

文章编号:1673-9469(2020)01-0007-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.002

偏心率对 CFRP 钢管约束混凝土柱力学性能的影响

李文,谷长霖,梅宝瑞

(东北石油大学,黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为研究偏心率对碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)布加固钢管混凝土柱力学性能的影响规律,借助有限元软件 ABAQUS 对偏心率为 0.3%、0.6%、0.9% 和 1.2% 的构件分别进行数值模拟。结果表明:随着偏心率的增大,被动约束的紧箍力减小;偏心率对构件的荷载挠度曲线影响比较大,对于偏心率大的构件,其极限承载力较小;不同偏心率对于不同长细比的构件影响不同,长细比为 28 时,构件的承载力相应地整体降低。

关键词: CFRP 布;力学性能;偏心率;长细比;极限承载力

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

Effect of Eccentricity Ratio on Mechanical Properties of CFRP Steel Tube Confined Concrete Column

LI Wen, GU Changlin, MEI Baorui

(Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: In order to study the influence of eccentricity rate on the mechanical properties of CFRP reinforced concrete filled steel tubular column, the finite element software ABAQUS was used to simulate the components with eccentricity rate of 0.3%, 0.6%, 0.9% and 1.2% respectively. The results show that with the increase of eccentricity, the tightening force of passive restraint decreases. Eccentricity has great influence on the load deflection curve of components, and the ultimate bearing capacity of components with high eccentricity is small. Different eccentricity has different effects on components with different slenderness ratios. When slenderness ratio is 28, the bearing capacity of components decreases correspondingly.

Key words: CFRP cloth; mechanical properties; eccentricity; slenderness ratio; ultimate capacity

钢管混凝土结构是用钢管包裹混凝土的一种组合结构,从力学性能上看,混凝土与钢管一起承压可以充分发挥混凝土的受压性能和钢管的受拉性能,钢管约束混凝土不但提高了混凝土的抗压强度,也提高了其塑性变形能力和韧性性能。另一方面钢管也可以充当施工模板,节省模板费用。纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)^[1-2]具有自重轻、抗拉强度高、抗疲劳性能优良等特点,随着碳纤维复合材料^[3-10]在工程领域越来越多的应用,该结构形式的纤维材料约束钢管混凝土组合柱的探索与研究也成为了一项重要课题。

目前,有关 FRP 应用于加固方面的研究较多^[11-14],但有关将 FRP 与钢管组合为复合管约束混凝土的相关研究相对较少。同时,在实际工程

中的构件柱通常受轴力和弯矩的共同作用,故可以等效为一个偏心的轴向力,因此研究偏心率对构件的影响显得尤为重要。本文研究 CFRP 钢管约束混凝土柱力学性能,分析偏心率对 CFRP 钢管约束混凝土柱的影响规律,为实际工程应用提供理论依据。

1 有限元模型

1.1 有限元模型的建立

CFRP 为各向异性材料,其在达到极限拉应变之前定义为理想线弹性材料,当超过极限拉应变时材料发生破坏,承载力下降为 0。根据简化计算需要,钢材采用的是双线性随动强化模型,屈服准则采用 Von

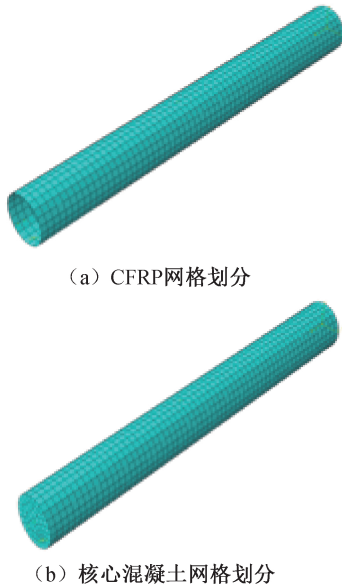
收稿日期:2019-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308028)

作者简介:李文(1969-),男,河北唐山人,硕士,教授,从事组合结构方面的研究。

Mises 屈服准则^[15-16]。混凝土采用塑性损伤模型。

混凝土定义为八节点缩减积分格式的三维实体单元 C3D8R, 钢管定义为壳单元 S4, CFRP 布定义为膜单元 M3D4^[17]。端板定义为三维实体单元, 其厚度为 20 mm。网格的密度划分对试验结果有一定的影响, 经过不断调整网格大小, 取两次分析结果相差较小的网格大小, 对组合柱和刚性端头进行网格划分, 设置全局单元尺寸为 0.1。划分网格后的 CFRP 与核心混凝土部分(图 1)。



