

# 配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱 有限元分析

杨志坚<sup>1</sup>, 彭书存<sup>1</sup>, 李帼昌<sup>1</sup>, 丛晓磊<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建二局第四建筑工程有限公司, 天津 300457)

**摘要** 目的 研究配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱受力性能及延性性能, 为配筋空心方钢管混凝土组合柱试验研究提供参考依据。方法 利用有限元软件 ABAQUS 建立了 22 个配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱模型, 对构件的受力全过程及钢材屈服强度、混凝土强度、偏心距和含钢率等参数对其受力性能的影响进行分析。结果 配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱受力过程分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化阶段、下降阶段。增大钢材强度和含钢率可以使构件的承载力显著提升, 延性也越好; 提高混凝土抗压强度, 构件的承载力增加但延性变差; 配普通钢筋可以增加构件的承载力且改善构件的延性。结论 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。

**关键词** 空心方钢管高强混凝土; 偏压短柱; 管柱; 偏心距; 含钢率

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Reinforced Hollow High Concrete Filled Square Steel Tubular Stub Columns under Eccentric Compression

YANG Zhijian<sup>1</sup>, PENG Shucun<sup>1</sup>, LI Guochang<sup>1</sup>, CONG Xiaolei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureall, Tianjin, China, 300457)

**Abstract:** This article aims to investigate the mechanical performance and ductility of reinforced concrete-filled hollow square steel tubular stub columns under eccentric compression, which will provide reference for the experimental study of reinforced hollow high concrete filled square steel tubular (RHHCFST) composite columns. The finite element software ABAQUS was used to establish 22 eccentrically loaded reinforced high-strength concrete-filled hollow square steel tubular stub column models, and the whole loading process of the column and the effects of the steel yield strength, concrete strength, eccentricity and steel ratio on its mechanical performance are analyzed

收稿日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808353, 52178148); 辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10)

作者简介: 杨志坚(1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

Results showed that the loading process of RHHCFST under eccentric load can be categorized into elastic stage, elastoplastic stage, plastic strengthening stage, and descending stage. Both the load-bearing capacity and the ductility of the column increase with steel yield strength, steel ratio, and when using the conventional reinforcement. Meanwhile, enhancing the concrete strength increases the load-bearing capacity while decreases the ductility. In summary the RHHCFST under eccentric compression can fully exert the advantageous mechanical characteristics of each material, and the column behaves a high bearing capacity, a good ductility, and a low weight in engineering practice.

**Key words:** reinforced hollow high concrete filled square steel tubular; eccentricity; tubular column; eccentricity; steel ratio

空心钢管混凝土被广泛应用于输电和变电工程中,全国已建成使用的空心钢管混凝土结构输电塔架多达上百个<sup>[1]</sup>。空心钢管混凝土与实心钢管混凝土结构相比,耗钢量相同,但内部空心节约混凝土,自重较轻<sup>[2]</sup>,便于运输和施工;与钢结构相比,可以节约大量钢材。空心钢管混凝土结构既可以充分发挥钢材和混凝土的力学性能,又避免了两种材料在单独应用时的缺点,具有良好的共同工作能力和力学性能<sup>[3]</sup>。为了进一步提升空心钢管混凝土结构的受力性能,杨志坚等<sup>[4]</sup>提出了一种新型配筋空心钢管混凝土组合结构,这种结构由钢管混凝土与预应力高强混凝土管柱组成。预应力高强混凝土管柱(PHC管柱)是在工厂采用先张法预应力和离心成型工艺,经过高温高压蒸养而制成的一种空心构件。钢管与PHC管柱之间浇筑混凝土从而形成配筋空心钢管混凝土构件。

近年来,国内很多学者对实心钢管混凝土、空心钢管混凝土以及配筋钢管混凝土结构进行了众多试验研究,而关于配筋空心钢管混凝土结构的研究较少。丁发兴等<sup>[5]</sup>采用试验和有限元分析结合的方法对方钢管混凝土轴压短柱进行了研究,提出了一种新的承载力计算公式。韦建刚等<sup>[6]</sup>对9根圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压受力性能进行试验,分析了含钢率、钢材强度和混凝土强度变化对其力学性能的影响,并建立了有限元模型进行参数变化扩展分析。徐礼华等<sup>[7]</sup>通过对21根钢管自应力自密实高强混凝土

