

配筋空心圆钢管高强混凝土轴压短柱 工作机理分析

杨志坚,刘雪,李帼昌

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种配筋空心圆钢管高强混凝土新型组合柱,分析其在轴向荷载作用下的工作机理,以解决空心钢管混凝土柱空心率较大和延性差等问题。方法 对配筋空心圆钢管高强混凝土短柱进行轴压试验,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立组合柱的有限元模型,以试验结果验证有限元模型的准确性。对组合柱的受力工作机理进行分析,重点研究其在轴向荷载作用下的受力过程、各组分分担内力比例和应力状态。结果 与空心圆钢管高强混凝土柱相比,未配置普通钢筋的试件峰值承载力提升了 6.37%、 DI 提高了 6.64%、 SI 提高了 3.59%,配置普通钢筋的试件峰值承载力提升了 13.31%、 DI 提高了 8.12%、 SI 提高了 5.68%。整个受力过程中,管柱混凝土和夹层混凝土承载的内力比例分别为 36.2%~39.7%和 29.0%~30.6%。结论 配置普通钢筋的试件具有更高的承载能力和延性能力;夹层混凝土和管柱混凝土在加载过程中为主要受力组分;钢筋在加载前期基本不承担内力,进入塑性强化阶段才开始发挥作用。

关键词 配筋空心钢管混凝土;轴压试验;延性系数;Mises 应力

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:杨志坚,刘雪,李帼昌.配筋空心圆钢管高强混凝土轴压短柱工作机理分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):807-817.(YANG Zhijian,LIU Xue,LI Guochang. Mechanical behavior analysis of reinforced hollow high strength concrete filled circular steel (Tubular short columns under axial loads[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):807-817.)

Mechanical Behavior Analysis of Reinforced Hollow High Strength Concrete Filled Circular Steel Tubular Short Columns under Axial Loads

YANG Zhijian,LIU Xue,LI Guochang

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

Abstract: A novel composite column of reinforced hollow circular steel tubes filled with high-

收稿日期:2024-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52178148,51808353);辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10);“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2203109)

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。

strength concrete (RHCFSST) is proposed, and its mechanical behavior under axial load is investigated. The aim of this study is to address the issues of large hollow ratio and poor ductility commonly observed in hollow concrete-filled steel tubular (HCFST) columns. Experimental testing was conducted on reinforced hollow circular high-strength concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial load. Subsequently, a finite element model of the composite column was developed using ABAQUS software, and its accuracy was validated against experimental data. The mechanical behavior of the composite column was analyzed, with a particular focus on the stress distribution under axial load, the distribution of internal forces among different components, and the overall stress state. Comparative analysis revealed that improvements were observed in the RHCFSST columns compared to the HCFST columns, with the ultimate bearing capacity increasing by 6.37% for specimens without ordinary steel bars and by 13.31% for specimens with ordinary steel bars. Additionally, notable enhancements were observed in the ductility index (DI) and strength index (SI). Throughout the loading process, the proportions of internal forces carried by the column concrete and the sandwich concrete were determined to be 36.2% ~ 39.7% and 29.0% ~ 30.6%, respectively. The proposed RHCFSST columns, particularly those incorporating ordinary steel bars, demonstrated superior bearing capacity and ductility. Notably, sandwich concrete and column concrete were identified as the primary load-bearing components during loading, while the steel bars remained inactive in bearing internal forces during the initial loading stages, only becoming effective during the plastic strengthening phase.

Key words: reinforced hollow concrete filled steel tube; axial load test; ductility factor; Mises stress

空心钢管混凝土是在传统实心钢管混凝土基础上发展而来的组合结构形式,空心钢管混凝土一般在工厂预制而成,大大缩短了施工时间。与实心钢管混凝土相比,预制空心钢管混凝土具有自重轻、运输方便、施工简便等优点^[1],在输电塔、高架桥桥墩等结构中具有较好的应用前景。

近年来, M. Yu 等^[2-5]对空心钢管混凝土短柱的轴压力学性能进行了研究,提出了空心钢管混凝土短柱在轴压荷载下的承载力计算方法。由于空心钢管混凝土需在工厂离心预制而成,受制作工艺的限制,其空心率往往较大,在一定程度上限制了其在建筑结构中的应用范围。陈约瑟^[6]通过对圆钢管约束钢筋混凝土空心短柱的轴压试验,得出试件延性随混凝土强度提高而减小,而提高配筋率可以有效提高试件的承载力和延性。H. Hasan 等^[7-10]通过试验和理论研究得出,在钢管混凝土内配置钢筋,可有效提升试件的承载能力和延性。随着材料技术和施工工艺的提升,高强材料在建筑结构中得到了较

多应用,采用高强材料的试件具有截面面积小、材料用量少等优点^[11]。预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)作为高强材料应用的试件之一,因其预制而成,具有质量可靠、桩身不易产生裂缝、桩身混凝土强度高和施工速度较快等优点^[12],被广泛应用于工业和民用建筑基础工程、边坡支护和挡土工程等结构中^[13]。

基于现有空心圆钢管混凝土柱延性弱、且受制作工艺限制导致空心率大等问题,杨志坚等^[14]结合空心钢管混凝土柱和预应力高强混凝土(PHC)管柱优点,提出一种配筋空心圆钢管高强混凝土新型组合柱,该试件由预制PHC管柱、高强混凝土及钢管组成。配筋空心圆钢管高强混凝土新型组合柱能充分发挥空心钢管混凝土柱与PHC管柱的优点,具有承载力高、延性好、施工方便等优点,且空心率和截面形式可依据实际工程需要进行调节,工程应用范围更广。为研究配筋空心圆钢管高强混凝土轴压短柱的受力机理,笔者制作了两根配筋空心圆钢管高强混凝土

