

引用本文:高小育,段海,杨正朴,等. CFRP 加固圆形钢管抗压承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6): 55-63.

GAO Xiao-yu, DUAN Hai, YANG Zheng-pu, et al. Research on Compressive Carrying Capacity of Circular Steel Tubes Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 55-63.

DOI:10.19815/j.jace.2020.11016

CFRP 加固圆形钢管抗压承载力研究

高小育,段海,杨正朴,李兆阳,刘永健

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:以碳纤维增强复合材料(CFRP)加固长圆形钢管轴心受压试验结果为基础,分析了 CFRP 在加载过程中的力学行为并提出了 CFRP 的破坏与加固机理。考虑初偏心、材料和几何非线性的影响,建立了一个预测承载力、轴向和横向位移的纤维模型,分析了 CFRP 的有效抗压弹性模量与 CFRP 层数的变化关系。将有效抗压弹性模量应用于有限元模型中进行加载试验模拟,验证简化纤维模型的合理性。结果表明:在达到极限承载力之前,圆形钢管轴心受压构件中部全截面均表现为压应变,验证了提出的加固机理;随着 CFRP 层数的增加,CFRP 的有效抗压弹性模量按自然对数增长;有效抗压弹性模量的引入较好地模拟了 CFRP 加固钢管的受压机理,并且纤维模型计算结果与有限元模型计算结果吻合良好;随着加载偏心距增大,CFRP 对长轴压构件承载力的贡献率逐渐降低,因此对于此类加固构件的使用应该尽量减小加载偏心距,以充分利用 CFRP 的抗压强度。

关键词:碳纤维增强复合材料;轴心受压;纤维模型法;抗压承载力

中图分类号:TU392.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)06-0055-09

Research on Compressive Carrying Capacity of Circular Steel Tubes Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer

GAO Xiao-yu, DUAN Hai, YANG Zheng-pu, LI Zhao-yang, LIU Yong-jian

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the test results of axial compression of long circular steel tube strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), the mechanical behavior of CFRP in the loading process was analyzed, and the failure and reinforcement mechanism of CFRP were proposed. Considering the effects of initial eccentricity, material and geometric nonlinearity, a fiber model was established to predict the bearing capacity, axial and lateral displacements of CFRP. The relationship between the effective compressive elastic modulus of CFRP and the number of CFRP layers was analyzed. The effective compressive elastic modulus was applied to the finite element model to simulate the loading test, and the rationality of the simplified fiber model was verified. The results show that before the ultimate bearing capacity is reached, the central section of the circular steel tube axial compression member shows compressive strain, which verifies the proposed reinforcement mechanism. With the increase of CFRP layers, the effective compressive

收稿日期:2020-11-01

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC090)

作者简介:高小育(1973-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:xygao@chd.edu.cn.

elastic modulus of CFRP increases according to natural logarithm. The introduction of effective compressive elastic modulus well simulates the compression mechanism of CFRP strengthened steel pipe, and the calculation results of fiber model are in good agreement with those of finite element model. With the increase of loading eccentricity, the contribution rate of CFRP to the bearing capacity of long axial compression members gradually decreases. Therefore, the loading eccentricity should be reduced as much as possible to make full use of the compressive strength of CFRP.

Key words: CFRP; axial compression; fiber model method; compressive carrying capacity

0 引 言

传统的钢结构或者构件的加固方法主要包括螺栓连接、焊接、粘钢加固等^[1]。这些加固方法所带来的焊接残余应力、截面削弱、应力集中等诸多问题是不容忽视的。碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)由于具有足够大的刚度、优越的抗腐蚀和抗疲劳性能以及加固施工工艺上的诸多优势,能够很好地弥补传统钢结构加固方法的不足^[2-3]。现有的关于 CFRP 粘贴加固钢结构的理论及试验研究大多集中在梁的受弯加固^[4-6]、疲劳加固^[7-8]、轴压短柱加固^[9-10]以及 CFRP 与钢材之间界面性能研究^[11-12]等,而关于 CFRP 加固长钢管轴压构件的研究开展较少,因此进一步研究 CFRP 加固长钢管的轴压性能,分析 CFRP 的受力机理,提出一种较为可靠的研究此类加固构件轴压承载力及变形的的方法是十分必要的。

目前已有的试验初步表明 CFRP 可以有效增强受压钢管的承载力^[12-17]。CFRP 加固长钢管轴压性能的研究通常采用数值分析方法,Shaat 等^[18]、彭福明等^[19]、魏劭杰等^[20]分别采用纤维模型法、AN-SYS、ABAQUS 有限元软件对 CFRP 加固轴压构件进行了模拟。现有研究鲜有对 CFRP 的受力状态及加固机理做具体分析。同时由于 CFRP 的特殊性,如脆性破坏、材料的各向异性、抗拉抗压力学性能的差异性以及 CFRP 与钢材之间复杂的界面行为等,都给数值模拟带来很大的障碍,不利于此类构件的研究应用。因此,本文欲依托 CFRP 加固长圆形钢管轴压试验结果,对 CFRP 的受力状态进行分析并提出一种 CFRP 加固长圆形钢管轴压承载力的简化计算方法。