柱进行偏心受压试验,分析了试件的破坏形态和各参数变化对偏压试件受力性能的影响,并且根据试验数据推导出了试件在偏心受压下承载力计算公式。王宏伟等<sup>[8]</sup>进行了55根不同截面的空心钢管混凝土柱轴压试验,研究表明圆形截面与其他类型截面的试件相比承载力更大,随着空心率减小构件的承载力逐渐增大,并且根据试验结果验证了空心钢管混凝土柱轴压强度标准计算公式的准确性。赵均海等<sup>[9-13]</sup>通过方钢管螺旋筋混凝土柱轴心受压试验,分析了构件破坏机理、受力过程及各参数对其受力性能的影响,并推导了方钢螺旋筋混凝土的承载力计算公式。陈宗平等<sup>[14]</sup>对方钢管螺旋筋混凝土柱进行了偏压试验研究,分析试件的受力全过程和破坏形态,研究了各参数对试件偏心受压力学性能的影响规律,建立了试件偏心受压的承载力计算公式。H. S. Hu等<sup>[15]</sup>对方形螺旋约束高强钢管混凝土柱进行了轴压及偏压试验,研究表明混凝土破碎是导致混凝土承载能力降低的主要原因,螺旋钢筋对提高承载能力效果不明显,但是可以显著改善试件的延性,并且基于试验结果推导了构件承载力计算公式。

传统的空心钢管混凝土构件承载力较低,抗震性能稍差,而实心钢管混凝土构件承载力较高但自重较大。为改善空心钢管混凝土构件和实心钢管混凝土构件的不足,笔者利用有限元软件ABAQUS建立了配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱模型,对构件的

受力全过程进行分析,研究钢材屈服强度、混凝土强度、偏心距和含钢率等参数对其受力性能的影响,为配筋空心方钢管混凝土组合柱试验研究提供参考依据。

1 构件设计

配筋空心方钢管高强混凝土柱内部为圆形空心高强混凝土,外部为方形钢管。由外

至内依次为方钢管、夹层混凝土、PHC 管柱、预应力筋和螺旋箍筋。构件高度为 1 200 mm,截面长 × 宽为 400 × 400 mm。PHC 管柱外径为 150 mm,内径为 80 mm,混凝土强度等级为 C80。箍筋屈服强度为 650 MPa,预应力筋屈服强度为 1 420 MPa,普通钢筋型号为 HRB400。构件参数见表 1,构件截面形式如图 1 所示。

表 1 构件参数

Table 1 Parameters of the columns

构件编号	$t/\text{mm}$	箍筋	预应力筋	$e/\text{mm}$	$f_{\text{cu}}/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	普通钢筋	$N_u/\text{kN}$
ERHCFST-1	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	60	235	—	5 119.99
ERHCFST-2	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	60	345	—	5 479.99
ERHCFST-3	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	60	390	—	6 006.54
ERHCFST-4	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	60	420	—	6 151.23
ERHCFST-5	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	60	460	—	6355.89
ERHCFST-6	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	70	345	—	5 743.26
ERHCFST-7	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	80	345	—	6 040.02
ERHCFST-8	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	90	345	—	6 291.54
ERHCFST-9	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	100	100	345	—	6 554.60
ERHCFST-10	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	60	60	345	—	6 831.06
ERHCFST-11	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	80	60	345	—	6 295.77
ERHCFST-12	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	—	5 019.68
ERHCFST-13	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	140	60	345	—	4 653.73
ERHCFST-14	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	160	60	345	—	4 326.67
ERHCFST-15	5	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 16$	4 941.60
ERHCFST-16	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 16$	5 217.68
ERHCFST-17	7	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 16$	5 482.18
ERHCFST-18	8	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 16$	5 767.02
ERHCFST-19	9	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 16$	6 069.42
ERHCFST-21	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 18$	5 281.19
ERHCFST-22	6	$\Phi 4@45$	6 $\Phi 7.1$	120	60	345	6 $\Phi 20$	5 439.92

注: $t$ 为钢管厚度; $e$ 为偏心距; $f_{\text{cu}}$ 为夹层混凝土抗压强度; $f_y$ 为钢材屈服强度; $N_u$ 为构件模拟极限承载力。

