

# BFRP 布加固钢筋混凝土圆柱的抗震性能研究

黄镜淳<sup>1,3</sup>, 高 鹏<sup>2,3</sup>, 马翠玲<sup>1</sup>, 周 安<sup>2</sup>

(1. 合肥学院 城市建设与交通学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;  
3. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 065000)

**摘要:** 基于 4 根玄武岩纤维布(Basalt Fiber Reinforced Plastic, BFRP)约束钢筋混凝土圆柱和 2 根未加固柱的低周反复侧向加载试验, 研究了试件的受力性能和机理, 对比分析了剪跨比、轴压比和加固方式对柱变形性能的影响. 利用 ABAQUS 软件对试件进行非线性有限元分析, 且验证了模型的有效性. 在此基础上, 以 BFRP 包裹层数、纵筋配筋率和箍筋配筋率为变化参数, 重点研究了各参数对加固柱抗震变形能力的影响. 结果表明: 随着剪跨比的减小及轴压比的增大, 加固柱延性性能明显降低, 且 BFRP 对低剪跨比加固柱变形能力的提高效果最好; 等 BFRP 加固量下全包较条带加固柱抗震性能略优; 加固柱的变形能力随着包裹层数得提高而增强, 但层数超过 4 层后, BFRP 对柱的加固效果不再明显; 当加固柱的纵筋配筋率增至 3.2% 时, 其延性性能变化趋势由上升转为下降; 而增加箍筋配筋率则可显著改善加固柱的极限位移.

**关键词:** 玄武岩纤维; 加固; 钢筋混凝土柱; 低周反复荷载; 变形能力; 有限元分析

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0291-07

## Research on seismic performance of BFRP-confined reinforced circular concrete columns

HUANG Jingting<sup>1,3</sup>, GAO Peng<sup>2,3</sup>, MA Cuilin<sup>1</sup>, ZHOU An<sup>2</sup>

(1. School of Urban Construction and Transportation, Hefei University, Hefei 230601, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Haerbin 065000, China)

**Abstract:** The low cyclic lateral loading tests were conducted on four basalt fiber reinforced plastic (BFRP) confined circular columns and two unconfined columns. The mechanical behavior and mechanism of specimens were investigated, and the influences on the deformation performance were analyzed by the parameters of shear span ratio, axial compression ratio and confining method. Nonlinear finite element analysis of the specimens was carried out by ABAQUS software, and the feasibility of models was verified. Then, the influences of BFRP layer, longitudinal reinforcement ratio and stirrup ratio on the seismic deformation capacity of columns were studied. Results show that with the reduction of shear span ratio and increment of axial compression ratio, the ductility of confined columns drops significantly, and the BFRP has the best effect on improving the deformation capacity of the columns reinforced with low shear-span ratio. With the same amount of BFRP, the seismic behavior of all wrapped columns is slightly better than that of partial wrapped columns. Moreover, the column deformation capacity is improved with the increase of BFRP layer, but the BFRP confinement is not obvious with more than four layers. When the longitudinal reinforcement ratio of columns reaches 3.2%, the ductility trend changes from rise to drop, while increasing the stirrup ratio can significantly improve the ultimate displacement of reinforced columns.

**Key words:** basalt fiber; retrofitting; reinforced concrete columns; low cyclic loading; deformation capacity; finite element analysis

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208166); 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2020EEEVL0417); 合肥学院人才科研基金(21-22RC38); 安徽省高校优秀青年人才基金项目(GXYQ2020068)

第一作者: 黄镜淳(1988—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为纤维复合材料加固混凝土结构. E-mail: huangjt@hfu.edu.cn

钢筋混凝土柱作为房屋和桥梁结构中重要的抗震构件,一旦破坏可能会引起结构的整体倒塌。一直以来,强度问题都是结构抗震设计的重点,但对延性抗震设计的重视却显不足,特别是早期规范对构件位移和延性要求偏低。而在保证柱一定强度的基础上,提高其变形能力,通过其自身变形来消耗地震能量,可有效保障结构的抗震安全。玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)具有优良的力学性能和价廉环保等优点,特别是其极限应变较高,适用于结构抗震加固工程<sup>[1-2]</sup>。吴刚等<sup>[3]</sup>和 Ouyang 等<sup>[4]</sup>通过抗震试验发现外包 BFRP 可有效改善钢筋混凝土柱的强度、变形和耗能能力,特别是对极限位移的提高幅度可达峰值承载力的 4~8 倍,认为 BFRP 对柱变形性能具有很好的加固效果。Li 等<sup>[5]</sup>、Ma 等<sup>[6]</sup>、唐协波<sup>[7]</sup>则分别基于试验结果对 BFRP 加固柱进行了抗震性能参数分析,再次验证了 BFRP 约束能够显著提高钢筋混凝土柱的延性性能,且得出轴压比、FRP 包裹层数和加载方式等参数对加固柱的变形能力皆有较大影响的结论。