1 试验概况

试验分为 5 组,包括 1 个钢管对照组和 4 个分别包裹 2,4,6,8 层 CFRP 布的对照组。钢管外径为

88.9 mm,壁厚 4 mm,屈服强度及抗拉强度分别为 355 MPa 和 490 MPa,每根钢管的截断长度为 2.4 m。加固钢管外包高模量的 CFRP(MBRACE CF 130),加固方式采用纤维方向沿钢管长度方向粘贴。在粘贴 CFRP 之前,钢管表面需预先粘贴 1 层 GFRP(MBRACE ED 900)以防止碳纤维与钢管直接接触发生电化学腐蚀^[21]。各层 CFRP 以及纤维与钢管之间均采用环氧树脂黏结。FRP 与环氧树脂材料特性见表 1。

表 1 FRP 和环氧树脂材料特性
Tab. 1 Material Properties of FRP and Epoxy

参数	CFRP	GFRP	环氧树脂
厚度/mm	0.56	1.10	
抗拉强度/MPa	3 000	500	39
弹性模量/GPa	230.0	28.0	2.4
伸长率/%	1.5	2.0	

钢管的轴压试验在 1 000 kN 液压试验机上进行。钢管底端采用光滑的半球形铰支座以保证钢管端部的自由转动,如图 1(a)所示。为记录加载过程中钢管产生的位移,试验构件两端及中点分别安装 4 个 LVDT 位移传感器来记录端部的轴向位移及中点的横向位移,如图 1(b),(c)所示。同时在钢管中点处竖向对称粘贴长度为 10 mm 的电阻应变片(S1,S2,S3,S4)以记录构件中点的纵向应变。

通过试验观察发现,受压构件在加载初期就开始产生侧向挠度。随着荷载的增加,受压构件侧向挠曲变形逐渐增大,当荷载达到某一数值以后,受压构件首先出现整体失稳,挠曲变形急剧增大,继而在构件中部截面附近压力较大侧发生局部失稳,受压构件丧失承载能力。对于 CFRP 加固的构件,局部失稳区域出现 CFRP 的脱层和压溃。在结构出现整体失稳前,跨中均处于压应变状态,局部失稳后,受压构件一侧出现压应变,其他部分仍表现为压应变。试验中还发现,随着粘贴 CFRP 层数的增加,相同荷载下钢管的轴向位移和侧向位移均减小。各

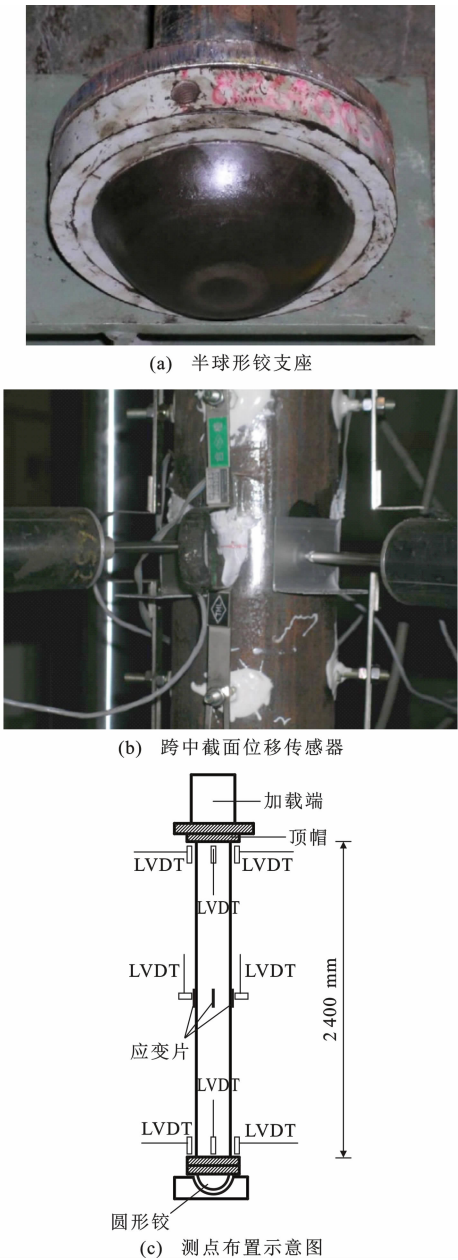


图 1 试验装置

Fig. 1 Test Setup

受压构件轴向承载力结果如表 2 所示。

表 2 构件轴向承载力

CFRP 层数	0	2	4	6	8
承载力/kN	296.1	374.1	417.5	455.0	544.9
提高百分比/%	0.0	26.3	41.0	63.7	84.0

