

# 偏心率对工字型 CFRP-高强圆钢管高强 混凝土短柱力学性能的影响

李帼昌,于 潇,李 晓

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究偏心率对内置工字型 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土短柱力学性能的影响。方法 利用 ABAQUS 有限元软件建立了工字型 CFRP-高强圆钢管高强混凝土短柱模型,分析不同偏心率下构件的受力-变形关系、各材料分担荷载以及应力发展,探究混凝土强度、钢材屈服强度、含钢率和 CFRP 型材对组合柱力学性能的影响。结果 随着偏心率的增大,构件延性提高,初始刚度与极限承载力降低,且降低幅度减小,偏心率与极限承载力呈非线性关系;偏心率越小,加入 CFRP 型材对组合柱承载力的提高越显著。结论 偏心率越大,混凝土强度的利用率越低,钢管力学性能发挥越充分。偏心率小于 0.328 时,建议采用增大混凝土强度的方式增加构件极限承载力;偏心率大于 0.328 时,建议采取增大钢材屈服强度和含钢率的方式增加构件的极限承载力。

**关键词** 单向偏压短柱;工字型 CFRP 型材;高强钢管;高强混凝土

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Effect of Eccentricity Ratio on Mechanical Behavior of High-strength Concrete-Filled High-strength Circular Steel Tube Short Columns with Inner I-shaped CFRP Profiles

LI Guochang, YU Xiao, LI Xiao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to study the influence of eccentricity on the mechanical properties of high strength concrete filled high strength circular steel tube short columns with inner I-shaped CFRP profiles. I-shaped CFRP-high strength concrete filled high strength circular steel tube short column model is established by using ABAQUS finite element software. The stress-deformation relationship, load sharing and stress development of each material under different eccentricity ratios

收稿日期:2023-01-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构等方面研究。

are analyzed. The effects of concrete strength, steel yield strength, steel ratio and CFRP profile on the mechanical properties of composite columns were investigated. With the increase of eccentricity, the ductility of the members increases, the initial stiffness and ultimate bearing capacity decrease, and the decrease amplitude decreases. There is a nonlinear relationship between eccentricity and ultimate bearing capacity. The smaller the eccentricity, the more significant the improvement of the bearing capacity of the composite column by adding CFRP profiles. The greater the eccentricity ratio, the lower the utilization rate of concrete strength, and the more fully the mechanical properties of the steel tube are exerted. When the eccentricity is less than 0.328, it is recommended to increase the ultimate bearing capacity of the component by increasing the concrete strength. When the eccentricity is greater than 0.328, it is recommended to increase the ultimate bearing capacity of the component by increasing the yield strength and steel content of the steel.

**Key words:** short columns under eccentric loading; I-shaped CFRP; high strength steel tube; high strength concrete

钢管混凝土结构由于承载力高、抗震性能好、施工方便等优点,在工业厂房、高层和超高层建筑以及桥梁结构中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。为了增加建筑的有效使用面积和减少不可再生资源材料的消耗,高强材料受到了国内外研究学者的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。诸多学者对高强钢管高强混凝土构件进行了研究。J. Y. R. Liew 等<sup>[4]</sup>对钢管混凝土构件进行了试验研究,提出了高强钢管高强混凝土构件的设计指南以及强度匹配准则。M. Xiong 等<sup>[5]</sup>对 56 个钢管混凝土轴压短柱进行了试验研究。结果表明,采用高强材料大幅提高了组合柱承载力,但是脆性变形较大。杨志坚等<sup>[6]</sup>对配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱进行了有限元分析。研究结果表明,配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱充分发挥了各材料的受力特点,在减轻自重的条件下承载力较高且延性较好。曾志伟等<sup>[7]</sup>对 27 个高强钢管高强混凝土和高强钢管普通混凝土短柱试件进行了轴压试验研究。结果表明,钢管起到了良好的约束作用,提高了构件极限承载力,构件延性随着套箍系数的增加而增加,高强钢管普通混凝土试件的延性优于钢管高强混凝土试件。

为进一步减小组合构件截面面积,提高其承载能力与变形能力,国内外学者将轻质

高强的纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)与钢管混凝土构件进行组合,提出了钢-FRP-混凝土组合结构。顾威等<sup>[8]</sup>通过对 CFRP-钢管混凝土轴压短柱(CFRP 表示碳纤维增强复合材料)进行研究,分析了其在轴向荷载下的受力情况,提出了此类构件承载力计算的基本假定。王昱等<sup>[9]</sup>通过改变 FRP 布缠绕方式(通长环向缠绕、螺旋缠绕和套袋缠绕)和 FRP 布层数(2 层、4 层和 6 层)对构件进行了轴压试验。结果表明,纤维缠绕角度影响构件的极限承载力,并且基于试验研究,提出了轴压承载力简化计算方法。

已有研究主要是针对 FRP 材料的受拉性能方面,关于 FRP 材料的抗压性能缺少相关研究。基于此,笔者结合高强圆钢管、高强混凝土及 CFRP 材料特点,提出一种新的 CFRP-钢管混凝土结构形式,利用 ABAQUS 有限元软件建立了工字型 CFRP-高强圆钢管高强混凝土短柱模型,分析不同偏心率下混凝土强度、钢材强度、含钢率和 CFRP 型材对构件力学性能的影响。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型设计参数

