

考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土 柱轴压性能研究*

张丽丽¹, 贾志路², 王文达³, 田雪梅¹

(1. 山西工商学院建筑工程学院, 山西 太原 030062; 2. 中北大学环境与安全工程学院,
山西 太原 030051; 3. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 为研究考虑内外钢管初应力对大空心率圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压性能的影响, 采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型, 在模型验证的基础上, 对轴压短柱和长柱全过程受力机理进行了分析, 研究钢管初应力的存在对圆锥形中空夹层钢管混凝土构件工作机理的影响, 得到构件荷载-变形曲线、各部件应力分布及不同部件之间接触应力的发展规律。在此基础上, 分析了空心率、初应力系数、长细比、锥度和外钢管径厚比等对承载力影响系数的影响规律。结果表明: 考虑钢管初应力后对短柱的轴压承载力影响较小, 最大下降 5% 左右; 但长柱承载力显著下降, 初应力影响导致钢管提前屈服。影响承载力影响系数的主要参数为初应力系数、长细比和空心率。给出了圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压的承载力计算方法。

[关键词] 钢管混凝土; 初应力; 有限元分析; 承载力; 计算

[中图分类号] TU398

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0008-10

Study on Axial Compression Behavior of Tapered CFDST Columns with Initial Stress of Steel Tube

ZHANG Lili¹, JIA Zhilu², WANG Wenda³, TIAN Xuemei¹

(1. School of Architecture Engineering, Shanxi Technology and Business University, Taiyuan, Shanxi 030062, China;
2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;
3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to study the influence of the initial stress of the inner and outer steel tubes on the axial compression performance of the large hollow ratio tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) members, the numerical model was established by ABAQUS finite element software. On the basis of model verification, the whole process stress mechanism of the axial compression short column and the long column was analyzed. The influence of the initial stress of the steel tube on the working mechanism of CFDST member was studied, and the load-deformation curve of the member, the stress distribution of each component and the development law of the contact stress between different components were obtained. On this basis, the influence of hollow ratio, initial stress coefficient, slenderness ratio, taper and diameter-thickness ratio of outer steel tube on the bearing capacity is analyzed. The results show that the initial stress of the steel tube has little effect on the axial compression bearing capacity of the short column, and the maximum decrease is about 5%. However, the bearing capacity of long columns decreases significantly, and the influence of initial stress leads to the early yield of steel tubes. The main parameters affecting the influence coefficient of bearing capacity are initial stress coefficient, slenderness ratio and hollow ratio. The calculation method of bearing capacity of CFDST column under axial compression is given.

* 国家自然科学基金(52168021); 山西省基础研究计划(202303021212205); 山西省高等学校科技创新项目(2023L492)

[作者简介] 张丽丽, 助教, E-mail: 2309747401@qq.com

[通信作者] 贾志路, 讲师, E-mail: cejiazl@163.com

[收稿日期] 2025-09-20

Keywords: concrete-filled double skin steel tube; initial stress; finite element analysis; bearing capacity; calculation

0 引言

中空夹层钢管混凝土 (concrete-filled double skin steel tube, CFDST) 不仅继承了钢管混凝土的特点,且具有自重轻、抗弯刚度大、承载力好等优点^[1-2]。可替代钢结构用于风电塔筒、电线塔杆、海洋平台支撑柱等长细比较大、抗侧刚度要求较高的构筑物中^[3]。但结合实际工程,中空夹层钢管混凝土有时并不是等截面,即下部截面尺寸比上部截面尺寸大,从而形成圆锥形中空夹层钢管混凝土柱。目前,对于等截面中空夹层钢管混凝土柱在轴压^[4-5]、受扭^[6-7]、耐撞性^[8-9]及耐火性^[10]方面均有研究,结果表明该类构件可表现出良好的性能,并形成相关规范 T/CCES 7—2020《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》。基于此,王文达等^[11]对中空夹层钢管混凝土风力机塔架风振性能进行了探究。Li 等^[12-13]对圆锥形中空夹层钢管混凝土柱受压性能进行了研究,揭示其受力机理,并给出了受压承载力计算方法。Shi 等^[14]对大空心率圆锥形中空夹层钢管混凝土进行了轴压和偏压性能研究,得到该类构件具体破坏位置。