由上述文献可知,现有针对 BFRP 的抗震试验多集中于剪跨比范围为 3~5,轴压比低于 0.6,加固方式为塑性铰区全约束的情况,且所涉及的参数也有限。因此,本文采用 BFRP 全约束和条带约束两种方法,对高轴压比钢筋混凝土短柱进行了低周反复侧向加载试验,分析了加固柱的受力性能,并在此基础上展开有限元分析,进一步研究其他参数对柱变形和承载能力的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设计

试验共设计了 6 根钢筋混凝土倒 T 型圆柱试

件,所有试件均采用 C25 级混凝土和相同的配筋形式。柱直径  $D$  为 300 mm,试验段净高分别为 1 450 mm 和 900 mm,基座高 400 mm。柱试验段纵筋为 6  $\Phi$  18 mm,沿圆周均布配置,箍筋为  $\Phi$  6 @200 mm。两种柱弯剪比分别为 0.96 和 1.49,预期破坏模式为弯剪和剪切破坏。弯剪比定义为抗剪需求  $V_M = M/\lambda D$  与抗剪承载力  $V_u$  之比,其中,抗弯承载力  $M$  和  $V_u$  采用 2010 版混凝土规范中计算公式得到<sup>[8-9]</sup>。实测混凝土立方体抗压强度平均值为 31.4 MPa。实测钢筋和 BFRP 的材料性能如表 1、2 所示。加固柱分别采用 3 层 BFRP 布环向全约束和条带约束两种方式,前者范围为距柱底 600 mm 高内,后者范围为距柱底 800 mm 高内且条带宽度为 200 mm,则两者 FRP 加固量相等。柱设计轴压比  $n$  分别为 0.3 和 0.9。水平荷载加载点到柱底距离分别为 1 175 mm 和 625 mm,剪跨比  $\lambda$  定义为此距离与柱直径的比值分别为 3.9 和 2.1。试件设计参数详见表 3。

表 1 钢筋的力学性能指标

Tab. 1 Mechanical properties of steel bars

钢筋级别	钢筋直径 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%
HRB400	18	477.3	626.5	30.0
HPB300	6	393.3	519.6	25.5

表 2 BFRP 的力学性能指标

Tab. 2 Mechanical properties of BFRP sheets

FRP 类别	单层厚度 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	延伸率 /%
BFRP	0.107	1857.3	79.4	2.4

表 3 试件设计参数及试验结果

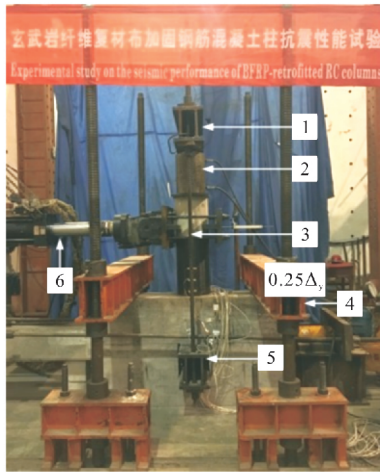
Tab. 3 Design parameters of specimens and test results

试件编号	剪跨比 $\lambda$	轴压比 $n$	加固方式	屈服位移 $\Delta_y$ /mm	屈服荷载 $P_y$ /kN	峰值位移 $\Delta_m$ /mm	峰值荷载 $P_m$ /kN	极限位移 $\Delta_u$ /mm	延性系数 $\mu_\Delta$	累计耗能 $E_{sum}/(kN \cdot mm)$
LB0N3	2.1	0.3	-	12.38	136.07	17.45	151.29	29.95	2.45	37 251
MB0N3	3.9	0.3	-	14.65	64.33	29.94	78.67	46.34	3.17	37 465
LB3N3	2.1	0.3	3 层全约束	12.35	150.65	49.96	186.59	76.76	6.26	220 741
MB3N3	3.9	0.3	3 层全约束	18.15	73.68	89.92	97.71	123.92	6.91	278 986
MB3N9	3.9	0.9	3 层全约束	15.88	92.82	59.93	121.36	102.76	6.51	292 619
MB3N3-P	3.9	0.3	3 层条带	14.57	74.51	69.93	96.99	109.89	7.65	245 580