工字型 CFRP-高强圆钢管高强混凝土偏

压短柱构件的截面形式如图 1 所示,构件编号及参数见表 1。

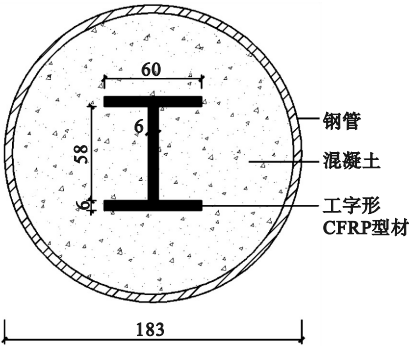


图 1 模型截面参数

Fig. 1 Sectional parameters of the model

表 1 构件参数

Table 1 Component parameters

构件编号	<i>L</i> /mm	<i>f<sub>y</sub></i> /MPa	<i>f<sub>cu</sub></i> /MPa	<i>T</i> /mm	<i>e</i> / <i>r</i>
ECSC-1	550	690	100	5	0.109
ECSC-2	550	690	100	5	0.328
ECSC-3	550	690	100	5	0.546
ECSC-4	550	690	100	5	0.765
ECSC-5	550	690	100	5	0.928

注:*L*为组合构件长度;*f<sub>y</sub>*为钢材屈服强度;*f<sub>cu</sub>*为混凝土强度;*T*为钢管壁厚;*e*/*r*为偏心率。

1.2 材料本构关系

有限元模型中采用钢材屈服强度为 460 ~ 890 MPa 的高强钢材,高强钢材的本构关系选用二折线本构模型<sup>[10]</sup>。

高强混凝土的本构关系采用刘威<sup>[11]</sup>修正后的简化核心混凝土单轴应力 - 应变模型,考虑了钢管对核心混凝土的约束效应,可以有效模拟核心混凝土在峰值应力后的塑性变形。

CFRP 型材是均质、线弹性正交各向异性材料<sup>[12]</sup>。CFRP 型材的本构关系可采用层合板来定义,上下表层和中间层分别为纤维编织布与单向纤维。采用本团队基于 ABAQUS 二次开发的 USDFLD 子程序,用 Tsai-Wu 失效强度准则<sup>[13]</sup>判断 CFRP 型材的破坏。具体表达式及材料属性参照文献<sup>[14]</sup>。

1.3 模型建立

钢管、混凝土以及端板采用八节点线性缩减积分的三维实体单元模拟,CFRP 型材采用八节点缩减积分的连续壳单元模拟。为降低端板对模型的影响,忽略端板的变形,将其视为刚性体,设置材料属性时,将端板弹性模量设置为无限大<sup>[15-16]</sup>。端板与圆钢管之间、CFRP 型材与混凝土之间采用绑定约束,端板与混凝土、CFRP 型材之间,均采用法向硬接触。钢管与混凝土之间采用法向硬接触和切向摩擦接触,设置摩擦系数为 0.6<sup>[17-18]</sup>。有限元模型接触关系如图 2 所示。

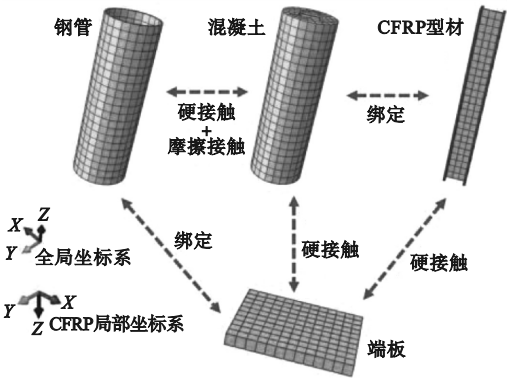


图 2 模型接触关系

Fig. 2 The contact relationship of the model

有限元模型两端设置为铰接,在上端板的加载点施加位移荷载,并将加载点与加载线耦合。上端板的加载线被约束为  $U1 = U2 = 0, U3 = 20, UR2 = UR3 = 0$ ;下端板的加载线被约束为  $U1 = U2 = U3 = 0, UR2 = UR3 = 0$ 。

1.4 有限元模型验证

为验证有限元分析模型的正确性,笔者采用相同建模方法建立了文献<sup>[17]</sup>中试件的模型,并与其试验结果进行对比验证。文献<sup>[19]</sup>中试件 EC5-1 和 EC5-2 参数:宽 × 壁厚 × 长为 150 mm × 5 mm × 450 mm,混凝土强度  $f_{cu} = 57$  MPa,钢管屈服强度  $f_y = 440$  MPa,偏心率  $e/r = 0.267$ 。图 3 为模拟与试验荷载 - 挠度曲线对比,从图中可以看出,有限元模型的荷载 - 挠度曲线与试验构件的荷

