

DOI:10.11918/201906169

CFRP 加固混凝土柱轴压性能尺寸效应试验分析

王作虎¹, 申书洋¹, 崔宇强², 杨 菊¹

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089)

摘 要: 为了研究碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢筋混凝土柱轴压性能的尺寸效应, 设计了 3 组 30 根几何相似的 CFRP 加固钢筋混凝土柱, 对其进行了轴心受压破坏试验. 试验参数主要包括构件尺寸、钢筋配置和加载方式, 研究了 CFRP 加固混凝土柱在轴压荷载下的破坏形态、极限强度、峰值应力、变形能力和残余变形等性能与构件尺寸的关系. 研究结果表明: 相同尺寸的 CFRP 加固钢筋混凝土柱比素混凝土柱的极限强度有不同程度的提高; CFRP 加固钢筋混凝土柱的峰值应力随着尺寸的增大, 呈先增大后减小的趋势, 归一化轴向变形能力和残余变形随着构件尺寸的增加逐渐减小; 不同的加载方式对于 CFRP 加固钢筋混凝土柱的承载力和极限位移影响不大.

关键词: CFRP; 轴压性能; 重复荷载; 尺寸效应; 钢筋混凝土柱

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)08-0112-09

Experimental analysis on size effect of axial compressive behavior for reinforced concrete columns strengthened with CFRP

WANG Zuohu¹, SHEN Shuyang¹, CUI Yuqiang², YANG Ju¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2. China IPPR International Engineering Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: To study the size effect of reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under axial compression loading, three groups of thirty geometrically similar reinforced concrete columns strengthened with CFRP were designed and tested. Test parameters including column size, reinforcement layout, and loading history were studied, and the relationships between the properties of the proposed columns (such as failure mode, ultimate strength, peak stress, and residual deformation) and column size were investigated under axial compression loading. Experimental results show that with the same size, the ultimate strength of the reinforced concrete columns strengthened with CFRP was higher than that of the plain concrete columns. As the size of the concrete columns strengthened with CFRP increased, the peak stress first increased and then decreased. The normalized axial deformability and residual deformation of the concrete columns strengthened with CFRP decreased with the increase in the size of the columns. Different loading histories had little effect on the bearing capacity and ultimate displacement of the concrete columns strengthened with CFRP.

Keywords: CFRP; axial compressive behavior; repeated and reversed loading; size effect; reinforced concrete columns

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, 简称 FRP)以其自身轻质、高强、抗腐蚀、耐久性好等优势, 越来越广泛地应用于土木工程界, 用 FRP 包裹粘贴混凝土柱进行加固是一种极其有效的加固方式. 国内外学者在试验的基础上对混凝土圆柱和矩形柱进行了大量研究, 提出了非常多不同的强度模型和应力-应变关系曲线. 文献[1-8]研究了圆形截面混凝土柱的本构关系, 对于矩形截面混凝土柱

的本构关系见文献[9-12]. 另外, 文献[13-15]还提出了 FRP 约束混凝土柱在重复受压荷载下的应力-应变曲线. 但是现有试验对于 FRP 加固钢筋混凝土柱在重复荷载作用下力学性能的探讨并不多, 并且绝大部分的研究对象是圆柱试件, 而未对矩形截面柱深入研究. 目前大部分学者主要研究的是 FRP 加固素混凝土柱, 而忽略了钢筋对混凝土柱轴压性能的影响. 此外, 现有试验中大部分研究的是 FRP 加固小尺寸试件, 对大尺寸构件的研究相对较少.

鉴于国内外的研究现状, 笔者通过对 30 根重复荷载作用下的 CFRP 加固混凝土柱进行轴心受压性能

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701104);
国家自然科学基金(51308028, 51878028)

作者简介: 王作虎(1979—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 申书洋, shenshuyang@stu.bucea.edu.cn

的尺寸效应试验,分析了不同尺寸、不同配筋和加载历史对试件轴压性能的影响,为工程实践提供参考.

1 试验设计

1.1 试件设计

试验共设计了 30 根正方形截面的混凝土柱,根据 GB 20608—2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》的规定,如果矩形混凝土柱的截面尺寸大于 600 mm 时,应先进行圆弧化处理,再采用 FRP 进行加固,所以采用 FRP 直接粘贴方式进行加固混凝土构件的最大截面尺寸为 600 mm. 将大、中、小 3 个系列的方柱截面边长分别设计为 600、400、200 mm, $h/b=3$ (b 为截面边长, h 为柱高). 考虑了

以下参数的影响:混凝土柱的不同尺寸、不同配筋和加载方式. 混凝土柱均采用横向全包裹 CFRP 的方式进行加固,为保证所有试件约束刚度相等,小、中、大 3 个系列试件的中部分别包裹 1、2、3 层 CFRP 布,为了防止局部承压破坏,端部分别包裹 2、3、4 层 CFRP,宽度为 100 mm. 混凝土构件浇筑、养护完成后,将构件的角部打磨成倒角,倒角半径等于 0.16 倍柱截面边长. 试件详细参数见表 1,编号中字母 S、L 和 H 分别表示方形截面柱、CFRP 加固层数和配筋情况,S 和 L 后面的 1、2、3 分别表示小、中、大 3 种构件,H 后面数字 0、1、2 分别代表素混凝土、仅配纵向钢筋、同时配有箍筋和纵向钢筋的混凝土构件. 字母 P 代表部分加卸载,字母 C 代表完全加卸载.