注: L 和 M 分别代表柱剪跨比为 2.1 和 3.9; B0 和 B3 分别代表未加固和 3 层 BFRP 加固柱; N3 和 N9 分别代表柱轴压比为 0.3 和 0.9; P 表示条带约束方式,其他柱则默认全约束方式。 $\Delta_u$  为水平荷载降至 85%  $P_m$  时对应的位移;  $\mu_\Delta$  为位移延性系数,  $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$ ;  $E_{sum}$  为累计耗能,定义为荷载自零一直到 0.85  $P_m$  对应的滞回环截止点所累计的滞回环包围面积<sup>[10]</sup>。

## 1.2 加载制度

试验装置详见图 1。竖向恒定荷载采用自平衡装置加载,水平荷载采用 MTS 液压伺服作动器施加且遵循全位移控制加载制度。柱屈服前,采用 0.25 倍屈服位移作为位移增量进行加载,每级往复 1 次;屈服后,按照屈服位移的整数倍逐级加载直至荷载下降至 85% 峰值荷载时结束试验,每级往复 2 次。



1-上反力梁; 2-千斤顶; 3-柔性拉杆; 4-门式反力架;  
5-下反力梁; 6-MTS 作动器

图 1 试验装置

Fig. 1 Test setup

试验加载过程中柱端的水平荷载和位移值由作动器上的传感器采集。并对柱塑性铰区位置的箍筋和 BFRP 布表面粘贴应变片以量测应变值,具体测点布置如图 2 所示。其中, S 和 F 分别代表箍筋和 BFRP 布应变片。

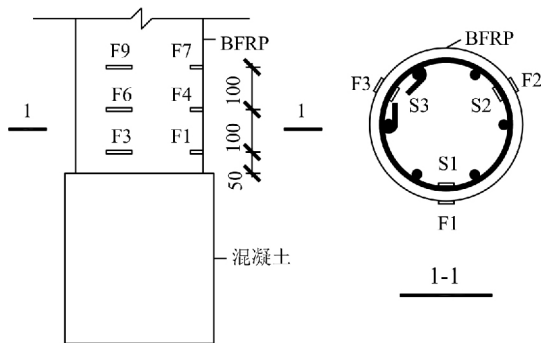


图 2 测点布置图

Fig. 2 Sketch of measured points

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏形态

典型试件的破坏形态如图 3 所示。未加固柱 LB0N3 为剪切破坏,破坏时约 10 mm 宽的交叉主斜裂缝贯穿柱身混凝土,柱根部有大块混凝土脱

落。未加固柱 MB0N3 为弯剪破坏,柱破坏时出现数条交叉的主斜裂缝,根部约 200 mm 高内混凝土碎裂崩出。加固柱皆呈现弯曲破坏形态,破坏时根部约 50~200 mm 宽的 BFRP 布断裂,混凝土压碎崩裂而出。其中高轴压比柱 LB3N9 混凝土压碎程度严重,条带约束柱 MB3N3-P 距柱底约 300 mm 处外露纵筋屈曲后折断。