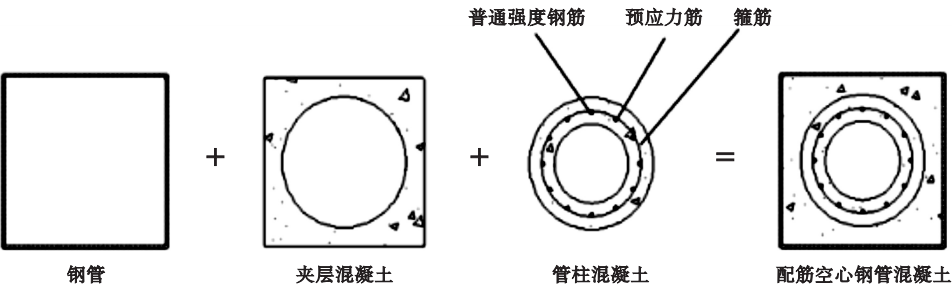


图 1 构件截面形式

Fig. 1 Cross-sections of the columns

2 建立有限元模型

2.1 材料本构关系

构件使用钢材包括钢管、预应力筋、普通钢筋和箍筋。钢管采用低碳钢五折线模型<sup>[2]</sup>;钢筋采用二折线模型<sup>[2]</sup>,分为弹性段和强化段,强化段的弹性模量为弹性段的 0.01 倍,取  $0.01E_s$ 。构件中混凝土包括 PHC 管柱和夹层混凝土。PHC 管柱在构件中处于无约束受力状态,采用过镇海<sup>[17]</sup>提出的混凝土单轴受压本构模型;由于外钢管和 PHC 管柱对夹层混凝土的约束效应,使其处于三向受力状态,选用韩林海<sup>[2]</sup>提出的钢管混凝土受压应力-应变关系。

2.2 模型建立

配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱中盖板、钢管、夹层混凝土和 PHC 管柱均采用 C3D8R 实体单元;预应力筋、普通钢筋和箍筋均采用 T3D2 桁架单元。盖板在材料属性中将其等同于刚体。考虑到外钢管与夹层混凝土之间的摩擦滑移作用,将接触界面定义为法线方向硬接触和切线方向库伦摩擦,界面摩擦系数取 0.6<sup>[2]</sup>。混凝土与盖板之间采用法线方向硬接触,夹层混凝土与 PHC 管柱之间为绑定约束(Tie),预应力筋、普通钢筋和箍筋内置嵌入 PHC 管柱中,采用降温法施加预应力。加载方式采用位移加载,有限元模型如图 2 所示。

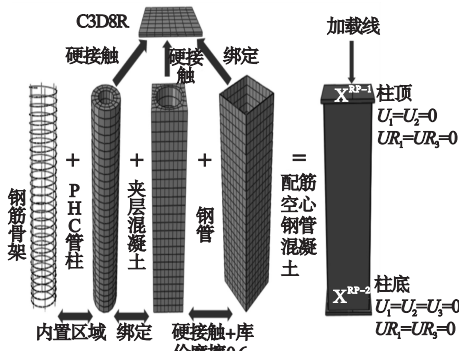


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

3 有限元模拟分析

3.1 受力全过程分析

选取 ERHCFST-16 构件作为典型构件,对配筋空心方钢管高强混凝土偏压短柱进行受力全过程分析。其荷载-中截面挠度( $N_u-\Delta$ )曲线如图 3 所示。构件的受力全过程大致可分为以下四个阶段。

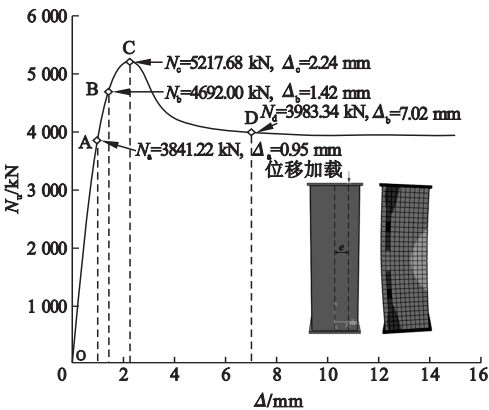


图 3 ERHCFST-16 构件荷载-中截面挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curves of ERHCFST-16

弹性阶段(OA)。构件在加载初期时,钢管、夹层混凝土和 PHC 管柱均处于弹性工作阶段,荷载-挠度曲线呈线性增长,钢管与夹层混凝土各自单独受力工作,钢管对夹层混凝土没有产生约束作用。A 点时构件均处于全截面受压状态,钢管近似于进入弹塑性阶段的起点,受压区 Mises 应力接近 345 MPa,预应力筋和普通钢筋处于弹性阶段。构件受到的荷载约为极限承载力 73.62%。

