引用格式：亓立刚，黄哲文，鲁懿虬，等．基于OpenSEES的碳纤维增强材料(CFRP)筋混凝土柱抗震性能分析[J]．工业建筑，2025，55(10)：26-34．QI Ligang，HUANG Zhewen，LU Yiqiu，et al．OpenSEES-Based Seismic Performance Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Column[J]．Industrial Construction，2025，55(10)：26-34 (in Chinese)．DOI：10．3724/j．gyjzG25080803

基于OpenSEES的碳纤维增强材料(CFRP)筋混凝土柱抗震性能分析*

亓立刚[1]　黄哲文[1]　鲁懿虬[1]　周　颖[1]　杨　燕[2,3]　许国文[2,3]　韩泽斌[2,3]

(1．同济大学土木工程学院防灾减灾工程系，上海　200092；2．中国建筑第八工程局有限公司，上海　200122；3．上海碳纤维复合材料土木工程应用工程技术研究中心，上海　200122)

摘　要　为解决钢筋锈蚀引发的混凝土结构耐久性问题，提出以碳纤维增强复合材料(CFRP)筋替代钢筋，并系统研究CFRP筋混凝土柱的抗震性能。通过三组全尺寸CFRP筋混凝土柱的低周往复加载试验及OpenSEES数值模拟，揭示了轴压比ν、混凝土强度、剪跨比λ、纵筋配筋率ρ及配箍率ρ_s等关键设计参数的影响机制。研究表明：轴压比ν存在阈值效应，超限后筋材屈服风险激增，柱试件抗震性能劣化；不同于轴压比引起的承载力衰减，混凝土强度的提高显著提升柱承载能力和耗能能力，但加剧了脆性；剪跨比λ的增大诱发弯曲破坏迁移，承载力降低，CFRP筋线弹性本构制约了柱耗能的提升；纵筋配筋率ρ的增加提升了柱承载能力，延缓柱进入屈服状态及刚度退化，提升柱耗能能力；配箍率ρ_s对侧向刚度影响弱化，但高ρ_s通过约束核心混凝土维持了柱后期承载力的稳定性。

关键词　CFRP筋混凝土柱；低周往复荷载试验；OpenSEES；数值模拟；抗震性能

OpenSEES-Based Seismic Performance Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Column

QI Ligang[1]　HUANG Zhewen[1]　LU Yiqiu[1]　ZHOU Ying[1]　YANG Yan[2,3]　XU Guowen[2,3]　HAN Zebin[2,3]

(1．*Department of Disaster Mitigation for Structures，College of Civil Engineering，Tongji University，Shanghai* 200092，*China*；2．*China Construction Eighth Engineering Division Corp．，Ltd．，Shanghai* 200122，*China*；3．*Shanghai Engineering Research Center of CFRP Application Technology in Civil Engineering，Shanghai* 200122，*China*)

Abstract：To address durability issues in concrete structures caused by steel corrosion，this study proposed replacing steel reinforcement with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) tendons and systematically investigated the seismic performance of CFRP-reinforced concrete columns．Through low-cycle reversed loading tests on three full-scale specimens and OpenSEES numerical simulations，the influence mechanisms of key design parameters—including axial compression ratio (ν)，concrete strength，shear span ratio (λ)，longitudinal reinforcement ratio (ρ)，and stirrup ratio (ρ_s)—were elucidated．The results demonstrated that a threshold effect of axial compression ratio (ν)，beyond which the risk of reinforcement yielding surged and seismic performance deteriorated abruptly；unlike strength degradation induced by excessive ν，enhanced concrete strength significantly improved load-bearing capacity and energy dissipation but exacerbated brittle failure；increased shear span ratio (λ) shifed failure modes toward flexural dominance，reducing load capacity while the linear-elastic constitutive behavior of CFRP tendons limited energy dissipation enhancement；higher longitudinal reinforcement

* 中建股份科技研发计划(CSCEC-2022-Z-8)；上海市科技计划项目(20DZ2253000)；碳纤维建筑工程结构设计与施工技术研究与应用(2023-2-39)。

第一作者：亓立刚，博士研究生，正高级工程师，主要从事CFRP筋混凝土结构的研究，qiligang_cscec@163．com。

通信作者：鲁懿虬，博士，教授，主要从事抗震韧性混凝土结构的研究，yiqiu_lu@tongji．edu．cn。

收稿日期：2025-08-08

ratio (ρ) boost load capacity, delayed yielding initiation and stiffness degradation, and improved energy dissipation; stirrup ratio (ρ_s) exerted negligible effects on lateral stiffness but maintained post-yield strength stability through enhanced core concrete confinement at elevated ratios.

Keywords: CFRP-reinforced concrete column; low cyclic reversed loading test; OpenSEES; numerical simulation; seismic performance

0　引　言

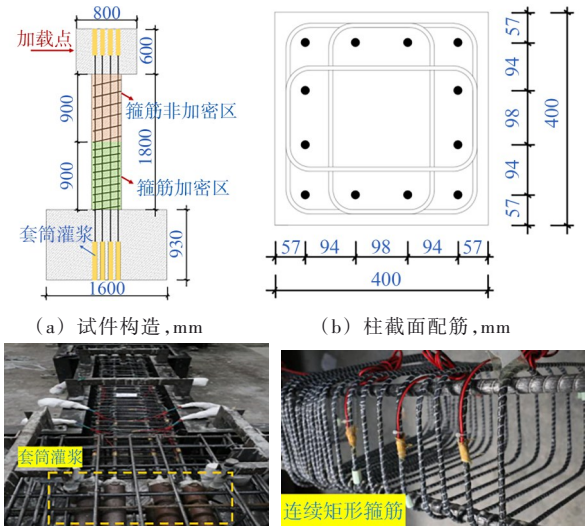
钢筋锈蚀问题的日益严重直接威胁钢筋混凝土结构的耐久性，不仅会诱发显著的经济损失与结构性能退化，甚至会导致结构倒塌风险增大。因此，具有高强度、轻质、优异耐腐蚀性的碳纤维增强复合材料（Carbon Fiber-Reinforced Polymer，CFRP）筋，已成为极具发展潜力的钢筋替代材料，并受到广泛关注[1-6]。然而，针对 CFRP 筋混凝土结构的研究起步相对较晚，且现有成果主要集中于其基本力学性能，如受弯性能[7]、抗剪性能[8-9]及抗压性能[10]，其抗震性能研究相对滞后。Sharbatdar[11]首次系统开展了 CFRP 筋混凝土柱的抗震性能试验研究，初步验证了 CFRP 筋在混凝土结构工程中应用的可行性；试验构件表现出脆性破坏模式及能量耗散能力不足等缺陷，为进一步改善其抗震性能指明了方向。目前，CFRP 筋混凝土结构在抗震性能方面尚未形成完善的研究体系，成为制约该类结构体系在实际工程中推广应用的关键因素。