短柱足尺试件,对其进行轴压试验;并利用 ABAQUS 有限元软件建立组合柱的有限元模型,利用试验结果验证了有限元模型的可靠性;然后对组合试件的受力全过程、各组分内力分担比例以及相互作用机理进行分析,以期为此类试件的工程应用提供参考。

1 试 验

1.1 试件设计

设计并制作了两根配筋空心圆钢管高强混凝土短柱足尺试件,主要参数为是否配置普通钢筋,试件编号为 T6-N、T6-Y。根据《先张法预应力混凝土管桩》(GB13476—2009)^[15],PHC 管桩螺旋箍筋为 A4@45 的冷拔钢丝,预应力筋为 6A7.1,普通钢筋为 6C16,普通钢筋和预应力筋并筋布置,桩身混凝土强度等级为 C80。试件长 L 为 1 200 mm,外直径 D 为 400 mm,钢管壁厚 t 为 6 mm。由于试验设备量程(12 000 kN)的限制,夹层混凝土强度等级为 C60,钢管屈服强度为 355 MPa。试件截面示意图如图 1 所示。

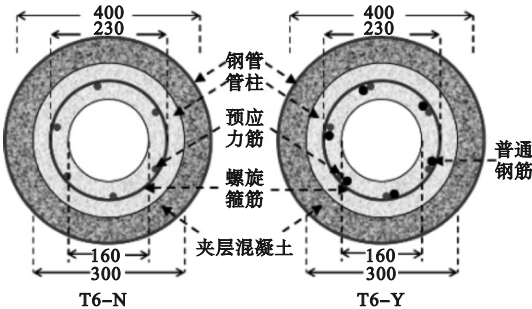


图 1 试件截面

Fig. 1 Cross section of the specimen

1.2 材料性能及测量方案

对试验材料进行力学性能测试,测得夹层混凝土养护 28 d 和试验前的强度分别为 57.2 MPa 和 75.0 MPa,管柱混凝土强度为 80.4 MPa。钢板拉伸试件、普通钢筋、预应力钢筋和螺旋钢筋的屈服强度分别为 358 MPa、459 MPa、1 465 MPa 和 631 MPa。采用 LVDT 采集试验过程中产生的位移。

1.3 结果分析

1.3.1 试验现象

试件破坏形态如图 2 所示。

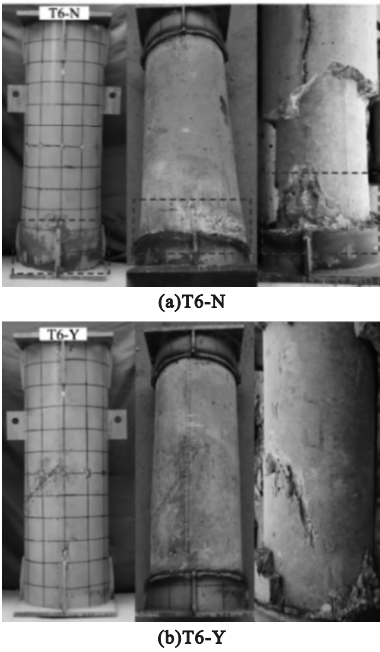


图 2 试件破坏形态

Fig. 2 Specimen failure modes

从图 2 中可以看到,试件 T6-N 发生下部压溃破坏(见图 2(a))。试验过程中,试件在弹性阶段刚度不变且外形无明显改变;荷载增加到 $0.65 N_u$ (N_u 为试件峰值承载力)时,下部截面应变和轴向压缩变形快速增加,试件下端部率先开始鼓曲,并传出内部混凝土压碎的响声,此时试件进入弹塑性阶段;荷载增加到 $0.8 N_u$ 时,试件进入屈服状态,试件下部较靠端部位置处一周均发生鼓曲现象,试件内部不断传出响声,判断为混凝土开裂响声,此时阶段为塑性强化阶段;当荷载接近峰值荷载 N_u 时,试件内部混凝土压碎的响声不断传出,试件下端部一周鼓曲严重。试验结束后,剖开外部钢管可以看见夹层混凝土和管柱混凝土下端部均被压碎。

试件 T6-Y 发生混合破坏,破坏形态如图 2(b)所示。从图中可以看出,试件出现较短的剪切滑移线且并未贯穿试件,破坏角度在 45° 左右。在加载初期即弹性阶段,试件

刚度不变,外表面无明显变化;荷载增加到 $0.7 N_u$ 时,试件外部形态没有变化,内有混凝土压碎声音发出,内部组分之间产生相互作用,此时试件进入弹塑性阶段;荷载增加到 $0.85 N_u$ 时,试件进入屈服状态,试件中部有油漆脱落现象,试件内部传出混凝土压碎的较大响声;接近峰值荷载 N_u 时,试件下部发生局部鼓曲,试件内部发出连续响声。当荷载下降到峰值荷载的 70% 时,试验终止。试验结束后,剖开外部钢管可见夹层混凝土表面无明显变化,管柱混凝土有斜向剪切裂缝,但没有贯穿试件。

1.3.2 试验结果

试件荷载-位移曲线如图 3 所示。从图中可以看到,配置普通钢筋后试件的承载力有明显提升,试件 T6-Y 的荷载-位移曲线较 T6-N 相比,峰值阶段和峰后下降阶段更平缓。