弹塑性阶段(AB)。随着荷载继续增加,钢管受压区 Mises 应力达到 345 MPa,发生屈服,而受拉区仍处于弹性状态。夹层混凝土的受压侧鼓曲变形,因此外钢管对夹层混凝土开始逐渐产生约束作用,抑制混凝土鼓曲变形的发展。夹层混凝土受到钢管和 PHC 管柱约束作用而处于三向受力状态,因此混凝土压应力得到提升。跨中截面中和轴缓慢向受压侧移动,预应力筋和普通钢筋仍处于弹性状态。构件受到的荷载约为极限承



载力的 89.93%。

塑形强化阶段(BC)。受压侧钢管和部分普通钢筋已经屈服进入塑性变形阶段,钢管对夹层混凝土约束效应逐渐增强,使两者之间接触压力不断增加。在特征点 C 时,构件中截面挠度变形增大,夹层混凝土中和轴逐渐向受压侧移动,中截面夹层混凝土发生开裂。构件的承载力达到最大值。

下降阶段(CD)。在特征点 C 之后构件进入下降阶段,中截面侧向挠度不断增加。钢管不能再为混凝土提供有效约束,混凝土纵向应力分布也变得不均匀,钢管中截面塑性区域不断向内部发展。构件的整体刚度持续减小,剩余承载力逐渐趋于稳定。

3.2 应力分析

3.2.1 夹层混凝土的纵向应力

构件 ERHCFST-16 夹层混凝土中截面的纵向应力分布如图 4 所示。从图中可以看出,在特征点 A 和特征点 B 时,夹层混凝土纵向应力分布均匀且最大值集中在受压区,分别为  $0.95f_c$  和  $1.01f_c$ ,在 A 点时混凝土受拉侧应力达到最大值,大约为 3.89 MPa,混凝土发生开裂。在特征点 C 时构件达到极限承载力,夹层混凝土受压侧角部区域应力达到最大值,约为  $1.26f_c$ ,受压侧应力增加至  $1.11f_c$ ,受拉侧应力减小至 3.69 MPa。钢管对混凝土有效约束集中在角部区域。在特征点 D 时,构件处于下降阶段,夹层混凝土纵向应力持续降低且分布不均匀,受压侧应力减小至  $0.35f_c$ ,而受拉侧应力减小至 2.75 MPa。在整个受力阶段中性轴逐渐向受压区移动。

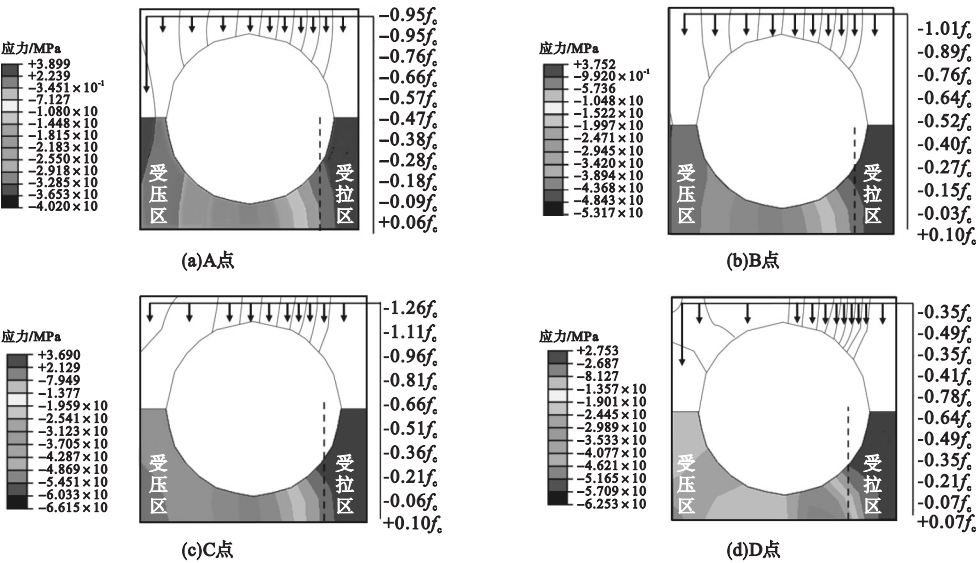


图 4 夹层混凝土纵向应力分布

Fig. 4 Longitudinal stress distribution of sandwich concrete

3.2.2 PHC 管柱的纵向应力

构件 ERHCFST-16 的 PHC 管柱混凝土中截面纵向应力分布如图 5 所示。从图中可以看出,在特征点 A 和 B 时,PHC 管柱纵向应力分布均匀且最大值集中在受压区,分别为  $0.76f_c$  和  $0.93f_c$ 。在弹性和弹塑性阶段