轴压性能是构件的基本力学性能,只有先了解受压性能,才可更好地了解构件静力性能。在实际施工中,由于钢构件自重及施工荷载等作用,钢管与混凝土组成共同受力体前,钢管首先产生初应力。关于钢管初应力对不同钢-混构件的受压性能影响的研究结果均表明钢管初应力会降低构件承载力^[15-16]。但目前关于考虑钢管初应力的中空夹层钢管混凝土受力性能研究较少。通过前述对圆锥形中空夹层钢管混凝土力学性能的分析,可发现其与等截面中空夹层钢管混凝土受力有区别,同时风电塔架上部风轮和机舱自重对钢管的影响也不可忽略。因此合理确定钢管初应力对中空夹层钢管混凝土构件力学性能的影响将对此类构件安全合理应用具有重要意义。

本文采用数值方法对考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压性能进行研究,分析该类构件在考虑钢管初应力后的荷载-变形曲线及受力机理;并分析锥度、空心率、钢管初应力系数、长细比、外钢管径厚比等对构件承载力和承载力影响系数的影响,最终给出考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压承载力计算方法,供实际工程参考。

1 有限元模型建立与验证

1.1 单元类型和相互作用

采用有限元软件 ABAQUS 建立考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压构件力学模型,由于钢管相对混凝土厚度小,因此钢管采用壳体单元 (S4R),混凝土和端板采用三维实体单元 (C3D8R)。通过定义切向和法向接触来实现钢管与混凝土间的相互作用,其中法线方向为“Hard”接触,切线方向为库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.6^[14]。

1.2 材料本构

钢材的本构关系采用韩林海^[17]建议的应力-应变关系,其简化为弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑流 5 个阶段,钢材弹性模量 E_s 取 2.06×10^5 MPa,泊松比 μ_s 取 0.3;混凝土采用塑性损伤模型,混凝土弹性阶段的泊松比 μ_c 取 0.2,具体本构关系表达式见文献[17]。

1.3 边界条件和网格

划分网格时将各部件设为独立部件单独划分,并采用全局与局部相结合的方式。短柱 ($\lambda \leq 16$) 和长柱 ($\lambda > 16$) 模型如图 1 所示,其中 λ 表示长细比。考虑初应力的模型分两步计算:①钢管初应力的计算,不论短柱还是长柱,初荷载均轴向施加于上端板,下端板采用固定约束,即设置 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$;②轴压破坏计算,对于短柱,下端板边界条件与钢管初应力阶段相同,上端板全截面施加位移荷载 ($U_1 = U_3 = 0, U_2 = -20\text{mm}$);对于轴压长柱模型考虑荷载初偏心影响,边界条件为在上端板加载线上设置 $U_1 = U_3 = 0, U_2$ 方向施加一定位移,下端板加载线上设置 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$ 。

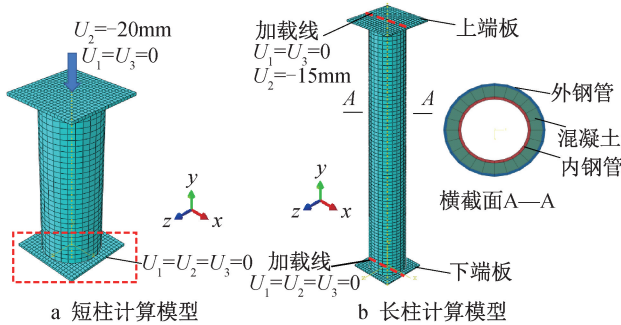


图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

1.4 模型验证

为了验证模型的可靠性,首先选取已有试验数

据进行圆锥形中空夹层钢管混凝土数值模型的验证,具体试件尺寸如表 1 所示,可看出建立的有限元模型能较真实地反映构件受压承载力。

考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土试验数据缺乏,对考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土柱进行有限元计算,以验证考虑钢管初应力的建模可靠性。考虑钢管初应力的内配工字型钢管混凝土试验数据如表 2 所示。工字型钢截面尺寸高×宽×腹板厚×翼缘厚($h\times b\times t_w\times t_f$)=75mm×50mm×3mm×3mm,考虑钢管初应力的试件实测荷载-变形曲线与模拟结果对比如图 2 所示,长柱破坏形态对比如图 3 所示。由图 2,3 可知,数值结果与试验结果吻合较好,模型可用于后续机理分析。

表 2 考虑钢管初应力的试件参数

Table 2 Parameters of specimens with initial stress of steel tube							
试件 编号	$D\times t\times H/mm$	β	N_p/kN	f_{ty}/MPa	f_{sy}/MPa	f_{cu}/MPa	文献 来源
CSP1-0	140×3.5×420	0.2	81	271	335	48.33	文献 [18]
CSP2-0	140×3.5×420	0.4	162	271	335	48.33	
CMP1-0	140×3.5×700	0.2	80	271	335	44.80	
CLP1-0	140×3.5×1 400	0.2	76	271	335	45.00	