载-挠度曲线基本吻合。

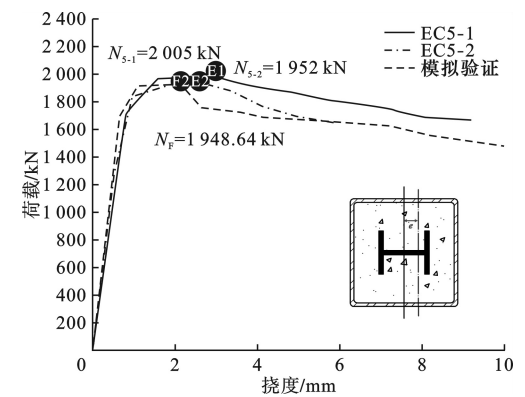


图 3 荷载-挠度曲线对比

Fig. 3 Comparison of load-deflection curves

表 2 为有限元计算结果与文献[19]中试件试验值的比较。由表可知,计算结果误差平均值为 1.003,标准差为 0.044。结果表明笔者建立的有限元模型通过验证,可以用来研究此类构件的受力性能。

表 2 有限元模型验证结果

Table 2 Finite element model validation results			
试件 编号	极限承载力/kN		$\frac{N_E}{N_F}$
	试验值 $N_E$	模拟值 $N_F$	
EC5-1	2 005	1 948.64	1.028 9
EC5-2	1 952	1 948.64	1.001 7
EC5-3	1 513	1 545.15	0.979 2
EC5-4	1 440	1 545.15	0.931 9
EC5-5	1 319	1 300.51	1.014 2
EC5-6	1 382	1 300.51	1.062 7

2 有限元结果分析

2.1 受力全过程分析

笔者以构件 ECSC-2 为例,对单向偏心荷载下的短柱进行受力全过程分析。图 4 为组合柱荷载-挠度曲线。曲线共分为弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段以及平缓阶段。笔者定义 5 个特征点:A 点为钢管达到屈服应力开始屈服;B 点为构件达到极限承载力;C 点表示工字型 CFRP 型材受压侧翼缘大部分破坏;D 点表示工字型 CFRP 型材截面发生断裂;E 点为组合构件承载力达到  $0.85 N_u$

( $N_u$  为试件极限承载力)。

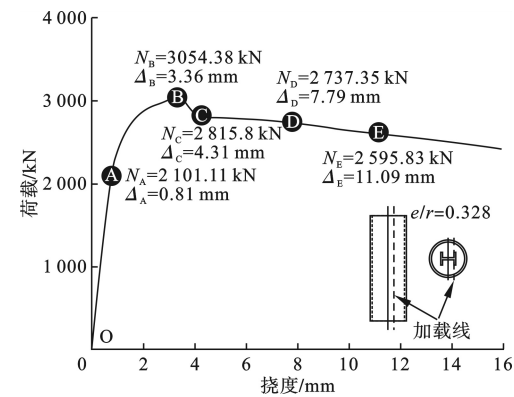


图 4 荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves

弹性阶段(OA):加载初期,曲线呈线性增长。钢管、混凝土和 CFRP 型材均单独受力工作,无相互作用,构件处于弹性工作状态。A 点时,构件承载力为极限承载力的 68.8%。

弹塑性阶段(AB):随着荷载的增加,曲线开始呈非线性增长,荷载增长缓慢,变形发展较快,构件进入弹塑性阶段。钢管与混凝土之间产生相互作用,钢管发挥约束作用,使混凝土处于三向受压状态。当构件达到极限承载力后,CFRP 型材出现失效区,发生脆性破坏。

下降段(BC):随着 CFRP 型材的破坏,组合构件承载力迅速下降到 C 点。当 CFRP 型材受压侧翼缘大部分破坏后,组合构件承载力下降趋于稳定。

平缓段(CE):由于高强混凝土与高强钢管都具有稳定的残余强度,所以 C 点后承载力下降程度变缓,构件各组分仍有残余承载力,构件挠度迅速增长。D 点时 CFRP 型材跨中截面发生断裂,同时钢管受拉侧发生屈服,D 点较 C 点承载力降低了 78.45 kN,E 点较 D 点承载力降低了 141.13 kN,DE 段组合柱承载力下降较 CD 段略快。

2.2 荷载-挠度曲线分析

不同偏心率下构件的荷载-挠度曲线见图 5。



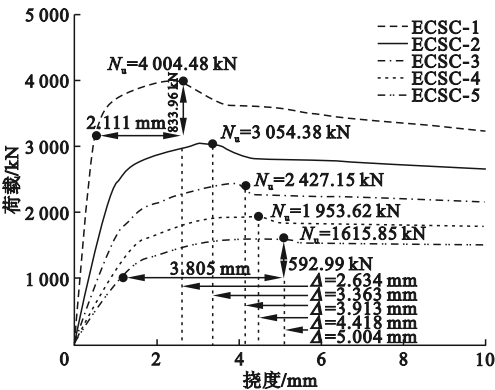


图5 偏心率对荷载-挠度曲线的影响

Fig. 5 The influence of eccentricity on load-deflection curves

引入延性指数  $DI^{[20]}$  对其延性进行分析:

$$DI = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \tag{1}$$

式中: $\Delta_{\max}$  为 0.85  $N_u$  对应的峰后挠度; $\Delta_y$  为连接原点和 0.75  $N_u$  的割线与峰值荷载水平线的交点对应的挠度。不同偏心率下构件延性系数见表 3。