PHC 管柱处于全面受压状态。在特征点 C 点时,PHC 管柱受压侧纵向压应力逐渐增加至  $0.96f_c$ ,受拉区应力大约为 1.94 MPa。在特征点 D 时,PHC 管柱纵向应力分布不均匀,受压侧应力逐渐减小至  $0.51f_c$ ,受拉侧应力增加至 3.20 MPa,混凝土发生开裂。

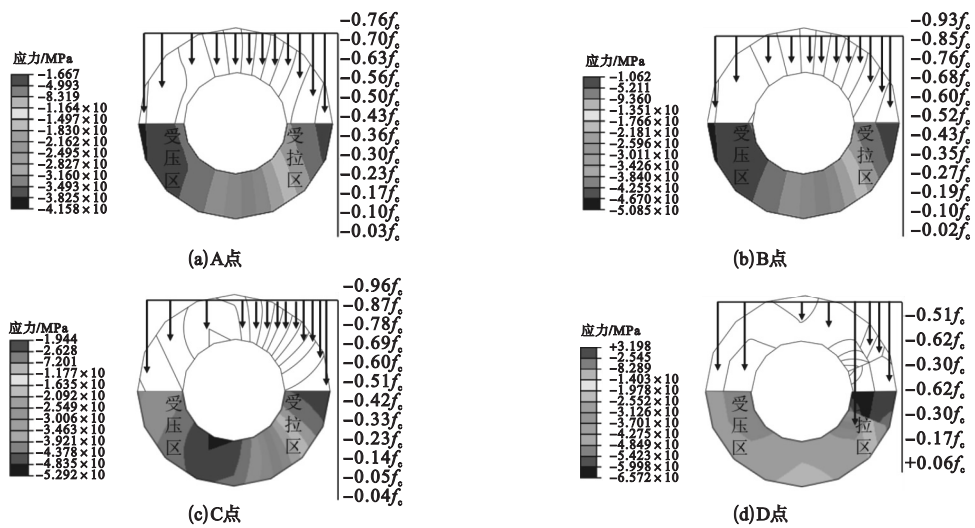


图 5 PHC 管柱纵向应力分布

Fig. 5 Longitudinal stress distribution of PHC string

3.2.3 钢管 Mises 应力

构件 ERHCFST-16 的钢管 Mises 应力云图如图 6 所示。从图中可以看出,在特征点 A 时,钢管 Mises 应力从受拉侧至受压侧呈带状均匀分布,在弹性段钢管接近发生塑性应变状态,最大应力约为 345 MPa,最小应力约为 74.68 MPa,钢管整体处于全截面受压状态。随着荷载继续增加,在弹塑性阶段受压侧钢管 Mises 应力持续增加,钢管开始发

生屈服且受压侧屈服区域持续扩大。在特征点 B 时,受压侧最大应力大约为受拉侧 4.12 倍,应力分布规律与弹性段大致相同。在特征点 C 时,构件达到极限承载力状态,钢管屈服区域进一步向受拉侧扩大,钢管受拉侧 Mises 应力大约为 77.12 MPa。在特征点 D 时,构件进入下降阶段,随着剩余承载力的持续减小,钢管中截面塑性区域继续向受拉侧发展,但钢管端部受拉侧未达到屈服状态。

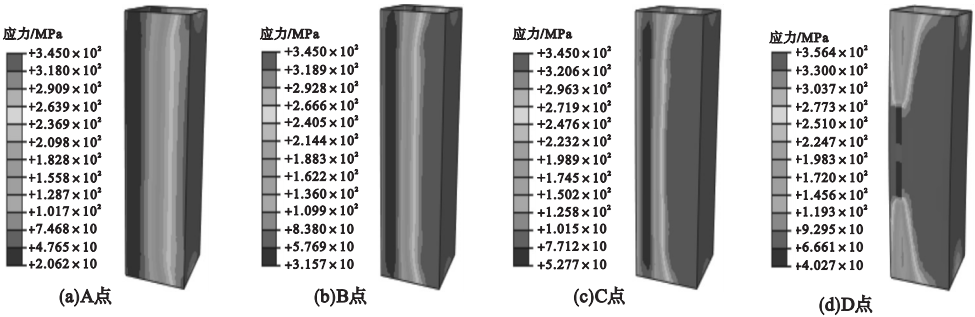


图 6 钢管 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress distribution of steel tube

3.2.4 预应力筋 Mises 应力

预应力筋在初期剩余预拉力为 801.7 MPa,由于弹性阶段构件处于全截面受压状态,预应力筋受压后 Mises 应力逐渐减小。预应力筋 Mises 应力云图如图 7 所示。从图中可以看出,在特征点 A 时,受压

