

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.021

中空夹层椭圆钢管混凝土 短柱轴压性能试验与数值分析

王静峰^{1,2}, 程谦勇¹, 沈奇罕^{1,3}, 苏杭¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009; 3. 先进钢结构技术与产业化协同创新中心, 安徽合肥 230009)

摘要:中空夹层椭圆钢管混凝土(concrete-filled double-skin elliptical steel tubular, CFDEST)造型独特、性能优良,在实际工程中逐渐被采用,但其力学性能研究较少,文章设计和开展6根CFDEST短柱的轴压试验,建立基于椭圆截面特征和空心率影响的CFDEST轴压短柱的分析模型,研究空心率、材料强度、径厚比和截面长短轴比等参数对其承载力、刚度和延性等力学性能指标的影响规律,揭示CFDEST短柱在轴压作用下的典型破坏形态、截面应力分布和环向接触行为。结果表明:CFDEST轴压短柱的破坏模式主要包括钢管局部腰鼓屈曲和剪切屈曲、核心混凝土局部压溃和斜向剪切破坏;轴压承载力随着空心率和径厚比的减小而增大,随着钢材强度和混凝土强度的增大而增大。

关键词:中空夹层椭圆钢管混凝土(CFDEST);短柱;轴压试验;有限元分析;破坏模式

中图分类号:TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)02-0278-11

Performance and numerical analysis of axially-loaded concrete-filled double-skin elliptical steel tubular short columns

WANG Jingfeng^{1,2}, CHENG Qianyong¹, SHEN Qihan^{1,3}, SU Hang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 3. Anhui Collaborative Innovation Center for Advanced Steel Structure Technology and Industrialization, Hefei 230009, China)

Abstract: Concrete-filled double-skin elliptical steel tubular (CFDEST) members are characterized by their unique shapes and excellent performance, leading to growing adoption in practical engineering. However, their mechanical properties are less studied. In this paper, axial compression tests on six CFDEST short columns were designed and carried out, and a numerical analysis model of axially-loaded CFDEST short columns considering the influence of elliptical section characteristics and hollow ratio was established based on the test findings. The influence of the parameters including hollow ratio, material strength, diameter-to-thickness ratio and cross-sectional aspect ratio on the mechanical performance indexes such as bearing capacity, stiffness and ductility was investigated, and the typical failure pattern, cross-sectional stress distribution and circumferential contact behavior of CFDEST short columns under axial compression were revealed. The results show that the failure modes of axially-loaded CFDEST short columns mainly include steel pipe local waist bulge buckling and shear buckling, core concrete local crush and oblique shear damage; the axial compression bearing capacity of CFDEST short columns increases with the decrease of hollow ratio and diameter-to-thickness ratio,

收稿日期:2023-07-28; **修回日期:**2023-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108129);中国博士后科学基金资助项目(2022M713388)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGTD0260)

作者简介:王静峰(1976—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

沈奇罕(1991—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者, E-mail: QihanShen667@hfut.edu.cn.

and the increase of steel strength and concrete strength.

Key words: concrete-filled double-skin elliptical steel tubular(CFDEST); short column; axial compression test; finite element analysis; failure mode

0 引言

中空夹层钢管混凝土是一种由内外钢管同心布置,并在两钢管夹层之间填充混凝土形成的组合构件,具有自重轻、强度高、抗弯刚度大、抗震和抗火性能优越等特点^[1-2],近年来,在高层建筑、风电塔和输电塔结构中被逐步推广,有着良好的应用前景。目前,学者们针对普通截面形式(圆形、方形)的中空夹层钢管混凝土构件的受力性能已开展了诸多基础与应用研究^[3-4],并逐步完善基础理论和设计方法。

然而,随着现代社会的不断发展,建筑的外观美学和结构效率逐步受到重视,普通截面形式的中空夹层钢管混凝土逐渐无法满足实际工程需求。因此,诸多具有异形截面的钢管混凝土构件应运而生。其中,椭圆形截面钢管兼备了圆形和方形钢管的组合优势,其优秀的建筑美学效果、较小的流阻系数和灵活的长短轴分布使其近年来被广泛应用于大型场馆、大型桥梁和机场航站楼等对空间、承重等方面有需求的各类重要的地标式公共工程中^[5]。虽然学者们^[6-9]针对椭圆钢管混凝土构件的各类力学性能和抗震性能开展了较为系统的研究,但是目前关于中空夹层椭圆钢管混凝土(concrete-filled double-skin elliptical steel tubular, CFDEST)构件力学性能研究仍较少。

本文拟开展 CFDEST 短柱的轴压性能试验,分析各类参数(如钢材强度、混凝土强度和空心率设置等)对其破坏形态、承载力、初始刚度和延性等力学性能的影响,并基于试验结果,建立考虑在椭圆截面特征和空心率影响下的 CFDEST 轴压短柱精细化有限元分析模型,进一步分析空心率等系统参数对 CFDEST 轴压短柱截面应力分布和相互作用的影响机制。研究成果旨在为 CFDEST 构件设计方法和实际工程应用提供科学依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共采用 10 根椭圆钢管短柱试件,包括 2 根椭圆空钢管短柱、2 根实心椭圆钢管混凝土短

柱和 6 根 CFDEST 短柱。CFDEST 外钢管、椭圆钢管混凝土外钢管和椭圆空钢管的截面尺寸($2\lambda_o \times 2\gamma_o \times t_o$)均为 $280 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,其中: $2\lambda_o$ 为外钢管长轴外径; $2\gamma_o$ 为外钢管短轴外径; t_o 为外钢管厚度中空夹层内钢管截面尺寸($2\lambda_i \times 2\gamma_i \times t_i$)为 $95 \text{ mm} \times 53 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,其中: $2\lambda_i$ 为外钢管长轴外径; $2\gamma_i$ 为外钢管短轴外径; t_i 为外钢管厚度。为保证加工试件为短柱,且消除端板约束状态对 CFDEST 截面受力的影响,根据文献^[10]的规定,对柱高 H 取为 500 mm (柱高径比 $H/(2\gamma_o)$ 约为 3.5)。CFDEST 短柱组成及其各剖面示意图如图 1 所示,试件相关参数见表 1 所列。