2 CFRP 的稳定性分析

2.1 CFRP 加固钢管增强受压承载力机理

周雷等^[22]的试验展示了 2 种碳纤维复丝的受压破坏模式,分别为整体剪切破坏和基体失效后的

局部剪切破坏,试验中的构件并不是由于抗压强度过大引起失效。即便如此,碳纤维复丝的抗压破坏强度依旧超过了 2 000 MPa,表现出了优异的抗压性能。试验现象表明,在构件失稳之前 CFRP 处于受压状态,构件承载力的提高主要源于 CFRP 自身的抗压稳定性。关于 CFRP 在轴压构件上表现出的抗压能力,本文给出以下解释:①CFRP 在使用前经过环氧树脂的浸渍,环氧树脂加强了纤维束的整体性,使之在受力过程中可以共同工作,从而产生了一定的抗压强度;②CFRP 对圆形钢管加固后,包裹在钢管表面,其形状由片状变为圆筒(图 2),刚度得以提高,进而增加了碳纤维布的抗压稳定性;③钢管外表面的 CFRP 类似于薄壁圆筒,钢管对 CFRP 起到径向支撑作用(图 3),限制了 CFRP 的局部屈曲,进一步提高了其整体稳定承载力。基于以上 3 个解释,CFRP 加固钢管后,由于 CFRP 本身具有抗压能力,CFRP 可以在构件受压时承担一部分荷载。同时,钢管与 CFRP 之间的支撑作用是相互的。CFRP 同样可以对钢管形成约束,减少钢柱的侧向位移,使得钢管受压更加均匀,钢管在荷载更大时开始出现塑性。

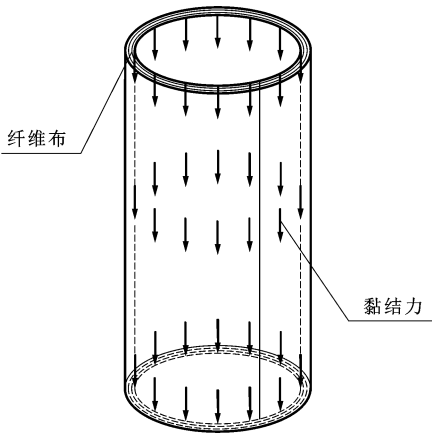


图 2 CFRP 形成圆筒

Fig. 2 CFRP Becoming Cylinder

2.2 加固机理的力学模型简化

对于 CFRP 加固钢管轴压构件问题,CFRP 的受力状态比较复杂,在受力变形过程中,CFRP 同时受到纵向、环向的拉力和压力等,为了便于计算和模拟,需对其受力状态进行简化。本文研究采用的简化包括:

- (1)由于加固构件为长柱,纤维束沿钢管纵向粘贴,因此忽略 CFRP 对钢管套箍效应的影响,只考虑 CFRP 的纵向受力。
- (2)根据试验所测得的荷载-应变曲线可知,在

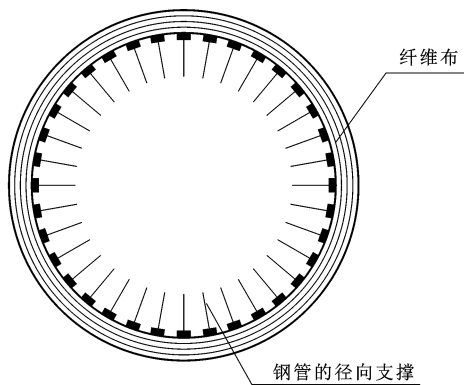


图3 钢管对 CFRP 的径向支撑作用

Fig. 3 Radial Support Effect of Steel Tube on CFRP

构件失稳之前各截面 CFRP 均处于受压状态,因此可忽略 CFRP 的纵向抗拉性能对加固构件稳定承载力的影响。

(3)通过试验现象发现,CFRP 的受压或剥离破坏由钢管的局部失稳导致,这发生于整体失稳之后^[13]。因此,在构件达到稳定承载力之前可不考虑 CFRP 的剥离破坏,只需考虑 CFRP 与钢管之间的滑移导致的抗压模量损失。

因此,本文研究的关键在于如何确定加固构件 CFRP 的有效抗压弹性模量,即考虑 CFRP 与钢管之间的滑移之后的模量。基于以上分析,本文借助纤维模型法对 CFRP 的有效抗压弹性模量进行了分析。

2.3 建立纤维模型

纤维模型将截面进行离散,模型像一束纤维,纤维之间通过平截面假定约束。假设每一纤维为单轴应力状态,因其受力状态类似于纤维,故称其为纤维模型。下文使用纤维模型对受压构件进行分析。

纤维模型中引入平截面假定。第 i 个单元的应变 ϵ_i 为

$$\epsilon_i = (1 - \frac{h_i}{c})\epsilon \quad (1)$$

式中: h_i 为单元 i 距荷载偏心方向截面边缘的距离; c 为中性轴距荷载偏心方向截面边缘的距离; ϵ 为荷载偏心方向截面边缘应变值。

由于假定 CFRP 与钢管之间没有滑移,对于带有纤维层的截面,截面总有效惯性矩 I_{teff} 计算公式为

$$I_{\text{teff}} = I_{\text{seff}} + \frac{E_{\text{fp}}}{E_s} I_{\text{feff}} \quad (2)$$

式中: I_{seff} 为钢管的有效抗弯刚度; I_{feff} 为纤维复合材料的有效抗弯刚度; E_{fp} 为纤维的有效受压模量; E_s 为钢材的弹性模量。