侧与受拉侧预应力筋 Mises 应力相差较大,受压侧应力大约为受拉侧 1.34 倍。在特征点 B 时,受压侧与受拉侧预应力筋 Mises 应力不断减小。从特征点 C 至 D 时,受压侧预应力筋 Mises 应力逐渐增加且达到屈服状态,而受拉侧 Mises 应力减小至 461.7 MPa。

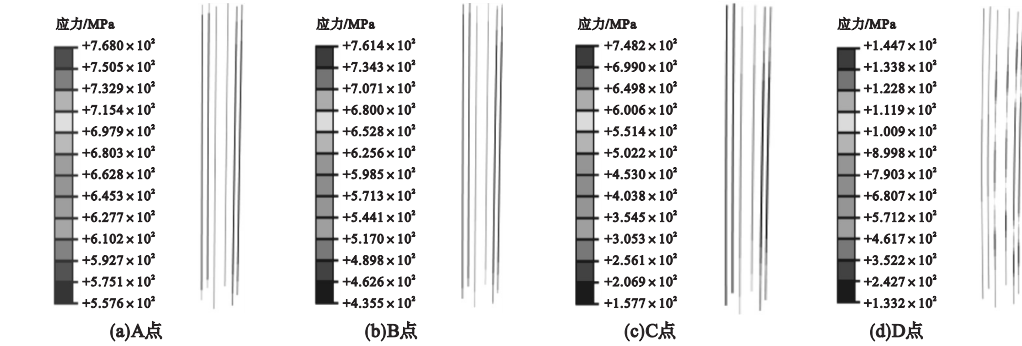


图 7 预应力筋 Mises 应力云图

Fig. 7 Mises stress distribution of prestressed tendons

4 参数分析

4.1 钢材强度的影响

钢管屈服强度对构件荷载 - 挠度影响曲线如图 8 所示。从图中可以看出,构件在弹性阶段曲线几乎重合,初始刚度基本相同。构件在弹塑性阶段以后,曲线呈非线性增长。钢材屈服强度 Q460 与 Q235 相比,构件极限承载力增加了 24. 14%。随着钢材屈服强度增大,构件的极限承载力和剩余承载力越大,后期的延性也变好。

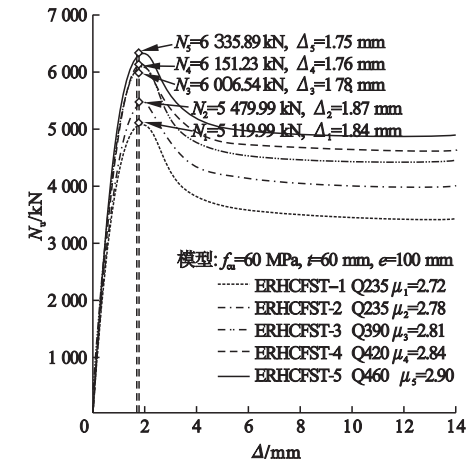


图 8 钢管屈服强度对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 8 Influence of steel yield strength on load-deflection curves

4.2 混凝土强度的影响

夹层混凝土强度对构件荷载 - 挠度影响曲线如图 9 所示。从图中可以看出,夹层混

凝土强度对构件受力性能的影响主要在塑性强化段,荷载 - 挠度曲线呈非线性增长。混凝土强度等级 C100 与 C60 相比,构件极限承载力增加了 19. 61%。增加夹层混凝土强度可以提高构件极限承载力,但后期的延性变差。

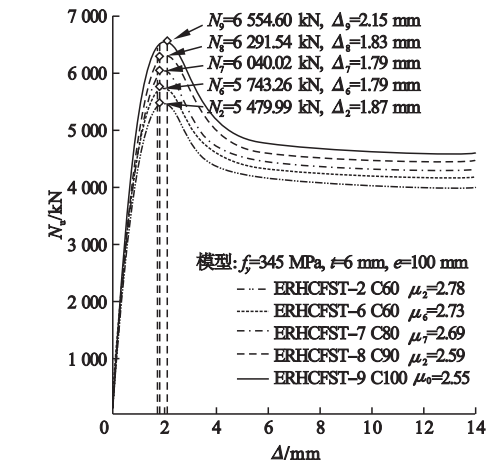


图 9 混凝土强度对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 9 Influence of concrete strength on load-deflection curves