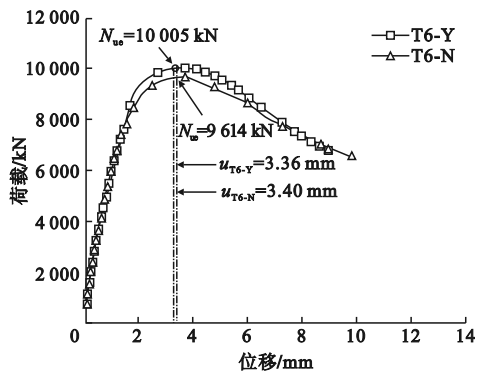


图 3 试件荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of specimen

试验结果见表 1。表中 u 表示峰值承载力 N_{ue} 对应的纵向位移; DI 表示延性系数; SI 表示强度提高系数。从表中结果可以得出,配置普通钢筋后,试件峰值承载力提高了 4.1%。表明配置普通钢筋可明显增加试件的承载力及延性。

表 1 试验结果

Table 1 Test results

试件	u/mm	N_{ue}/kN	DI	SI	破坏模式
T6-N	3.40	9 614	1.927	1.074	压溃破坏
T6-Y	3.36	10 005	1.937	1.108	混合破坏

2 有限元模型建立与验证

采用 ABAQUS 有限元分析软件建立配筋空心圆钢管高强混凝土短柱有限元模型,模型主要由钢管、夹层混凝土、PHC 管柱、钢筋及端板五部分组成。

2.1 材料本构模型

钢材主要包括钢管、螺旋箍筋、普通钢筋及预应力钢筋,其中除预应力钢筋采用双折线模型外,其余钢材均采用 U. Katwal 等^[16]提出的具有强化阶段的弹塑性模型。

轴向荷载下的混凝土处于三向受压状态,常规混凝土本构模型不能较准确地预测其受力性能,故笔者采用韩林海教授^[17]提出的考虑钢管约束系数的混凝土本构模型。

2.2 单元设置及网格划分

钢管采用四节点壳单元(S4R);夹层混凝土、端板及管柱均采用八节点三维实体单元(C3D8R);钢筋采用两结点线性三维桁架单元(T3D2)。网格划分对于模型计算精度有一定影响,在保证计算精度的情况下考虑模型的计算效率,网格大小取为 30 mm。模型中钢管、夹层混凝土及 PHC 管柱采用中性轴算法划分网格,内部钢筋采用桁架单元。

2.3 接触及边界条件设置

钢管与夹层混凝土之间采用面面接触,法向方向为“硬”接触,切向方向库伦摩擦系数为 0.6^[18]。试验后发现夹层混凝土与管柱混凝土之间粘结良好,无相对滑移,采用绑定连接,端板作为传力工具与钢管之间采用绑定连接。钢筋笼嵌入 PHC 管柱混凝土中。

2.4 荷载施加过程

为了模拟实际试件加工及加载,钢筋预应力与位移分两步加载,即在初始分析步中设定一个初始温度,在第一步中对预应力筋降温,使其产生预应力,第二步进行位移荷载的施加。

2.5 模型验证

组合柱有限元模拟结果与试验结果对比

曲线和破坏形态对比如图 4 所示。从图中可以看出,荷载-位移曲线吻合良好,破坏形态基本一致。两试件峰值承载力的有限元结果与试验结果相对误差为 0.60% 和 2.23%,误

差范围在 3% 以内。表明笔者建立的有限元模型可有效地模拟出试件在轴向荷载作用下的受力性能,模拟结果较为准确。

3 与空心钢管混凝土柱对比分析

为分析配筋对空心圆钢管高强混凝土柱力学性能的影响,建立空心钢管高强混凝土柱的对比试件,分析其在轴压作用下的受力性能,有限元模型参数见表 2。表中 RHCFS**T**-a 为空心钢管混凝土柱,RHCFS**T**-b 为笔者提出的未配置普通钢筋试件,RHCFS**T**-c 为笔者提出配置普通钢筋的试件。图 5 为试件的荷载-位移关系曲线。从图中可以看出,与普通空心圆钢管混凝土试件相比,配筋空心圆钢管高强混凝土柱试件的荷载-位移曲线下降段较为平缓,配置钢筋可提高试件的峰值承载力和延缓组合柱承载力的下降趋势。

从表 2 可以得出,与试件 RHCFS**T**-a 相比,试件 RHCFS**T**-b 峰值承载力提高了 6.37%、*DI* 提高了 0.094、*SI* 提高了 0.036;试件 RHCFS**T**-c 峰值承载力提高了 13.31%、*DI* 提高了 0.115、*SI* 提高了 0.057。延性系数提高的幅度比强度提高系数大,说明相比于提高承载力,增加钢筋对于提高延性效果更好。综上所述,与普通空心钢管高强混凝土试件相比,笔者提出的配筋空心圆钢管高强混凝土柱具有更高的承载力和更好的延性。