为阐明 CFRP 筋混凝土结构的抗震机理，本研究团队于 2022 年设计并完成了系列 CFRP 筋混凝土柱的低周往复加载试验，系统考察了其抗震性能[12]。试验结果表明，CFRP 筋混凝土柱兼具较高的承载能力与抑制损伤发展的良好特性，体现了该结构体系优异的抗震性能。

基于试验研究成果，本研究采用 OpenSEES 非线性有限元分析平台，建立了 CFRP 筋混凝土柱数值模型。经试验结果验证后，对数值模型系统开展参数研究，揭示了剪跨比、CFRP 筋配筋率、混凝土强度、箍筋约束作用及轴压比等关键设计参数对其抗震性能的影响规律，研究结果可为该类柱的抗震设计与工程应用提供依据。

1　试验构件

本研究设计制作了三个全 CFRP 筋混凝土柱试件，其构造详见图 1，关键设计参数列于表 1。纵筋为国产大丝束螺旋压纹 CFRP 筋（中国石化上海石油化工股份有限公司生产）。基于 CFRP 筋弯折后强度与弹性模量显著折减的特性，连续螺纹箍筋可有效减轻此类折减，并增强对纵筋及核心区混凝土的约束效应[13-15]。因此，采用定制热塑成型矩形螺旋 CFRP 箍筋（中国复合材料中复碳芯集团生产），其由 CFRP 螺旋压纹筋加工而成。



（a）试件构造，mm　（b）柱截面配筋，mm

（c）试件套筒灌浆　（d）连续矩形箍筋

图 1　柱试件构造

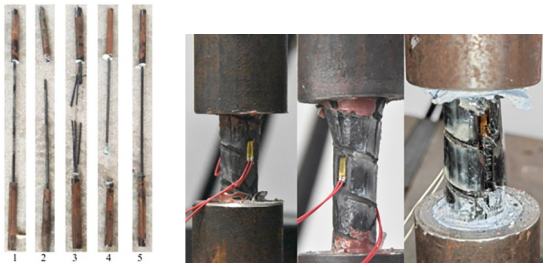
Fig. 1　Structural detailing of column specimens

表 1　试验试件设计参数

Table 1　Design parameters of test specimens

试件编号	纵筋数量	纵筋直径/mm	纵筋配筋率/%	箍筋规格/mm		设计轴压比	混凝土强度等级
				加密区	非加密区		
1	12	14	1.15	8@100	8@150	0.25	C50
2	12	14	1.15	8@100	8@150	0.42	C50
3	12	14	1.15	6@60	6@150	0.42	C50

针对CFRP筋材的拉、压本构关系，分别开展了单轴拉伸与压缩材性试验。受拉性能测试依据GB/T 26743—2011《结构工程用纤维增强复合材料筋》[16]及GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》[17]，完成五组试件的拉拔试验；试件端部均采用环氧树脂填充的钢套筒锚具实现夹持。受压性能测试参考GB/T 1448—2005《纤维增强塑料压缩性能试验方法》[18]，设计制备了多组受压构件；为抑制端部压碎失效对筋材受压特性的干扰，构件端部增设了由环氧树脂填充的钢管[19-20]。图2呈现了筋材试验的典型破坏模式：拉伸试验表现为筋材拉断爆裂，压缩试验呈纵向劈裂形态。图3、图4分别为拉、压试验曲线，最终取各试件曲线均值作为选定本构曲线，用于定义后续数值模型中CFRP筋材料参数。



（a）受拉试验　　（b）受压试验

图2　筋材材性试验破坏模式

Fig. 2　Structural detailing of column specimen

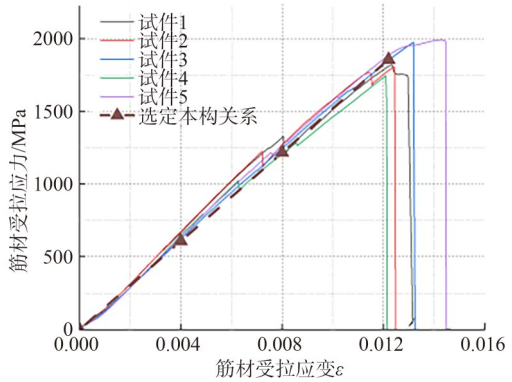


图3　CFRP筋受拉应力-应变曲线

Fig. 3　Tensile stress-strain curves of CFRP tendons

试件总高度为1.8 m，沿柱轴向采用双区段约束机制：底部900 mm高度配置加密箍筋，顶部900 mm高度配置非加密箍筋，形成梯度约束效应。通过600 mm高加载梁构成反力传递系统。根据几何中轴加载原则，试件有效剪跨高度取2.1 m，对应剪跨比为5.25。纵筋端部采用全包裹式套筒灌浆锚固系统，以满足CFRP筋的可靠锚固要求。