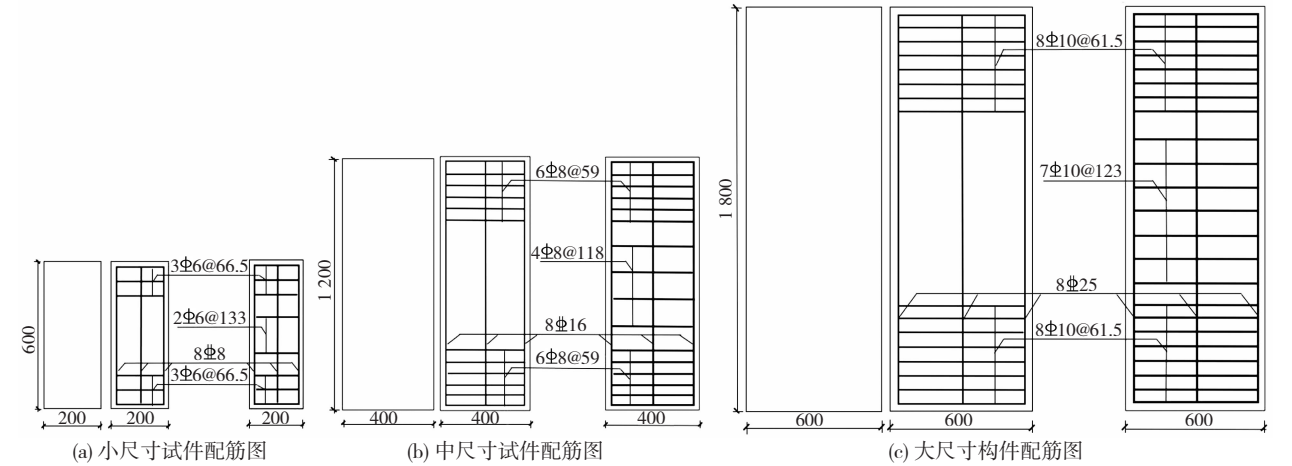


图 1 试件尺寸及配筋图 (mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement details of specimens (mm)

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimen design parameters

试件编号	截面尺寸/ mm	高度/mm	试件数量/ 个	保护层厚度/ mm	纵向配筋	纵筋配筋 率/%	箍筋间距	体积配箍 率/%	加固层数	倒角半径/ mm
S1L1H0C	200 × 200	600	3	15					1	32
S1L1H0P	200 × 200	600	3	15					1	32
S1L1H1C	200 × 200	600	1	15	8 Φ 8	1			1	32
S1L1H1P	200 × 200	600	1	15	8 Φ 8	1			1	32
S1L1H2C	200 × 200	600	1	15	8 Φ 8	1	Φ6@133	0.5	1	32
S1L1H2P	200 × 200	600	1	15	8 Φ 8	1	Φ6@133	0.5	1	32
S2L2H0C	400 × 400	1 200	3	30					2	64
S2L2H0P	400 × 400	1 200	3	30					2	64
S2L2H1C	400 × 400	1 200	1	30	8 Φ 16	1			2	64
S2L2H1P	400 × 400	1 200	1	30	8 Φ 16	1			2	64
S2L2H2C	400 × 400	1 200	1	30	8 Φ 16	1	Φ8@118	0.5	2	64
S2L2H2P	400 × 400	1 200	1	30	8 Φ 16	1	Φ8@118	0.5	2	64
S3L3H0C	600 × 600	1 800	3	45					3	96
S3L3H0P	600 × 600	1 800	3	45					3	96
S3L3H1C	600 × 600	1 800	1	45	8 Φ 25	1			3	96
S3L3H1P	600 × 600	1 800	1	45	8 Φ 25	1			3	96
S3L3H2C	600 × 600	1 800	1	45	8 Φ 25	1	Φ10@123	0.5	3	96
S3L3H2P	600 × 600	1 800	1	45	8 Φ 25	1	Φ10@123	0.5	3	96

1.2 材料的力学性能

混凝土设计强度为 C40,实测标准尺寸混凝土立方体的平均抗压强度为 51.65 MPa. 采用对称配筋,纵筋为 HRB400 级钢筋,箍筋为 HRB300 级钢筋,CFRP 和钢筋的材料性能分别见表 2、3.

表 2 CFRP 力学性能指标

Tab. 2 Mechanical parameters of CFRP

种类	抗拉强度标准值/MPa	厚度/mm	弹性模量/MPa	延伸率/%
CFRP	3 461	0.167	2.41×10^5	1.61

表 3 钢筋实测强度

Tab. 3 Measured strengths of steel bars

钢筋直径/mm	钢筋等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
6	HPB300	381	536
8	HPB300	386	452
10	HPB300	316	424
8	HRB400	419	570
16	HRB400	496	694
25	HRB400	453	609

1.3 加载装置及加载制度

采用完全加卸载和部分加卸载两种加载制度进行加载,试验过程中采用荷载控制的加卸载方式,小、中、大系列构件分别以 200、1 000、2 000 kN 为增量逐级进行加载,每级荷载重复加载两次,加载等级

为 6 ~ 7 个,部分加卸载制度卸载至每级荷载的 50%,完全加卸载制度卸载至 0. 构件受压承载力下降至峰值的 85% 时,终止试验并结束数据采集,加载装置见图 2,其最大出力为 40 000 kN.



图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

1.4 测量内容及测点布置

试验过程中,混凝土柱的承载力由加载端的力传感器测得,柱的竖向变形由安装在每个试件四周中间部位的 4 个竖向位移计进行测量,CFRP 的应变通过粘贴在试件中间部位和转角部位的 8 个应变片进行测量,箍筋和纵向钢筋的应变测点布置见图 3.