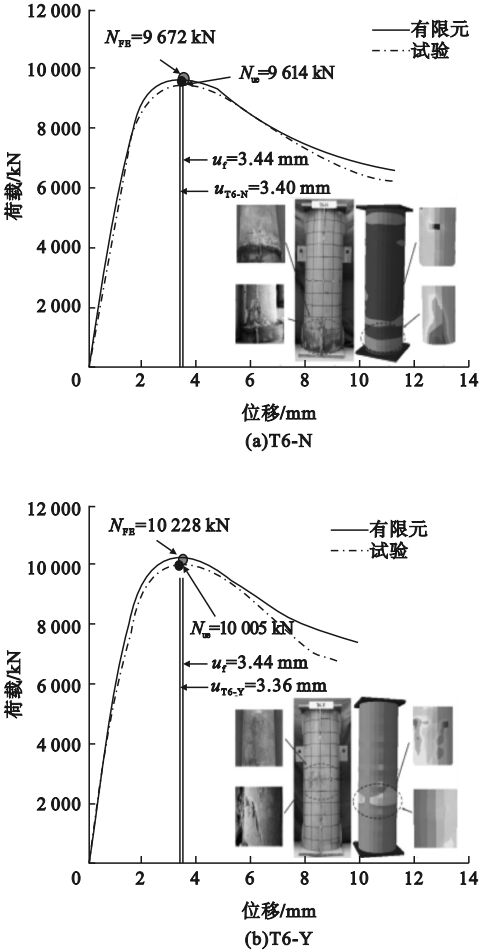


图 4 有限元与试验荷载-位移曲线对比
Fig. 4 Comparison of finite element analysis and test load-displacement curves

表 2 有限元模型参数

Table 2 Parameters of finite element model

试件编号	f_y /MPa	t /mm	f_c /MPa	箍筋	预应力筋	普通钢筋	u_f /mm	N_{FE} /kN	增加幅值/%		DI	SI
									I	II		
RHCFS T -a	235	6	80	—	—	—	2.04	8 042	—	—	1.416	1.003
RHCFS T -b	235	6	80	ΦA4@45	6A7.1	—	3.30	8 554	6.37	6.37	1.510	1.039
RHCFS T -c	235	6	80	Φ4@45	6A7.1	6 Φ16	3.30	9 112	13.31	6.52	1.531	1.096

注: f_y 为钢材屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度; u_f 为峰值荷载对应的峰值位移; N_{FE} 为峰值承载力;I列表示与 RHCFS**T**-a 对比 N_{FE} 提高比例;II列表示与上一模型对比 N_{FE} 提高比例。

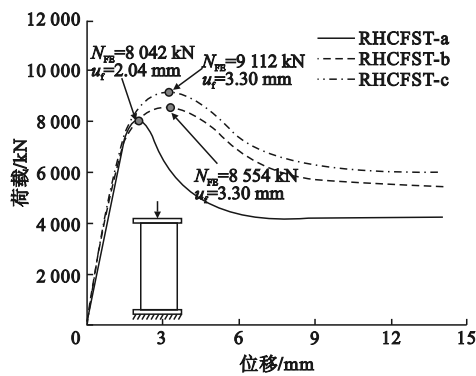


图5 荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

4 组合柱工作机理分析

4.1 受力全过程分析

上述结果表明,配置普通钢筋后,组合柱的承载能力和延性性能均有明显改善,因此笔者以 T6-Y 为基础,建立有限元模型,对其进行受力全过程分析。试件基本参数:钢管壁厚为 6 mm,试件长度为 1 200 mm,长径比为 3,钢材强度为 355 MPa,夹层混凝土抗压强度为 80 MPa,管柱混凝土抗压强度为 80 MPa,预应力筋配置 6A7.1,普通钢筋为 6 根直径 16 mm 的 HRB400 钢筋(普通钢筋和预应力筋并筋布置)。图 6 为典型试件的荷载-位移关系曲线。

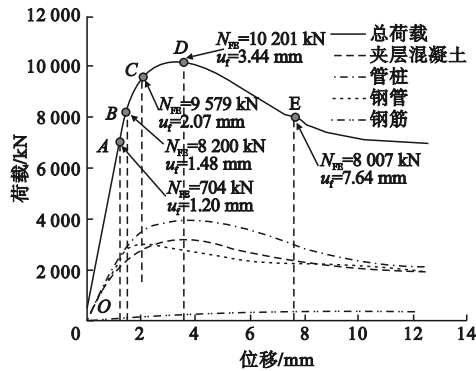


图6 典型试件荷载-位移关系曲线

Fig. 6 The $N-u$ curves of typical components

通过定义各特征点将曲线分为四个阶段:

(1)弹性阶段(OA段):此阶段试件的荷载-位移曲线呈线性关系,钢材与混凝土之

间无相互作用,试件各组分单独受力,混凝土在 A 点开始出现塑性变形。

(2)弹塑性阶段(AC段):A 点之后,各组材料相继开始出现塑性变形,B 点为钢管比例极限点,以钢管首次出现屈服点(C 点)作为本阶段的终点。此阶段试件的荷载-位移曲线逐渐偏离直线出现弯曲,整体刚度逐渐降低,混凝土进入弹塑性阶段,裂缝不断扩展,此时承载力为峰值承载力的 93.9%。

(3)塑性强化阶段(CD段):C 点过后钢管进入屈服状态,此阶段末试件达到峰值承载力。试件内各部件相继破坏,混凝土裂缝继续发展,钢材在此阶段出现明显外部变形,普通钢筋在此阶段开始屈服。

(4)下降阶段(DE段):D 点为峰值点,D 点后试件的承载力下降到 E 点,此阶段试件变形加剧发展,管柱混凝土和夹层混凝土达到极限压应变而破坏,预应力钢筋和螺旋箍筋在此阶段达到屈服。

4.2 分担内力分析

对组合柱中截面各特征点处的钢管、管柱、夹层混凝土、钢筋等组分分担内力进行分析,各组分在各个特征点的内力分担结果见表 3。从表 3 可以得出:

(1)A 点:管柱、夹层混凝土、钢管和钢筋分担的内力比例分别为 36.2%、29.0%、33.7% 和 1.05%。此点管柱混凝土与夹层混凝土相比,同强度下由于内部钢筋的存在使其单位截面面积分担内力比例更大。