表3 不同偏心率下构件分析结果

Table 3 Component analysis results under different eccentricity				
编号	$e/r$	$N_u/kN$	$EA$	$DI$
ECSC-1	0.109	4 004.48	6 057	8.75
ECSC-2	0.328	3 054.38	2 601	8.75
ECSC-3	0.546	2 427.15	1 581	8.89
ECSC-4	0.765	1 953.62	1 119	9.86
ECSC-5	0.984	1 615.85	853	10.29

注:  $EA$  为构件初始刚度。

由表 3 可知,构件在不同偏心率下的延性指数  $DI$  分别为 8.75、8.75、8.89、9.86 和 10.29,表明偏心率的增大可以提高构件的延性。加载初期,偏心率较大的构件,初始刚度较小。构件偏心率每增加 0.219,即偏心距每增大 20 mm,组合柱初始刚度依次降低 57.1%、39.2%、29.2% 和 23.7%。说明在弹性阶段,构件的偏心率越大,其侧向挠度发展速度越快。在弹塑性阶段,偏心率为

0.109 的构件挠度增长 2.11 mm,荷载增长 833.96 kN;偏心率为 0.984 的构件挠度增长了 3.81 mm,荷载增长了 592.99 kN。表明随着偏心率的增大,构件弹塑性阶段延长,屈服后荷载增长较小但变形发展较快。对于偏心率较大的构件,在接近极限承载力时,其侧向挠度发展较快,荷载-挠度曲线较平缓。由表 3 可知,构件偏心率每增加 0.219,即偏心距每增大 20 mm,组合柱的承载力依次降低 23.73%、20.54%、19.51% 和 17.29%。

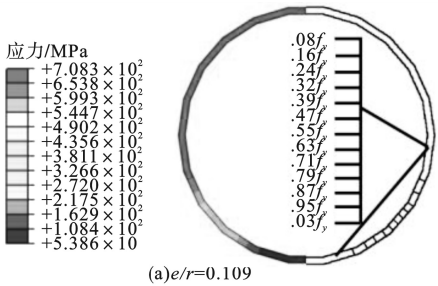
2.3 应力云图分析

2.3.1 钢管应力云图

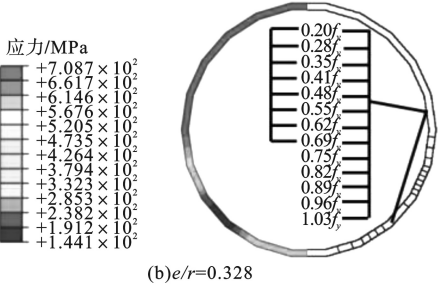
不同偏心率下构件达到极限承载力时钢管跨中截面的应力云图见图 6。从图中可以看出,构件达到极限承载力时,受压侧钢管均达到屈服强度。在偏心率为 0.109 时,受压侧应力最大值为 708.3 MPa,钢管应力由受压侧向受拉侧逐渐减小;受拉侧应力最大值为 53.86 MPa,两者相差 654.44 MPa,受压侧钢管应力值大于受拉侧,受拉侧钢管未充分利用。随着偏心率的增大,受压侧与受拉侧应力差逐渐减小。在偏心率大于 0.328 后,构件达到极限承载力时,钢管受拉侧应力也达到屈服强度,受拉侧钢管性能得到发挥,且钢管受拉侧屈服面积随着偏心率的增大而增大。综上所述,偏心率越大,钢管受拉区以及受压区力学性能发挥越充分。

2.3.2 混凝土应力云图

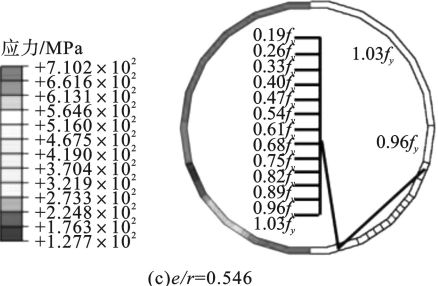
图 7 为构件在不同偏心荷载作用下混凝土跨中截面达到极限承载力时的应力云图,图中黑色虚线为中性轴位置。从图中可以看出,在偏心率为 0.109 时,构件中截面混凝土全截面受压,压应力最大值出现在工字型 CFRP 型材受压翼缘与腹板连接处,最大值为 116.9 MPa,在 CFRP 型材对混凝土的约束作用下,混凝土应力已超过其自身抗压强度。随着偏心率的增加,混凝土纵向应力分布均匀,从受压侧向受拉侧逐渐减小。当偏心率为 0.328 时,中截面受拉侧混凝土拉应