4.3 偏心距的影响

偏心距对构件荷载 - 挠度影响曲线如图 10 所示。从图中可以看出,偏心距对构件受力性能的影响从弹性阶段开始,偏心距增加构件初始刚度和剩余承载力逐渐减小。随着偏心距增大,构件侧向挠度逐渐增加,极限承载力逐渐降低。

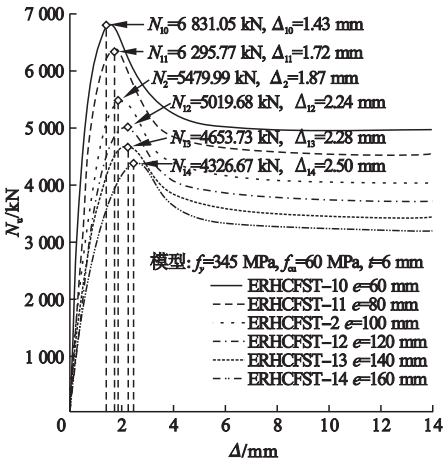


图 10 偏心距对荷载 - 挠度曲线的影响  
Fig. 10 Influence of the eccentricity on load-deflection curves

4.4 含钢率的影响

含钢率对构件荷载 - 挠度影响曲线如图 11 所示。从图中可以看出,含钢率对构件力学性能影响在弹塑性阶段以后。含钢率  $\alpha = 0.106$  与  $\alpha = 0.06$  相比,构件极限承载力增加了 22.82%。随着含钢率的增加,构件的剩余承载力逐渐增大,延性越好。

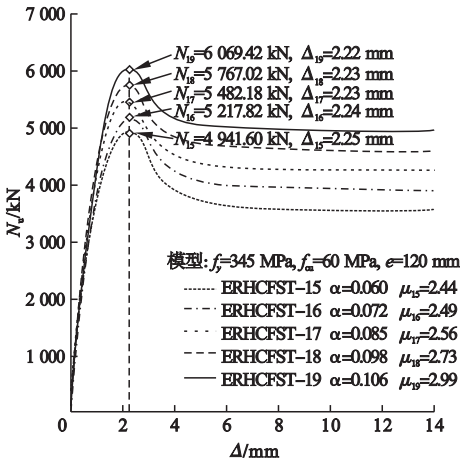


图 11 含钢率对荷载 - 挠度曲线的影响  
Fig. 11 Influence of the steel ratio on load-deflection curves

4.5 普通钢筋的影响

普通钢筋对荷载 - 挠度影响曲线如图 12 所示。从图中可以看出,配普通钢筋对构件的受力性能影响主要在塑性强化段。普通钢筋主要改善了 PHC 管柱的受力性能,由此

来提高构件的极限承载力,使构件后期延性变好。从图 12 可以看出,PHC 管柱有普通钢筋和无普通钢筋构件相比,极限承载力提高 3.94%。当钢筋直径从 16 cm 增加至 18 cm 时,极限承载力提高不明显;当钢筋直径增加到 20 cm 时,极限承载力和初始刚度显著提高,与钢筋直径 18 cm 构件相比,极限承载力提高 2.98%。

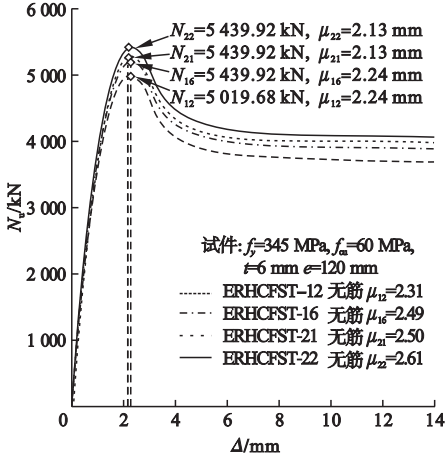


图 12 普通钢筋对荷载 - 挠度曲线的影响  
Fig. 12 Influence of the conventional reinforcement on load-deflection curves

5 结 论

(1) 配筋空心方钢管高强混凝土偏心受压短柱受力全过程分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化段和下降阶段。其中夹层混凝土和 PHC 管柱承担主要荷载,当构件达到极限承载力时,钢管和普通钢筋均达到屈服状态,核心混凝土发生破坏,充分发挥了材料受力性能。

(2) 提高钢材屈服强度和混凝土强度能够增加构件的极限承载力,其中钢材屈服强度提高使构件的延性变好,而混凝土强度提高使构件的延性变差;偏心距越大构件的极限承载力越小,初始刚度和剩余承载力也逐渐减小。