(a) CFRP网格划分

(b) 核心混凝土网格划分

图 1 网格划分

Fig.1 The diagram of gridding

本文借鉴文献[18]的方法, 在柱上下底面分别施加两个刚性垫板, 在两端刚性垫块上创建两个偏心参考点, 通过施加位移荷载来施加偏心荷载, 将参考点与刚性垫块进行耦合, 对柱顶参考点约束 X、Y 方向位移, 在参考点上施加 Z 方向位移荷载, 对柱底参考点约束 X、Y、Z 三个方向位移(铰接), 如图 2 所示。

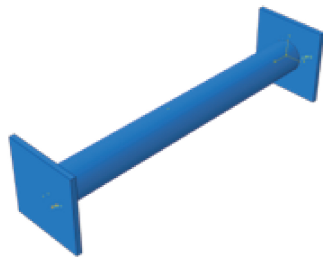


图 2 边界条件

Fig.2 The diagram of the boundary conditions

1.2 试件设计参数

根据相关规定, 本文钢管厚度取 6 mm, 钢管外

径取 500 mm, 柱高取 800 mm; 采用一层加固 CFRP 布, 其具体参数如下: 理论厚度为 0.167 mm, 弹性模量为 $2.3 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 密度为 1.8 g/cm^3 , 泊松比为 0.17。

两组长细比分别为 22.4、28。A 组及 B 组偏心率都分别为 0.3、0.6、0.9、1.2。钢管材料性能参数及所需模拟的试件参数见表 1 和表 2。

表 1 钢材性能

Tab.1 Steel performance

厚度 t_s/mm	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa	泊松比 μ
4.75	318	500	206	0.31

表 2 构件分组

Tab.2 Component grouping

试件组名	试件名称	长细比 λ	钢管约束效应系数 ξ_s	偏心率 e	CFRP 约束效应系数 ξ_{cf}	混凝土强度
A	CSCC-1	22.4	0.59	0.3	0.07	C40
	CSCC-3	22.4	0.59	0.6	0.07	C40
	CSCC-5	22.4	0.59	0.9	0.07	C40
	CSCC-7	22.4	0.59	1.2	0.07	C40
B	CSCC-2	28	0.59	0.3	0.07	C40
	CSCC-4	28	0.59	0.6	0.07	C40
	CSCC-6	28	0.59	0.9	0.07	C40
	CSCC-8	28	0.59	1.2	0.07	C40

1.3 模型验证

将参考文献[7]试验数据与有限元模拟结果对比, 表 3 给出了试件在 ABAQUS 计算所得承载力与试验所得承载力, 可以看出模拟极限承载力与试验承载力比值介于 0.83~1.04 之间, 平均值为 0.96, 均方差为 0.06, 误差在可接受的范围内, 说明模拟与试验结果比较吻合, 因此可进行接下来的模拟运算工作。

表 3 模拟对比验证数据

Tab.3 Verification and compare with the simulation data.

试件编号	试验极限承载力 N_μ^s/kN	模拟极限承载力 N_μ^m/kN	$\frac{N_\mu^m - N_\mu^s}{N_\mu^s}/\%$	$\frac{N_\mu^m}{N_\mu^s}/\%$
SCD-1	1 183	1 198.49	1.31	1.01
SCD-2	878	818.26	-6.80	0.93
SCD-3	650	601.25	-7.5	0.93
SCD-4	557	460.88	-17.26	0.83
SCE-1	1 042	1 000.93	-3.94	0.96
SCE-2	752	717.263	-4.62	0.95
SCE-3	538	532.43	-1.04	0.99
SCE-4	405	419.908	3.68	1.04

2 有限元分析结果

2.1 不同偏心率作用下构件的等效应力云图分析

图 3 为不同偏心率作用下极限承载力下各部件的应力云图。环向 CFRP 的最大等效应力均达到极限强度 1 265 MPa,随着偏心距的增大,达到极限应力的区域向柱中区域缩小,环向 CFRP 的紧

箍力减小。钢管均达到了屈服强度,钢管的等效应力转变为向柱中距荷载较远一侧扩大,柱中两侧最大应力分布相差越来越小。主要原因是偏心率较小时,柱子距荷载较远一侧因弯矩产生的拉力较小,当偏心率增大时,相同荷载产生的弯矩增大,对钢管另一侧的拉应力也相应增大。对于混凝土区域,当偏心率为 0.3、0.6、0.9、1.2 时,最大压应力值分别为 88.2、75.9、72.0、70.3 MPa,最大