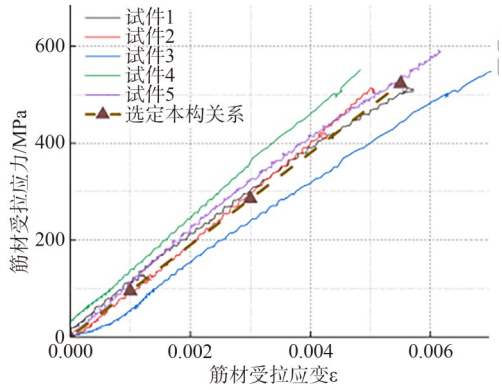


图4　CFRP筋受压应力-应变曲线

Fig. 4　Compressive stress-strain curves of CFRP tendons

2　有限元模型

2.1　模型建立

基于试验试件几何尺寸，在OpenSEES平台建立的数值分析模型见图5。采用基于位移的梁柱单元将构件沿高度方向离散为6个等分单元。沿单元截面高度设置7个纤维控制节点（定义纤维截面离散）。每个单元分配5个高斯积分点，赋予多材料纤维截面属性。为提高模拟精度，对核心区与保护层混凝土分别实施差异化网格划分：核心区混凝土采用10×10网格，保护层混凝土采用10×2网格，以确保网格过渡协调。

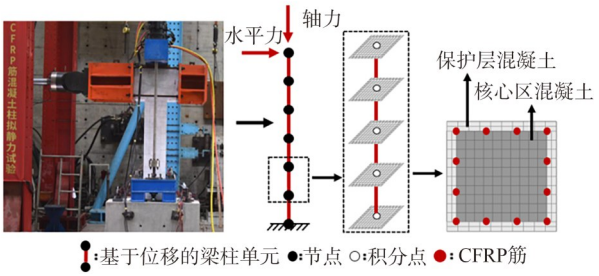


图5　OpenSEES有限元模型示意

Fig. 5　Schematic diagram of OpenSEES finite element model

2.2　材料本构模型

2.2.1　受压骨架曲线分段表达

核心区与保护层混凝土均采用OpenSEES内置的Concrete02模型（修正Kent-Park模型，考虑受拉性能）模拟，其压应力-应变骨架曲线如图6所示，并按应变范围分成三段，各段表达式见式（1）：

上升段（$\varepsilon_c \leqslant \varepsilon_0$）：

$$\sigma_c = Kf_c'\left[2\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - (\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0})^2\right] \tag{1a}$$

下降段($\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leqslant \varepsilon_u$)：

$$\sigma_c = Kf_c'\left[1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)\right] \tag{1b}$$

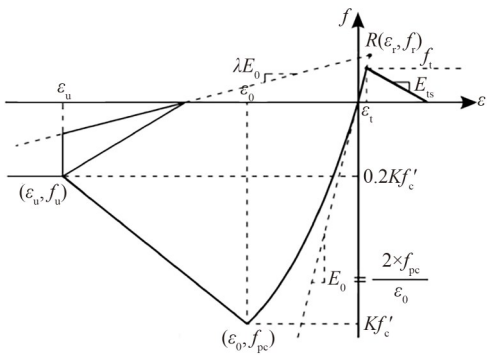
平台段($\varepsilon_c > \varepsilon_u$)：

$$\sigma_c = 0.2Kf_c' \tag{1c}$$

其中　$K = 1 + \dfrac{\rho_s f_{yh}}{f_c'}$

$$Z = \frac{0.5}{\dfrac{3 + 0.29f_c'}{145f_c' - 1000} + 0.75\rho_s\sqrt{\dfrac{h'}{s_h}} - 0.002K}$$

式中：ε_0为峰值压应力对应压应变；ε_u为压应力降至$0.2Kf_c'$对应的压应变；K为箍筋约束混凝土强度提高系数；Z为应变软化段斜率系数；f_c'为混凝土圆柱体抗压强度，MPa；f_{yh}为CFRP箍筋极限抗拉强度，取为1800 MPa；ρ_s为配箍率；h'为核心区约束混凝土宽度，mm；s_h为箍筋间距，mm。



注：λ为剪跨比。

图 6　Concrete02模型应力-应变骨架曲线

Fig. 6　Stress-strain skeleton curve of Concrete02 constitutive model

2.2.2　Concrete02模型特征点的试验标定

依据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》[21]，通过标准圆柱体试件轴压试验测得C50非约束混凝土抗压强度为56.7 MPa。

保护层混凝土(无约束)：采用Popovics模型[22]，其由式(2)表征：

$$\sigma = f_{co}\frac{(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}}) \times n_c}{n_c - 1 + (\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}})^{n_c}} \tag{2}$$

其中　$n_c = 0.4 \times 10^{-3} \times f_{co} \times 145.04 + 1.0$

式中：ε_{co}为混凝土峰值压应力对应的应变，取值为0.002；ε_{cu}为极限压应变，取值为$2\varepsilon_{co}$；f_{co}为峰值压应力，取值为56.7 MPa。

核心区混凝土(CFRP箍筋约束)：采用Mander模型[23]，其由式(3)表征：

$$\sigma = f_{cc}\frac{\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \times r}{r - 1 + (\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}})^r} \tag{3a}$$

$$f_{cc} = f_{co}(-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f_{co}}} - 2\frac{f_l}{f_{co}}) \tag{3b}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}(1 + 5 \times (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)) \tag{3c}$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_{co}} \tag{3d}$$

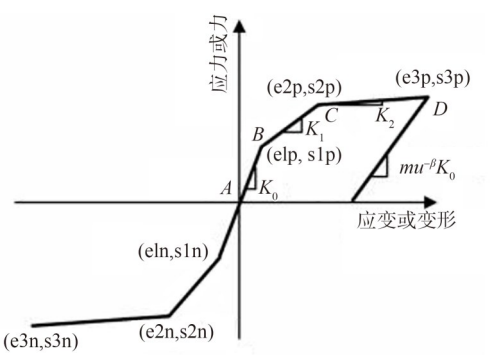
$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{3e}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \tag{3f}$$