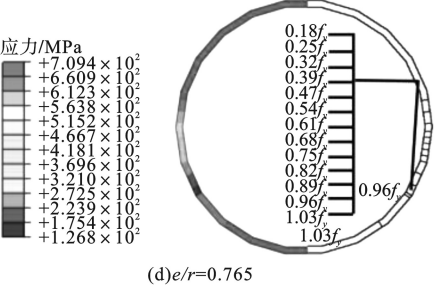
(a)  $e/r=0.109$



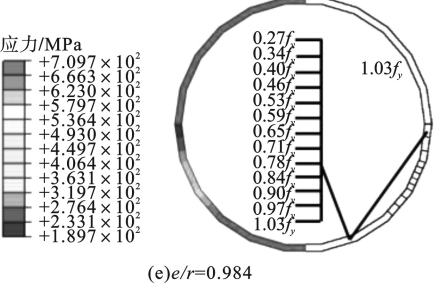
(b)  $e/r=0.328$



(c)  $e/r=0.546$



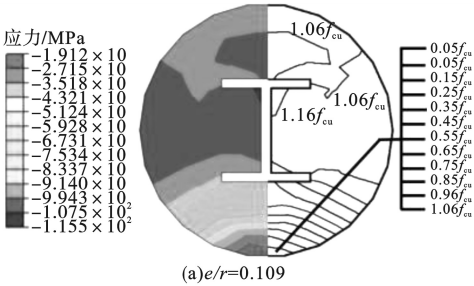
(d)  $e/r=0.765$



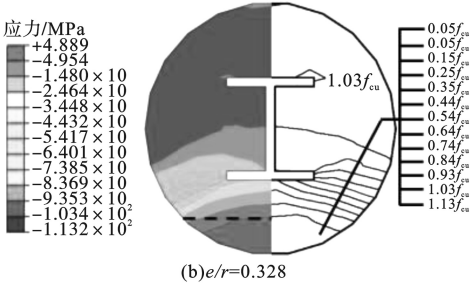
(e)  $e/r=0.984$

图6 钢管 Mises 应力分布云图

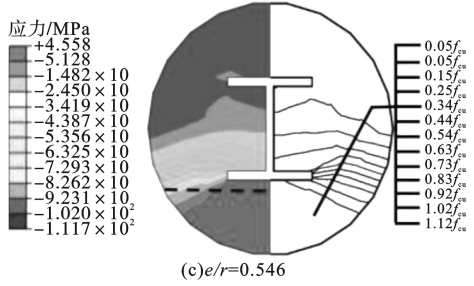
Fig. 6 Mises stress contour plot of steel tube



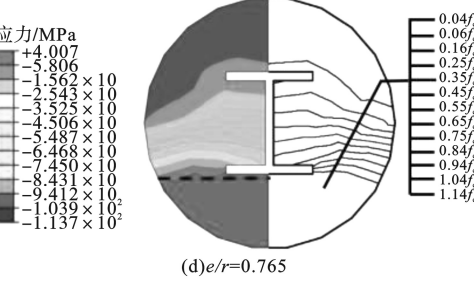
(a)  $e/r=0.109$



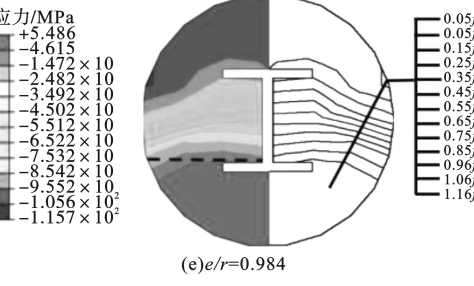
(b)  $e/r=0.328$



(c)  $e/r=0.546$



(d)  $e/r=0.765$



(e)  $e/r=0.984$

图7 混凝土纵向应力分布云图

Fig. 7 Longitudinal stress contour plots of concrete

力为 4.89 MPa;当偏心率从 0.328 增加到 0.984 时,中性轴位置由受拉侧逐渐向受压侧偏移。表明随着偏心率的增大,混凝土受拉区不断增大,受压区不断减小,其抗压强度没有得到充分利用,所以构件承载力明显降低。

2.3.3 工字型 CFRP 型材失效模式

随着偏心率的增加,构件荷载-挠度曲线下降段(BC 段)越来越平缓,现对特征点 C 时 CFRP 型材破坏状态进行分析。图 8 为构件在不同偏心率下特征点 C 时 CFRP 型材纵向纤维破坏失效模式。图中 CFRP 型材左

侧为受拉侧,右侧为受压侧,其中黑色区域表示未破坏,灰色区域表示出现纵向纤维破坏。从图中可以看出,在偏心率为 0.109 时,CFRP 型材失效区域以受压侧翼缘为底呈倒三角型向受拉侧翼缘发展,受压侧翼缘区域面积 32% 发生破坏,腹板区域面积 14.7% 发生破坏。随着偏心率的增加,CFRP 型材破坏范围逐渐减小,当偏心率为 0.765 时,腹板处未发生破坏,受压侧翼缘区域面积 22% 发生破坏。表明随着偏心率的增大,工字型 CFRP 型材强度失效区域逐渐减小,其强度利用率逐渐降低。