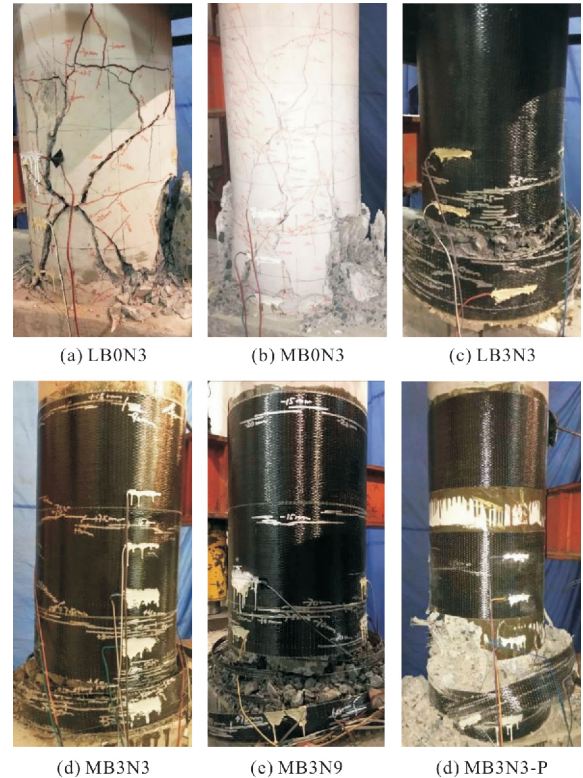


图 3 各试件破坏形态

Fig. 3 Failure pattern of specimens

### 2.2 滞回特性

各试件水平荷载  $P$ -加载点水平位移  $\Delta$  滞回曲线如图 4 所示。由图可知,未加固柱 LB0N3 和 MB0N3 滞回曲线分别呈反 S 和弓形,形状较不饱满且“捏缩”效应较明显,极限位移偏小,显示柱较差的耗能和变形能力。BFRP 加固柱滞回曲线则转变为梭形,峰值荷载、极限位移和滞回环面积较未加固前皆有增大,表明柱承载力、延性和耗能能力的增强。随着剪跨比增大,加固柱 MB3N3 较柱 LB3N3 承载力的减幅和极限位移的增幅皆可接近 1 倍;随着轴压比提高,加固柱 MB3N9 较柱 MB3N3 承载力有一定提高,但极限位移减小显著;等 FRP 加固量的条带加固柱 MB3N3-P 较全包加固柱 MB3N3 承载力和极限位移皆略小,滞回曲线的饱满程度也较低。

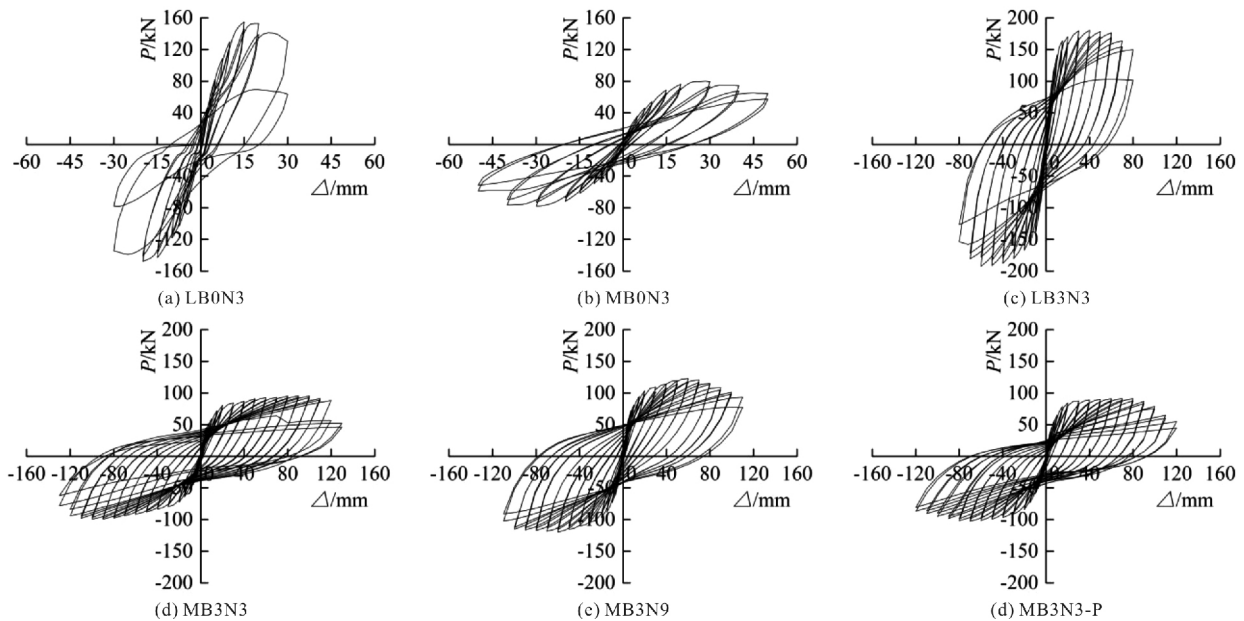


图4 各试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic loop curves of specimens

### 2.3 承载力和变形性能

各试件骨架曲线和试验结果详见图5和表3, 其中, 屈服点位置按通用屈服弯矩法<sup>[10]</sup>确定. 当柱剪跨比由3.9降至2.1时, 未加固柱LB0N3较柱MB0N3的峰值荷载和位移延性系数分别显著增大和减小. 加固后, 柱MB3N3的峰值荷载和延性系数分别提高了24.2%和118.0%, 而柱LB3N3的相同指标则提高了23.3%和155.5%. 而LB3N3的BFRP极限应变为1.33%, 大于柱MB3N3的1.17%. 说明BFRP对低剪跨比柱的约束更有效, 能够显著改善柱的承载力和延性.