假定钢为理想弹塑性材料,弹性模量为 206 GPa。屈服强度为 355 MPa。假定复合材料为理想弹脆性材料。由于纤维抗拉、抗压性能不同,纤维单元的应力 σ_{fi} 可分别通过 $\sigma_{fi} = E_{\text{fp}}\epsilon_{fi}$ 或 $\sigma_{fi} = E_{\text{ft}}\epsilon_{fi}$ 进行计算,其中 E_{ft} 为纤维的抗拉模量, ϵ_{fi} 为任一纤维单元应变值。当 $\epsilon_{fi} > \epsilon_{\text{ut}}$ 或 $\epsilon_{fi} < -\epsilon_{\text{up}}$ 时,表示纤维已经破坏,即取 $\sigma_{fi} = 0$, ϵ_{ut} , ϵ_{up} 分别为纤维的极限抗拉、抗压应变值。

构件初始挠曲假定为半波正弦曲线,在轴压荷载 P 的作用下,构件将产生侧向挠曲变形,距压杆底端距离为 z 的截面横向位移 δ 可以通过公式(3)计算^[18],该式仅适用当 $\delta \leq L/10$ 的情况。

$$\delta = e' \left[\frac{\sin(\pi z/L)}{1 - P/P_{\text{cr}}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: e' 为杆件 midpoint 截面的初始偏心值; L 为压杆的计算长度; P_{cr} 为临界荷载。

构件加载端轴向位移 Δ 由材料压缩产生的轴向位移 Δ_a 和构件挠曲变形引起的轴向位移 Δ_b 两部分组成。 Δ_a 、 Δ_b 可分别由公式(4)、(5)计算,即

$$\Delta_a = \frac{PL}{\sum E_i A_i} \quad (4)$$

$$\Delta_b = L - \Delta_a - S \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 个单元的弹性模量; A_i 为第 i 个单元的面积; S 为轴压构件变形挠曲线的弦长。

侧向挠曲线近似为弧长为 $L - \Delta_a$ 、振幅为 $\delta + e'$ 的半波正弦曲线。由此可以计算弦长 S 为

$$S = \frac{L - \Delta_a + \sqrt{(L - \Delta_a)^2 - [\pi(\delta + e')]^2}}{2} \quad (6)$$

随着构件作用轴向荷载 P 的增加,跨中截面应变逐渐增大,钢单元逐渐屈服,直至跨中截面钢单元全部屈服,加载终止。此时构件具有较大的挠曲变形,横向位移 δ 的计算已不再适用公式(3)。

2.4 CFRP 的抗压弹性模量

为排除各试验构件初始缺陷程度不同对研究结果的干扰,本文借助试验结果拟合所得的结论,运用加固构件稳定承载力与 CFRP 加固层数的线性关系,对回归方程进行线性插值,得到 8 个理论承载力^[13],并通过对轴压荷载设置初始偏心距来考虑构件的初始缺陷,偏心距按未加固钢管承载力取值。

在此基础上,借助不同 CFRP 加固层数构件的理论承载力,利用纤维模型法分析 CFRP 抗压弹性模量的取值,得到如表 3 所示的计算结果。通过表 3 可以看出,CFRP 的有效抗压弹性模量并不是恒定的,而是随着 CFRP 加固层数的增加而逐渐增大。

表 3 不同加固层数的 CFRP 抗压弹性模量
Tab. 3 Compressive Elastic Modulus of CFRP for
Different Reinforcement Layers

CFRP 层数	理论承载力/ kN	纤维模型承 载力/kN	CFRP 抗压弹性 模量/GPa
0	301.810	299.155	
1	330.769	332.988	71.3
2	360.148	359.671	80.5
3	389.527	387.582	87.4
4	418.906	417.011	92.0
5	448.285	446.118	94.3
6	477.644	477.010	96.6
7	507.043	509.684	98.9
8	536.422	538.841	100.0

根据表 3 的计算结果,可得到 CFRP 抗压弹性模量与层数之间的关系曲线,如图 4 所示。

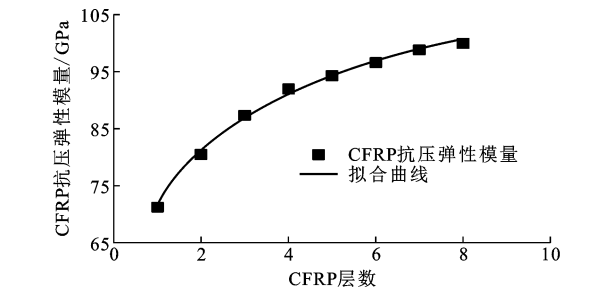


图 4 CFRP 加固层数与抗压弹性模量关系曲线
Fig. 4 Relation Curve of Reinforcement Layers and
Compressive Elastic Modulus of CFRP