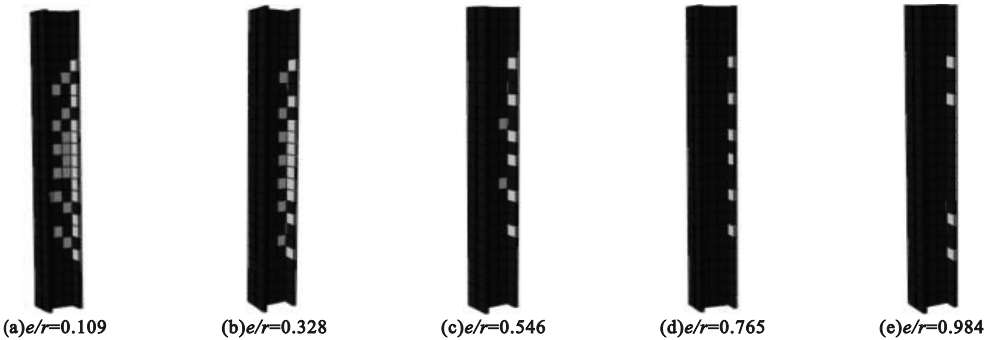


图 8 工字型 CFRP 型材失效模式

Fig. 8 Failure mode of I-shaped CFRP profile

2.4 分担荷载

不同偏心率下构件达到极限荷载时各材料分担荷载占比见图 9。从图中可以看出,当偏心率为 0.109 时,混凝土、钢管、工字型 CFRP 型材三者各分担承载力的 54.0%、37.3%、8.7%。当偏心率为 0.984 时,混凝土、钢管、工字型 CFRP 型材三者各分担承载力的 72.6%、17.15%、10.26%。偏心率每增加 0.219,即偏心距每增大 20 mm,混凝土分担荷载占比增加 5.7%、8.9%、8.8%、7.2%,钢管分担荷载占比减少 10.5%、17.1%、18.8%、24%,CFRP 型材分担荷载变化不明显。分析表明,由于偏心率的增大,混凝土受压破坏程度降低,钢管过早地发生屈服,所以混凝土分担荷载占比随偏心率增大逐渐增大,钢管分担荷载占比随偏心率增大逐渐减小。因此,偏心率较小时,可以通过

增加混凝土强度的方式来提高构件的极限承载力;偏心率较大时,可以通过增加钢材屈服强度的方式来提高构件的极限承载力。

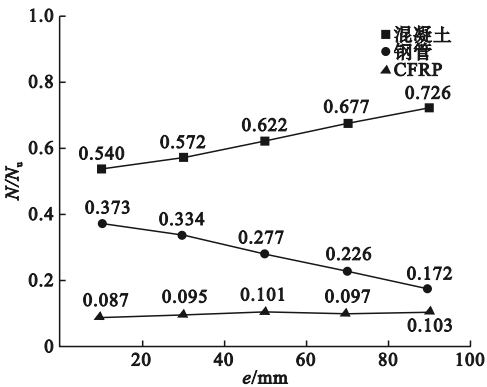


图 9 不同材料的分担荷载

Fig. 9 Different material shares the loads

2.5 强度提升系数 SIF

2.5.1 混凝土强度的影响

为进一步分析不同偏心率下各参数对构

件极限承载力的影响,引入承载力提升系数  $SIF$  进行分析。混凝土强度对  $SIF$  的影响曲线见图 10。从图中可以得出,偏心率小于 0.328 时,  $f_{cu}$  取 80 ~ 120 MPa 的模型  $SIF$  值最小降低了 0.39%,最大降低了 1.10%;偏心率大于等于 0.328 时,  $SIF$  值最小降低了 0.50%,最大降低了 1.70%。说明随着混凝土强度的增大,  $SIF$  值增大,但  $SIF$  值增大的幅度随着偏心率的增加而减小。

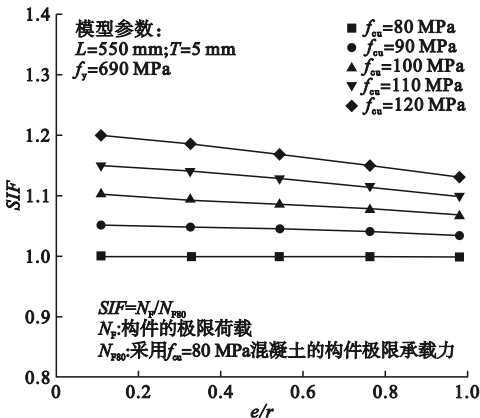


图 10 混凝土强度对  $SIF$  的影响

Fig. 10 Effects of  $f_{cu}$  on  $SIF$

2.5.2 钢材屈服强度的影响

钢材屈服强度对  $SIF$  的影响曲线见图 11。从图中可以得出,随着钢材屈服强度的增大,  $SIF$  值增大,  $SIF$  值增大的幅度随着偏心率的增加而增大。在极限荷载时,偏心率为 0.109 和 0.328 的构件受拉侧钢管均未屈服,高强钢管的高屈服强度在构件达到极限

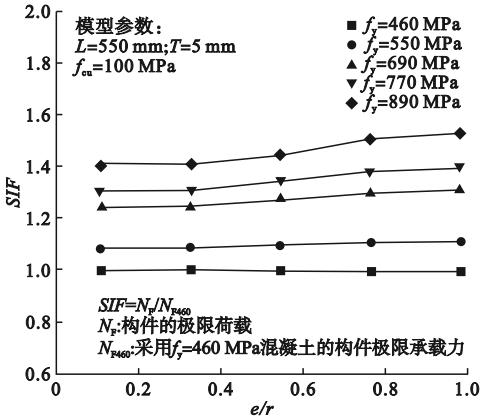


图 11 钢材屈服强度对  $SIF$  的影响

Fig. 11 Effects of  $f_y$  on  $SIF$

荷载时发挥效率则不高。所以,当偏心率为 0.109 和 0.328 时,  $f_y$  取 460 ~ 890 MPa 的模型的  $SIF$  值增加幅度不明显,最小增长了 0.22%,最大增长了 0.47%。当偏心率大于等于 0.328 时,在极限荷载时,所有构件受拉侧钢管均已发生屈服,  $SIF$  增加幅度显著,最小增长了 1.80%,最大增长了 4.12%。