注: D 为钢管直径; t 为钢管厚度; β 为钢管初应力系数; N_p 为施加在钢管上的荷载; f_{ty} 、 f_{sy} 分别为钢管和型钢屈服强度

2 机理分析

2.1 典型构件信息

通过典型算例分析考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压构件的全过程受力机理。由于沿构件高度为变截面,为合理确定空心率及长细比,参考已有文献[12,14]取下底面为控制截面,因此,空心率定义为 $\chi=D_i/(D_o-2t_o)$,长细比定义为 $\lambda=4L/D_o$, L 为构件长度。构件尺寸如图 4 所示。锥度为 0.57°;空心率为 0.8;混凝土抗压强度取 $f_{cu}=50\text{MPa}$;内、外钢管屈服强度为 $f_y=355\text{MPa}$;初应力系数 $\beta=0.5$,中空夹层钢管混凝土内外钢管均可能产生钢管初应力,因此 β 的定义参考文献[19], $\beta=N_p/(N_{uso}+N_{usi})$,其中 N_p 为施加在钢管上

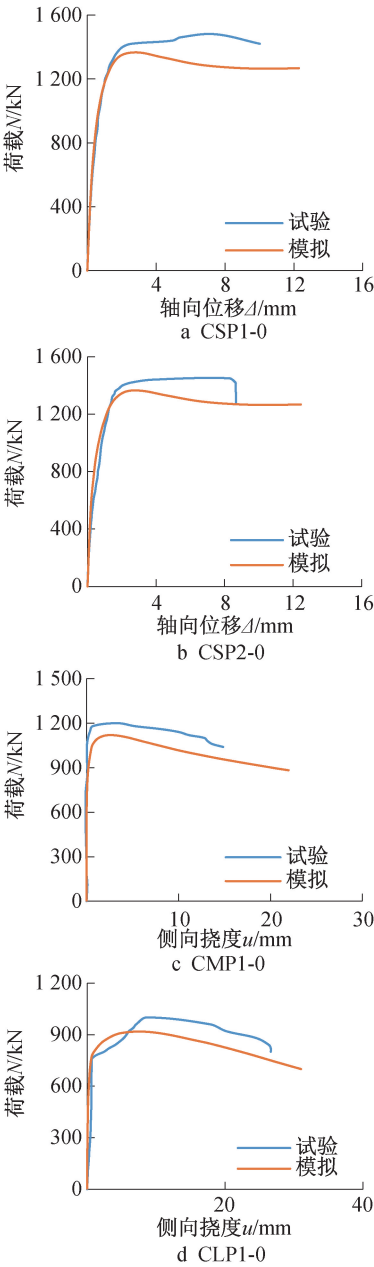


图 2 构件实测荷载-变形曲线与数值结果对比
Fig.2 Comparison between the tested load-deformation curves of the member and the numerical results

的初荷载, N_{uso} 为外钢管轴压承载力, N_{usi} 为内钢管

表 1 中空夹层钢管混凝土试件参数

Table 1 Parameters of CFDST specimens												
试件 编号	外钢管下端 $D_o\times t_o/mm$	外钢管上端 $d_o\times t_o/mm$	内钢管下端 $D_i\times t_i/mm$	内钢管上端 $d_i\times t_i/mm$	H/mm	$\theta/(^{\circ})$	f_{yo}/MPa	f_{yi}/MPa	f_{cu}/MPa	N_{ue}/kN	N_{uf}/kN	文献 来源
C2	350×3.82	329×3.82	231×2.92	210×2.92	1 050	0.57	439.3	396.5	52.5	4942	4778	文献 [12]
C3	350×3.82	308×3.82	231×2.92	189×2.92	1 050	1.14	439.3	396.5	52.5	4569	4384	
C4	300×3.82	282×3.82	198×2.92	180×2.92	900	0.57	439.3	396.5	52.5	4048	3758	
CT-25	200×2.78	175×2.78	155×2.78	130×2.78	1 250	0.57	281	281	61.6	1200	1210	文献 [4]
CT-30	200×2.78	170×2.78	155×2.78	125×2.78	1 500	0.57	281	281	61.6	1140	1156	