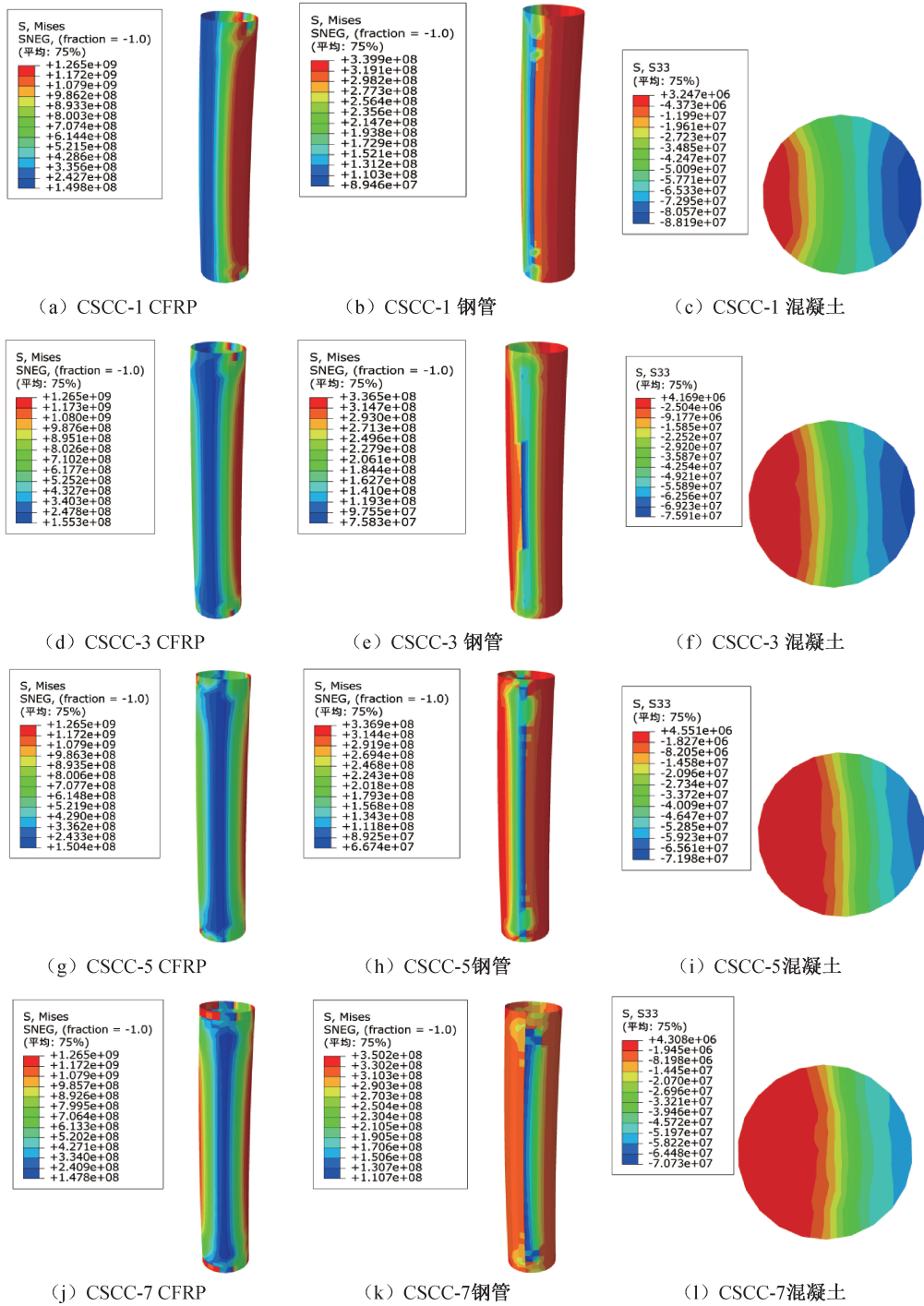


图 3 不同偏心率下试件应力云图
Fig.3 The diagram of stress nephograms of specimens with different eccentricity

拉应力值分别为 32.5、41.7、45.5、43.1 MPa,可以看出最大压应力值随着偏心率增高而降低。最大拉应力在偏心率 0.3~0.9 之间随着偏心率增大而增大,在偏心率 0.9~1.2 之间略有下降。随着偏心率的增大,受拉区域相对于受压区域有所增大。