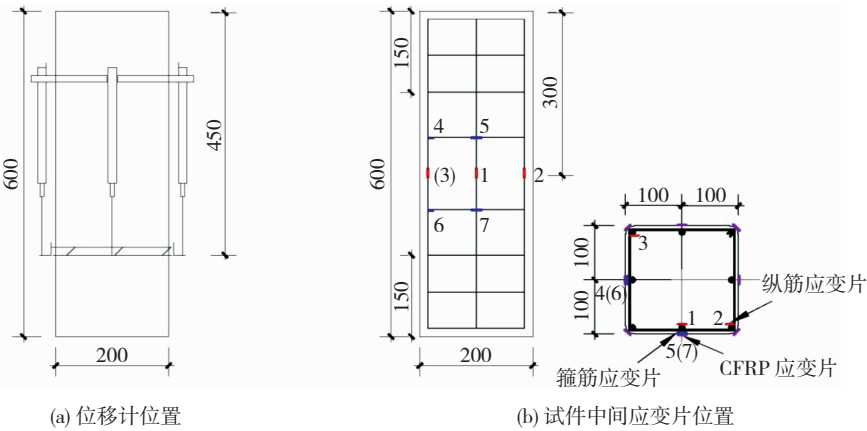


图 3 测量方案(mm)

Fig. 3 Measurement scheme (mm)

2 试验现象与试验结果

2.1 试验现象

不同尺寸的构件,在相同条件下的破坏过程基本类似. 加载初期,CFRP 加固混凝土柱表面没有明显变化,随着荷载的增加,CFRP 不断发出“噼里啪啦”声;试件破坏时,伴随着剧烈的爆破声响,中间部位的 CFRP 被拉裂,混凝土局部被压碎,混凝土碎

渣向四周迸溅. 试验过程中破坏现象最为严重的是 CFRP 加固素混凝土柱,破坏时除了混凝土碎渣向周围迸溅外,部分混凝土柱在中间部位被直接压碎(见图 4(b)). CFRP 加固钢筋混凝土柱(纵筋)在加载初期的试验现象与加固素混凝土柱相似,当加载接近混凝土柱的峰值荷载时,CFRP 局部发出断裂的响声,在中间高度附近出现横向白丝,CFRP 的横向应变明显增加;当试件破坏时,配置在试件中的纵

向钢筋受压向外发生屈曲,钢筋周围的混凝土大面积剥落,CFRP 在角部被拉断,试件破坏部位的混凝土呈锥形。CFRP 加固钢筋混凝土柱(含箍筋)在纵筋屈服后,箍筋向外膨胀,破坏部位的混凝土部分脱

落呈锥形。与没有箍筋约束的混凝土柱相对比,在有箍筋约束纵筋时,混凝土柱达到极限承载力时纵筋的屈曲程度较小,混凝土剥落也相对较少,CFRP 加固混凝土柱典型破坏现象如图 4 所示。

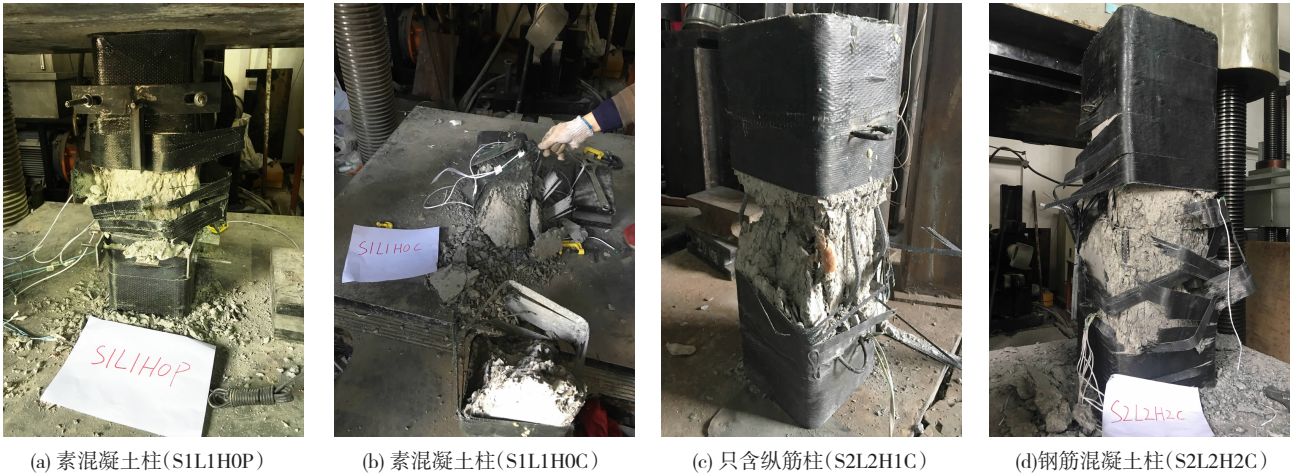


图 4 试件典型破坏形态

Fig.4 Typical failure modes of specimens

2.2 试验结果及分析

各混凝土柱的试验结果见表 4. 对于 CFRP 加固素混凝土柱来说,为了消除离散性,其试验结果为 3 个加固混凝土柱的平均值。

表 4 试验结果
Tab.4 Test results

试件编号	极限荷载/ kN	极限位移/ mm	峰值应力/ MPa	峰值应变/ 10 ⁻³	破坏 位置
S1L1H0P	1 515.85	1.45	37.89	2.42	中部
S1L1H0C	1 590.56	1.25	39.76	2.09	中部
S1L1H1P	1 892.45	1.14	47.31	1.90	中部
S1L1H1C	1 861.70	2.23	46.54	3.72	中部
S1L1H2P	1 783.52	3.95	44.59	6.58	中部
S1L1H2C	1 971.23	1.33	49.28	2.22	中部
S2L2H0P	6 833.53	2.52	42.71	2.10	中部
S2L2H0C	7 066.02	1.87	44.16	1.56	中部
S2L2H1P	7 821.69	2.58	48.89	2.15	中部
S2L2H1C	7 246.86	2.07	45.29	1.73	中部
S2L2H2P	7 574.04	2.00	47.34	1.67	中部
S2L2H2C	8 167.69	1.89	51.05	1.58	中部
S3L3H0P	13 787.76	2.05	38.30	1.14	中部
S3L3H0C	15 064.19	2.22	40.48	1.32	中部
S3L3H1P	16 113.21	1.34	44.76	0.74	中部
S3L3H1C	14 545.72	1.64	40.40	0.91	中部
S3L3H2P	16 568.00	1.35	46.02	0.75	中部
S3L3H2C	16 970.00	1.76	47.14	0.98	中部

