 论

本文开展了配置不同水平配筋率的钢筋和BFRP筋混凝土剪力墙抗震性能试验,并采用细观数值模拟方法对试验工况进行了拓展,分析了不同水平配筋率和筋材类型下的破坏模式、荷载-位移曲线、变形能力、耗能能力、刚度及恢复性能的变化规律。主要结论如下:

(1)水平配筋率为0%~0.25%和0.50%~1.00%时,RC剪力墙和BFRP-RC剪力墙均分别发生了剪切破坏和压剪破坏。

(2)相同水平配筋率下,BFRP-RC剪力墙抗剪承载力比RC剪力墙低22%~26%。随着水平配筋率由0%增大到1.00%,RC剪力墙和BFRP-RC剪力墙的抗剪承载力提高程度相似,分别为85%和90%。

(3)与RC剪力墙相比,BFRP-RC剪力墙的变形能力、耗能能力等抗震性能均较弱。但是,BFRP-RC剪力墙的恢复能力远远强于RC剪力墙。在极限阶段,水平配筋率为0.25%和0.50%时,BFRP-RC剪力墙残余变形分别为RC剪力墙的62%和13%。低残余变形和较强的自恢复能力,更加符合实际工程中可恢复功能抗震结构的要求。

本文较为全面地对比了RC剪力墙和BFRP-RC剪力墙的抗震性能,并对尺寸(长度×高度×厚度)为1800 mm×1800 mm×240 mm,水平配筋率为0.25%和0.50%的钢筋和BFRP筋混凝土剪力墙的差异进行了定量分析,推动了BFRP筋在工程中的应用。但本文仅讨论了水平配筋率对两种剪力墙抗震性能的影响,讨论剪跨比、轴压比等重要因素影响的试验将在后续研究中进一步开展。

### 参考文献:

[1] LEFAS I D, KOTSOVOS M D, AMBRASEYS N N.

Behavior of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanism[J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(1): 23-31.

- [2] GREIFENHAGEN C, LESTUZZI P. Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls[J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(11): 1703-1712.
- [3] ATHANASOPOULOU A. Shear strength and drift capacity of reinforced concrete and high-performance fiber reinforced concrete low-rise walls subjected to displacement reversals[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2010.
- [4] BEKŐ A, ROSKO P, WENZEL H, et al. RC shear walls: full-scale cyclic test, insights and derived analytical model[J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 120-131.
- [5] LI B, QIAN K, WU H. Flange effects on seismic performance of reinforced concrete squat walls with irregular or regular openings[J]. *Engineering Structures*, 2016, 110: 127-144.
- [6] PENG Y K, WU H, ZHUGE Y. Strength and drift capacity of squat recycled concrete shear walls under cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 356-368.
- [7] HIDALGO P A, LEDEZMA C A, JORDAN R M. Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls[J]. *Earthquake Spectra*, 2002, 18(2): 287-308.
- [8] HOSSEINI S M, YEKRANGNIA M, VATANI OSKOU EI A. Effect of spiral transverse bars on structural behavior of concrete shear walls reinforced with GFRP bars[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 55: 104706.
- [9] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction: state-of-the-art review[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2): 73-87.
- [10] YANG X, BAI Y, DING F X. Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 986-996.
- [11] YANG X, BAI Y, LUO F J, et al. Dynamic and fatigue performances of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2016, 138: 227-236.
- [12] KASSEM C, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(5): 682-695.
- [13] 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.
- [14] EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B, EL-RAGABY A, et al. Field investigation on the first bridge deck slab reinforced with glass FRP bars constructed in Canada[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(6): 470-479.