2.5.3 含钢率的影响

含钢率对  $SIF$  的影响曲线见图 12。从图中可以看出,随着含钢率的增大,  $SIF$  值增大,  $SIF$  值增大的幅度随着偏心率的增加而增大。随着偏心率的增大,在极限荷载时,受拉侧钢管逐渐发挥了更大的作用,塑性发展得更加充分,进而使得构件极限承载力提高效果较为显著。

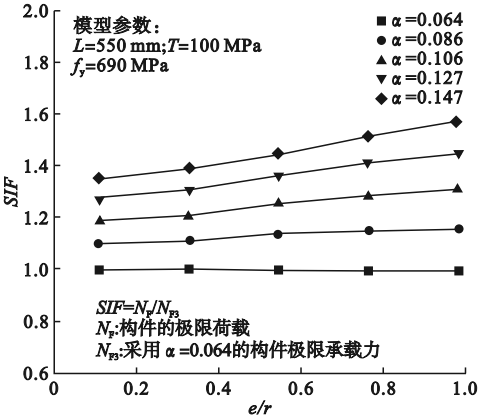


图 12 含钢率对  $SIF$  的影响

Fig. 12 Effects of  $\alpha$  on  $SIF$

综上所述,对于偏心率大于等于 0.328 的组合柱,建议采取增大钢材屈服强度和含钢率的方式提高构件的极限承载力;对于偏心率小于 0.328 的构件,建议采取增大混凝土强度的方式提高构件的极限承载力。

2.6 有无工字型 CFRP 型材

不同偏心率下有无工字型 CFRP 型材对荷载 - 挠度曲线的影响见图 13。从图中可以看出,有 CFRP 型材的构件在弹性阶段的荷载 - 挠度曲线与无 CFRP 型材的构件基本重合。CFRP 型材充分发挥了其抗压性能以及对混凝土的约束作用,明显提高了构件的极限承载力。当构件达到极限承载力后,



CFRP 型材开始破坏,有 CFRP 型材的构件承载力迅速降低,直到 CFRP 型材受压侧翼缘大部分破坏时(特征点 C),曲线下降段斜率与无 CFRP 构件基本重合。

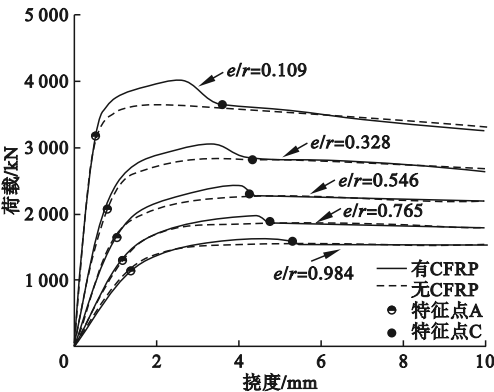


图 13 有无工字型 CFRP 型材对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 13 The influence of I-shaped CFRP profiles on the load-deflection curves

有无工字型 CFRP 型材对构件极限承载力的影响见图 14。从图中可以看出,偏心率从 0.109 增加到 0.984,加入 CFRP 型材构件较未加入 CFRP 型材的构件承载力分别提高了 9.52%、8.90%、7.23%、6.15% 和 5.88%。随着偏心率的增加,CFRP 型材对组合柱承载力的提高程度降低,分析原因是由于当偏心率较大时,仅 CFRP 型材受压侧翼缘部分发生破坏,CFRP 型材没有完全发挥作用。

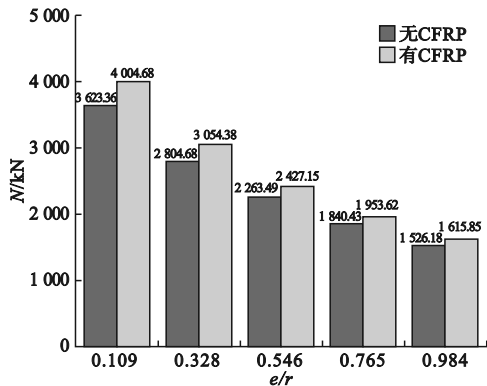


图 14 有无工字型 CFRP 型材对构件极限承载力的影响

Fig. 14 The influence of I-shaped CFRP profiles on ultimate bearing capacity

综上所述,在钢管混凝土构件中放置工字型 CFRP 型材后,对于构件的初始刚度无影响。CFRP 型材充分发挥了其自身抗压性能以及对混凝土的约束作用,但随着偏心率的增大,CFRP 型材对组合柱承载力的提高程度降低,偏心率越小,加入 CFRP 型材对组合构件承载力提高越显著。