由表 4 可看出:在轴向荷载下,CFRP 加固混凝土柱的破坏位置基本都在混凝土柱的中间位置,不

同尺寸对于构件的破坏位置没有影响. 相同尺寸的 CFRP 加固钢筋混凝土柱的极限强度比加固素混凝土柱的极限强度具有不同程度的提高. 随着截面尺寸的增大,CFRP 加固只含有纵筋的混凝土柱比素混凝土柱承载力的提高程度呈下降趋势,小、中、大 3 种尺寸构件的承载力提高幅度分别为 20.9%、8.41%、6.26%,这是因为尺寸越大,试件内部的缺陷单元越多,在重复荷载下更易积累损伤;CFRP 加固同时含有纵筋和箍筋的混凝土柱相较于只含有纵筋混凝土柱的承载力提高幅度呈上升趋势,小、中、大 3 种尺寸构件的承载力提高幅度分别为 0.01%、4.47%、9.39%. 是否含有钢筋对不同尺寸的 CFRP 加固混凝土柱极限位移的影响不大相同. CFRP 加固小尺寸的钢筋混凝土柱(纵筋)比加固小尺寸的素混凝土柱的极限位移提高 24.81%,CFRP 加固小尺寸的钢筋混凝土柱(纵筋+箍筋)比钢筋混凝土柱(纵筋)的极限位移提高 56.68%. 但是对于大尺寸构件,钢筋的存在并没有使极限位移提高,钢筋混凝土柱(纵筋)与钢筋混凝土柱(纵筋+箍筋)相较于素混凝土柱极限位移分别下降 30.21%和 27.40%。

2.2.1 荷载-位移曲线

CFRP 加固混凝土柱的荷载-位移曲线见图 5. CFRP 加固钢筋混凝土柱和素混凝土柱的荷载-位移曲线形状比较接近,大致都经历了弹性上升过程,当 CFRP 破坏后出现下降阶段。

2.2.2 荷载-位移包络图

CFRP 加固不同配筋混凝土柱的荷载-位移包络图见图 6. 相对于相同尺寸的 CFRP 加固素混凝土

柱,配置纵筋和纵筋加箍筋后,混凝土柱的刚度和极限承载力明显逐渐增加.

不同加载方式下混凝土柱的荷载-位移包络图见图 7. 部分加卸载和完全加卸载对于构件的轴压性能没有明显的影响.

不同尺寸构件的荷载-位移曲线包络图见图 8. 对于 CFRP 加固素混凝土柱、钢筋混凝土柱(纵筋)和钢筋混凝土柱(箍筋和纵筋),随着构件截面尺寸的增大,构件刚度和极限承载力均有明显的提高,存在明显的尺寸效应.