通过数值分析,可以得到抗压弹性模量和 CFRP 加固层数的关系为

$$E_{cp}=14.1\ln(n)+71.4 \tag{7}$$

式中: E_{cp} 为 CFRP 抗压弹性模量; n 为 CFRP 加固层数。

由式(7)可以得出:对于 CFRP 加固圆形钢管轴压构件,CFRP 的抗压弹性模量随加固层数的增加按自然对数增长。

2.5 纤维模型计算结果

基于上述 CFRP 抗压弹性模量的分析结果,本文分别给出纤维模型法计算加固 0, 2, 4, 6, 8 层 CFRP 的构件的荷载-位移曲线,如图 5 所示。

通过纤维模型可得到加固构件跨中截面荷载-应变曲线,应变计算点分别取为跨中截面偏心方向与垂直偏心方向截面外缘点。由于 S1, S3 沿偏心方向对称,因此两点应变值相等,故得到 3 条荷载-应变曲线。本文选取加固 2, 4 层 CFRP 的钢管纤维模型为典型计算结果,荷载-轴向应变曲线如图 6 所示。

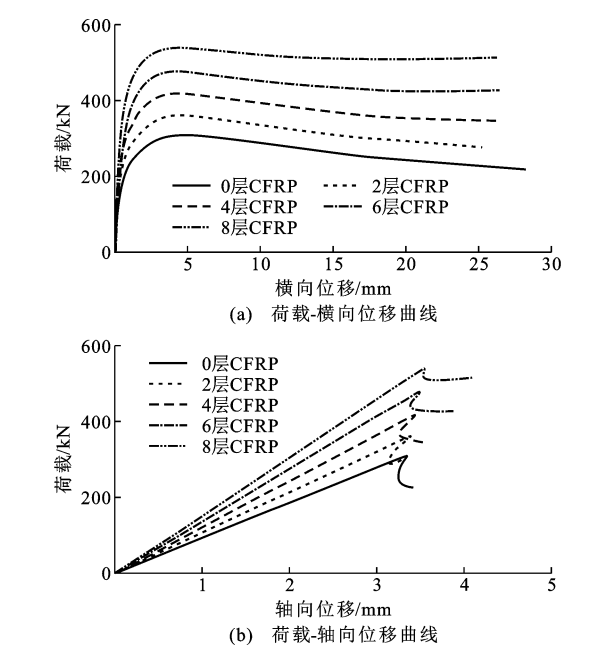


图 5 纤维模型荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement Curves of Fiber Model

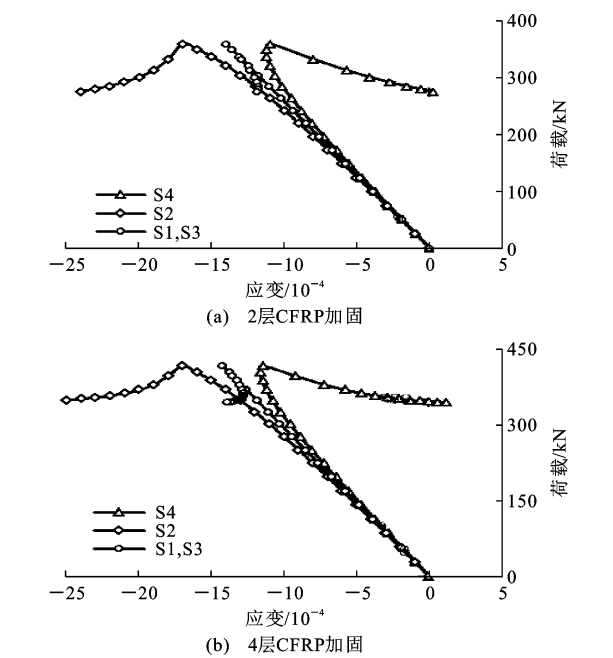


图 6 纤维模型荷载-轴向应变曲线
Fig. 6 Load-axial Strain Curves of Fiber Model

由图 6 可以看出:纤维模型在其失稳之前,应变值均为负,即处于全截面受压状态;在达到稳定承载力之后,随着构件变形逐渐增大,跨中截面一侧开始出现拉应变,这与试验结果是一致的。

3 有限元模型

为了验证纤维模型及所获得的 CFRP 抗压弹性模量取值的正确性,本文通过 ABAQUS 通用有

限元软件,基于上述 CFRP 受力状态的分析,对加固构件进行了模拟。

3.1 模型建立

钢管模型采用连续均匀实体单元 C3D8R 进行建模,为了限制线性缩减积分单元沙漏模式的扩展,沿钢管的径厚方向划分为 4 层单元。钢材的本构关系采用理想的弹塑性关系,屈服强度为 355 MPa,初始弹性模量为 210 GPa。FRP 模型采用连续均匀壳单元 S4R 进行建模,材料本构关系为线弹性,由于碳纤维为正交异性材料,因此材料属性定义为单层板,各项材料参数定义如表 4 所示,其中 E_1 为 CFRP 沿纤维方向弹性模量,按表 3 取值; E_2 为垂直于纤维方向的弹性模量,由于该方向不考虑纤维强度,因此按表 1 中基体树脂的弹性模量取值, μ 为材料泊松比, G_{12}, G_{13}, G_{23} 分别为材料各平面内剪切模量,本文试验未对此项参数进行试验,故参考相关文献[9]进行设置,结果表明该项参数对计算结果影响很小,因此将三者按相等取值。

表 4 CFRP 材料参数
Tab. 4 Material Parameters of CFRP

E_1 /GPa	E_2 /GPa	μ	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
71.3	2.4	0.3	3 387	3 387	3 387