3 结 论

- (1)随着偏心率的增大,构件初始刚度降低,延性提高,弹塑性阶段延长,屈服后荷载增长较慢但变形发展较快,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。
- (2)随着偏心率的增大,中性轴由受拉侧不断向受压侧移动,受拉侧钢管材料强度得以充分发挥,混凝土的抗压强度没有得到充分利用。对于偏心率小于 0.328 的构件,建议采用增大混凝土强度的方式来有效增加构件极限荷载;对于偏心率大于 0.328 的构件,建议采取增大钢材屈服强度和含钢率的方式增加构件的极限承载力。
- (3)工字型 CFRP 型材充分发挥了其抗压性能以及对混凝土的约束作用,提高了组合柱的承载力。承载力提高的幅度随着偏心率的增大而减小,偏心率越小,加入 CFRP 型材对组合柱承载力的提高越显著。

参考文献

[ 1 ] HAN L, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [ J ]. Journal of constructional steel research, 2014, 100: 211 - 228.

[ 2 ] SONG T, XIANG K. Performance of axially-loaded concrete-filled steel tubular circular columns using ultra-high strength concrete [ J ]. Structures, 2020, 24: 163 - 176.

[ 3 ] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述 [ J ]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31 ( 3 ): 1 - 24.

( CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [ J ]. Journal of architecture and civil engineering, 2014, 31 ( 3 ): 1 - 24. )

- [4] LIEW J Y R, XIONG M, XIONG D. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete [J]. Structures, 2016, 8: 213 – 226.
- [5] XIONG M, XIONG D, LIEW J Y R. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high-and ultra-high-strength materials [J]. Engineering structures, 2017, 136: 494 – 510.
- [6] 杨志坚, 彭书存, 李幅昌, 等. 配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 655 – 663.  
(YANG Zhijian, PENG Shucun, LI Guochang, et al. Finite element analysis of axial compression behavior of hing strength concrete-finite square high strength steel tube with inner I-shaped CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(4): 655 – 663.)
- [7] 曾志伟, 黄永辉, 陈碧静, 等. 高强钢管高强混凝土短柱轴压承载能力试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(18): 72 – 77.  
(ZENG Zhiwei, HUANG Yonghui, CHEN Bijing, et al. Experimental study on bearing capacity of short columns with high-strength concrete-filled high strength steel tubes under axial loading [J]. Building structure, 2022, 52(18): 72 – 77.)
- [8] 顾威, 赵颖华, 尚东伟. CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力分析 [J]. 工程力学, 2006(1): 149 – 153.  
(GU Wei, ZHAO Yinghua, SHANG Dongwei. Load carrying capacity of concrete filled CFRP-steel tubes under axial compression [J]. Engineering mechanics, 2006(1): 149 – 153.)
- [9] 王罡, 胡清, 刘昌永, 等. FRP 缠绕方式对 FRP 约束钢管混凝土短柱轴压性能的影响研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 189 – 196.  
(WANG Gang, HU Qing, LIU Changyong, et al. Axial compressive behavior of FRP confined concrete-filled steel tubular columns with different FRP-sheet winding patterns [J]. Journal of building structures, 2021, 42(S2): 189 – 196.)
- [10] 韩林海. 钢管混凝土结构 – 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
(HAN Linhai. Steel pipe concrete structure-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [11] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究 [D]. 福州: 福州大学, 2005.  
(LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [12] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of structural engineering, 1997, 123(9): 1135 – 1143.
- [13] DAVALOS J F, QIAO P. A computational approach for analysis and optimal design of FRP beams [J]. Computers & structures, 1999, 70(2): 169 – 183.
- [14] 李润泽. 内置工字型 CFRP 型材的高强方钢管高强混凝土轴压中长柱受力性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.  
(LI Runze. Research on mechanical behavior of high strength concrete-filled high strength square steel tube middle-long columns with inner I-shaped CFRP under axial load [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [15] 金浏, 梁健, 李冬, 等. 结构尺寸对方钢管混凝土短柱抗震性能影响的试验研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(4): 35 – 45.  
(JIN Liu, LIANG Jian, LI Dong, et al. Experimental study on the effect of structural size on the seismic performance of square CFST short columns [J]. Engineering mechanics, 2023, 40(4): 35 – 45.)
- [16] 王凤芹, 王静峰, 沈奇罕. 圆端形钢管混凝土短柱偏压性能和破坏机理分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(11): 1521 – 1529.  
(WANG Fengqin, WANG Jingfeng, SHEN Qihan. Analysis on mechanical properties and failure mechanism of round-ended concrete-filled steel tube stub columns under eccentric compression [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2019, 42(11): 1521 – 1529.)
- [17] TAO Z, WANG Z, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89: 121 – 131.
- [18] HAN L, YAO G, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-walled structures, 2007, 45(1): 24 – 36.
- [19] 张硕. 内置 CFRP 工字型型材的方钢管混凝土偏压短柱的力学性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.  
(ZHANG Shuo. Study on mechanical behavior of concrete-filled square steel short column with inner CFRP I-shaped profiles under eccentric compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [20] LEE H J, CHOI I R, PARK H G. Eccentric compression strength of rectangular concrete-filled tubular columns using high-strength steel thin plates [J]. Journal of structural engineering, 2016, 143(5): 4016228.  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)