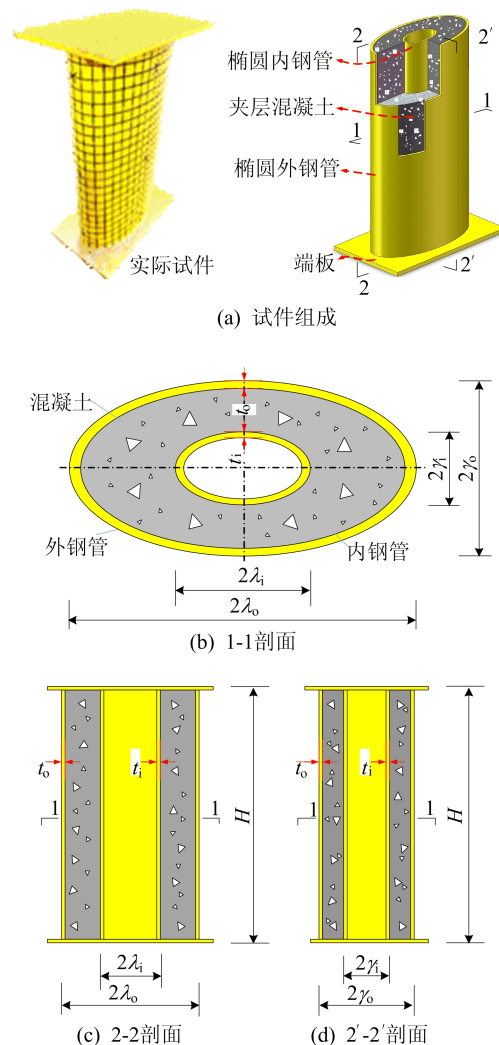


图 1 CFDEST 短柱示意图

表 1 试件相关参数

编号	试件	f_{y0}/MPa	f_{cu}/MPa	f_{yi}/MPa
1	ST-S I	270		
2	ST-S II	422		
3	CFST-S I	270	58.3	
4	CFST-S II	422	58.3	
5	ECS-S44-C I	422	38.6	434
6	ECS-S42-C I	422	38.6	276
7	ECS-S22-C I	270	38.6	276
8	ECS-S44-C II	422	58.3	434
9	ECS-S42-C II	422	58.3	276
10	ECS-S22-C II	270	58.3	276

注： f_{y0} 、 f_{yi} 和 f_{cu} 分别为外钢管、内钢管的屈服强度和混凝土的立方体抗压强度；椭圆空钢管短柱试件编号为 ST-S I、ST-S II，实心椭圆钢管混凝土短柱试件编号为 CFST-S I、CFST-S II，其余为 6 根中空夹层椭圆钢管混凝土短柱。

1.2 材料性能

试件中共采用 4 种不同类型的椭圆钢管 S-I、S-II、S-III、S-IV，其分别表示由钢材牌号为 Q235 和 Q345B 圆形钢管经模具冷轧后形成尺寸为 280 mm×140 mm×6 mm 和 95 mm×53 mm×4 mm 的椭圆钢管。因为成型后的椭圆管在横截面上各点的曲率不同，所以依据现行规范 GB/T 2975—2018^[11]分别对不同椭圆钢管在弧线上 3 处不同位置(即在椭圆长轴端点、短轴端点和 1/4 弧线中点)的材料性能进行试验，以获取椭圆钢管平均屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、屈服应变 ϵ_y 、弹性模量 E_s 和伸长率 δ 等关键指标。测试前，需对拉伸试件两端进行压平处理，以保证试验仪器对试件的有效夹持。拉伸试件取样位置如图 2 所示，钢材性能指标见表 2 所列。

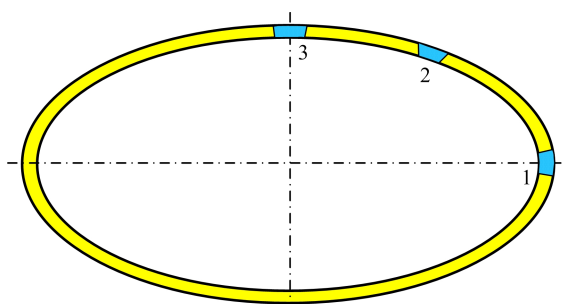


图 2 拉伸试件取材位置

表 2 钢管性能指标

编号	f_y/MPa	f_u/MPa	$\epsilon_y/\%$	E_s/MPa	$\delta/\%$
S-I	270.3	368.9	0.31	203.6	23.5
S-II	421.5	485.6	0.37	205.8	21.1
S-III	276.2	352.8	0.31	202.1	24.2
S-IV	433.7	491.1	0.38	206.2	20.6

试件采用强度等级为 C30 和 C60 的自密实

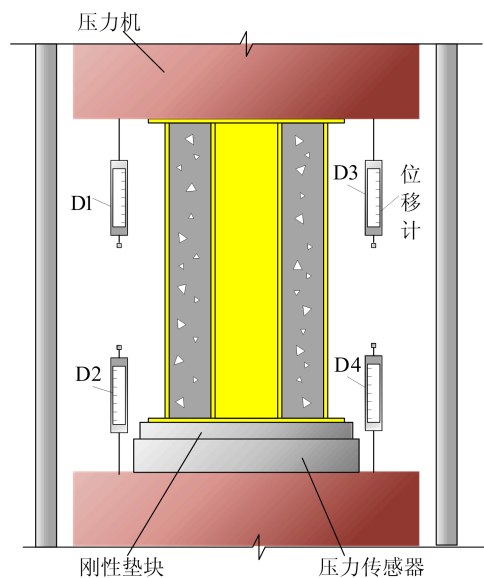
混凝土，对上述 2 种等级的混凝土分别取其同批次浇筑的混凝土砂浆，制作 3 个边长为 150 mm 的标准立方体试块和 3 个 150 mm×150 mm×550 mm 的棱柱体试块，经同等条件养护 28 d 后，依据规范 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[12]，测量其标准抗压强度 $f_{cu,k}$ 和弹性模量 E_c ，详细混凝土材料性能见表 3 所列。

表 3 混凝土的材料性能

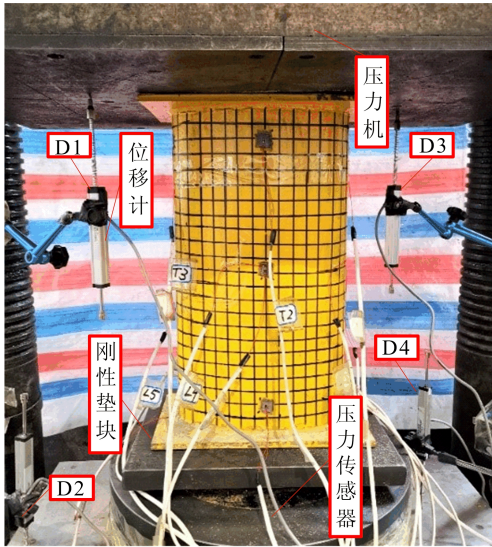
强度等级	试块编号	$f_{cu,k}/\text{MPa}$	E_c/MPa
C30	C30-I	39.5	24 331.2
	C30-II	37.4	23 981.4
	C30-III	38.9	24 062.5
C60	C60-I	58.6	32 130.0
	C60-II	56.9	32 012.8
	C60-III	59.4	32 038.4