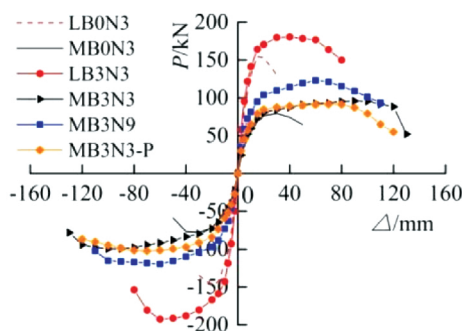


图5 各试件骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of specimens

随着轴压比由0.3增至0.9, 加固柱MB3N9较柱MB3N3的峰值荷载和累计耗能分别增大了24.2%和4.9%, 延性系数则减小了5.8%, 显示出加固柱的变形能力随着轴压比增大而减小. 测点显示加固柱MB3N9的BFRP极限应变为1.46%, 远大于柱MB3N3的1.17%. 柱轴力较大时, 柱截面受压区面积较大, 核心区混凝土侧向膨胀加剧, BFRP的约束作用也更强.

等BFRP加固量的条带加固柱MB3N3-P与全包围加固柱MB3N3的承载力相近, 但前者的位移延性系数较后者提高了17.5%, 主要由于条带纤维布加固柱中未约束混凝土区域侧向膨胀明显, 而其各条带的BFRP工作应变值略高, 实现的约束效果较好.

## 3 有限元模型建立

### 3.1 单元选择与材料本构关系

本文采用有限元软件ABAQUS对BFRP加固钢筋混凝土柱进行抗震性能分析. 混凝土采用8节点减缩积分实体单元C3D8R; 纵筋和箍筋采用2节点桁架单元T3D2; BFRP采用4节点减缩积分膜单元M3D4R. 本模型未直接建立纵筋和混凝土的滑移单元, 而在选取的纵筋本构模型中考虑了二者之间的粘结滑移情况.

混凝土采用塑性损伤 (Concrete damaged plasticity, CDP) 模型, 该模型能够模拟混凝土在低约束压力下受往复荷载作用的损伤累积过程. CDP模型的屈服函数和流动势函数皆含有侧向围压参数. 为模拟混凝土裂缝开裂和闭合带来的刚度退化, CDP模型还引入损伤因子对其弹性刚度矩阵进行折减<sup>[11]</sup>. 则依据Sidiroff能量等效原理<sup>[12]</sup>, 混凝土损伤因子  $D = 1 - \sqrt{\sigma / (E_0 \epsilon)}$ , 其中  $\sigma$ 、 $\epsilon$  和  $E_0$  分别混凝土的应力、应变和弹性模量. 且该本构模型中刚度恢复系数  $\omega$  经试算取0.35. 本文模型分别采用Chen<sup>[13]</sup>和2010版混凝土规范<sup>[9]</sup>建议的未约束混凝土单轴受压和受拉应力-应变曲线, 如图6(a)所示. 柱身纵筋采用Clough<sup>[14]</sup>提出的双



折线再加载刚度退化滞回本构模型, 并将卸载段结束点应力值由 0 修正为历史最大点应力  $f_{\max}$  的 0.2 倍, 详见图 6(b). 箍筋则采用理想弹塑性模型. BFRP 定义纤维方向为环向, 该方向弹性模量取材性试验实测值, 其抗拉强度亦取试验值. 钢筋采用“embedded”命令嵌固于混凝土中共同受力; BFRP 与混凝土之间则采用“Tie”约束, 共用节点, 共同工作. 柱基座底部完全约束, 对柱端施加恒定竖向力, 并按试验加载制度施加水平位移直至荷载下降至 85% 峰值荷载时终止计算.