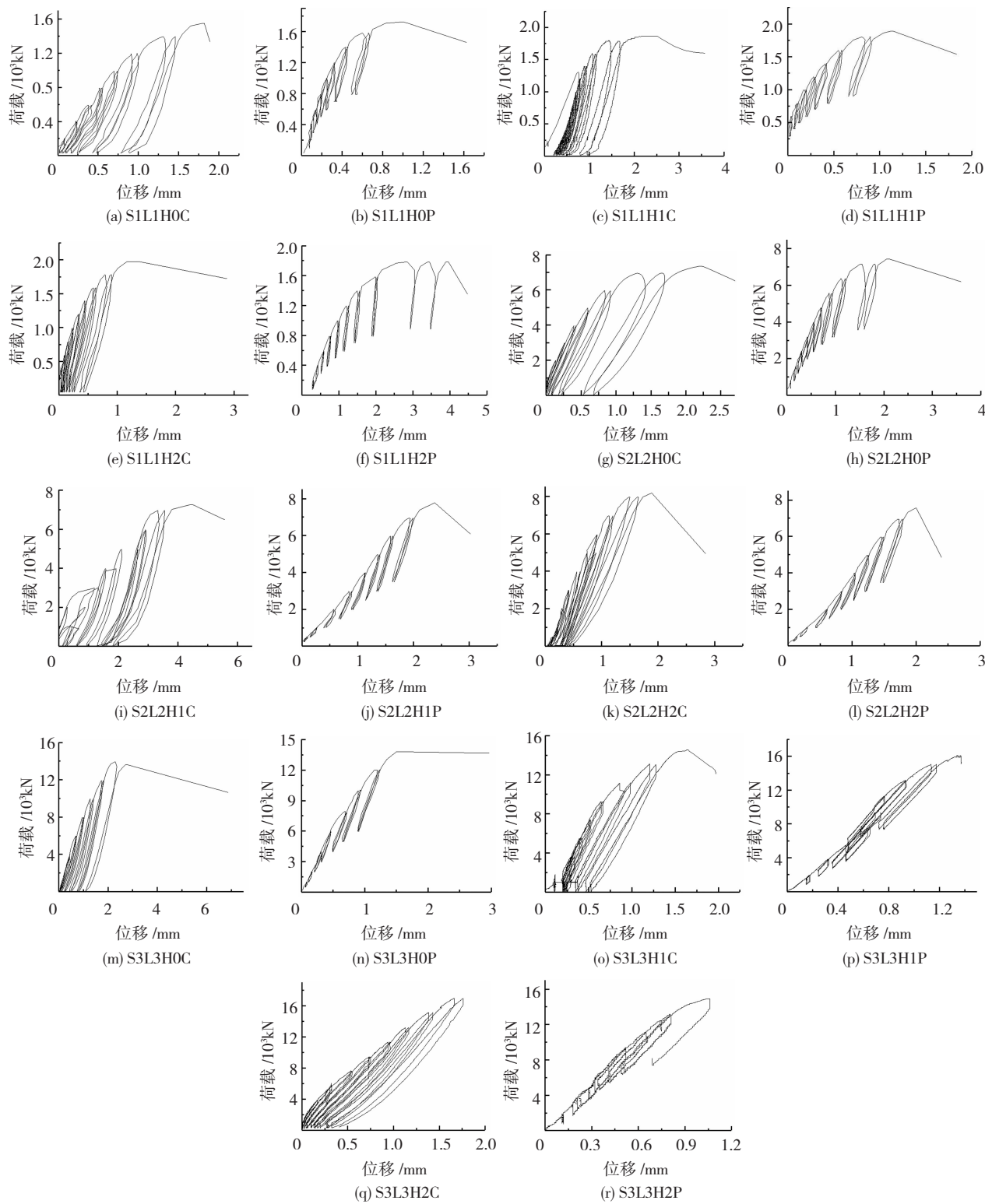


图 5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curves

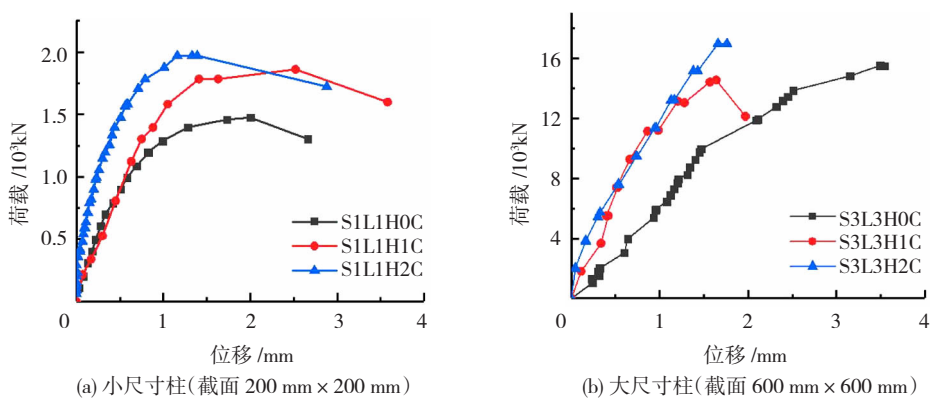


图 6 不同配筋混凝土柱的荷载 - 位移包络图

Fig. 6 Load-displacement envelope curves of concrete columns with different steel bars

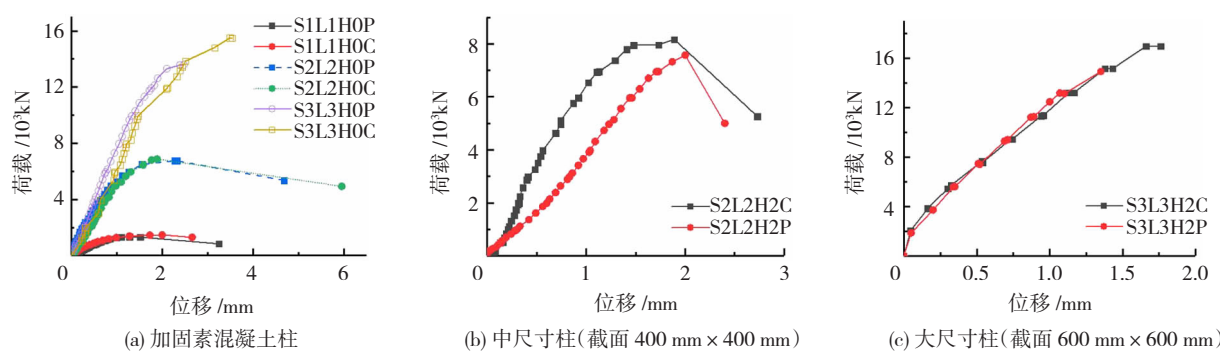


图 7 不同加载方式下混凝土柱的荷载 - 位移包络图

Fig. 7 Load-displacement envelope curves of concrete columns under different loading histories