1.3 加载装置及量测内容

试验在合肥工业大学土木工程结构与材料安徽省重点实验室进行，通过 5 000 kN 型多功能液压伺服试验机进行力-位移混合控制分级加载，并采用 GLBHL500 吨级压力传感器监测轴压力。正式加载时，在加载达构件预估峰值荷载前，采用力控制分级加载，0.8 N_u (N_u 为预估峰值荷载)之前，每级荷载 100 kN，匀速加载 60 s 完成后持荷 90 s；0.8 N_u 后，每级荷载 50 kN，匀速加载 60 s 完成后持荷 120 s；在试件达预估峰值荷载之后，采用位移控制分级加载，每级位移加载 1 mm，并实时采集力和位移响应，详细加载及量测示意图如图 3 所示。



(a) 试验示意图



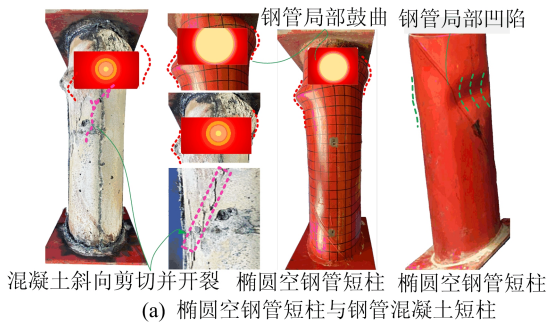
(b) 现场试验图

图 3 试验加载及量测装置

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式

典型破坏模式如图 4 所示。



(a) 椭圆空钢管短柱与钢管混凝土短柱



(b) 中空夹层椭圆钢管混凝土短柱

图 4 典型破坏模式

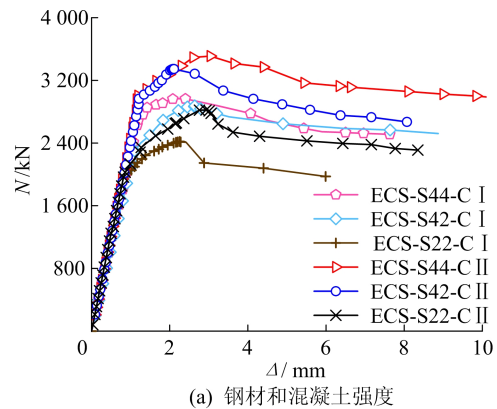
试验研究表明,当空心率为 0 时(即椭圆钢管实心混凝土短柱),钢管混凝土短柱的破坏模式主要表现为外钢管的局部鼓曲和核心混凝土的斜向剪切破坏;同时,核心混凝土的斜剪面破坏主要沿着弱轴方向出现。这是由于椭圆形钢管曲率较小的部分对核心混凝土的约束较弱。因而在轴压力作用下,核心混凝土沿椭圆截面弱轴方向出现斜

剪面破坏,表现出典型的脆性特征。当中空率为 100%时(即椭圆空钢管短柱),钢管缺乏核心混凝土的有效支撑,因此钢管出现明显向内凹陷的破坏形态(图 4a)。

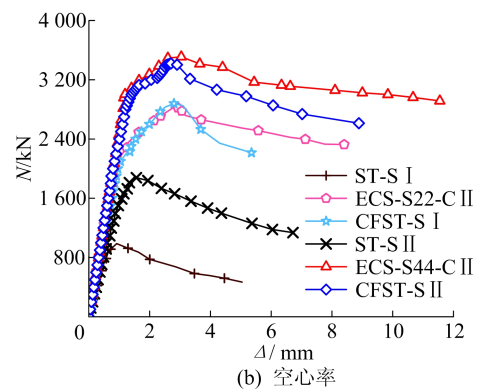
对于 CFDEST 轴压短柱,其破坏模式主要包括外钢管的局部鼓曲、内钢管的局部凹陷、核心混凝土的截面压溃和斜向剪切等破坏模式(图 4b)。相比椭圆钢管实心混凝土轴压短柱,CFDEST 短柱由于内外钢管对核心混凝土有良好的约束作用,使得混凝土的脆性特征有所限制,核心混凝土在某一截面上率先发生压溃破坏。同时,内钢管由于在外表面混凝土支撑作用下只能向内部发生局部屈曲。

2.2 荷载-位移曲线

通过试验记录了试件的荷载-位移($N-\Delta$)曲线,并开展不同材料强度参数对 CFDEST 试件承载力影响及空心率对各类型试件的承载力影响分析,结果如图 5 所示。



(a) 钢材和混凝土强度



(b) 空心率

图 5 荷载-位移曲线

由图 5 可知,椭圆空钢管短柱、实心椭圆钢管混凝土短柱和带球冠形脱空缺陷椭圆钢管混凝土短柱的轴压荷载-位移曲线具有一定的相似性,下降段均较为明显,曲线下降段幅度与空心率有关。对比试件 ECS-S42-C I、ECS-S22-C I 可知,钢材

强度的增大对 CFDEST 轴压短柱的初始刚度和荷载-位移曲线下降段的影响较小。对比试件 ECS-S42-C I、ECS-S42-C II 可知,随着混凝土强度的增大,CFDEST 轴压短柱的初始刚度有所提升。然而,由于混凝土的脆性特征随着强度的增大越发明显,因此试件荷载-位移曲线的下降段斜率有所增大(图 5a)。

由图 5b 可知,随着空心率的增大,试件的截面面积和初始刚度逐步减小。然而,CFDEST 短柱由于内外钢管对核心混凝土良好的约束作用,有效抑制了混凝土的脆性特征,使其荷载-位移曲线的下降段更加平缓。

2.3 峰值承载力和初始刚度

根据荷载-位移曲线,确定试件的峰值承载力 N_{ut} 和初始刚度 K_i ,结果见表 4 所列。

由表 4 可知,相同钢管强度下,CFDEST 轴压短柱的峰值承载力和初始刚度相对于椭圆空心钢管轴压短柱有显著提升。试件 ECS-S22-C I 和试件 ECS-S22-C II ($f_{y0}=270.3$ MPa, $f_{yi}=276.2$ MPa) 的峰值承载力比试件 ST-S I 分别提高 145.6% 和 186.5%,初始刚度分别提高 59.4% 和 66.0%, ECS-S44-C I 和 ECS-S44-C II ($f_{y0}=421.5$ MPa, $f_{yi}=433.7$ MPa) 的峰值承载力比试件 ST-S II 分别提高了 57.7% 和 86.6%,初始刚度分别提高了 30.0% 和 44.4%。