注: D_o 、 D_i 分别为外、内钢管下端直径; d_o 、 d_i 分别为外、内钢管上端直径; t_o 、 t_i 分别为外、内钢管壁厚; H 为试件高度; f_{yo} 、 f_{yi} 分别为外、内钢管屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; θ 为锥度; N_{ue} 为试件实测轴压承载力; N_{uf} 为数值计算得到的承载力

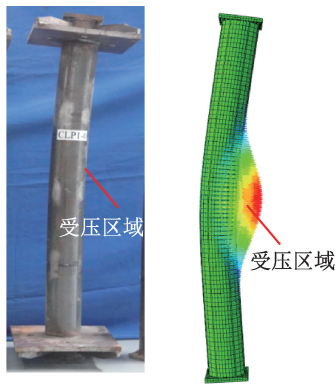


图3 破坏形态对比
Fig. 3 Comparison of failure mode

轴压承载力, $N_{uso} = \varphi f_{sy0} A_{so}$, A_{so} 取外钢管下端截面面积, $N_{usi} = \varphi f_{syi} A_{si}$, A_{si} 取内钢管下端截面面积; φ 为空钢管受压稳定系数, 参考 GB 50017—2017《钢结构设计标准》进行取值; 下端外内钢管直径分别为 $D_o = 400\text{mm}$, $D_i = 305.6\text{mm}$, 外、内钢管厚度 $t_o = t_i = 9\text{mm}$; 对于长柱长细比 $\lambda = 36$, 此时柱高为 $3\,600\text{mm}$, 上端外、内钢管直径分别为 $d_o = 328\text{mm}$, $d_i = 234\text{mm}$; 对于短柱 $\lambda = 12$, 此时柱高为 $1\,200\text{mm}$, 上端外、内钢管直径分别为 $d_o = 376\text{mm}$, $d_i = 281.6\text{mm}$ 。

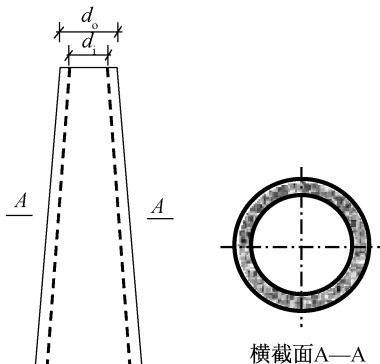


图4 圆锥形中空夹层钢管混凝土剖面
Fig. 4 Tapered CFST section

2.2 典型荷载-变形曲线

圆锥形中空夹层钢管混凝土柱荷载-变形曲线如图5所示。由图5a,5b可知,考虑钢管初应力后,短柱试件达到最大荷载前内、外钢管已屈服,但对应承担荷载降低不显著;混凝土则均在试件最大承载力对应位移时到达峰值;考虑钢管初应力($\beta = 0.5$)后短柱承载力下降不显著。对于考虑钢管初应力的短柱,由图5b可知,荷载-变形曲线分为钢管初应力阶段(OA),弹性阶段(AB),弹塑性强化段

(BC)和承载力下降段(CD)。由图5c,5d可知,考虑钢管初应力后外、内钢管在达到轴压承载力时对应承担荷载明显下降,构件总承载力也降低。对于考虑钢管初应力的长柱,由于钢管初应力为轴向施加,所以长柱的荷载-挠度曲线分为弹性阶段(OA_1),塑性阶段(A_1B_1)和承载力下降阶段(B_1C_1)。