偏压柱到达极限承载力时,截面上出现不同程度的塑性变形,随着偏心距的增大受压区减小,压区塑性应变也相应减小,塑性变形变小,导致被动约束紧箍力也就减小,即随着偏心距的增大,被动约束的紧箍力减小。由于横截面受压区应力越靠近受压侧边缘应力值越大,塑性变形越大,因此对于同一截面上的紧箍力是不均匀的。

2.2 荷载-挠度曲线

荷载-挠度曲线如图 4 所示,可以看出偏心率对柱的荷载-挠度曲线形状有较大的影响,偏心率大的构件极限力较小,上升段整体斜率及极限承载力对应的挠度较小,即刚度较小。如图 4(a)所示,在长细比为 22.4,偏心率为 0.3 时,随着极限

承载力的增加,挠度呈近似线性变化,当极限承载力达到 9 900.87 kN 时,曲线呈下降趋势;当长细比为 22.4,偏心率为 0.6,极限承载力仅达到 6 341.55 kN 时,曲线即开始下降。当长细比一定时,随着偏心率的增加,荷载-挠度曲线整体呈下降的趋势。主要原因是随着偏心率增加,截面的受拉区及受压区应力分布发生了改变,受拉区相对受压区增大,在较小的荷载下受拉区混凝土就已经开裂,导致其极限承载力降低。

2.3 极限承载力对比

由表 4 可知偏心率对极限承载力有较大的影响,A 组试件 CSCC-3 比 CSCC-1 降低了 35.9%,CSCC-5 比 CSCC-3 降低了 32.7%,CSCC-7 比 CSCC-5 降低了 27.7%;对比 B 组数据的极限承载力有着同样的降低趋势,可知随着偏心率的增大柱的承载力降低,且降低幅度减小;偏心率对不同长细比的构件影响不同,长细比为 28 时,试件的承载力相应地整体降低。

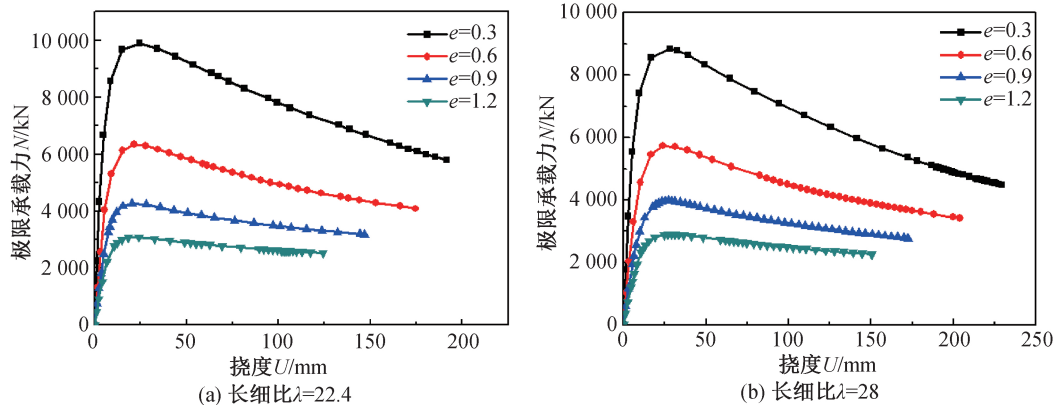


图 4 不同偏心率下荷载-挠度曲线

Fig.4 The diagram of load-deflection curves at different eccentricity

表 4 极限承载力
Tab.4 Ultimate capacity

试件组名	试件名称	长细比 λ	钢管约束效应系数 ξ _s	偏心率 e	CFRP 约束效应系数 ξ _{cf}	混凝土强度	极限承载力 N/kN	极限承载力提高幅度/%
A	CSCC-1	22.4	0.59	0.3	0.07	C40	9 900.87	-
	CSCC-3	22.4	0.59	0.6	0.07	C40	6 341.55	-35.9
	CSCC-5	22.4	0.59	0.9	0.07	C40	4 270.61	-32.7
	CSCC-7	22.4	0.59	1.2	0.07	C40	3 088.26	-27.7
B	CSCC-2	28	0.59	0.3	0.07	C40	8 841.7	-
	CSCC-4	28	0.59	0.6	0.07	C40	5 735.57	-35.1
	CSCC-6	28	0.59	0.9	0.07	C40	3 978.47	-30.6
	CSCC-8	28	0.59	1.2	0.07	C40	2 892.53	-27.3