式中：f_{cc}为核心区混凝土峰值压应力；ε_{cc}为峰值压应变；ε_{cu}为极限压应变，通过能量平衡迭代法求解；f_{cu}为核心区混凝土极限压应力，由ε_{cu}代入式(3a)导出。

CFRP筋采用OpenSEES的Hysteretic Material本构模型(图7)模拟其双折线滞回行为。该模型通过定义加载(正向)与卸载(负向)路径上的三对特征点(应变ε、应力σ)来绘制骨架曲线，详见表2。受拉路径(正向)应变点ε选择0.004、0.008、0.0122，受拉应力取试件受拉曲线均值；受压路径(负向)应变点ε选择-0.001、-0.003、-0.0055，受拉应力取试件受压曲线均值；选定本构关系与试件实测应力-应变曲线关系的对比详见图3、4。此外，需标定以下关键参数以反映CFRP的脆性特性和滞回行为：捏拢效应参数pinchX、pinchY，累积损伤演化参数damage1、damage2，以及卸载刚度退化参数β。

参照OpenSEES理论手册，建议并兼顾CFRP



注：mu为模型的延性系数。

图 7　Hysteretic Material模型滞回响应示意

Fig. 7　Schematic diagram of hysteretic response for the Hysteretic Material constitutive model

表2 Hysteretic Material模型特征点参数

Table 2 Characteristic point parameters of the Hysteretic Material model

应变ε						应力σ/MPa					
正向			负向			正向			负向		
e1p	e2p	e3p	e1n	e2n	e3n	s1p	s2p	s3p	s1n	s2n	s3n
0.004	0.008	0.0122	−0.001	−0.003	−0.0055	600	1216	1854.9	−95	−285	−522.5

筋材的低延性特征（即微小损伤后迅速破坏的特性），选取如下参数组合：pinchX=0.7，pinchY=0.5（模拟明显的捏拢效应），damage1=0.02，damage2=0.02（设定较小的累积损伤阈值以快速响应），β=0（忽略卸载刚度退化，反映CFRP准弹性特性）。该参数组合通过计算得到的滞回曲线形态与预期行为相符。

3 有限元模型分析

3.1 试验与有限元结果对比

三组试件有限元模型关键抗震性能参数见表3，其滞回曲线、骨架曲线及侧向刚度退化规律与试验结果对比如图8所示。

表3 抗震性能指标试验值与模拟值对比

Table 3 Comparison of the measured and predicted seismic performance indices

试件编号	数据来源	正向屈服点		正向极限点		位移延性系数μ
		屈服位移Δ_y/mm	屈服承载力M_y/(kN·m)	极限位移Δ_u/mm	极限承载力M_u/(kN·m)	
1	试验	33.46	352.44	72.18	434.60	2.17
	模拟	34.58	360.53	73.50	458.74	2.13
2	试验	26.30	398.89	73.37	469.31	2.80
	模拟	24.70	360.19	73.50	439.82	2.98
3	试验	25.35	375.01	71.53	451.98	2.87
	模拟	26.40	364.24	73.50	449.40	2.78

结果表明：有限元模型有效捕捉了试件的滞回特性与骨架曲线演化规律；位移响应（屈服位移Δ_y、极限位移Δ_u）模拟误差较小，平均相对误差分别为4.52%与1.59%；承载力响应（屈服承载力M_y、极限承载力M_u）精度良好，平均相对误差分别为4.96%与4.14%；侧向刚度退化规律高度吻合，表明模型可准确表征反复荷载下的刚度衰减特性；基于等效弹塑性能量法计算的位移延性系数μ平均误差为3.80%。综上，各性能指标误差均小于5%，验证了模型对CFRP筋混凝土柱抗震行为的可靠表征能力。据此，后续将以直径14 mm CFRP筋混凝土柱为基准模型，开展基于剪跨比λ、轴压比ν、混凝土强度、纵筋配筋率ρ及配箍率ρ_s等参数的抗震性能影响研究。

3.2 轴压比ν影响分析

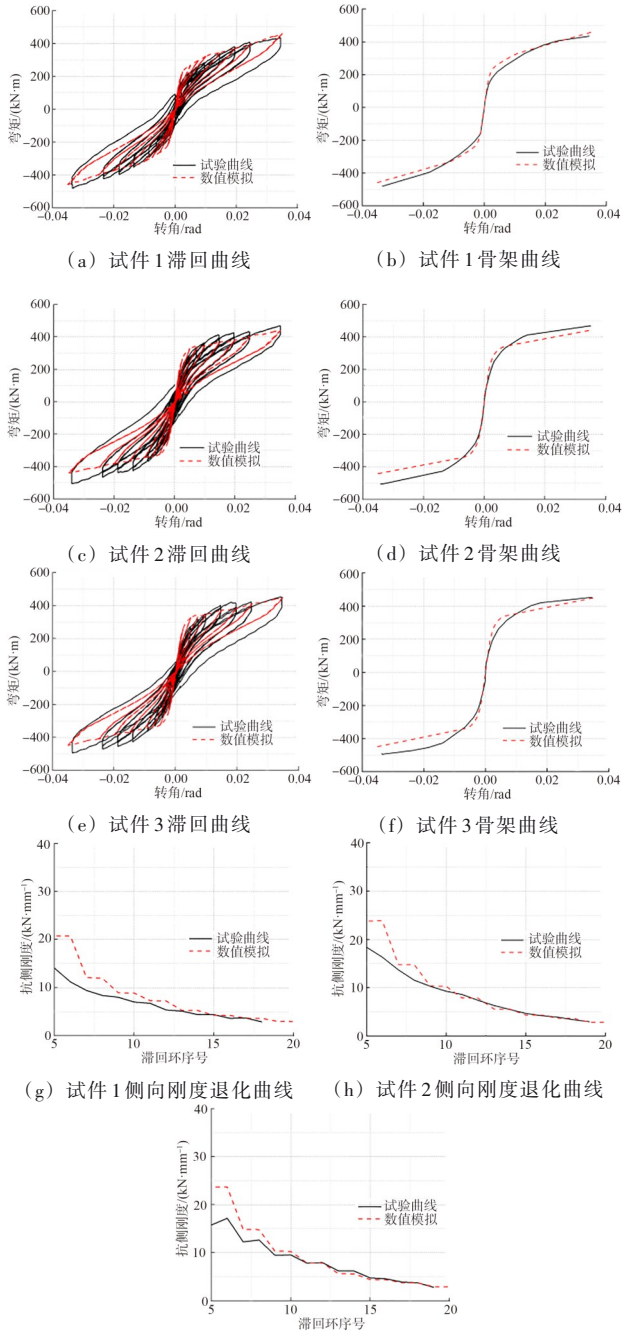
依据GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》[24]中框架柱抗震设计规定，在剪跨比λ、纵筋配筋率ρ、混凝土强度等级及配箍率ρ_s保持恒定的条件下，建立ν=0.1~0.7的数值模型，量化轴压比对CFRP筋混凝土柱抗震性能的影响规律。