为模拟真实的试验条件,模型边界条件设置为固定端限制 3 个位移方向,加载端加载位移方向释放,固定其余位移方向,模型两端转角均不作限制。同时为保证计算结果的收敛性和精确性,在变形较大和较早进入塑性的跨中截面附近以及受力较为复杂的加载端部进行网格细分。另外为了便于偏心加载,在轴压构件两端建立解析刚体壳作为加载载体,解析刚体与钢管之间采用 Tie 连接。有限元模型如图 7 所示。

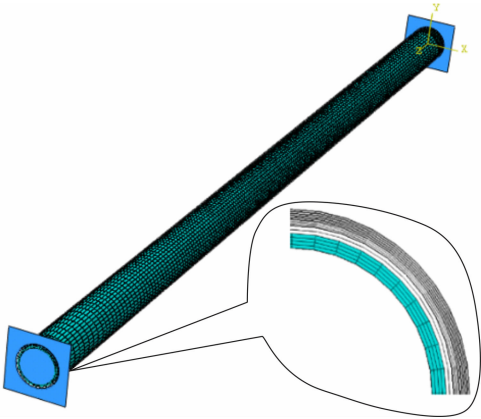


图 7 有限元模型
Fig. 7 Finite Element Model

由于在轴压构件达到稳定承载力之前,各截面满足平截面假定,因此各层纤维及纤维与钢管之间的接触类型设置为 Tie 连接。本文研究构件为轴压长柱,无须做线性摄动屈曲分析即可判断其失稳模态,因此本文采用设置加载初偏心的方式来考虑试验构件的初始缺陷,偏心距选取表 3 中未加固钢管承载力进行确定。根据试验条件进行位移加载,采用基于弧长法的 Static,Riks 求解器进行求解。

3.2 有限元计算结果

根据 ABAQUS 计算结果,绘制了构件处于稳定承载力时 CFRP 沿构件全长的纵向应力云图。由于模型应力分布对称,本文仅给出模型跨中截面以下部分,如图 8 所示。通过纵向应力云图可以看出,轴压构件在其达到稳定承载力时,CFRP 沿构件全长纵向均受压,进一步验证了加固构件稳定承载力的提高源于 CFRP 的抗压贡献。

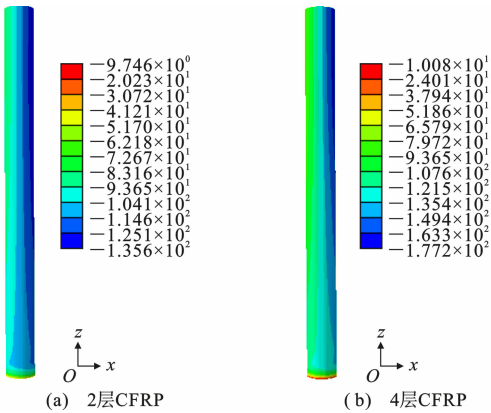


图 8 CFRP 纵向应力云图(单位:MPa)
Fig. 8 CFRP Longitudinal Stress Nephograms (Unit:MPa)

将 ABAQUS 计算结果与纤维模型计算结果进行对比,得到如图 9 所示的荷载-位移曲线。由图 9 可以看出,2 种数值计算方法所得到的结果吻合较好,从而可以验证纤维模型计算过程的正确性。

同时,本文将有限元计算结果与试验结果进行对比,得到轴压构件荷载-横向位移曲线,如图 10 所示。由图 10 可以看出,ABAQUS 与试验得到的加固构件承载力误差在允许范围内,说明依靠纤维模型分析得到的 CFRP 抗压弹性模量是合理的。

4 CFRP 加固效率

本文提出的轴压构件稳定承载力数值分析方法的前提是加固构件外层纤维仅承受压力,即需满足轴压构件在达到其稳定承载力之前为全截面受压状态。截面的受力状态与加载偏心距有关,随着加载

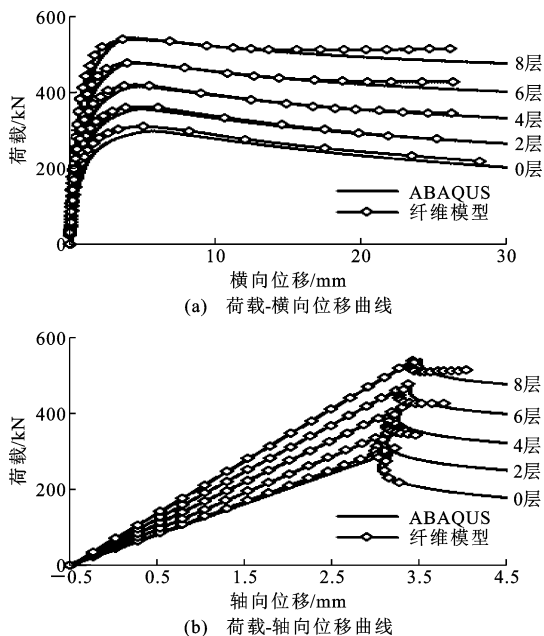


图 9 ABAQUS 与纤维模型荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement Curves in ABAQUS and Fiber Element Model