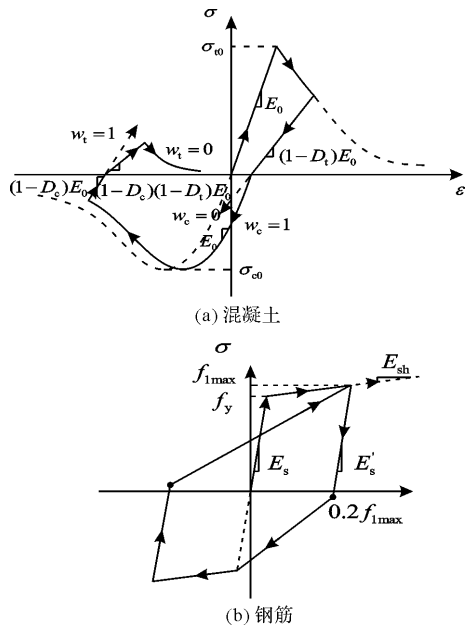


图 6 往复荷载下材料的本构模型

Fig. 6 Constitutive model of materials under cyclic load

3.2 模型验证

图 7 给出了典型试件的滞回曲线试验和模拟对比结果, 各柱有限元分析结果与试验曲线在整体趋势、承载力和极限位移等方面皆吻合较好. 而因模拟柱卸载路径受纵筋的 Clough 本构模型影响较大, 模拟柱与试验柱的卸载刚度稍显差别. 表 4 则为各试件峰值荷载和极限位移模拟值和试验值的对比结果. 该表显示柱峰值荷载和极限位移试验值与模拟值比值基本在 0.94~1.10 的范围内. 仅未加固柱 LB0N3 的极限位移比值较大, 主要原因为该柱试验时钢筋与混凝土之间粘结滑移较大, 而模拟时未直接设立二者之间的滑移界面单元. 并对表 4 比值数据进行统计分析, 统计指标包括平均值 AVE、标准差 SD 和变异系数 COV. 结果可得峰值荷载比值的 AVE、SD 和 COV 值分别为 1.05、0.03 和 0.03, 而极限位移比值的相同指标则分别为 1.05、0.13 和 0.12, 说明该模型具有较高的精确度.

图 8(a) 显示出试件 MB0N3 试验柱在破坏时距柱底约 200 mm 高范围内出现了明显的交叉斜裂缝, 而模拟柱混凝土等效塑性应变较大值分布区域与试验柱混凝土开裂及剥落区域相对应. 图 8(b) 表明破坏时试件 MB3N3 试验柱根部有约 50 mm 宽 BFRP 布断裂, 而模拟柱 BFRP 最大应变分布位置与试验柱 BFRP 断裂位置相对应. 综上所述, 该有限元模型可以较准确地模拟出 BFRP 加钢筋混凝土柱的破坏形态.

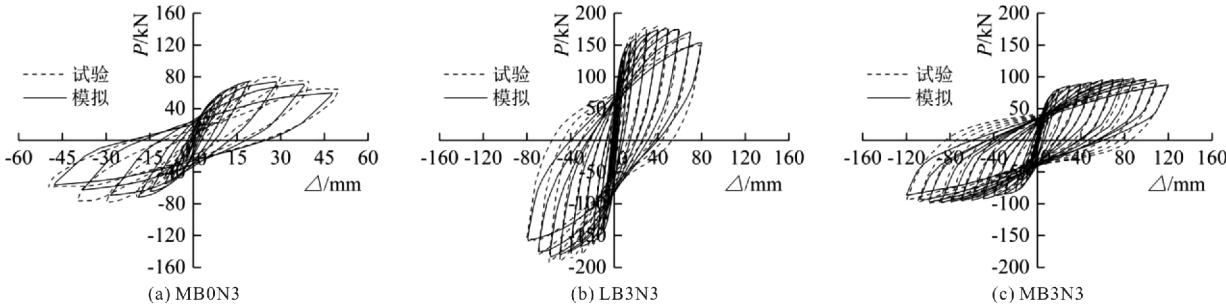


图 7 模拟与试验结果滞回曲线对比

Fig. 7 Comparison of hysteretic loop curves between simulation and tested results

表 4 模拟结果与试验数据对比

Tab. 4 Comparison between and test data simulation results

试件编号	峰值荷载模拟值 $P_{m,cal}/kN$	峰值荷载试验值 $P_{m,exp}/kN$	峰值荷载比值 $\eta_l = P_{m,exp}/P_{m,cal}$	极限位移模拟值 $\Delta_{u,cal}/mm$	极限位移试验值 $\Delta_{u,exp}/mm$	极限位移比值 $\eta_z = \Delta_{u,exp}/\Delta_{u,cal}$
LB0N3	140.63	151.29	1.08	23.34	29.95	1.28
MB0N3	72.99	78.67	1.08	42.01	46.34	1.10
LB3N3	180.11	186.59	1.04	80.69	76.76	0.95
MB3N3	98.19	97.71	1.00	118.95	123.92	1.04
MB3N9	118.15	121.36	1.03	109.34	102.76	0.94
MB3N3-P	91.59	96.99	1.06	109.88	109.89	1.00