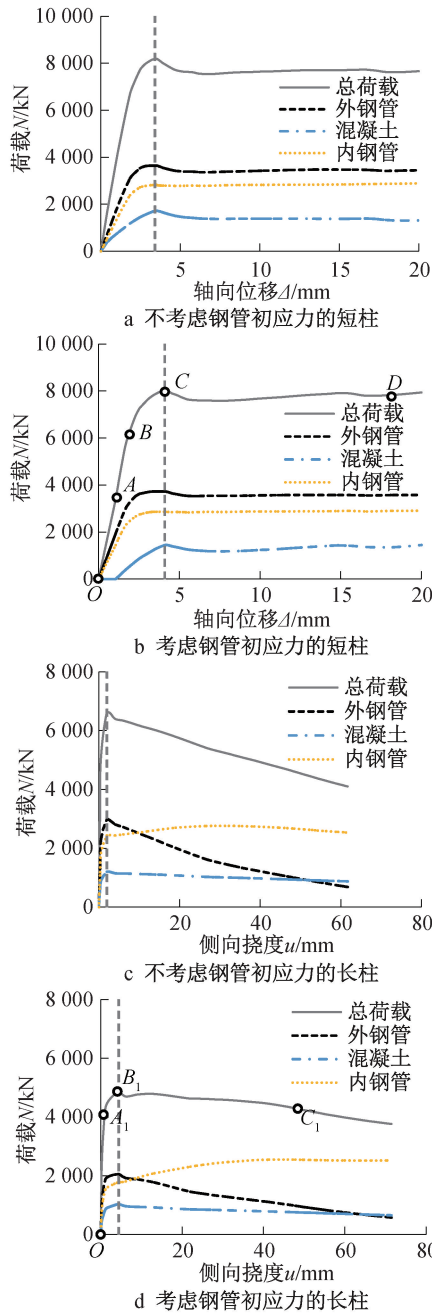


图5 中空夹层钢管混凝土试件的荷载-变形曲线
Fig. 5 Load-deformation curves of CFST specimens

2.3 应力分布

考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱各部件在图5b各特征点处应力分布如图6~8所示。在A点,此时对应外钢管初应力施加结束,可看出钢管还未屈服($f_y = 355\text{MPa}$),内钢管分析同

样未屈服,混凝土此时刚浇筑,应力为 0;在 B 点时,内外钢管上端开始屈服,由于沿柱高度为不等截面且上部截面小,因此上部先屈服,夹层混凝土还未达到最大抗压强度;在 C 点处,构件达到轴压承载力,内外钢管沿高度均基本屈服,混凝土纵向应力最大为 $1.11f_c$;在 D 点处,对应内外钢管上部应力均超过屈服强度,很明显内外钢管上部出现局部鼓曲,此时混凝土上部有压碎,下部仍未达到最大抗压强度。

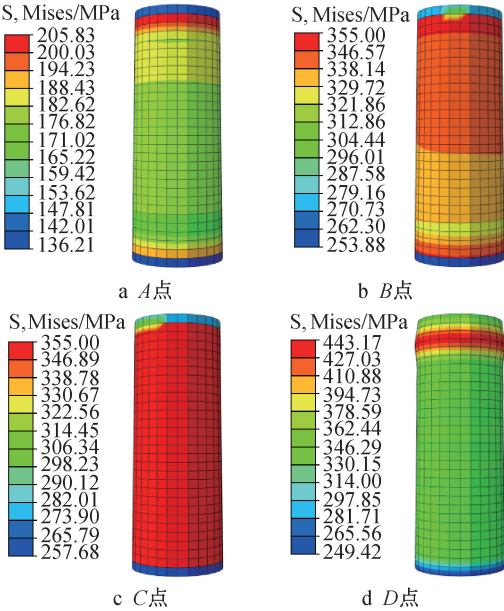


图 6 短柱外钢管在特征点处纵向应力
Fig. 6 Longitudinal stress of outer steel tube of short column at characteristic point

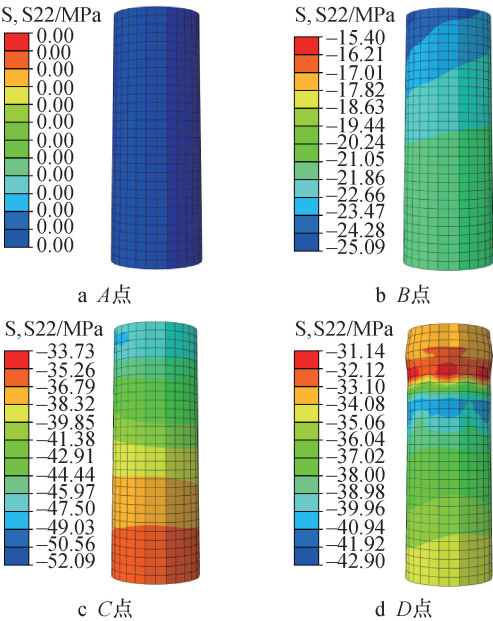


图 7 短柱混凝土在特征点处纵向应力
Fig. 7 Longitudinal stress of concrete of short column at characteristic point