(2)B 点:管柱、夹层混凝土、钢管和钢筋分担的内力比例分别为 36.2%、29.2%、33.5% 和 1.13%。与 A 点相比,此阶段钢管和钢筋与混凝土之间的组合作用较弱,各组分分担内力比例未出现明显变化。

(3)C 点:管柱、夹层混凝土、钢管和钢筋分担的内力比例分别为 37.1%、30.2%、31.4% 和 1.33%。与 B 点相比,钢管中截面位置发生屈服,承担的内力比例开始下降;管

柱和夹层混凝土的分担比例基本不变;钢筋开始发挥作用。

(4) *D* 点:管柱、夹层混凝土、钢管和钢筋分担的内力比例分别为 39.4%、30.6%、27.7% 和 2.29%。与 *C* 点相比,由于钢管在中部截面发生屈服,夹层混凝土出现斜向剪切裂缝,分担比例上升较小;钢筋作用逐渐增强,分担内力比例增大;钢筋作用使管柱混凝土分担内力比例提高。

(5) *E* 点:管柱、夹层混凝土、钢管和钢筋分担的内力比例分别为 39.7%、29.3%、

26.3% 和 4.62%。此阶段钢管与夹层混凝土中截面变形进一步增大,分担比例继续下降;管柱混凝土斜向剪切裂缝出现在上下 1/4 截面处,因此管柱中截面受钢筋约束分担内力比例继续增大。

综上可知,钢管分担的内力比例在屈服后开始下降;夹层混凝土和管柱混凝土在加载过程中为主要受力组分,管柱混凝土由于钢筋作用其单位截面面积分担内力比例始终大于夹层混凝土;钢筋在加载前期基本不承担内力,进入塑性强化阶段开始发挥作用。

表 3 各特征点内力分担比例

特征点	管柱		夹层混凝土		钢管		钢筋		总内力/kN
	内力/kN	比例/%	内力/kN	比例/%	内力/kN	比例/%	内力/kN	比例/%	
<i>A</i>	2 547	36.2	2 044	29.0	2 376	33.7	74	1.05	7 041
<i>B</i>	2 965	36.2	2 395	29.2	2 747	33.5	93	1.13	8 200
<i>C</i>	3 551	37.1	2 891	30.2	3 010	31.4	127	1.33	9 579
<i>D</i>	4 019	39.4	3 122	30.6	2 822	27.7	234	2.29	10 201
<i>E</i>	3 179	39.7	2 344	29.3	2 106	26.3	370	4.62	8 007

4.3 试件各组分受力状态分析

4.3.1 管柱混凝土的应力分析

图 7 为管柱混凝土在不同特征点的纵向应力云图。从图中可以看出,在特征点 *A* 时,由于管柱混凝土仅受到压力的作用,其纵向应力分布均匀,应力均值为 51.7 MPa;端部位置受到钢管与端板的约束,应力达到了 54.0 MPa。在弹塑性阶段,特征点 *B* 时,管柱混凝土纵向应力沿截面依旧分布均匀,应

力均值增加至 59.6 MPa,最大应力增加至 62.6 MPa。特征点 *C* 时,管柱混凝土纵向应力分布不再均匀,大部分纵向应力继续增大至 66.2 MPa;部分区域纵向应力增加较少,仅为 61.2 MPa。应力较小区域主要出现在管柱混凝土中部截面一侧,该位置处管柱混凝土变形较大,螺旋箍筋开始发挥作用,纵向应力呈现斜向 30° 分布,由于该位置管柱混凝土的损伤累计,其纵向应力低于其他截面。

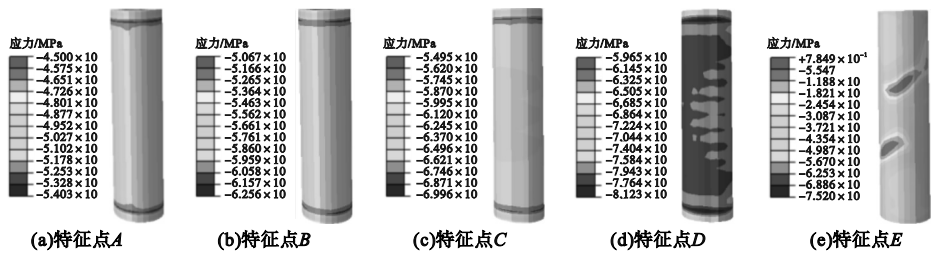


图 7 管柱混凝土在不同特征点处的纵向应力云图

Fig. 7 Longitudinal stress distributions of PHC column at different characteristic points

特征点 *D* 时,试件达到峰值荷载,管柱混凝土纵向应力进一步增大,螺旋箍筋约束

区域应力增大至 81.23 MPa,其他区域应力在 75.8 MPa 左右;螺旋箍筋影响区域由中部截面向两端延伸,应力沿截面斜向 30°分布扩展至端部位置。特征点 E 时,管柱混凝土中部截面上下位置处出现两道明显的斜向 30°应力分布,应力减小至 0.8 MPa,表明该位置出混凝土压碎开裂。夹层混凝土于中部截面表现出明显的剪切破坏形态。

4.3.2 夹层混凝土的应力分析

图 8 为夹层混凝土在不同特征点的纵向应力云图。从图中可以看出,在特征点 A 时,夹层混凝土最大应力位置在端部,为 53.7 MPa,其纵向应力环向分布均匀,此时处于弹性阶段,夹层混凝土仅受到压力的作用。弹塑性阶段,在特征点 B 时,纵向应力环向分布依旧均匀,应力值增加至 62.5 MPa,中间部分应力分布均匀,均值为 56.2 MPa。在特征点 C 时,夹层混凝土受到轴力以及钢管和管柱的约束作用,使得最大