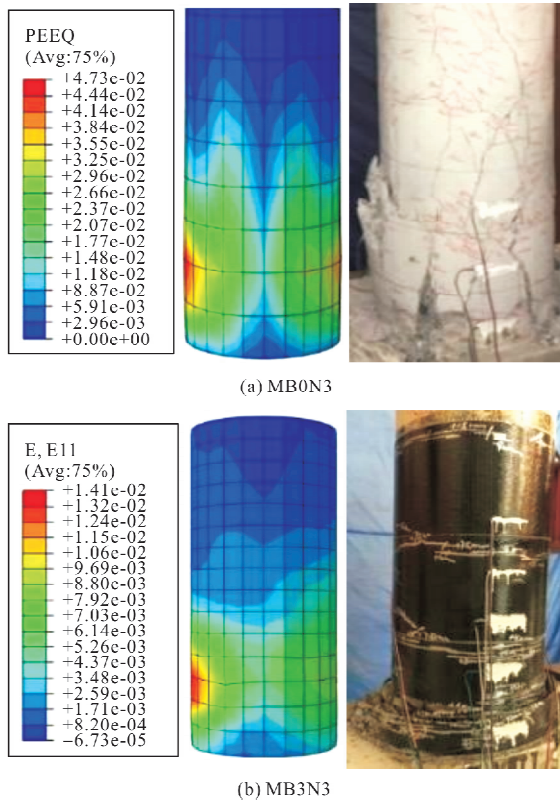


图8 模拟与试验结果破坏形态对比

Fig. 8 Comparison of failure modes between simulation and tested results

## 4 有限元结果分析

为了更全面地掌握 BFRP 加固钢筋混凝土柱抗震变形能力的影响参数,本部分增加了 BFRP 包裹层数、纵筋配筋率和箍筋配筋率三种参数,以模拟柱 MB3N3 为基准,变化单一参数值进行分析与讨论。试件具体参数范围如表 5 所列。

表5 试件参数范围

Tab. 5 Parametric range of specimens

组号	包裹层数 $n$	纵筋配筋率 $\rho_s / \%$	箍筋配筋率 $\rho_{sv} / \%$
1	2	1.7	0.23
2	3	2.2	0.40
3	4	2.7	0.54
4	5	3.2	0.80

### 4.1 包裹层数

图 9 为包裹层数对构件水平荷载-加载点水平位移骨架曲线的影响。该图表明,随着 BFRP 包裹层数的增加,加固柱峰值位移后移,承载力提高,荷载下降趋势更平缓,极限位移增大,说明柱承载力和变形能力改善明显。当包裹层数由 2 层增至 3 层时,加固柱承载力和极限位移分别提高了约 9% 和 12%,而由 4 层增至 5 层时仅分别提高了约 3% 和 2%。此结果表明,对于轴压比为 0.3 且

弯剪比为 0.96 的柱,当包裹层数超过 4 层后, BFRP 对承载力和变形能力的增强效果明显降低。

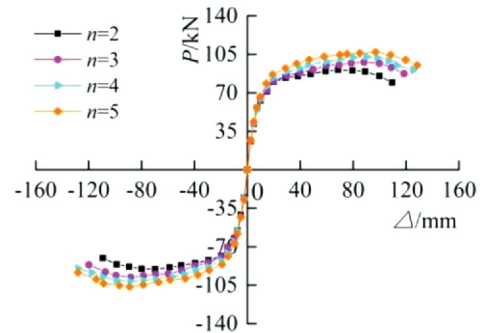


图9 包裹层数组柱骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of columns with different BFRP layers

### 4.2 纵筋配筋率

为研究纵筋配筋率对 BFRP 加固钢筋混凝土柱抗震性能的影响,模拟结果分析如图 10 所示,随着纵筋配筋率增大,加固柱初始刚度、屈服荷载和位移皆增大,峰值荷载显著提高。当纵筋配筋率由 1.7% 升至 2.7% 时,柱的极限位移增大,增强了其延性性能;而由 2.7% 增至 3.2% 时,柱的极限位移几乎未变,反对其延性产生不利影响。这是由于纵筋的增多表明混凝土部分承担的压力下降,从而延缓了混凝土的破坏,使柱延性变好;但当纵筋增量较大时,又易使柱发生剪切或粘结破坏,使延性变差。

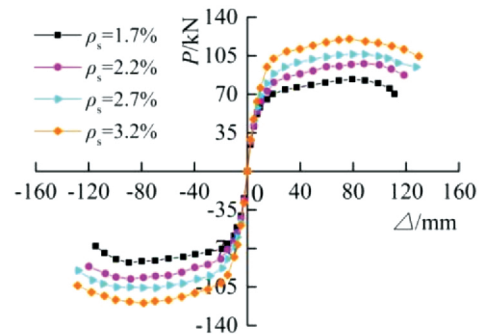


图10 纵筋配筋率组柱骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of columns with different longitudinal reinforcement ratio