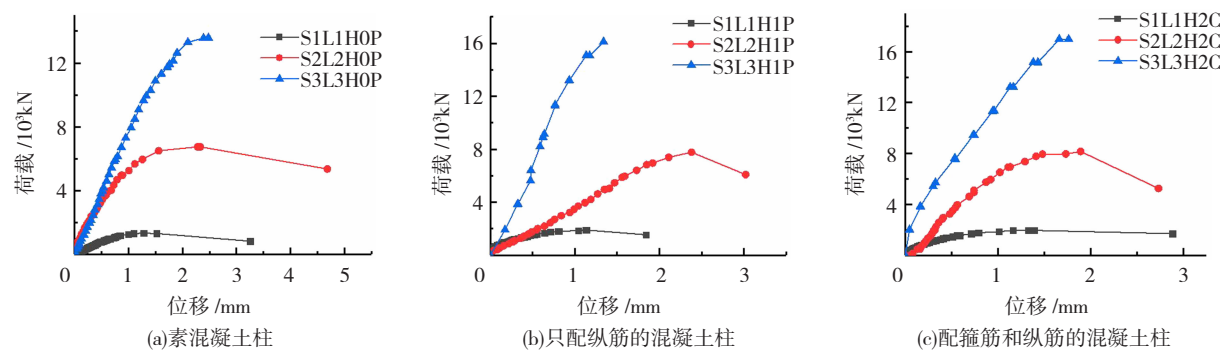


图 8 不同尺寸构件的荷载 - 位移包络图

Fig. 8 Load-displacement envelope curves of columns with different sizes

2.2.3 峰值应力

CFRP 加固混凝土柱的峰值应力随构件尺寸变

化曲线见图 9,CFRP 加固钢筋混凝土柱的峰值应力随着尺寸的增大呈先增大后减小的趋势。

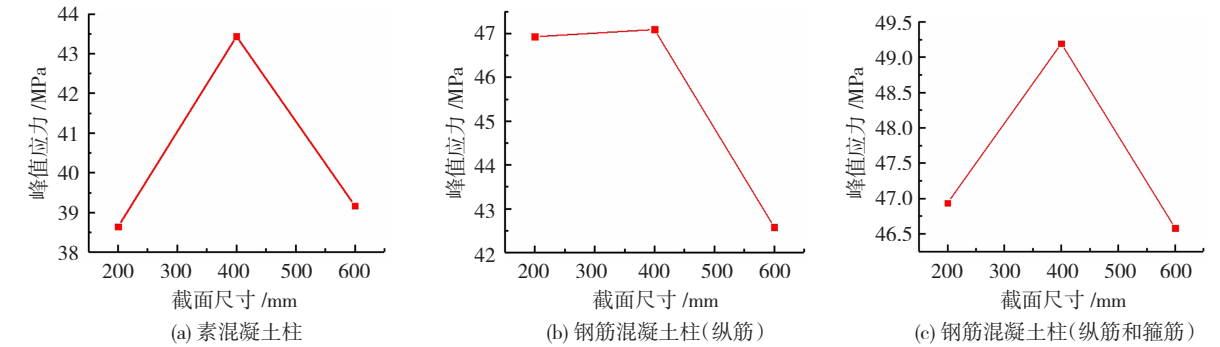


图 9 钢筋混凝土柱峰值应力

Fig. 9 Peak stress of reinforced concrete columns

2.2.4 卸载曲线

CFRP 加固混凝土柱的卸载曲线见图 10. 由 CFRP 加固不同配筋混凝土柱的卸载曲线图 10(a) 可看出,在钢筋的约束作用下,CFRP 加固钢筋混凝土柱比素混凝土柱有更小的塑性变形;在相同荷载水平下,配置纵筋和箍筋的混凝土柱的残余变形最小,仅配置纵筋混凝土柱的残余变形次之,而素混

凝土柱的残余变形最大. 由不同截面尺寸钢筋混凝土柱的卸载曲线图 10(b) 可看出,随着尺寸的增大,小、中、大尺寸构件的残余变形逐渐减小. 由相同尺寸不同加载方式混凝土柱的卸载曲线图 10(c) 可看出,部分加卸载和完全加卸载这两种加载方式对于构件的承载力和极限位移影响不大,卸载刚度和残余位移比较接近.

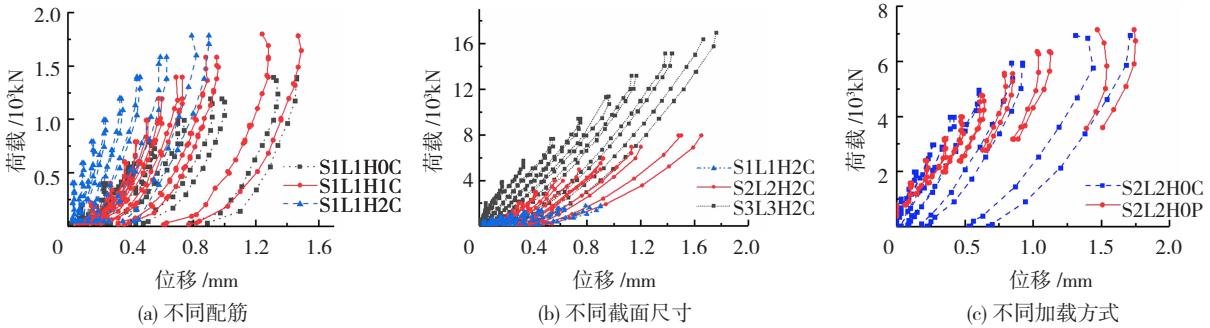


图 10 卸载曲线的比较
Fig. 10 Comparison of unloading curves

2.2.5 CFRP 应变曲线

同一构件不同位置的 CFRP 应变曲线见图 11 (a). 由图 11(a) 可以看出,在相同荷载水平下,转角处 CFRP 的应变均大于中间部位 CFRP 的应变,可见 CFRP 加固混凝土柱在转角处存在应力集中现象,导致转角处的 CFRP 会先破坏,与试验破坏现象相符. 相同部位不同尺寸钢筋混凝土柱的 CFRP 应变见图 11(b). 由图 11(b) 可看出,在加载前期,CFRP 应变较小;在加载后期,截面较大的构件中的 CFRP 相较于小截面构件的 CFRP 应变要小很多.

2.2.6 尺寸效应分析

归一化荷载 - 位移曲线的横坐标为归一化轴向变形 (Δ/h),即轴向位移 (Δ) 与构件柱计算高度 (h)

的比值;纵坐标为归一化轴向强度 ($P/f_c A$),即水平荷载值 (P) 与混凝土标准抗压强度 (f_c) 和柱子截面面积 (A) 乘积的比值. 不同尺寸构件的归一化荷载 - 位移曲线包络图见图 12.