在材料强度基本相同时,对比 CFDEST 和实心椭圆钢管混凝土轴压短柱发现,虽然空心设置极大地减小了试件的截面面积,降低了试件的截

面刚度,但由于内外钢管的设置,以及双层钢管对核心混凝土良好的约束作用,使得 CFDEST 轴压短柱的峰值承载力相对于实心椭圆钢管混凝土未出现明显削弱。如试件 ECS-S22-C II 的峰值承载力相比试件 CFST-S I 仅相差了 3.6%,而初始刚度却下降了 22.7%;试件 ECS-S44-C II 的峰值承载力相比试件 CFST-S II 仅相差 0.3%,而初始刚度下降了 26.6%。

在空心率相同的情况下,外钢管强度提升对 CFDEST 短柱的轴压承载力影响较大,而对内钢管强度变化影响较小。对于试件 ECS-S42-C I 而言,当外钢管屈服强度从 421.5 MPa 降低至 270.3 MPa 时,其峰值承载力下降了 18.8%;同样,试件 ECS-S22-C II 的峰值承载力比试件 ECS-S42-C II 下降了 18.5%。而当试件 ECS-S42-C I 的外钢管强度保持不变,内钢管强度从 276.2 MPa 上升到 433.7 MPa 时,峰值荷载仅提高 3.2%;同样,试件 ECS-S44-C II 的峰值荷载比试件 ECS-S42-C II 仅提高 5.0%。同时,对比可知,内外钢管强度的变化对 CFDEST 轴压短柱的初始刚度影响不大。

不同于钢材强度的影响,CFDEST 轴压短柱中核心混凝土强度的提高均能明显增大其峰值承载力和初始刚度。试件 ECS-S44-C II、ECS-S42-C II 和 ECS-S22-C II ($f_{cu}=58.3$ MPa) 的峰值承载力分别比试件 ECS-S44-C I、ECS-S42-C I、ECS-S22-C I ($f_{cu}=38.6$ MPa) 提高 18.3%、16.3%、16.6%,初始刚度分别提高 11.1%、13.6%、12.1%。

表 4 试验结果

试件编号	Δ_y /mm	Δ_u /mm	$\Delta_{0.85}$ /mm	延性系数	K_i /(kN/mm)	N_{ut} /kN	承重比特征参数
ST-S I	0.65	0.97	1.39	2.14	1 505.8	985.0	
ST-S II	1.09	1.56	3.57	3.28	1 730.2	1 881.0	
CFST-S I	0.84	2.26	3.63	4.32	3 233.7	2 723.0	52 852.4
CFST-S II	1.03	2.41	5.42	5.26	3 405.2	3 501.0	67 953.1
ECS-S44-C I	1.32	2.17	7.63	5.78	2 250.1	2 966.8	64 266.6
ECS-S42-C I	1.31	2.64	7.42	5.42	2 200.3	2 874.4	62 265.1
ECS-S22-C I	1.08	2.25	5.12	5.07	2 230.1	2 419.6	52 413.2
ECS-S44-C II	1.40	3.04	7.84	5.60	2 500.2	3 510.2	75 107.2
ECS-S42-C II	1.34	2.10	7.29	5.24	2 499.9	3 344.3	71 557.5
ECS-S22-C II	1.13	2.93	5.56	4.92	2 500.0	2 822.0	60 381.9

注: Δ_u 为试件峰值承载力对应的轴向位移; Δ_y 、 $\Delta_{0.85}$ 为纵向位移。

2.4 荷载-应变关系曲线

基于应变片采集数据,试验给出 CFDEST 轴压短柱的荷载-平均应变曲线和典型试件柱高中部截面关键点应变发展情况,并将其与实心椭圆钢管混凝土轴压短柱进行对比,结果如图 6 所示。

图 6 中:纵向压应变为负值,横向拉应变为正值。

从图 6 横向应变分析可知,CFDEST 轴压短柱在达到峰值荷载之前,其横向应变均未发生屈服,与其他类型的钢管混凝土轴压构件规律一致;同时,横向应变相对于纵向应变发展较慢,且在弹

性受力阶段,横、纵向应变发展比值基本契合钢材的泊松比常量。对比试件 ECS-S44-C I、ECS-S42-C I 和 ECS-S22-C I 的荷载-应变曲线发现,保持混凝土强度不变,先后改变 CFDEST 轴压短柱的内外钢管强度,对其在弹性阶段下的应变发展影响不大。但当荷载-应变曲线进入塑性阶段,相同荷载下采用强度较低椭圆钢管的切线模量下降幅度更大,对应纵向应变的发展速度更快。

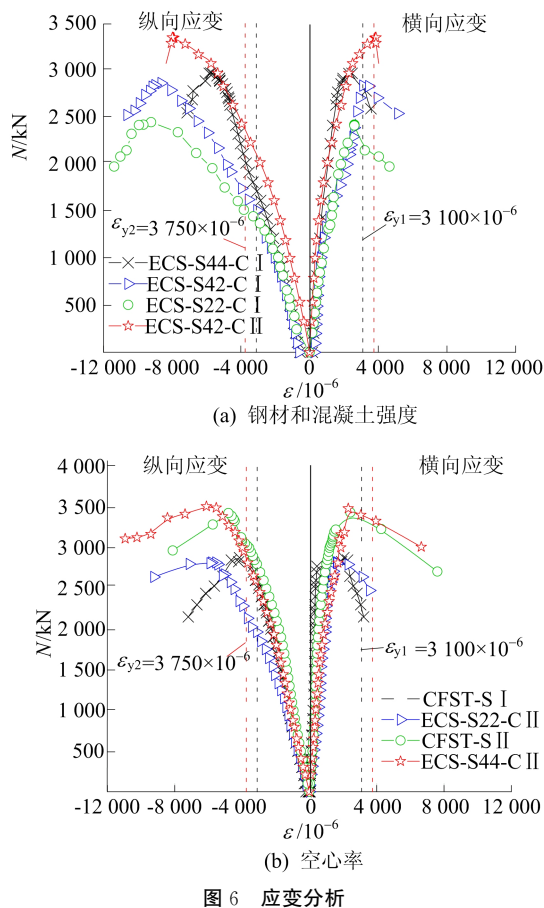


图 6 应变分析

同理,对比试件 ECS-S42-C I 和 ECS-S42-C II 的荷载-应变曲线发现,由于提高了中空夹层核心混凝土的强度,试件 ECS-S42-C II 的截面刚度有所增大,因此在相同荷载下,试件 ECS-S42-C II 相比试件 ECS-S42-C I 的应变发展速度明显降低,且峰值荷载下的纵向变形能力显著减小。基于纵向应变分析可知,由于空心率的设置,CFDEST 轴压短柱相比于实心椭圆钢管混凝土轴压短柱的截面刚度有所减小。因此,相同荷载下,CFDEST 轴压短柱的应变发展更快,达到峰值荷载时,CFDEST 轴压短柱相比实心钢管混凝土轴压短柱表现出更强的变形能力。同时,荷载-应变曲线进入下降段后,由于内外钢管的设置,使其下降段相比于实心椭圆钢管混凝土轴压短轴荷载-