应力增加至 70.0 MPa,仅出现在端部位置,中部区域应力分布发生变化,与管柱混凝土分布相似呈现斜向 30°分布,应力为 63.1 MPa,此时混凝土全截面进入塑性应力状态。特征点 D 时,试件达到峰值荷载,夹层混凝土纵向应力整体提高,沿高度方向分布表现为先增大后减小。最大应力为 86.3 MPa,出现在端部位置;最小应力为 67.9 MPa,出现在上端部的 1/4 区域,沿环向方向呈现斜向 30°分布;中部截面纵向应力为 77.1 MPa,应力沿环向分布均匀。在特征点 E 时,夹层混凝土纵向应力整体减小,应力沿高度及环向方向分布再次变化,沿高度方向的斜向 30°分布,由端部两侧逐渐发展至中部截面,中部应力由 77.1 MPa 下降至 35.7 MPa,下降幅度较大。夹层混凝土整体表现为中部偏上侧的斜向 30°剪切破坏形态。

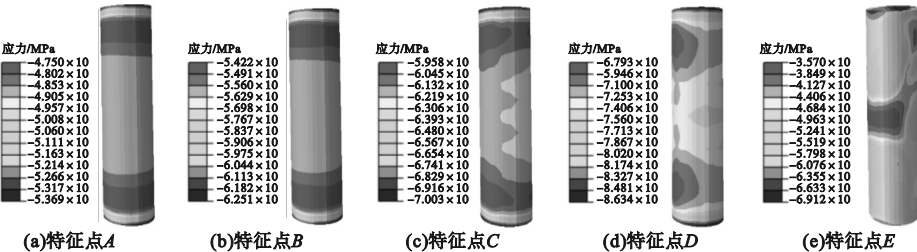


图 8 夹层混凝土在不同特征点的纵向应力云图

Fig. 8 Longitudinal stress distributions of sandwich concrete at different characteristic points

4.3.3 钢管的应力分析

图 9 为钢管在不同特征点的 Mises 应力云图。从图中可以看出,在特征点 A 时,Mises 应力云图分布均匀,应力均值为 183.7 MPa,为钢管屈服强度的 51.7%,此时钢管全截面处于均弹性状态。最大应力为 204.5 MPa,出现位置靠近钢管端部,这是因为钢管与端板通过绑定约束,钢管与端板刚度相差较大,因此在钢管端部出现应力集中现象。弹塑性阶段,加载至特征点 B 时,此时钢管还未发生屈服,Mises 应力沿截面分布依旧均匀,大部分截面应力增加至

317.0 MPa,达到了钢管的比例极限;最大应力达到了 332.2 MPa,依旧位于端部位置。在特征点 C 时,钢管部分截面开始屈服,钢管 Mises 应力沿高度方向分布不再均匀,沿截面方向分布相差较小,最大应力在中部截面,为 345.6 MPa。加载至特征点 D 时,试件达到峰值荷载,此时钢管屈服区域由中部截面发展至全截面,最大应力增加至 358.7 MPa;中截面偏下位置出现轻微鼓曲。当承载力下降至特征点 E 时,钢管中截面偏下位置出现明显斜向鼓曲,且在该位置处的 Mises 应力增加至 363.4MPa;钢管 Mises 应

力沿高度方向由鼓曲位置向两端逐渐减小,布整体表现为多层斜向 30° 分布。最小应力为端部位置处 249.7MPa,应力分

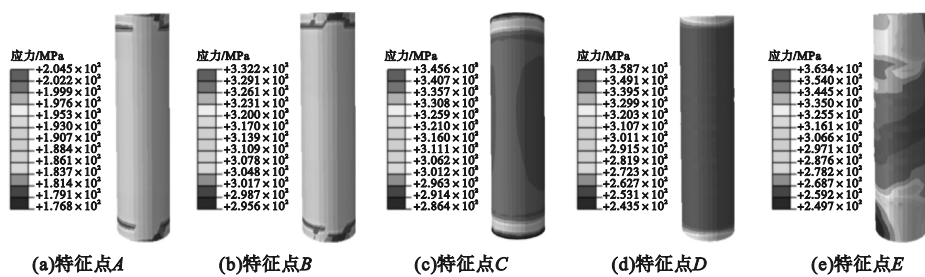


图 9 钢管在不同特征点的 Mises 应力云图

Fig. 9 Mises stress contour plots of steel tube at different characteristic points

4.3.4 预应力钢筋的应力分析

图 10 为预应力钢筋在不同特征点的 Mises 应力云图。从图中可以看出,在特征点 A 和特征点 B 时,预应力筋的 Mises 应力云图分布均匀;应力随着荷载的增加逐渐减小,在试件高度 1/2 截面位置,特征点 A、特征点 B 应力分别为 712.2 MPa 和 501.1 MPa。在特征点 C 时,预应力钢筋应力值进一步减小,应力分布未发生明显变化,最大应力为 582.1 MPa。在特征点 D 时,预应力筋应力分布发生变化,最小应力减小至