- [15] KAZEM SHARBATDAR M, SAATCIOGLU M. Seismic design of FRP reinforced concrete structures[J]. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2009, 2(3): 211-222.
- [16] TOBBI H, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(4): 551-558.
- [17] MOHAMED N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B, et al. Flexure and shear deformation of GFRP-reinforced shear walls[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(2): 04013044.
- [18] MOHAMED N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Aspects of deformability of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(5): 06014001.
- [19] ARAFA A, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Effect of web reinforcement on the seismic response of concrete squat walls reinforced with glass-FRP bars[J]. *Engineering Structures*, 2018, 174(1): 712-723.
- [20] ARAFA A, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Experimental behavior of GFRP-reinforced concrete squat walls subjected to simulated earthquake load[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(2): 04018003.
- [21] ARAFA A, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Prediction of flexural and shear strength of concrete squat walls reinforced with GFRP bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(4): 06018001.
- [22] ARAFA A, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Evaluation of flexural and shear stiffness of concrete squat walls reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. *ACI Structural Journal*, 2018, 115(1): 211-221.
- [23] ZHAO Q, ZHAO J, DANG J T, et al. Experimental investigation of shear walls using carbon fiber reinforced polymer bars under cyclic lateral loading[J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 82-91.
- [24] HUANG Z, SHEN J, LIN H Q, et al. Shear behavior of concrete shear walls with CFRP grids under lateral cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110422.
- [25] SONG X Y, HUANG Z, SHEN J, et al. Experimental study on cyclic behavior of hybrid CFRP grids-steel shear walls[J]. *Structures*, 2020, 28: 496-511.
- [26] SHEN J, HUANG Z, SONG X Y, et al. Cyclic behavior of concrete shear wall with CFRP grid-steel reinforcement[J]. *Composite Structures*, 2022, 297: 115938.
- [27] 赵军, 赵齐, 陈纪伟. CFRP 筋钢筋混凝土剪力墙自复位性能试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(3): 18-24.  
ZHAO Jun, ZHAO Qi, CHEN Jiwei. Experimental analysis of the self-centering performance of shear walls reinforced by CFRP and steel bars[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(3): 18-24.
- [28] 赵军, 沈富强, 司晨哲, 等. CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(5): 46-53.  
ZHAO Jun, SHEN Fuqiang, SI Chenzhe, et al. Experiment on seismic performance of shear wall reinforced with CFRP bars and steel bars[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(5): 46-53.
- [29] ELGABBAS F, AHMED E A, BENMOKRANE B. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 623-635.
- [30] RAHMAN H, DONCHEV T, PETKOVA D. Comparing the behaviour of the FRP and steel reinforced shear walls under cyclic seismic loading in aspect of the energy dissipation[J]. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 14(3): 84-89.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 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.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [32] SONG W, DYKE S, HARMON T. Application of nonlinear model updating for a reinforced concrete shear wall[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(5): 635-649.
- [33] JIN L, DING Z X, LI D, et al. Experimental and numerical investigations on the size effect of moderate high-strength reinforced concrete columns under small-eccentric compression[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2018, 27(5): 657-685.
- [34] PAN J W, ZHONG W, WANG J T, et al. Size effect on dynamic splitting tensile strength of concrete: mesoscale modeling[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 128: 104435.
- [35] ZHONG W, PAN J W, WANG J T, et al. Size effect in dynamic splitting tensile strength of concrete: experimental investigation[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121449.
- [36] SCHLANGEN E, VAN MIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. *Materials and Structures*, 1992, 25(9): 534-542.
- [37] JIN L, LI D, DU X L, et al. Experimental and numerical study on size effect in eccentrically loaded stocky RC columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(2): 04016170.
- [38] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299-326.

- [39] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [40] LIAO F Y, HAN L H, TAO Z. Performance of reinforced concrete shear walls with steel reinforced concrete boundary columns[J]. *Engineering Structures*, 2012, 44: 186-209.
- [41] ZHANG Y X, LIN X S. Nonlinear finite element analyses of steel/FRP-reinforced concrete beams by using a novel composite beam element[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(2): 339-352.
- [42] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1997, 1(2): 40-51.
- [43] MAHMUD G H, YANG Z J, HASSAN A M T. Experimental and numerical studies of size effects of ultra high performance steel fibre reinforced concrete (UHPRFC) beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 1027-1034.
- [44] YILMAZ O, MOLINARI J F. A mesoscale fracture model for concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 97: 84-94.
- [45] NADERI S, TU W L, ZHANG M Z. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 140: 106317.
- [46] American Concrete Institute (ACI). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI CODE-440.11—22[S]. Farmington Hills: ACI Committee, 2022.
- [47] PRIESTLEY M J N, KOWALSKY M J. Aspects of drift and ductility capacity of rectangular cantilever structural walls[J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1998, 31(2): 73-85.
- [48] 陈宗平, 周济, 莫琳琳, 等. 双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(10): 199-213.
- CHEN Zongping, ZHOU Ji, MO Linlin, et al. Experimental study on seismic behavior of double-skin corrugated plates and concrete composite shear wall[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(10): 199-213.
- [49] JIN L, WANG T, JIANG X A, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: simulation and formulation[J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109573.
- [50] GUO L H, WANG Y H, ZHANG S M. Experimental study of rectangular multi-partition steel-concrete composite shear walls[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 577-592.

第一作者:苗丽越(1992—),女,博士研究生。

E-mail: miaoliyue2022@163.com

通信作者:金 浏(1985—),男,博士,教授。

E-mail: jinliu@bjut.edu.cn