应变曲线的下降段更加平缓。

2.5 延性系数

为明确 CFDEST 轴压短柱的延性性能,引入延性系数(ductility index, DI),表达式为:

$$I_D = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (1)$$

其中: $\Delta_{0.85}$ 为试件承载力超过峰值承载力后并降低至 0.85 倍峰值荷载时对应的纵向位移; Δ_y 为试件屈服荷载对应的纵向位移。

由于内外椭圆钢管的设置,CFDEST 短柱的延性系数相比于实心椭圆钢管混凝土轴压短柱有明显提升。试件 ECS-S22-C II 和 ECS-S44-C II 的延性系数分别比试件 CFST-S I 和 CFST-S II 提高了 13.8% 和 6.5%。相比于椭圆空钢管轴压短柱试件 ST-S I 和 ST-S II,实心椭圆钢管混凝土轴压短柱试件 CFST-S I 和 CFST-S II 的延性系数分别提升了 101.9% 和 60.4%,而 CFDEST 轴压短柱试件 ECS-S22-C II 和 ECS-S44-C II 的延性系数分别提升了 129.9% 和 70.7%。这是由于当椭圆空钢管中填充混凝土后,核心混凝土可为钢管提供较好的支撑作用,抑制了椭圆钢管在压力作用下的板件局部屈曲,显著提高了整体的延性。

混凝土强度较低的 CFDEST 轴压短柱试件 ECS-S44-C I、ECS-S42-C I 和 ECS-S22-C I 的延性系数分别比混凝土强度较高的 CFDEST 轴压短柱试件 ECS-S44-C II、ECS-S42-C II 和 ECS-S22-C II 提高了 3.2%、3.4%、3.0%。说明 CFDEST 轴压短柱中混凝土强度的增大会略微降低其延性。这是由于混凝土强度的增大会导致其脆性特征愈发明显,进而导致核心混凝土强度较高的 CFDEST 轴压短柱的延性有所降低。

2.6 核心混凝土强度提高系数

为进一步探明内外钢管对核心混凝土的约束效果,本文提出中空夹层椭圆钢管核心混凝土强度提高系数(concrete strength improved factor, CSIF),具体表达式为:

$$F_{CSIF} = (N_{ut} - A_{so}f_{yo} - A_{si}f_{yi}) / (A_c f_c) \quad (2)$$

其中: f_{yi} 、 f_{yo} 、 f_c 分别为内、外钢管屈服强度、核心混凝土轴心抗压强度; A_{si} 、 A_{so} 、 A_c 分别为内、外钢管和核心混凝土的截面积。

CSIF 对比结果如图 7 所示。由图 7 可知,试件 CFST-S I 和 CFST-S II 的 CSIF 值分别为 1.21 和 1.35,相比试件 ECS-S22-C II 和 ECS-S44-C II 的 CSIF 值分别提高了 5.2% 和 25.0%。说明实心椭圆钢管混凝土轴压短柱的核心混凝土强

度提高更加显著,空心率的出现会削弱钢管对核心混凝土的约束作用,进而降低其抗压强度。

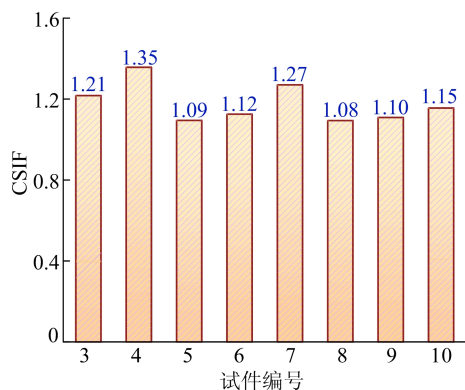


图 7 试件的核心混凝土强度提高系数

试件 ECS-S22-C II、ECS-S42-C II 和 ECS-S44-C II 的 CSIF 值分别比试件 ECS-S22-C I、ECS-S42-C I 和 ECS-S44-C I 降低 9.4%、1.7% 和 0.1%。说明随着中空夹层核心混凝土强度的提升,内、外钢管对核心混凝土强度的提升有所降低。中空夹层试件的 CSIF 值虽然相比同等外径尺寸椭圆实心钢管混凝土试件小,但其 CSIF 值均显著大于 1.0。说明夹层核心混凝土在轴压力下仍会受到椭圆钢管较为良好的约束作用。

2.7 承重比特征系数

为进一步研究 CFDEST 构件的实用性和经济性,引入承重比特征系数,具体表达式为:

$$R_{\text{BW}} = N_{\text{ut}}/W \quad (3)$$

其中: N_{ut} 为试件的试验承载力; W 为试件的重量理论计算值。另外钢材容重取 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, C30 级和 C50 级混凝土容重分别取 2.37×10^3 、 $2.42 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

3 有限元分析

3.1 模型的建立

3.1.1 材料模型

根据 CFDEST 构件的组成,其材料模型分别涉及核心混凝土、内外椭圆钢管和上、下端板。

对于中空夹层椭圆核心混凝土,文献[13]基于试验和理论研究提出了适用于模拟其应力-应变发展的本构关系模型,关系式为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta_0 = 0.5 \left[2.36 \times 10^{-5} \left(\frac{a}{b} \right)^5 \right]^{[0.25+(\xi-0.5)^7]} \times f_c^{0.5} \geq 0.12 \quad (5)$$

其中: $x = \epsilon/\epsilon_0$, $y = \sigma/f_c$, $\epsilon_0 = \epsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$, ϵ_c 为混凝土峰值应变, ξ 为钢管的约束效应系数, $\epsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6}$; σ 和 ϵ 分别为核心混凝土的应力和应变; $\xi = A_s f_y / (A_c f_c)$; f_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度, $f_c = 0.79 f_{\text{cu,k}}$; η 值取 $2^{[15]}$ 。

试件的内外椭圆钢管是由热轧圆钢管经冷轧工艺制成的,可对其采用钢材双折线模型进行模拟分析[13]。试件上、下加载板为低碳热轧钢,因此可采用二次流塑模型进行模拟[10]。

3.1.2 几何模型

几何模型主要包括数值分析模型中的单元类型、相互作用和边界条件等内容。

基于文献[14]研究,对于上、下加载板和中空夹层椭圆核心混凝土应采用 8 节点减缩积分格式三维实体单元 C3D8R 模拟。内外钢管壁厚较小,采用实体单元可能会导致厚度方向的网格节点数较少,进而影响其计算的准确性,因此采用壳单元 (S4R) 对内外椭圆钢管进行模拟分析。