5.5 MPa,逐渐向受压发展,在试件高度上下 1/4 截面处,预应力钢筋应力分布与管柱混凝土类似,呈现斜向 30° 分布;最大应力下降较小,仍有 570.2 MPa。在特征点 E 时,预应力筋的斜向应力分布由上下 1/4 截面逐渐延伸至全截面,端部应力变化较小,仍有 420.9 MPa,中部应力由 190.3 MPa 下降至 1.7 MPa。上下 1/4 截面处应力由受拉转为受压,最大应力增加至 840.0 MPa。整体表现为斜向剪切破坏形态,与管柱混凝土相似,两者变形协调一致。

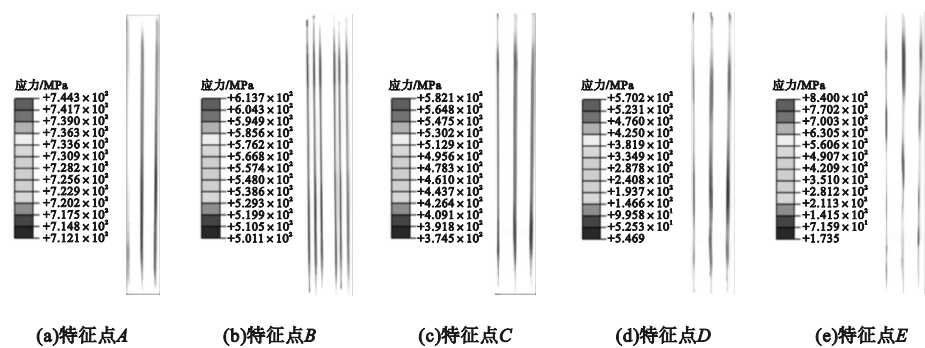


图 10 预应力筋在不同特征点的 Mises 应力云图

Fig. 10 Mises stress contour plots of prestressed tendons at different characteristic points

4.3.5 普通钢筋的应力分析

图 11 为普通钢筋在不同特征点的 Mises 应力云图。从图中可以看出,在特征点 A 时,普通钢筋的 Mises 应力云图分布均匀,最大应力出现在 1/4 截面 ~ 3/4 截面处,为 189.6 MPa,此时普通钢筋处于弹性状态。在特征点 B 时,普通钢筋最大应力位置不变

化,应力值为 400.0 MPa,钢筋发生屈服;在特征点 C 时,最大应力没有变化,但钢筋屈服区域由上下 1/4 截面延伸至全截面。在特征点 D 时,普通钢筋的最大应力为 406.3 MPa;特征点 E 时,普通钢筋沿上 1/4 截面处应力下降至 380.0 MPa。普通钢筋的最大应力位置在整个受力过程中无变化,而

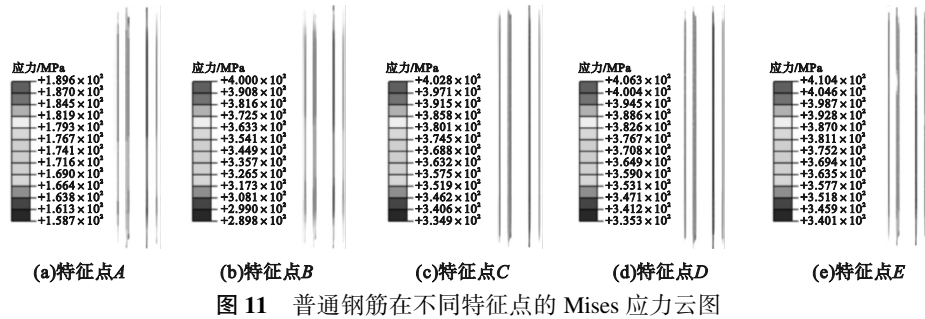


Fig. 11 Mises stress contour plots of ordinary tendons at different characteristic points

最大应力逐渐增加。整体表现为斜向剪切破坏形态,与管柱混凝土相似,两者变形协调一致。

4.3.6 螺旋钢筋的应力分析

图 12 为预应力钢筋在不同特征点的 Mises 应力云图。从图中可以看出,在特征点 A 时,螺旋箍筋的 Mises 应力云图分布均匀,最大应力出现在试件高度 1/4 截面 ~3/4 截面处,为 56.6 MPa,此时螺旋箍筋应力较小,基本不发挥作用。在特征点 B 时,螺旋箍筋最大应力位置无明显改变,最大应力增加至 149.5 MPa,螺旋箍筋依旧未发挥明显作用。在特征点 C 时,螺旋箍筋最大应力位置逐渐向中间区域靠近,应力值增加至为 312.4 MPa,端部位置应力仅为 122.6 MPa,相差 189.8 MPa,说明在此阶段,螺旋箍筋开

始发挥作用,为管柱混凝土提供约束作用。在特征点 D 时,螺旋箍筋的最大应力增大至 540.8 MPa,位置由中部逐渐发展至上下 1/4 截面处,此时管柱混凝土在此位置也表现出斜向剪切分布,说明在此阶段,箍筋对混凝土的约束效果增强。在特征点 E 时,应力分布与管柱混凝土相似,呈斜向 30° 分布。在试件高度上下 1/4 截面处,螺旋箍筋应力在此阶段表现为先增大后减小,应力由 540.8 MPa 减小至 473.3 MPa,其他区域应力增大至 657.9 MPa,达到屈服强度。螺旋箍筋主要作用为 PHC 管柱混凝土提供侧向约束,在前期受力过程中,螺旋箍筋并未承受较强荷载,约束主要出现在塑性强化阶段与荷载下降阶段,其应力分布与管柱混凝土相似,说明两者变形协调一致。