图9与表4分别对比不同轴压比试件的滞回特性、骨架曲线、侧向刚度退化规律及关键抗震指标。研究表明：轴压比增大显著增强了核心区混凝土三向受压状态，充分激发箍筋约束效应，提升累积耗能能力。当ν<0.4时，初始侧向刚度随ν增大而提高；但ν≥0.4后，纵向CFRP筋屈曲风险激增[12]，导致截面有效抗弯刚度显著劣化；同时，ν≥0.4致使受压区筋材提前达到极限应变[12]；试验中，在相近轴压比下，构件受压区筋材出现损伤，而受拉区筋材未发生断裂[12]，这进一步印证了轴压比增大对受压区筋材提前达到极限应变的影响；相较于ν=0.4，当ν增至0.7时，试件屈服承载力M_y降低18.8%，极限承载力M_u降低22.42%；同时，屈服位移减少21.1%。

3.3 混凝土强度等级

在剪跨比λ、纵筋配筋率ρ、轴压比ν及配箍率ρ_s恒定的条件下，建立混凝土强度等级为C30~C60的基准模型，系统研究其对CFRP筋混凝土柱抗震性能的影响。

图10与表5结果表明：混凝土强度提升（C30→C60）未显著改变滞回曲线形态，但累积耗能能力随强度提高线性增长；屈服位移随混凝土强度提高降低，C60试件较C30试件降低14.4%，这缘于核心区混凝土刚度增大导致的试件弹性阶段缩短；试件初始侧向刚度提升，但加剧了脆性破坏倾向；屈服承载力M_y与极限承载力M_u同步提升，C60试件较C30



（a）试件 1 滞回曲线　（b）试件 1 骨架曲线

（c）试件 2 滞回曲线　（d）试件 2 骨架曲线

（e）试件 3 滞回曲线　（f）试件 3 骨架曲线

（g）试件 1 侧向刚度退化曲线　（h）试件 2 侧向刚度退化曲线

（i）试件 3 侧向刚度退化曲线

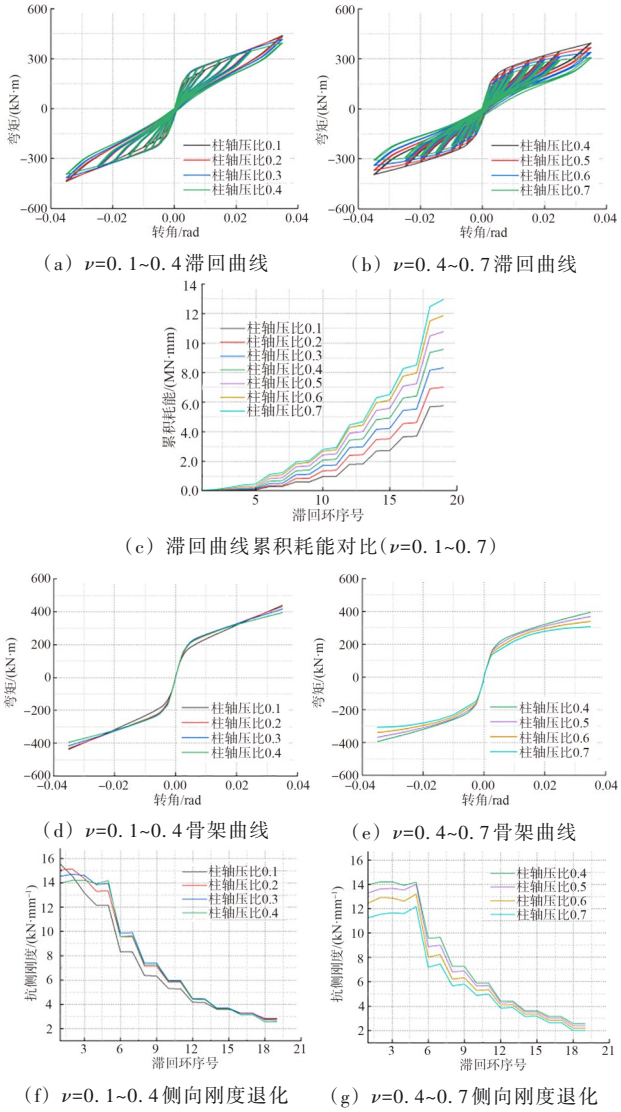
图 8　试验与数值模拟结果对比

Fig. 8　Comparison of experimental and numerical simulation results

试件分别提高 16. 1% 与 21. 6%。区别于轴压比引起的承载力衰减，混凝土强度提升直接增强截面抗压能力，而非诱发筋材屈曲。

3. 4　剪跨比 λ

在轴压比 ν、纵筋配筋率 ρ、混凝土强度及配箍率 ρ_s 恒定的条件下，建立 λ=3. 75~5. 25 的五组 CFRP 筋混凝土柱数值模型，系统研究剪跨比对抗震性能的影响机制。