部件的相互作用主要包含钢-混凝土、钢-钢相互作用。对于内外椭圆钢管和上、下加载板间采用“绑定”约束模拟钢管与加载板间的焊接。而对于钢管、加载板与中空夹层核心混凝土接触面间的相互作用,则可采用“表面对表面接触”进行模拟,其中接触界面法向行为应采用“硬接触”,切向行为采用“库伦摩擦模型”,摩擦系数根据相关研究[15]取为 0.6。

边界条件主要针对上、下加载板,其中下加载板应为固结边界,可通过限定平面所有自由度进行模拟。而上加载板需施加轴压荷载,因此可通过在板件上部中心区域创建参考点 (RP1) 与加载板耦合,并对 RP1 施加 Z 向位移,模拟加载程序。具体有限元分析模型如图 8 所示。

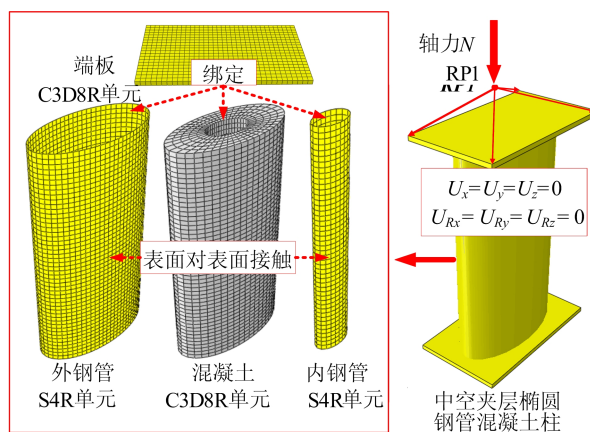


图 8 有限元分析模型

3.2 模型验证

基于上述建模方法,对本文中的 CFDEST 轴压短柱进行数值模拟。对比分析试验与有限元破坏模式如图 9 所示,试验与有限元荷载-位移曲线如图 10 所示。由图 9、图 10 可知,有限元分析模型中 CFDEST 轴压短柱的外钢管的局部鼓曲、内钢管凹陷和混凝土的压溃等现象均与试验结果吻合良好;有限元计算与试验分析承载力比值

(N_{FE}/N_t)的平均值为 1.03,试件 ECS-S44-C I、ECS-S42-C I、ECS-S22-C I、ECS-S44-C II、ECS-S42-C II、ECS-S22-C II 与对应的有限元模型误差分别为 4.92%、3.55%、9.41%、6.29%、7.92%、8.53%,最大误差仅为 9.41%,方差为 0.031,说明承载力及荷载-位移曲线吻合良好。因此本文建立的 CFDEST 轴压短柱有限元分析模型具有较好的准确性和可靠性。

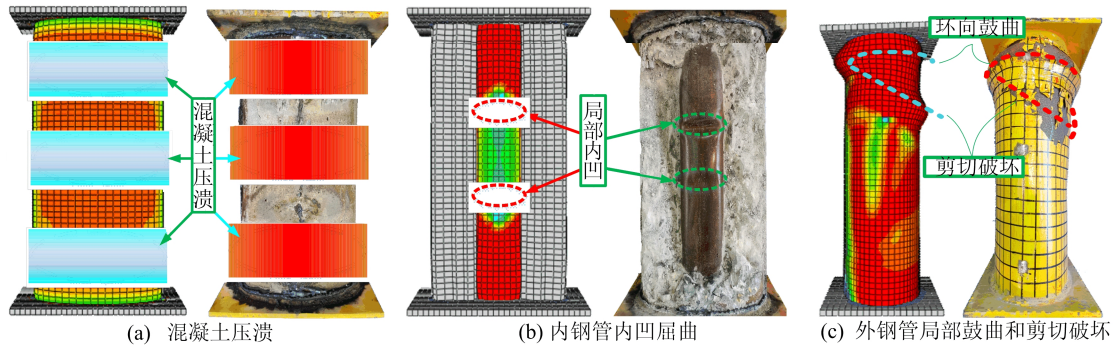


图 9 试验与有限元破坏模式对比

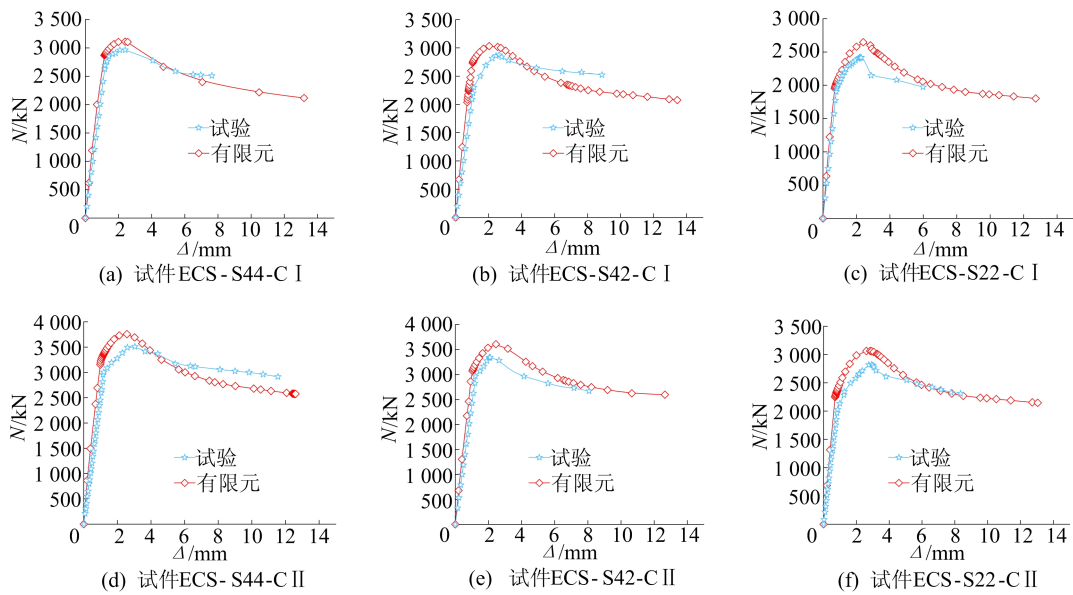


图 10 试验与有限元荷载-位移曲线

3.3 参数分析

为研究 CFDEST 短柱的轴压性能,基于有限元模型探究不同参数对 CFDEST 轴压短柱力学性能的影响规律。研究参数及其取值范围如下:内外钢管屈服强度 f_y 为 235~460 MPa;核心混凝土抗压强度 f_{cu} 为 30~100 MPa;空心率 $\chi = \lambda_i \gamma_i / (\lambda_o \gamma_o)$,其取值范围为 10%~80%;椭圆钢管长短轴比 λ/γ 为 1~2; $2\lambda_o/t_o$ 为 37~100。

试件参数分析结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,CFDEST 轴压短柱的峰值荷载随着钢材