根据图5可以看出随着偏心率的增大,曲线斜率的绝对值逐渐减小,即随着偏心率的增大,极限承载力的降低幅度变小。

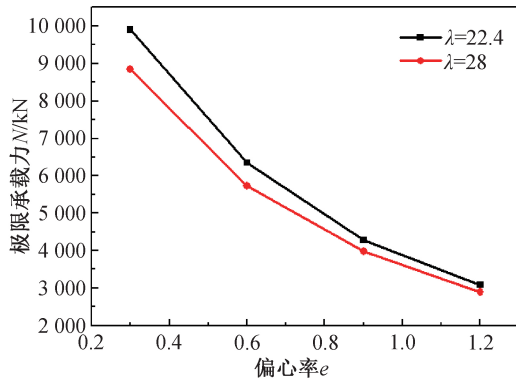


图5 偏心率 e -极限承载力 N 关系曲线

Fig.5 The diagram of eccentricity e -ultimate bearing capacity N relation curve

3 结论

1) 随着偏心率的增大,受压区减小,压应力整体减小,其受压区塑性应变也就越小,导致被动约束紧箍力也就减小,即随着偏心率的增大紧箍力减小。

2) 由于截面受压区应力越靠近受压侧边缘应力值越大,塑性变形越大,紧箍力在同一个截面上是不均匀的。

3) 随着偏心率的增大,受拉区域相对于受压区域有所增大,构件的极限承载力降低,且降低幅度减小,偏心率与极限承载力呈非线性关系。

4) 极限承载力随着长细比的增大而整体减小。

参考文献:

- [1] HAN L H, HUO J S, WANG Y C. Behavior of Steel Beam to Concrete-Filled Steel Tubular Column Connections after Exposure to Fire [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 800-814.
- [2] SEICA M V, PACKER J A. FRP Materials for the Rehabilitation of Tubular Steel Structures, for Underwater Applications (Article) [J]. Composite Structures, 2007, 80(3): 440-450.
- [3] PARK J, HONG Y, HONG G, et al. Design Formulas of Concrete Tilled Circular Steel Tubes Reinforced by Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheets [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 2916-2922.
- [4] ZHONG Tao, HAN L H, Wang L L. Hide ResearcherID and ORCID View ResearcherID and ORCID Author ResearcherID ORCID Number Tao, Zhong B-1157-2008 Tao, Zhong http://orcid.org/0000-0003-2117-2162. Compressive and Flexural Behaviour of CFRP-Repaired Concrete-Filled Steel Tubes after Exposure to Fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(8): 1116-1126.
- [5] 刘洋. CFRP 增强方钢管混凝土压弯构件静力性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [6] 王庆利, 叶茂, 周琳. 圆 CFRP-钢管混凝土构件受弯性能研究 [J]. 土木工程学报, 2008(10): 30-38.
- [7] 郭亚滨. CFRP 布加固钢筋混凝土异形柱力学性能数值研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [8] 苗亚军. 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压静力性能试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] 崔洋. 碳纤维加固不同损伤钢筋混凝土梁的有限元分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [10] 董蛟震. 内嵌碳纤维板加固混凝土梁抗弯性能试验研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [11] KANG-KYU C, YAN X. Analytical Model of Circular CFRP Confined Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Axial Compression [J]. Composite Construction, 2010, 1(14): 125-133.
- [12] PARK J, HONG Y, CHOI S. Behaviors of Concrete Filled Square Steel Tubes Confined by Carbon Fiber Sheets (CFS) Under Compression and Cyclic Loads [J]. Steel and Composite Structures, 2010, 10(2): 187-205.
- [13] 王庆利, 朱贺飞, 高轶夫. 圆 CFRP-钢管约束混凝土轴压力作用下的本构关系 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007(02): 199-203.
- [14] TAO Z, WANG Z B, HAN L H, et al. Fire Performance of Concrete-Filled Steel Tubular Columns Strengthened by CFRP, Steel Composite [J]. Structures, 2011, 11(4): 307-324.
- [15] 刘斐. 圪工拱桥倒塌模型试验以及基于 Abaqus 的数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [16] 陈林. 钢筋混凝土框架异型中节点抗剪承载力及 ABAQUS 非线性有限元分析 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [17] 车媛. CFRP-钢管混凝土压弯构件的力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [18] 徐亚丰, 金松. 钢管-圆钢管高强混凝土组合柱偏心受压有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2016, 32(1): 40-50.

(责任编辑 王利君)