（a）ν=0. 1~0. 4 滞回曲线　（b）ν=0. 4~0. 7 滞回曲线

（c）滞回曲线累积耗能对比（ν=0. 1~0. 7）

（d）ν=0. 1~0. 4 骨架曲线　（e）ν=0. 4~0. 7 骨架曲线

（f）ν=0. 1~0. 4 侧向刚度退化　（g）ν=0. 4~0. 7 侧向刚度退化

图 9　轴压比参数化分析结果

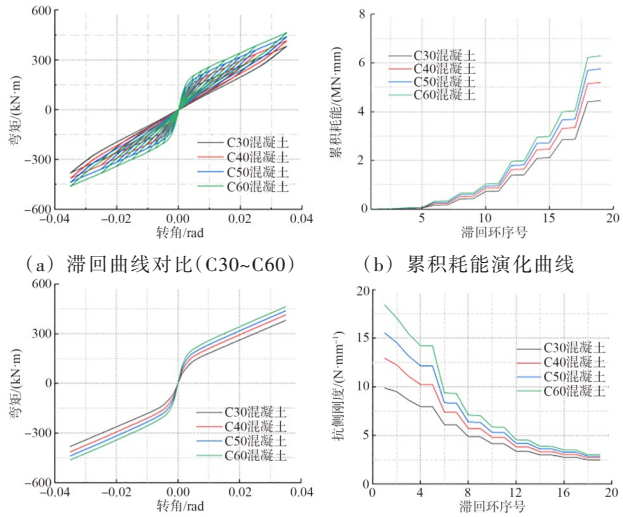
Fig. 9　Parametric analysis results of axial compression ratio

表 4　轴压比试件抗震性能指标

Table 4　Seismic performance indices of axial compression ratio specimens

轴压比	正向屈服点		正向极限点	
	Δ_y/mm	M_y/(kN · m)	Δ_u/mm	M_u/(kN · m)
0.1	50.41	350.8	73.50	439.3
0.2	45.24	337.9	73.50	431.5
0.3	41.73	326.2	73.50	416.3
0.4	38.88	312.4	73.50	394.6
0.5	36.35	296.0	73.50	368.2
0.6	33.83	277.3	73.50	338.5
0.7	30.69	253.8	73.50	306.1

图 11 与表 6 结果表明：当 λ 从 3. 75 增至 5. 25，试件的破坏模式由剪切控制迁移至弯曲控制，屈服承载力 M_y 降低 27. 5%，极限承载力 M_u 降低 25. 3%。弯曲破坏主导下，柱试件初始侧向刚度衰减，柱试件屈服位移随 λ 增大呈单调递增趋势，λ 为 5. 25 的试件较 λ 为 3. 75 的试件屈服位移增大 26. 4%。钢筋混



（a）滞回曲线对比（C30~C60）　（b）累积耗能演化曲线

（c）骨架曲线对比　（d）侧向刚度退化规律对比

图10　混凝土强度等级参数化分析结果

Fig. 10　Parametric analysis results of concrete strength grades

表5　混凝土强度等级试件抗震性能指标

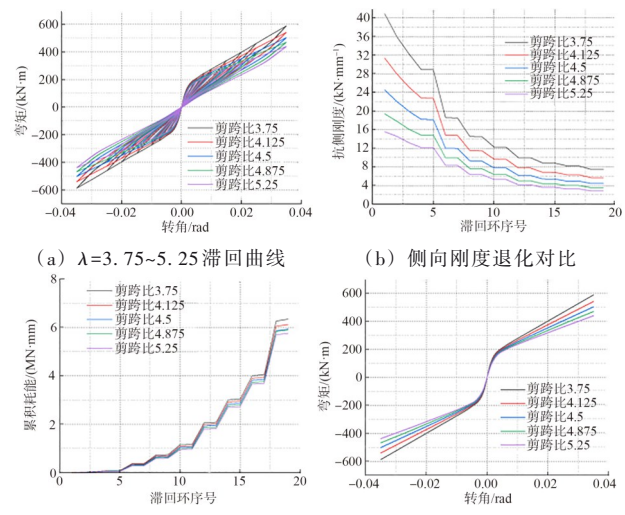
Table 5　Seismic performance indices of concrete strength grades

混凝土强度等级	正向屈服点		正向极限点	
	Δ_y/mm	M_y/(kN·m)	Δ_u/mm	M_u/(kN·m)
C30	56.02	315.3	73.50	381.3
C40	52.83	335.5	73.50	414.6
C50	50.41	350.8	73.50	439.3
C60	47.95	366.1	73.50	463.6

凝土柱中，λ增大通过延性铰区扩展显著提升塑性耗能[12]；但CFRP筋混凝土柱因线弹性本构特征，滞回曲线呈现严重捏缩效应，耗能能力不受破坏模式转变影响，而是仅由CFRP筋材料本构特征主导。

3.5　纵筋配筋率ρ

在轴压比ν、剪跨比λ、混凝土强度及配箍率ρ_s恒



（a）λ=3.75~5.25滞回曲线　（b）侧向刚度退化对比

（c）累计耗能演化曲线　（d）骨架曲线对比

图11　剪跨比参数化分析结果

Fig. 11　Parametric analysis results of shear span ratio

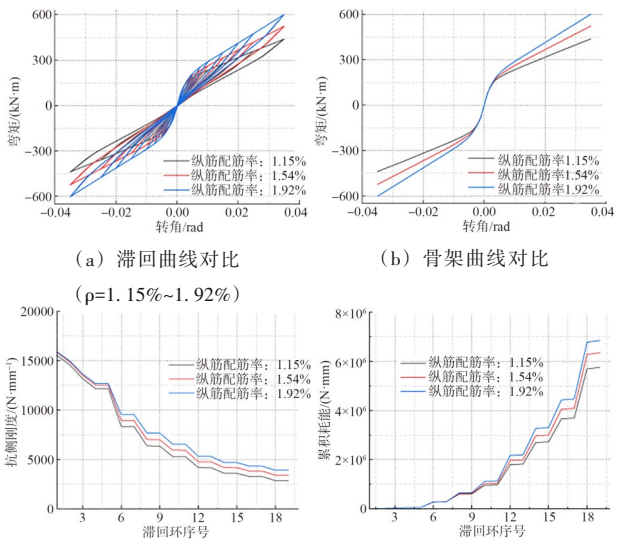
表6　剪跨比试件抗震性能指标

Table 6　Seismic performance indices of speciemens with different shear span ratios