和混凝土强度的提高而增大,随着空心率、径厚比和长短轴比的增大而减小。参数分析表明,试件的初始刚度随着混凝土强度的提高而增大,随着空心率和径厚比的增大而减小,而试件的钢材强度和截面长短轴比对初始刚度的影响不大。试件的 DI 随着混凝土强度、径厚比、空心率和截面长短轴比的增大而减小。CFDEST 轴压短柱的核心 CSIF 随着径厚比的提高而增大,随着钢材强度、混凝土强度、空心率和长短轴比的增大而减小。

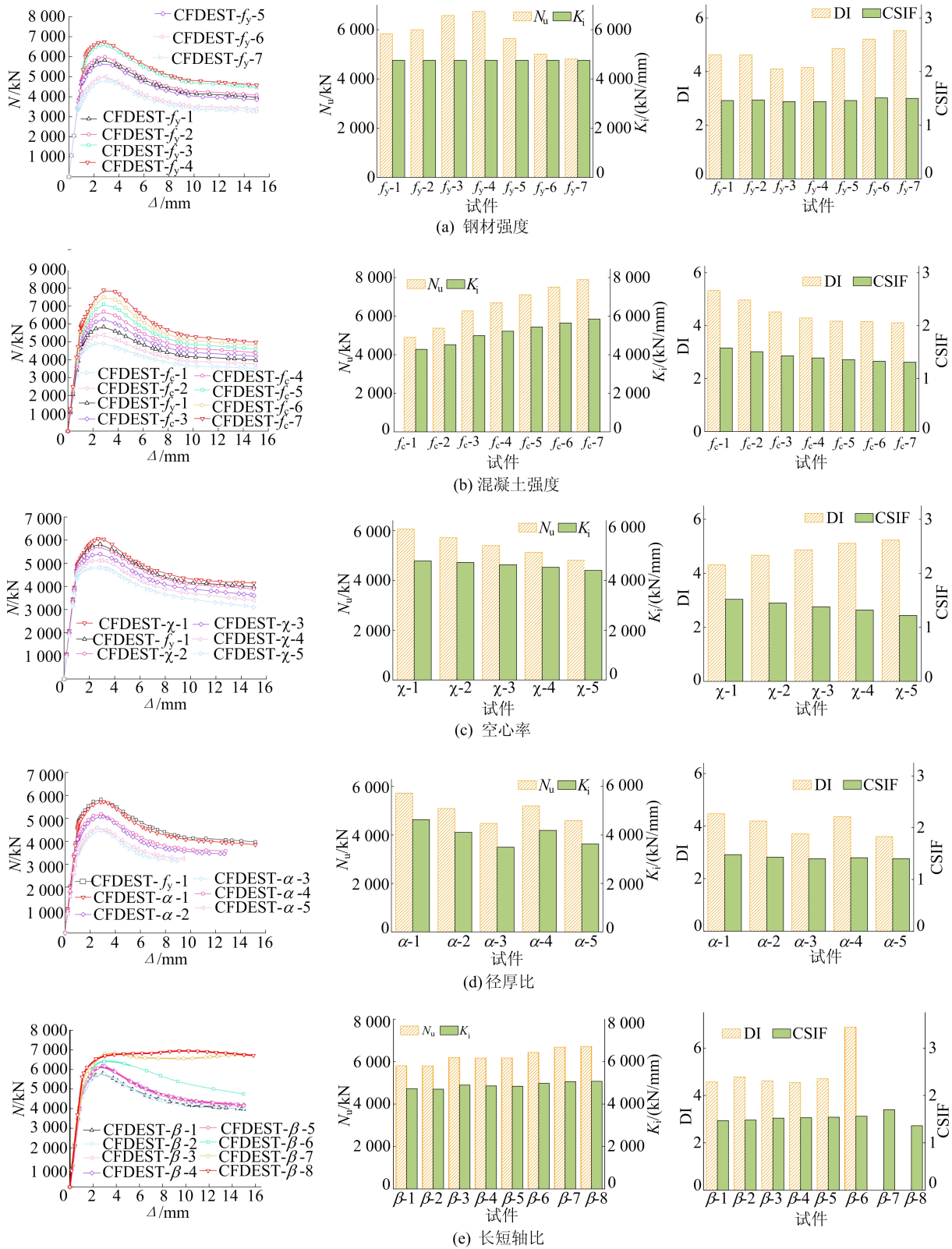


图 11 参数分析结果

3.4 接触应力

为进一步明确 CFDEST 轴压短柱中钢管与核心混凝土之间的相互作用特征,基于有限元分析工作,提取 CFDEST 短柱在轴压作用下的接触

应力,揭示空心率及椭圆截面特征对内外钢管与混凝土间相互作用的影响规律,结果如图 12 所示。

图 12 中:点 1~点 4 为外钢管与核心混凝土

接触界面 1/4 椭圆弧的三等分点,点 1 为长轴端点,点 4 为短轴端点;点 a~点 c 为内钢管与核心混凝土接触界面 1/4 椭圆弧的二等分点,点 a 为长轴端点,点 c 为短轴端点。

从图 12 可以看出,CFDEST 轴压短柱的接触应力分布呈现出明显的不均匀性,接触应力自长轴端点向短轴端点依次减小,且外钢管与混凝土的接触应力较大,而内钢管与混凝土之间的相互作用明显减弱。原因是椭圆绕短轴的曲率远小于圆形,而椭圆绕长轴的曲率则远大于圆形,随着 CFDEST 短柱空心率的增大,夹层核心混凝土厚度减小,在轴压作用下的横向扩张变形逐步减小,因此,外钢管与核心混凝土的接触应力也持续减小。

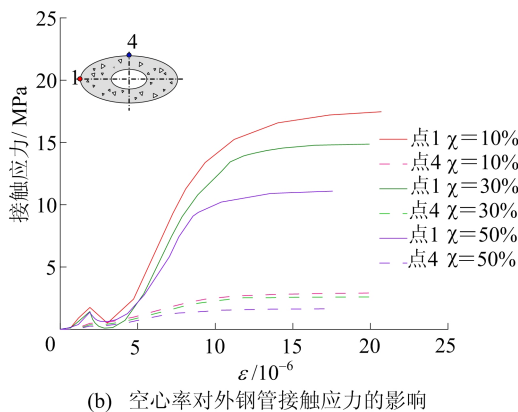
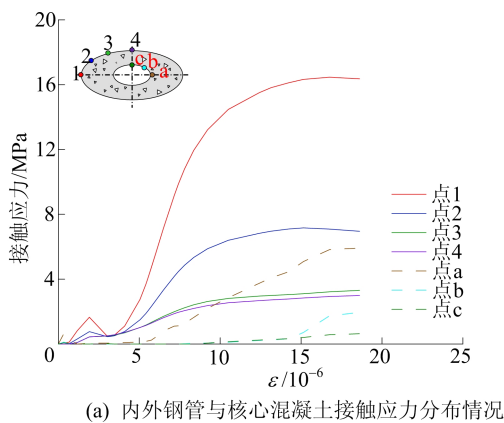