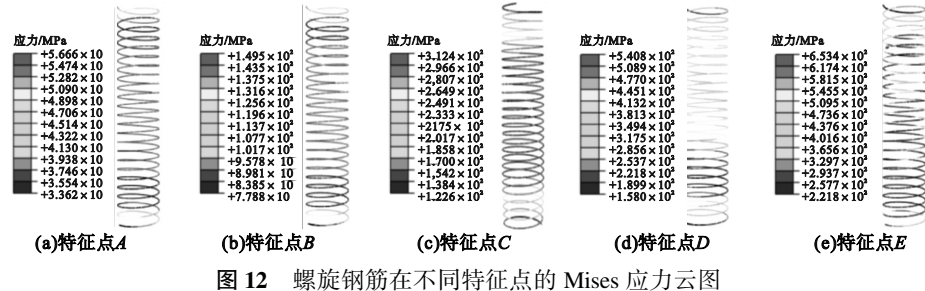


Fig. 12 Mises stress contour plots of ordinary tendons at different characteristic points

综上可知,在特征点 A 和特征点 B 时,试件各组分应力云图分布均匀,无明显变化;特征点 C 时,管柱混凝土和夹层混凝土应力分布发生变化呈现斜向 30° 分布,钢管 Mises 应力沿高度方向分布不再均匀,预应力钢筋应力减小,螺旋箍筋最大应力位置向中间区

域靠近;特征点 D 时,钢管屈服区域由中部截面发展至全截面,中截面偏下位置出现轻微鼓曲;特征点 E 时,管柱混凝土和夹层混凝土整体表现为中部偏上侧的斜向 30° 剪切破坏形态。由此可知,试件的破坏率先由管柱混凝土内部开始。

5 结 论

(1) 配筋空心圆钢管高强混凝土轴压短柱的破坏形态有压溃破坏和混合破坏两种。与空心钢管高强混凝土柱相比,配筋空心圆钢管高强混凝土柱具有更高的承载能力和延性。

(2) 配筋空心圆钢管高强混凝土短柱在轴向荷载作用下的受力过程可以分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化阶段及下降阶段。

(3) 夹层混凝土和管柱混凝土为试件主要受力组分;钢筋在加载前期基本不承担内力,进入塑性强化阶段才开始发挥作用;试件的破坏率先由管柱混凝土内部开始。

参考文献

- [1] 查晓雄. 空心心和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] YU Min,ZHA Xiaoxiong, YE Jianqiao, et al. A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression [J]. Engineering structures, 2010, 32(4): 1046 – 1053.
- [3] 王宏伟,陈少杰,周云. 圆空心钢管混凝土短柱在轴向压力作用下的可靠性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 98 – 107.
(WANG Hongwei, CHEN Shaojie, ZHOU Yun. Reliability analysis of circular hollow concrete filled steel tube short column under axial compression [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2018, 40(6): 98 – 107.)
- [4] ZHAO Yangang, YAN Xifeng, LIN Siqi. Compressive strength of axially loaded circular hollow centrifugal concrete-filled steel tubular short columns [J]. Engineering structures, 2019, 201: 109828.
- [5] CHEN Ju, JIN Weiliang, FU Jun. Experimental investigation of thin-walled centrifugal concrete-filled steel tubes under torsion [J]. Thin-walled structures, 2008, 46(10): 1087 – 1093.
- [6] 陈约瑟. 圆钢管约束钢筋混凝土空心短柱轴压及偏压力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
(CHEN Yue. Research on axial and eccentric behavior of circular steel tube confined concrete short hollow columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.)
- [7] HASAN H, EKMEKYAPAR T, SHEHAB B A. Mechanical performances of stiffened and reinforced concrete-filled steel tubes under axial compression [J]. Marine structures, 2019, 65: 417 – 432.
- [8] HU Hongsong, LI Xu, GUO Zixiong, et al. Behavior of eccentrically loaded square spiral-confined high-strength concrete-filled steel tube columns [J]. Engineering structures, 2020, 216: 110743.
- [9] XIAMUXI A, LIU X R, 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.
- [10] CHEN Zongping, NING Fan, MO Linlin. Experimental study and mechanism analysis of concrete-filled square steel tubular columns reinforced by rhombic stirrups under axial compression [J]. Frontiers in materials, 2021, 8: 646656.
- [11] LI Guochang, CHEN Bowen, YANG Zhijian, et al. Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns [J]. Thin walled structures, 2018, 127: 483 – 499.
- [12] YANG Zhijian, LEI Yueqiang, LI Guochang. Experimental and finite element analysis of shear behavior of prestressed high-strength concrete piles [J]. International journal of civil engineering, 2022, 21(2): 219 – 233.
- [13] HUANG Fuyun, WU Suiwen, LUO Xiaoye, et al. Pseudo-static low cycle test on the mechanical behavior of PHC pipe piles with consideration of soil-pile interaction [J]. Engineering structures, 2018, 171: 992 – 1006.
- [14] 杨志坚, 韩嘉明, 雷岳强, 等. 一种新型的配筋空心钢管高强混凝土柱[P]. 中国专利, ZL 2018 21067732. 2, 2019 – 02 – 22.
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, LEI Yueqiang, et al. A new type of reinforced hollow high strength concrete-filled steel tube column [P]. Chinese patent, ZL 2018 21067732. 2, 2019 – 02 – 22.)
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 先张法预应力混凝土管桩: GB 13476—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(General Administration of Quality Supervision. Pretensioned prestressed concrete pipe pile: GB/T 13476—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [16] KATWAL U, TAO Z, KAMRUL H. Finite element modelling of steel-concrete composite beams with profiled steel sheeting [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 146(7): 1 – 15.
- [17] 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. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [18] 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.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)