### 4.3 箍筋配筋率

箍筋配筋率  $\rho_{sv}$  对加固柱的抗震变形性能影响如图 11 所示。该图显示,随着箍筋配筋率增大,加固柱初始刚度、屈服位移、屈服和峰值荷载皆未出现明显变化。当箍筋配筋率由 0.23% 增至 0.40% 时,加固柱骨架曲线仍基本重合;但当继续增至 0.54% 以上时,柱骨架曲线的水平平台段长度增大,极限位移提高显著。该结果说明,当箍筋配筋率的提高幅度达 2 倍以上时,柱的变形能力才明显增强。

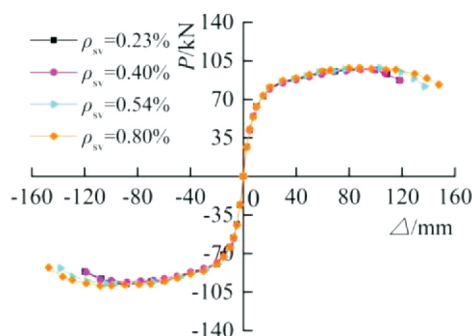


图 11 箍筋配箍率组柱骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of columns with different stirrup ratio

## 5 结论

通过 BFRP 加固钢筋混凝土圆柱的抗震试验及有限元分析,可以得到以下结论:

(1) 试验结果表明, BFRP 全包或条带约束钢筋混凝土柱皆可有效提高柱的承载力、变形和耗能能力,使加固后柱的破坏形态为弯曲破坏;

(2) 试验结果亦显示,剪跨比对加固柱变形能力的影响较其他参数更为显著。随着剪跨比的减小, BFRP 加固柱的变形性能大幅减小,且 BFRP 对低剪跨比加固柱变形能力的提升效果更优。随着轴压比的增大,加固柱的延性性能也明显降低。等 BFRP 加固量下条带较全包加固柱的极限位移和累计耗能较小,说明其抗震性能略差;

(3) 有限元结果表明,对于轴压比较低且呈弯剪破坏形态的柱,其加固后延性随着包裹层数的增加而提高,但当层数超过 4 层后, BFRP 对柱变形性能的提高效果不再明显。随着纵筋配筋率的增大,加固柱的变形能力持续增大,但当达到 3.2% 时,柱延性性能反而降低。箍筋配箍率仅对加固柱的极限位移有较大影响,且当其由 0.23% 升至 0.54% 以上时,柱变形能力明显提高。

## 参考文献 References

- [1] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.
- [2] 刘华, 胡文乐, 何朋立, 等. 玄武岩纤维灰土力学特性及拓宽路堤边坡稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 53-60.  
LIU Hua, HU Wenle, HE Pengli, et al. Mechanical properties of basalt fiber ash soil and stability analysis of widened embankment slope[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Nature Science Editon), 2021, 53(1): 53-60.
- [3] 吴刚, 顾冬生, 吴智深, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆形柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 19-23.  
WU Gang, GU Dongsheng, WU Zhishen, et al. Compar-

- ative study on seismic performance of circular concrete columns strengthened with BFRP and CFRP composites[J]. Industrial Construction, 2007, 37(6): 19-23.
- [4] OUYANG L J, GAO W Y, ZHEN B, et al. Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets: A comparative study[J]. Composite Structures, 2017, 162: 294-307.
- [5] LI Y, XIE M F, LIU J B. Experimental study on the seismic behaviour of reinforced concrete bridge piers strengthened by BFRP sheets[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 4169421: 1-11.
- [6] MA G, LI H, WANG J. Experimental study of the seismic behavior of predamaged reinforced-concrete columns retrofitted with basalt fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 04015016: 1-12.
- [7] 唐协波. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土方柱抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
TANG Xiebo. Study on seismic behavior of reinforced concrete square columns reinforced with basalt fiber cloth [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 催济东, 韩小雷, 龚涣钧, 等. 钢筋混凝土柱变形性能指标限值及其试验验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 593-603.  
CUI Jidong, HAN Xiaolei, Gong Huanjun, et al. Deformation limits of reinforced concrete columns and their experimental verification[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(5): 593-603.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structure: GB50010-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 姚谦峰, 陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
YAO Qianfeng, CHEN Ping. Civil engineering experiment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [11] ABAQUS Inc.. ABAQUS Analysis User's Manual [Z]. Lexington: ABAQUS Inc., 2012.
- [12] NEDJAR B. Elastoplastic-damage modelling including the gradient of damage: formulation and computational aspects[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(30): 5421-5451.
- [13] CHEN W F. Plasticity in reinforced concrete[M]. Newyork: McGraw-Hill, 1982.
- [14] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earth-quake ductility requirements[R]. America: University of California, 1966.

(编辑 沈波)