图 12 接触应力分析

3.5 夹层混凝土纵向峰值应力

为进一步明确空心率和长短轴比对轴压 CFDEST 短柱混凝土截面应力分布的影响,本节基于参数空心率(CFDEST- χ -1、CFDEST- χ -3 和 CFDEST- χ -5)和长短轴比(CFDEST- f_y -1、CFDEST- β -4 和 CFDEST- β -8)为例,研究峰值荷载下核心混凝土截面较大纵向应力的发展规律,如图 13 所示。

由图 13a 可知,随着空心率的增加,核心混凝土的纵向应力逐渐减小。空心率的增加导致核心混凝土的截面积逐渐减小,其膨胀值会明显下降,这将导致钢管和核心混凝土之间的约束应力下降。因此,核心混凝土的峰值压应力也相应减少。

由图 13b 可知,随着长短轴比的增加,截面不同点的曲率变化幅度增大,因此核心混凝土在峰值荷载作用下的纵向应力分布开始出现明显的不均匀分布特性。由文献[16-17]中的结果可知,CFST 柱椭圆截面的平均约束应力随着长短轴比的增加而降低,导致核心混凝土的平均纵向压应力逐渐下降。该分析结果与 3.3 节和 3.4 节结论一致。

由于混凝土层的厚度和椭圆截面的曲率均从长轴端向短轴端不断减小,长轴周围的约束应力比短轴周围的约束应力大。因此,混凝土纵向的较大压应力主要分布在沿长轴方向的区域,而沿短轴方向的纵向压应力则比长轴方向的纵向压应力小。

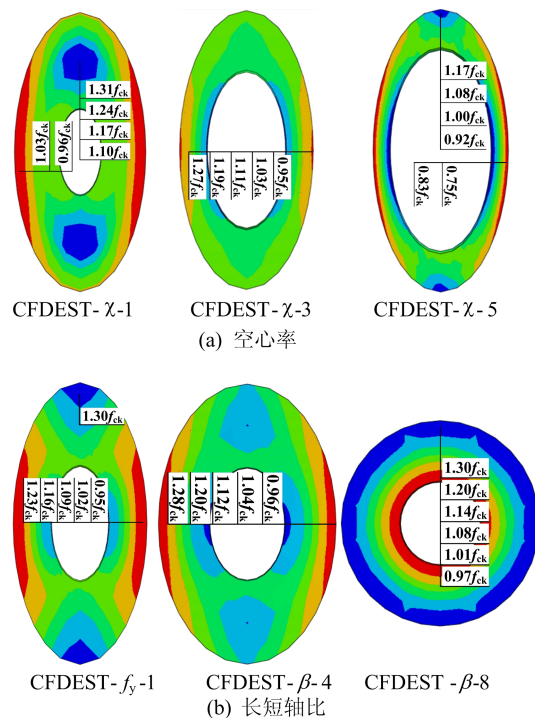


图 13 混凝土纵向压应力

4 结 论

1) 试验表明,CFDEST 轴压短柱的破坏模式主要包括外钢管的局部鼓曲、内钢管的局部凹陷、核心混凝土的截面压溃和斜向剪切等破坏模式。

2) 基于试验研究,本文建立轴压作用下 CFDEST 短柱有限元分析模型,通过试验验证模型的准确性,并在此基础上进行了参数分析,探究

不同参数对中空椭圆钢管混凝土轴压短柱力学性能的影响。

3) 试验与有限元分析表明,CFDEST 轴压短柱的峰值荷载随着钢材和混凝土强度的提高而增大,随着空心率、径厚比和长短轴比的增大而减小。

4) 接触应力分析表明,CFDEST 接触应力存在显著的不均匀分布特性,接触应力自长轴端点向短轴端点依次减小,且外钢管与混凝土之间的相互作用明显强于内钢管与混凝土之间的相互作用;同时,钢管与混凝土之间的相互作用随着空心率的增大而持续减小。

5) 混凝土纵向峰值应力分析表明,CFDEST 短柱核心混凝土的纵向峰值应力随空心率的增加逐渐减小;同时核心混凝土的纵向峰值应力存在不均匀分布性,随着长短轴比的增加,纵向峰值应力逐渐减小。

[参 考 文 献]

- [1] 史艳莉,张超峰,鲜威,等.圆锥形中空夹层钢管混凝土偏压构件受力性能研究[J].建筑结构学报,2021,42(5):155-164,176.
- [2] 张玉琢,吕学涛,刘发起,等.三面受火的方中空夹层钢管混凝土柱耐火极限分析[J].建筑结构学报,2019,40(增刊1):156-162.
- [3] LI W, CHEN B, HAN L H, et al. Experimental study on the performance of steel-concrete interfaces in circular concrete-filled double skin steel tube[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106660.
- [4] WANG W D, FAN J H, SHI Y L, et al. Research on mechanical behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular members with large hollow ratio subjected to bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 182: 106689.
- [5] YANG H, LAM D, GARDNER L. Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3771-3781.
- [6] 王凤芹,刘发起,杨华.适用于直接分析法的椭圆钢管混凝土柱应力-应变关系模型[J].建筑结构学报,2021,42(增刊2):332-338.
- [7] XING W D, SHEN Q H, WANG J F, et al. Performance and design of oval-ended elliptical CFT columns under combined axial compression-torsion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 106148.
- [8] 沈奇罕,高奔浩,王静峰,等.椭圆截面钢管钢渣混凝土短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊2):197-203.
- [9] 马贤峰.椭圆钢管混凝土抗震性能试验与计算方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [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.
- [11] 国家市场监督管理总局.钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—2018[S].[出版地不详:出版者不详],2018:1-21.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019:1-148.
- [13] CAI Y C, QUACH W M, CHEN M T, et al. Behavior and design of cold-formed and hot-finished steel elliptical tubular stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156(5): 252-265.
- [14] WANG J F, SHEN Q H, JIANG H, et al. Analysis and design of elliptical concrete-filled thin-walled steel stub column under axial compression[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(2): 365-380.
- [15] 宋天诣,刘夏璐,项凯.火灾后椭圆钢管混凝土界面黏结性能研究[J].土木工程学报,2021,54(6):41-52.
- [16] WANG J F, LIU W, SHEN Q H, et al. Experimental investigation and theoretical analysis of axially-loaded concrete-filled elliptical tubes with circumferential gaps[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 181: 110100.
- [17] SHEN Q H, LI J Z, WANG J F. Experimental, numerical and design investigations on the performance of axially-loaded ECFT stub columns with spherical-cap gaps[J]. Structures, 2022, 46: 109-127.

(责任编辑 吴亮)