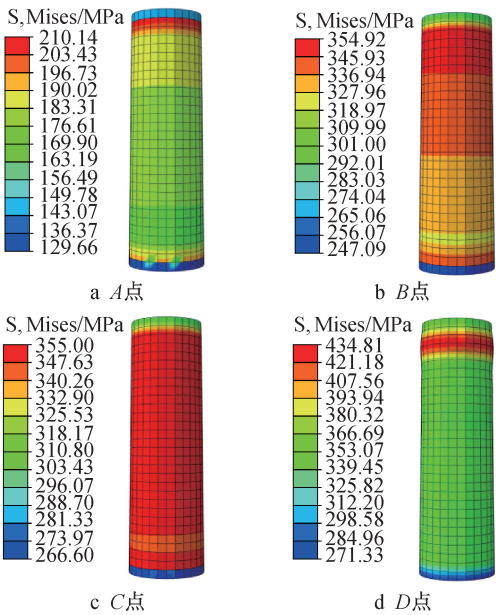


图 8 短柱内钢管在特征点处纵向应力
Fig. 8 Longitudinal stress of inner steel tube of short column at characteristic point

考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土长柱各部件在图 5d 中不同特征点处应力云图如图 9~11 所示。

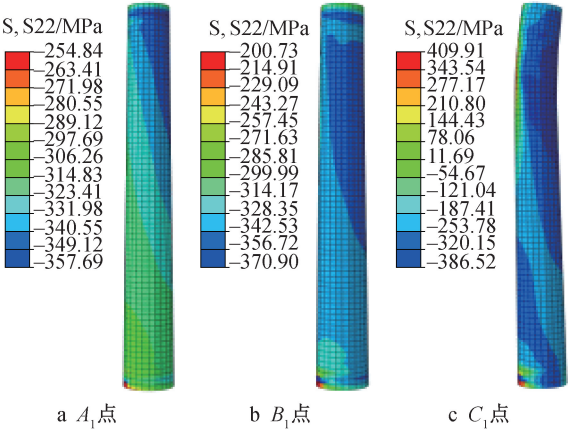


图 9 长柱外钢管在特征点处纵向应力
Fig. 9 Longitudinal stress of outer steel tube of long column at characteristic point

由图 9~11 可知,对于外钢管,在 A_1 点时,对应钢管上部纵向应力达到屈服状态,由于长柱为失稳破坏,且截面为不等截面,最大应力先发生在上部受压侧,同时受拉侧也表现为压应力,说明此时整个截面仍处于受压状态,随荷载增加,钢管纵向应力持续增大,当达到轴压承载力的 85% 时,即 C_1 点,构件失稳发生在 $0.75L$ 附近。内钢管的受力与外钢管基本类似,但达到 C_1 点时,内钢管受拉侧应力较小,这是因为构件满足平截面假定,靠近截面

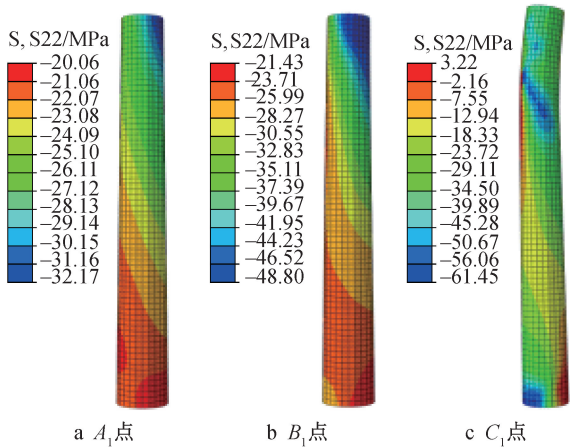


图 10 长柱混凝土在特征点处纵向应力
Fig. 10 Longitudinal stress of concrete of long column at characteristic point

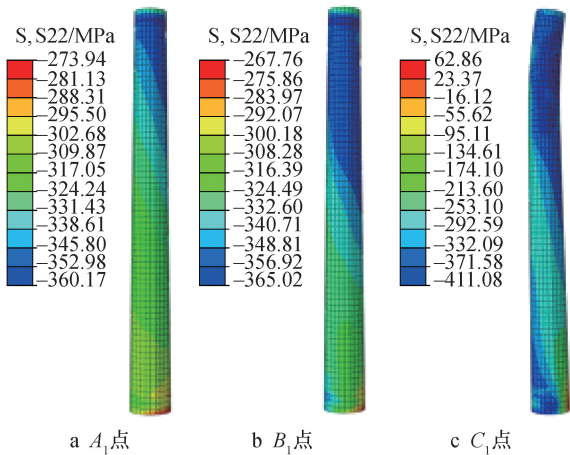


图 11 长柱内钢管在特征点处纵向应力
Fig. 11 Longitudinal stress of inner steel tube of short column at characteristic point