由图 12 可看出,对于 CFRP 加固素混凝土柱,归一化轴向强度和归一化轴向变形能力受尺寸效应影响的规律比较明显,随着混凝土柱截面尺寸的逐渐增大,其归一化轴向强度先增大后减小,而归一化轴向变形能力是逐渐减小. 对于 CFRP 加固钢筋混凝土柱,构件的归一化轴向强度受尺寸效应的影响较小,但是归一化轴向变形能力存在着明显的尺寸效应,随着构件截面尺寸的增大,归一化轴向变形能力逐渐减小.

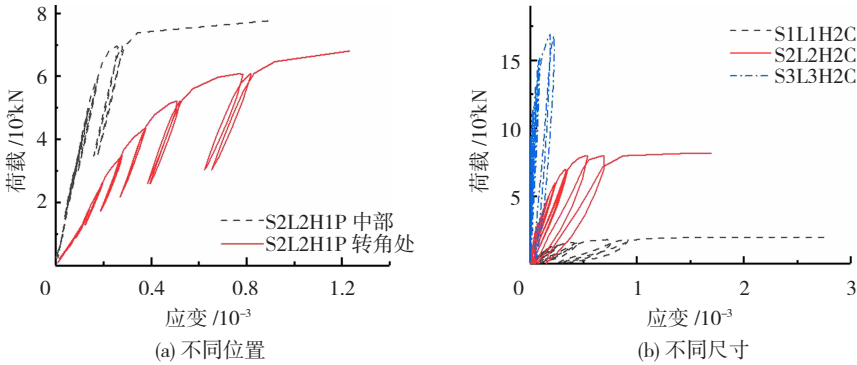


图 11 CFRP 应变曲线
Fig. 11 Strain curves of CFRP

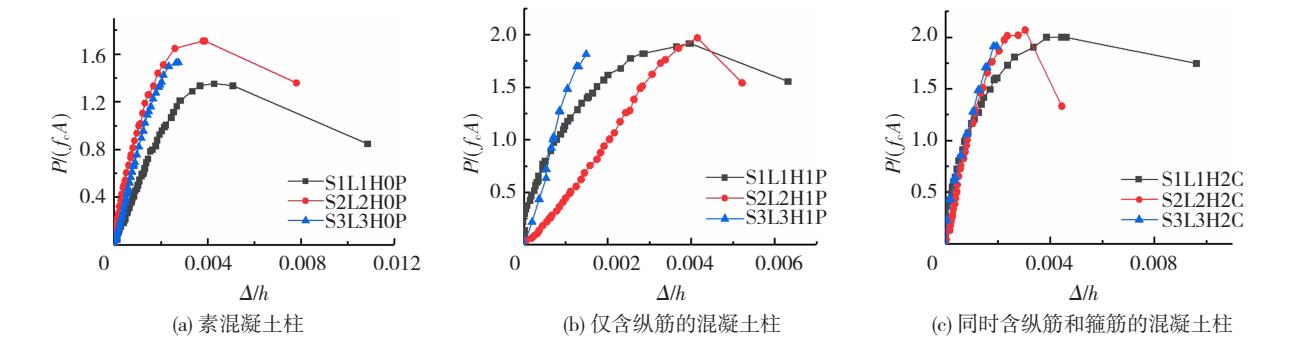


图 12 归一化荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Normalized load-displacement curves

3 承载力计算

3.1 理论计算

根据魏洋等推导的计算公式^[16]和 GB 20608—2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》进行理论计算,构件中箍筋按等强度原则换算为 CFRP,所有材料均采用实测强度计算结果见表 5。 η_1 为安全储备系数,计算公式为 $\eta_1 = P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}$,其中 P_{exp} 和 P_{cal} 分别为 CFRP 加固混凝土柱极限强度的试验值和计算值。

3.2 有限元数值计算

利用 ABAQUS 进行建模时,混凝土采用三维实体单元,钢筋采用桁架单元,CFRP 布采用三维膜单元;混凝土本构关系采用过镇海塑性损伤模型,钢筋采用理想弹塑性模型,碳纤维布简化为理想线弹性材料,认为其仅具有抗拉能力;不考虑钢筋骨架、碳布和混凝土的相对滑移,钢筋骨架嵌入混凝土,碳布与混凝土之间采用绑定的方式,柱子底部采用固端约束;在加载面中心设置一个参考点,模拟时只需将荷载施加在参考点上,有限元模型见图 13。 $\eta_2 = P_{\text{mod}}/P_{\text{exp}}$,其中 P_{mod} 为 CFRP 加固混凝土柱的有限元模拟值。

土柱的安全储备系数,随构件尺寸的增加,呈先增加后减小的趋势,有限元模拟值和实验值大致相等。

表 5 试验值和计算值的比较

Tab. 5 Comparison of experimental and calculated values of bearing capacity

试件编号	P_{cal}/kN	P_{exp}/kN	P_{mod}/kN	η_1	η_2
S1L1H0P	1 168.13	1 515.85	1 596.37	1.29	1.05
S2L2H0P	4 672.52	6 833.53	6 966.11	1.46	1.02
S3L3H0P	10 513.17	13 787.76	14 515.38	1.31	1.05
S1L1H1P	1 336.62	1 892.45	1 794.98	1.41	0.95
S2L2H1P	5 470.33	7 821.69	7 331.95	1.43	0.94
S3L3H1P	12 292.10	16 113.21	14 464.44	1.31	0.90
S1L1H2P	1 356.15	1 783.52	2 061.39	1.32	1.16
S2L2H2P	5 539.77	7 574.04	7 068.77	1.37	0.93
S3L3H2P	12 445.07	16 568.00	16 839.83	1.33	1.02