剪跨比	正向屈服点		正向极限点	
	Δ_y/mm	M_y/(kN·m)	Δ_u/mm	M_u/(kN·m)
3.75	39.88	483.6	52.50	588.0
4.125	42.82	440.9	57.75	541.4
4.5	45.62	406.4	63.00	503.0
4.875	48.05	377.1	68.25	469.3
5.25	50.41	350.8	73.50	439.3

定的条件下，建立ρ=1.15%（单侧4根14 mm CFRP筋）、1.54%（单侧5根14 mm CFRP筋）及1.92%（单侧6根14 mm CFRP筋）的CFRP筋混凝土柱模型，系统研究纵筋配筋率对抗震性能的影响机制。

图12与表7结果表明：ρ由1.15%增至1.92%，试件屈服承载力M_y提升41.8%，极限承载力M_u提升37.1%，截面抗弯能力随纵筋配筋面积线性增强；屈服位移同步增加10.9%，ρ的增加延缓了柱试件进入屈服工作状态，反映CFRP筋弹性变形主导的位移响应特性。高纵筋配筋率ρ值有效延缓刚度退化速率，使得累积耗能能力提升，这缘于筋材弹性应变能储备的增加。



（a）滞回曲线对比（ρ=1.15%~1.92%）　（b）骨架曲线对比

（c）侧向刚度退化规律　（d）累积耗能演化曲线

图12　纵筋配筋率参数化分析结果

Fig. 12　Parametric analysis results of longitudinal reinforcement ratio

表7　纵筋配筋率试件抗震性能指标

Table 7　Seismic performance indices of speciemens with different longitudinal reinforcement ratios

纵筋配筋率/%	正向屈服点		正向极限点	
	Δ_y/mm	M_y/(kN·m)	Δ_u/mm	M_u/(kN·m)
1.15	50.41	350.8	73.50	439.3
1.54	53.85	426.5	73.50	524.1
1.92	55.93	497.5	73.50	602.1

3.6　配箍率ρ_s

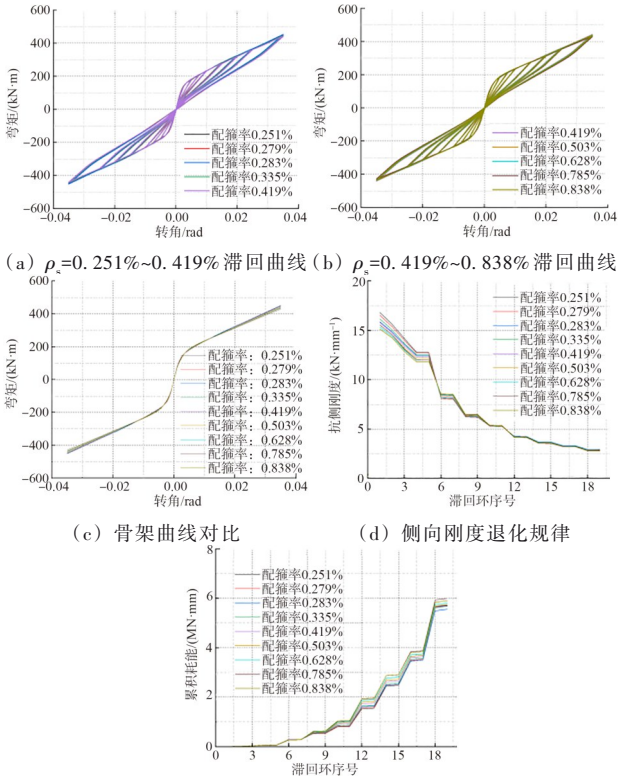
在轴压比ν、纵筋配筋率ρ、混凝土强度等级恒定的条件下，建立 9 组 CFRP 筋混凝土柱模型（3 种箍筋直径+7 种间距组合），系统研究配箍率对抗震性能的影响机制。试件配箍率ρ_s范围为 0.251%~0.838%。

OpenSEES 有限元模型无法直接模拟箍筋实体单元，其约束效应通过修正核心区混凝土本构模型予以体现。因此，不同配箍率对模型的影响需通过调整核心区混凝土（采用 Mander 本构模型）的参数实现。具体方法为：根据箍筋间距及直径计算配箍率；依据式(4a)及(4b)计算构件截面两方向的约束应力；进而通过式(3b)计算核心区混凝土（约束混凝土）的等效约束应力。

$$\rho_s = \frac{As}{s \times b} \tag{4a}$$

$$f_l = k_e \rho_s f_{yh} \tag{4b}$$

图 13 及表 8 分析结果表明：不同配箍率下柱试件滞回曲线形状高度相似，屈服位移最大差异仅为 2.76%（ρ_s：0.251%→0.838%）；屈服承载力M_y与极限承载力M_u波动范围小于 4.4%，不同ρ_s试件初始抗侧刚度相近，这缘于 CFRP 筋的高弹性模量主导截面刚度削弱了箍筋约束的刚度。但加载后期，高ρ_s提升了核心区混凝土的极限压应变。区别于轴压比增大导致承载力的衰减，箍筋的有效约束维持承载力稳定性，使得累积耗能随ρ_s增大而呈线性增长趋势。