(3) 增加含钢率使构件的极限承载力显著提高,同时具有较好的延性;配普通钢筋可以改善构件的延性和受力性能,提高构件的



极限承载力。

## 参考文献

- [1] 查晓雄. 空心、实心钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2011.  
(ZHA Xiaoxiong. Hollow and solid concrete filled steel tubular structures [M]. Beijing: Science Press,2011.)
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3th ed. Beijing: Science Press,2016.)
- [3] 王宏伟. 空心钢管混凝土构件试验与统一理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
(WANG Hongwei. Research on unified theory and experiment of hollow concrete filled steel tube (H-CFST) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2008.)
- [4] 杨志坚,韩嘉明,杨军彩,等. 空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):429-438.  
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, YANG Juncai, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020,36(3):429-438.)
- [5] 丁发兴,付磊,龚永智,等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2014,31(6):583-592.  
(DING Faxing, FU Lei, GONG Yongzhi, et al. Behavior of concrete-filled square steel tubular stub columns axially compressive loading [J]. Journal of Shenzhen university science and engineering, 2014, 31 (6): 583-592.)
- [6] 韦建刚,罗霞,欧智菁,等. 圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(11):16-28.  
(WEI Jiangang, LUO Xia, OU Zhijing, et al. Experimental study on axial compressive behavior of circular UHPC filled high-strength steel tube short columns [J]. Journal of building structures,2020,41(11):16-28.)
- [7] 徐礼华,许明耀,周鹏华,等. 钢管自应力自密实高强混凝土柱偏心受压性能试验研究[J]. 工程力学,2017,34(7):166-176.  
(XU Lihua, XU Mingyao, ZHOU Penghua, et al. Experimental study on self-stressing self-compacting and high-strength concrete filled steel tubular columns under eccentric compression [J]. Engineering mechanics, 2017,34(7):166-176.)
- [8] 王宏伟,徐国林,钟善桐. 空心率对空心钢管混凝土轴压短柱工作性能及承载力影响的研究[J]. 工程力学,2007,24(10):112-118.  
(WANG Hongwei, XU Guolin, ZHONG Shantong. Study on influence of hollow ratio to bearing capacity of H-CFST [J]. Engineering mechanics,2007,24(10):112-118.)
- [9] 赵均海,韩庚阳,张常光. 方钢管螺旋箍筋混凝土受压短柱极限承载力分析[J]. 钢结构,2017,32(4):33-37,43.  
(ZHAO Junhai, HAN Gengyang, ZHANG Changguang. Ultimate bearing capacity analysis of square concrete filled steel tubular with spiral stirrups under axial compression [J]. Steel construction,2017,32(4):33-37,43.)
- [10] DING F X, FANG C J, BAI Y, et al. Mechanical performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. Journal of constructional steel research,2014,98(7):146-157.
- [11] XIAMUXI A, HASEGAWA A. A Study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns [J]. Journal of constructional steel research,2012,76:144-154.
- [12] XIAMUXI A, LIU X, HASEGAWA A. Study of the concrete in reinforced concrete-filled steel tube column under axial loading [J]. Journal of constructional steel research,2020,170:106111.
- [13] 谭秋虹,陈宗平,经承贵. 方钢管螺旋筋复合约束混凝土柱偏压性能试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2020,41(4):105-112.  
(TAN QiuHong, CHEN Zongping, JING Chenggui. Experimental investigation on mechanical performance and bearing capacity calculation of spiral stirrup-reinforced concrete-filled square steel tubular columns under eccentric compression [J]. Journal of building structures,2020,41(4):105-112.)
- [14] 陈宗平,黄乐彰,谭秋虹. 方钢管螺旋筋混凝土柱偏压性能试验及参数分析[J]. 工程力学,2021,38(1):205-219.  
(CHEN Zongping, HANG Lezhang, TAN QiuHong. Experimental study and analysis of concrete filled square steel tube columns with spiral reinforcement under eccentric compression [J]. Engineering mechanics, 2021, 38 (1): 205-219.)
- [15] HU H S, WANG H Z, GUO Z X, et al. Axial compressive behavior of square spiral-confined high-strength concrete-filled steel-tube columns [J]. Journal of structural engineering, 2020, 146(7):04020136.
- [16] HU H S, XU L, GUO Z X, et al. Behavior of eccentrically loaded square spiral-confined high-strength concrete-filled steel tube columns [J]. Engineering structures, 2020, 216:110743.
- [17] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系—原理与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
(GUO Zhenhai. Strength and constitutive model of concrete-principle and application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press,2004.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)