4 结 论

1)在轴向荷载下,CFRP 加固混凝土柱的破坏位置基本都在混凝土柱的中部位置,不同尺寸对于破坏的位置没有明显影响. CFRP 加固有钢筋混凝土柱相对于素混凝土柱的极限荷载具有不同程度的提高。

2)CFRP 加固钢筋混凝土柱的峰值应力随着尺寸的增大呈先增大后减小的趋势. 部分加卸载和完全加卸载这两种加载方式对于构件的承载力和极限位移影响不大,卸载刚度和残余位移比较接近。

3)CFRP 加固相同尺寸不同配筋的混凝土柱,钢筋混凝土柱相较于素混凝土柱有更小的塑性变形;在相同荷载水平下,配纵筋和箍筋的混凝土柱的残余变形最小,仅配纵筋混凝土柱的残余变形次之,而素混凝土柱的残余变形最大. 对于不同截面尺寸钢筋混凝土柱,随着尺寸的增大,小、中、大尺寸构件的残余变形逐渐减小。

4)对于 CFRP 加固钢筋混凝土柱,构件的归一化轴向强度受尺寸效应的影响较小,但是归一化轴

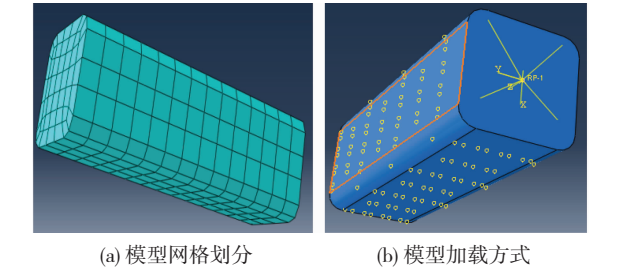


图 13 有限元模型

Fig. 13 Finite element model

CFRP 加固混凝土柱的承载力计算值和试验值的比较以及模拟值与试验值的比较见表 5,CFRP 加固混凝土柱的极限强度,按照规范公式进行计算的结果均比较保守. 同一配筋条件下 CFRP 加固混凝土

向变形能力存在着明显的尺寸效应,随着构件截面尺寸的增大,归一化轴向变形能力逐渐减小.

5)在相同荷载水平下,转角处 CFRP 的应变均大于中间部位 CFRP 的应变.对于相同部位不同尺寸的 CFRP 加固钢筋混凝土柱,截面较大的构件中 CFRP 的应变比小截面构件的 CFRP 的应变要小.相同配筋条件下 CFRP 加固混凝土柱的安全储备系数,随构件尺寸的增加呈先增加后减小的趋势.

参考文献

[1] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000,12(2):144. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139)

[2] 吴刚,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 6
WU Gang, LYU Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2003.05.001

[3] 吴刚,吴智深,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱有软化段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报,2006,39(11): 13
WU Gang, WU Zhishen, LYU Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column with a strain-softening response[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 13. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.11.002

[4] TOUTANJI H, SEAM D. Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials[J]. Thin-walled Structures, 2001, 39(2): 160. DOI: 10.1016/S0263-8231(00)00049-5

[5] TOUTANJI H, DENG Yong. Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets[J]. Composites: Part B, 2002, 33(4): 257. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00016-1

[6] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites[J]. Composites: Part B, 2007, 38(5/6): 623. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.020

[7] 顾祥林,李玉鹏,张伟平,等. 碳纤维布约束混凝土单轴受压时的应力-应变关系[J]. 结构工程师,2006, 22(2):54
GU Xianglin, LI Yupeng, ZHANG Weiping, et al. Compressive stress-strain relationship of concrete confined by carbon fiber composite sheets[J]. Structural Engineers, 2006, 22(2): 54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2006.02.012

[8] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical model for fiber reinforced polymer confined concrete [J]. Journal of

Composites for Construction, ASCE, 2007, 11(2): 208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(201)

[9] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003,13(22): 1151. DOI: 10.1177/0731684403035429

[10] 吴刚,吕志涛. 纤维增强复合材料(FRP)约束混凝土矩形柱应力-应变关系的研究[J]. 建筑结构学报,2004, 25(3):104
WU Gang, LYU Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete rectangular columns[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(3): 104. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.03.016

[11] 敬登虎,曹双寅. 方形截面混凝土柱 FRP 约束下的轴向应力-应变曲线计算模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 35
JING Denghu, CAO Shuangyin. A model for calculating the axial stress strain curve of square-section concrete column confined by FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.12.006

[12] 潘景龙,王雨光,来文汇. 混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响[J]. 工业建筑, 2001,31(6):18
PAN Jinglong, WANG Yuguang, LAI Wenhui. Effect of sectional shape of concrete column on the bearing capacity of short columns wrapped with FRP[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.06.005

[13] SHAO Y, ZHU Z, MIRMIRAN A. Cyclic modeling of FRP confined concrete with improved ductility [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(10):962. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.009

[14] LAM L, TENG J G, CHEUNG C H, et al. FRP confined concrete under axial cyclic compression [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(10): 953. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.007

[15] 王震宇,李洪鹏. 重复荷载作用下碳纤维约束混凝土加卸载准则[J]. 建筑结构, 2009, 39(7):102
WANG Zhenyu, LI Hongpeng. Loading and unloading criteria of FRP-confined concrete under cyclic compression [J]. Building Structure, 2009, 39(7): 102. DOI: 10.19701/j.jzjg.2009.07.030

[16] 魏洋,吴刚,吴智深,等. FRP 约束混凝土矩形柱有软化阶段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报,2008, 41(3):24
WEI Yang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Study on the stress-strain relationship for insufficient FRP-confined rectangular concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2008,41(3): 24. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2008

(编辑 赵丽莹)