（a）ρ_s=0.251%~0.419%滞回曲线　（b）ρ_s=0.419%~0.838%滞回曲线

（c）骨架曲线对比　（d）侧向刚度退化规律

（e）累积耗能演化曲线

图 13　配箍率参数化分析结果

Fig. 13　Parametric analysis results of stirrup ratio

表 8　配箍率试件抗震性能指标

Table 8　Seismic performance indices of speciemens with different stirrup ratios

配箍率ρ_s/%	箍筋配置	正向屈服点		正向极限点	
		Δ_y/mm	M_y/(kN·m)	Δ_u/mm	M_u/(kN·m)
0.251	8@200	51.11	361.8	73.50	450.4
0.279	8@180	51.06	360.0	73.50	448.4
0.283	6@100	51.57	364.0	73.50	452.8
0.335	8@150	50.90	356.8	73.50	445.2
0.419	8@120	50.66	353.2	73.50	441.7
0.503	8@100	50.41	350.8	73.50	439.3
0.628	8@80	50.08	348.3	73.50	437.0
0.785	10@100	49.18	340.4	73.50	429.0
0.838	8@60	49.70	346.0	73.50	435.2

4　结　论

针对当前 CFRP 筋混凝土结构抗震性能研究尚不完善的现状，本课题组基于已完成的全尺寸 CFRP 筋混凝土柱低周往复荷载试验，在 OpenSEES 平台中建立了数值模型。有限元分析结果与试验结果吻合良好，验证了模型的可靠性。在此基础上，系统分析了轴压比ν、混凝土强度、剪跨比λ、纵筋配筋率ρ及配箍率ρ_s等参数对 CFRP 筋混凝土柱抗震性能的影响机制，主要结论如下：

1）采用 Hysteretic 及 Concrete02 材料本构建立的有限元模型，其滞回曲线、骨架曲线、侧向刚度退化规律及延性系数与试验结果吻合良好，验证了该模型可准确模拟 CFRP 筋混凝土柱的抗震性能。

2）轴压比ν对 CFRP 筋混凝土柱抗震性能的影响呈现显著阈值效应，当ν<0.4 时，ν的增大显著提升了柱试件的耗能能力与初始侧向刚度；当ν≥0.4 时，纵向 CFRP 筋屈曲风险激增，柱试件抗震性能劣化，加剧脆性破坏倾向。

3）混凝土强度的提高增大了截面抗压能力，显著提升柱试件的承载能力和耗能能力，这与轴压比引起的承载力衰减机制不同，但其耗能能力仍然不足；同时，混凝土强度提升将导致柱试件较早屈服，增大脆性破坏倾向。

4）剪跨比λ的增大诱发了柱破坏模式由剪切

控制向弯曲控制迁移,降低了其屈服承载力、极限承载力及初始侧向刚度。与钢筋混凝土柱不同,CFRP筋本构关系呈线弹性,限制了柱试件的耗能能力。因此,λ的增大未能显著提升柱试件的耗能能力。

5)纵筋配筋率ρ的增加显著提高了柱试件的屈服承载力与极限承载力;同时,高ρ值会延缓试件进入屈服状态及刚度退化,并使得纵筋弹性应变能储备增加,提升柱试件的累积耗能能力。

6)配箍率ρ_s的变化对屈服位移、承载力及初始侧向刚度的影响显著弱化,其根本机理为CFRP筋高弹性模量与混凝土的显著差异,大幅抑制了箍筋约束的刚度贡献。然而,ρ_s增大显著增强了核心混凝土的约束效应,维持了柱试件加载后期承载力的稳定性。

参 考 文 献

[1] GUDONIS E, TIMINSKAS E, GRIBNIAK V, et al. FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design[J]. Engineering Structures and Technologies, 2013, 5(4): 147-158.

[2] MANALO A C, MENDIS P, BAI Y, et al. Fiber-reinforced polymer bars for concrete structures: State-of-the-practice in Australia[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(1), 05020007.

[3] SAID A M, NEHDI M L. Use of FRP for RC frames in seismic zones: Part II. Performance of steel-free GFRP-reinforced beam-column joints[J]. Applied Composite Materials, 2004, 11: 227-245.

[4] BENMOKRANE B, ZHANG B, LAOUBI K, et al. Mechanical and bond properties of the new generation of carbon fibre reinforced polymer reinforcing bars for concrete structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2): 338-343.

[5] GUO X, XIONG C, JIN Z, et al. A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sea sand concrete environmental effects[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 58, 105038.

[6] YUN H D, KIM S H, CHOI W. Determination of mechanical properties of sand-coated carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rebar[J]. Polymers, 2023, 15(9), 2186.

[7] 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.

[8] ABED F, EL-CHABIB H, ALHAMAYDEH M. Shear characteristics of GFRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(16): 1063-1073.

[9] BENTZ E C, MASSAM L, COLLINS M P. Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(6): 637-646.

[10] SALEH E, ALJABERI M. Evaluation of Stability Resistance Factor for Slender Concrete Columns Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2023, 27(1), 04022102.

[11] SHARBATDAR M K. Concrete columns and beams reinforced with FRP bars and grids under monotonic and reversed cyclic loading[D]. Canada: University of Ottawa, 2003.

[12] 亓立刚,刘超然,周颖,等. CFRP筋混凝土柱抗震性能拟静力试验研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(10): 224-232.

[13] 宋荣基, 江世永, 余晗健, 等. 全CFRP筋混凝土柱低周反复荷载试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(3): 26-31.

[14] ABDALLAH A E M, EL-SALAKAWY E. Confinement properties of GFRP-reinforced concrete circular columns under simulated seismic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(2), 04020088.

[15] KHARAL Z, SHEIKH S A. Seismic behavior of square and circular concrete columns with GFRP reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(1), 04019059.

[16] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 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, 2011.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准: GB 50608—2020[S]. 中国计划出版社, 2020.

[18] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料压缩性能试验方法: GB/T 1448—2005[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.

[19] 周继凯,杜钦庆,袁明亮,等. GFRP筋抗压力学性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008(4): 542-545.

[20] 孙丽,王汉斑. GFRP筋受压力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 1037-1042.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.

[22] SANDOR P. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(5): 583-599.

[23] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计标准: GB/T 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2024.