中性轴时应力偏小。对于混凝土,纵向应力波也是从上部往下部传递,从而导致上部应力大于下部应力。在 B_1 点时,各部件仍处于受压状态。

2.4 外钢管与混凝土接触应力

钢管初应力对外钢管与混凝土间接触应力的影响如图 12 所示。对于短柱,由于变形为轴向压缩,圆截面试件环向受力均匀,因此选取破坏位置横截面一点进行分析,由图 12a 可知,随着变形增加外钢管与夹层混凝土间接触应力逐渐增大,钢管初应力对接触应力影响较小。对于长柱,由于失稳破坏,拉压侧应力不同,因此给出了破坏位置拉压侧的外钢管与混凝土间接触应力。由图 12b 可知,挠度相同时,拉压侧均为考虑钢管初应力的接触应力更小,这是由于考虑钢管初应力使外钢管与混凝土接触应力减小,从而降低了对混凝土的约束,使混凝土强度提高程度减小,因此试件轴压承载力降低。

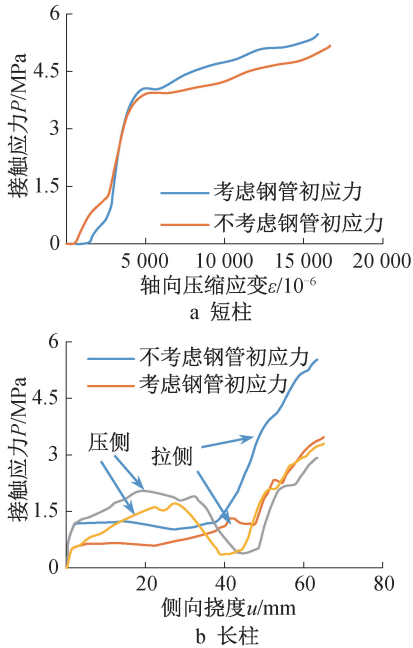


图 12 外钢管与混凝土间接触应力
Fig. 12 Contact stress between outer tube and concrete

2.5 内钢管与混凝土接触应力

钢管初应力对内钢管与混凝土间接触应力的影响如图 13 所示。由图 13a 可知,钢管初应力对短柱的内钢管与混凝土间接触应力影响很小,两种工况下的接触应力变化趋势基本相同,这是因为在轴压作用下,钢管初应力不影响混凝土横向变形。刚开始接触应力基本为 0,随后逐渐增大,这是因为混凝土应变率(横向应变与纵向应变比值)发展快,从而与内钢管产生相互作用。由图 13b 可知,对于长柱受拉侧或受压侧,考虑钢管初应力与否,钢管与混凝土接触应力变化稍有差异,但规律不显著。这可能是因为内钢管内部是空心的,其发生屈曲时可能向外也可能向内,与混凝土接触较随机,同时也可看出在破坏位置内钢管与混凝土接触应力较小。

3 参数分析

为研究不同参数对考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土柱承载力的影响,提出承载力影响系数 $k_p = N_u / N_{u0}$,其中 N_u 和 N_{u0} 分别为考虑钢管初应力和不考虑钢管初应力对应的构件轴压承载力。

3.1 空心率

空心率对圆锥形中空夹层钢管混凝土柱荷载-挠度曲线及承载力影响系数的影响如图 14 所示,空心率取 0.4~0.9。由图 14a 可知,空心率增大对荷载-挠度曲线的初始刚度影响不大,空心率=0.8 时,承载力下降显著,这是因为空心率较大时,混凝土承担的荷载下降显著。由图 14b 可知,随着空心率