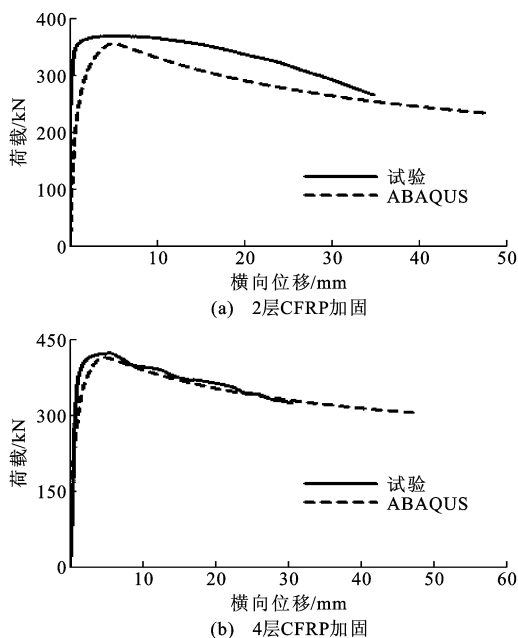


图 10 ABAQUS 与试验荷载-横向位移曲线

Fig. 10 Load-lateral Displacement Curves in ABAQUS and Test

偏心距的增大,跨中截面外侧将提前进入受拉区,无法满足数值模型的计算条件。本文通过纤维模型法计算了加固构件达到极限承载力时构件中点截面受压纤维面积,并提出纤维加固效率的概念,以表示 CFRP 的抗压贡献效率,即

$$\rho_c = \frac{A_c}{A_f} \quad (8)$$

式中: ρ_c 为 CFRP 加固效率; A_c 为中点截面受压纤维面积; A_f 为中点截面纤维总面积。

CFRP 的受力状态与加载偏心距有关,随着加载偏心距的增大,中点截面外侧将会提前承受拉力,为了研究纤维受压率随偏心距的变化规律,本文利用纤维模型分别计算了不同的加载偏心距构件在达到极限承载力时中点截面纤维受压率,并绘出如图 11 所示关系曲线。

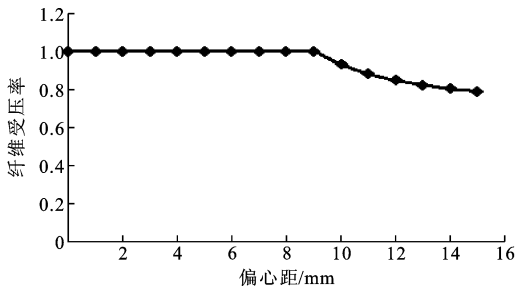


图 11 纤维受压率与偏心距关系曲线

Fig. 11 Relation of Fiber Compression Ratio and Eccentricity

由图 11 可以看出,加载偏心距在达到 9 mm 以后,截面纤维受压率开始逐渐降低,说明部分纤维对承载力的贡献未得到充分利用,偏心距越大,这种现象越明显。据此可以得出结论:随着加载偏心距的增大,CFRP 对长轴压构件承载力的贡献效率逐渐降低,因此对于此类加固构件的使用应该尽量减小加载偏心距,以充分利用 CFRP 的抗压强度。

对于一般的轴心受压构件,加载偏心距主要由轴压构件的初始缺陷引起,各国钢结构设计规范一般均要求由构件的初始缺陷引起的初始偏心距小于 $L/1\,000$ ^[21]。从本文分析来看,在初始偏心距小于 $L/1\,000$ 的情况下,轴压构件满足其稳定承载力之前的全截面受压要求。因此,本文所提出的 CFRP 加固圆形钢管轴压承载力分析方法可以作为此类构件研究的一种简化方法。

5 结 语

(1)通过分析荷载-应变曲线试验结果发现,轴压构件在其达到稳定承载力之前处于全截面受压状态,结合粘贴 CFRP 后相同荷载下构件的轴向位移和横向位移均减小,认为其承载力的提高源于 CFRP 的抗压贡献。

(2)采用纤维模型法对加固构件进行了计算,分析发现 CFRP 的抗压弹性模量随加固层数的增加按自然对数增长。

(3)运用有限元软件 ABAQUS 对加固构件进

行了模拟,得到了与纤维模型及试验结果吻合良好的荷载-位移曲线,验证了以上分析的正确性,本文所提出的轴压构件稳定承载力分析方法可以作为 CFRP 加固圆形钢管轴压承载力的简化分析方法。

(4)随着偏心距的增加,CFRP 加固效率开始逐渐降低,部分纤维的抗压承载能力未得到充分利用。当偏心距大于一定数值后,截面纤维受压率随偏心距的增加逐渐降低。

(5)本文所提出的稳定承载力数值分析方法未考虑轴压构件达到稳定承载力之后 CFRP 的失效过程,有关构件失稳之后 CFRP 抗压失效条件需进一步的试验分析确定。

参考文献:

References:

- [1] 程江敏,程波,邱鹤,等. 钢结构加固方法研究进展[J]. 钢结构,2012,27(11):1-7.
CHENG Jiang-min, CHENG Bo, QIU He, et al. Research Development of Steel Structure Reinforcement [J]. Steel Construction, 2012, 27(11): 1-7.
- [2] 季园园,韩庆华,芦燕,等. CFRP 在土木工程中的应用研究[J]. 结构工程师,2014,30(5):210-219.
JI Yuan-yuan, HAN Qing-hua, LU Yan, et al. Application Research of CFRP in Civil Engineering [J]. Structural Engineers, 2014, 30(5): 210-219.
- [3] 卢亦焱,黄银桑,张号军,等. FRP 加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):34-42.
LU Yi-yan, HUANG Yin-shen, ZHANG Hao-jun, et al. New Progress in the Study of the Technology of Reinforcement with Fiber Reinforced Plastics [J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 34-42.
- [4] HMIDAN A, KIM Y. CFRP Repair of Steel Beams with Various Initial Crack Configurations[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(6): 952-962.
- [5] SAYED-AHMED E Y. Numerical Investigation into Strengthening Steel I-section Beams Using CFRP Strips[C]//CROSS B, FINKE J. Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety. St. Louis: ASCE, 2006: 1-8.
- [6] ALEMDAR F, GANGEL R, MATAMOROS A. Use of CFRP Overlays to Repair Fatigue Damage in Steel Plates Under Tension Loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(4): 04013052.
- [7] ALEMDAR F, MATAMOROS A, BENNETT C R, et al. Improved Method for Bonding CFRP Overlays to Steel for Fatigue Repair[C]//AMES D, DROESSLER T L, HOIT M. Structures Congress 2011. Las Vegas: ASCE, 2011: 133-144.
- [8] HAEDIR J, ZHAO X. Design of Short CFRP-reinforced Steel Tubular Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 497-509.
- [9] KABIR M Z, NAZARI A. Enhancing Ultimate Compressive Strength of Notch Embedded Steel Cylinders Using Overwrap CFRP Patch[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3/4): 723-738.
- [10] YU T, FERNANDO A, TENG J G, et al. Experimental Study on CFRP-to-steel Bonded Interfaces [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(5): 2279-2289.
- [11] FERNANDO D, YU T, TENG J G. Behavior of CFRP Laminates Bonded to a Steel Substrate Using a Ductile Adhesive[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(2): 04013040.
- [12] SHAAT A, FAM A. Axial Loading Tests on Short and Long Hollow Structural Steel Columns Retrofitted Using Carbon Fibre Reinforced Polymers[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(4): 458-470.
- [13] GAO X Y, BALENDRA T, KOH C G. Buckling Strength of Slender Circular Tubular Steel Braces Strengthened by CFRP[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 547-556.
- [14] 李兆阳. 碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢管柱力学性能数值分析[D]. 西安: 长安大学, 2016.
LI Zhao-yang. Numerical Analysis of Mechanical Properties of Steel Tube Strengthened by Carbon Fiber Reinforced Polymer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [15] 唐红元,王灿军,潘毅,等. CFRP 加固冷弯薄壁槽钢短柱偏心受压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 159-165.
TANG Hong-yuan, WANG Can-jun, PAN Yi, et al. Experimental Study on Stability Capacity of Cold-formed Thin-wall Short Steel Channel Columns Reinforced with CFRP Under Eccentric Compression[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 159-165.
- [16] 陈亚飞. CFRP 加固偏心受压方钢管柱稳定承载力试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
CHEN Ya-fei. Experimental Study on Stability Capacity of Square Hollow Section Columns Strengthened with CFRP Under Eccentric Compression[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [17] 王海涛. CFRP 板加固钢结构疲劳性能及其设计方法

- 研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- WANG Hai-tao. Study on the Fatigue Behavior of CFRP Plate Strengthened Steel Structures and Its Design Method [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [18] SHAAT A, FAM A. Fiber-element Model for Slender HSS Columns Retrofitted with Bonded High-modulus Composites[J]. Journal of Structural Engineering, 2007,133(1):85-95.
- [19] 彭福明,郝际平,岳清瑞,等. FRP 加固钢结构轴心受压构件的弹性稳定分析[J]. 钢结构,2005,20(3):18-21.
- PENG Fu-ming, HAO Ji-ping, YUE Qing-rui, et al. Elastic Stability Analysis of Axially Loaded Compression Steel Members by FRP Strengthening[J]. Steel Construction,2005,20(3):18-21.
- [20] 魏劲杰,冯 鹏,杨家琦,等. 复合材料套管加固钢柱的压弯性能[J]. 复合材料科学与工程,2020(9):48-60.
- WEI Shao-jie,FENG Peng,LIU Jia-qi,et al. Behavior of FRP Tube Strengthened Steel Members Under Eccentric Compressive Load[J]. Composites Science and Engineering,2020(9):48-60.
- [21] WEST T D. Enhancement to the Bond Between Advanced Composite Materials and Steel for Bridge Rehabilitation [R]. Newark: University of Delaware, 2001.
- [22] 周 雷,顾轶卓,邱学仕,等. 碳纤维复丝压缩性能测试方法[J]. 复合材料学报,2015,32(5):1436-1444.
- ZHOU Lei, GU Yi-zhuo, QIU Xue-shi, et al. Measuring Method for Compression Property of Carbon Fiber Multifilament[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015,32(5):1436-1444.