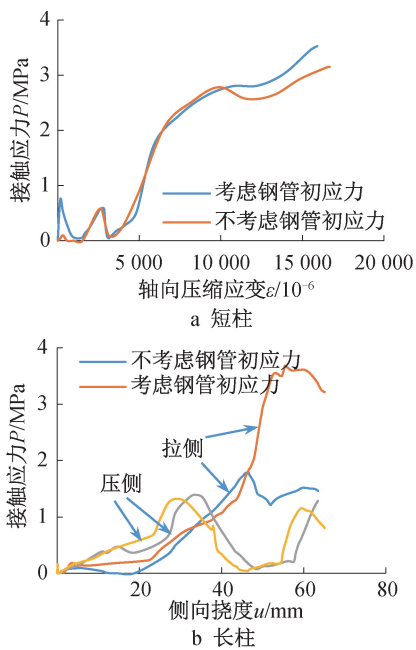


图 13 内钢管与混凝土间接触应力

Fig. 13 Contact stress between inner tube and concrete

增大,承载力影响系数 k_{cr} 逐渐下降。其原因为随着空心率的增大,施加在钢管上的初荷载增加,同时混凝土含量减小,使钢管初应力对构件的影响更显著。

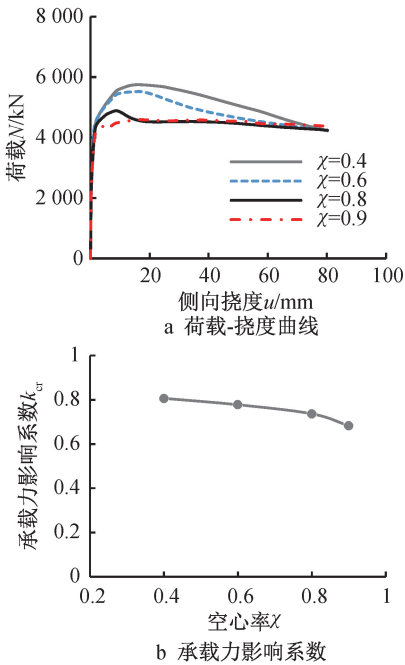


图 14 空心率的影响
Fig. 14 Effect of hollow ratio

3.2 初应力系数

钢管初应力系数对荷载-位移曲线及构件承载力影响系数的影响如图 15, 16 所示。由图 15a, 16 可知, 对于短柱, 钢管初应力对轴压承载力的影响

较小, 初应力系数从 0 增加到 0.8 时, 承载力仅下降 5.2%。由图 15b, 16 可知, 对于长柱, 随初应力系数从 0 增加到 0.8, 轴压承载力下降显著, 同时承载力影响系数也下降了 42.4%, 分析原因为考虑钢管初应力后, 相同挠度时降低了外钢管与混凝土间的相互作用, 使钢管对混凝土的约束减弱, 钢管初应力越大, 影响越显著, 从而降低了长柱的轴压承载力。

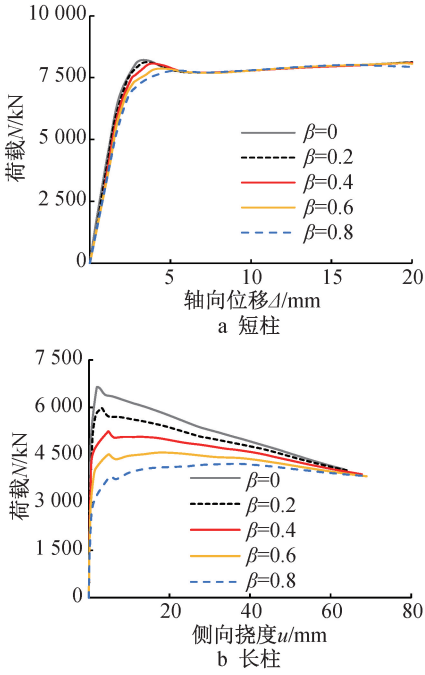


图 15 初应力系数对荷载-位移曲线的影响
Fig. 15 Effect of initial stress coefficient on load-displacement curves

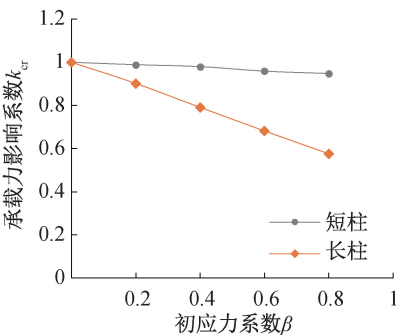


图 16 初应力系数对 k_{cr} 的影响
Fig. 16 Effect of initial stress on k_{cr}

3.3 长细比

长细比对圆锥形中空夹层钢管混凝土柱的荷载-挠度曲线和承载力影响系数的影响如图 17 所示, 长细比取 20~80。由图 17a 可知, 随着长细比增大, 构件荷载-挠度曲线的初始刚度及轴压承载力均在下降, 这是因为随着长细比增大, 二阶效应逐渐明显。另外, 由图 17b 可知, k_{cr} 随长细比的增大而

增大,这是因为随长细比增加,试件破坏位置截面也在减小,同时长细比的增加加剧了二阶效应,破坏位置截面受拉区域增大,但钢管初压应力延缓了受拉区域的发展,进而使 k_{cr} 逐渐增大。

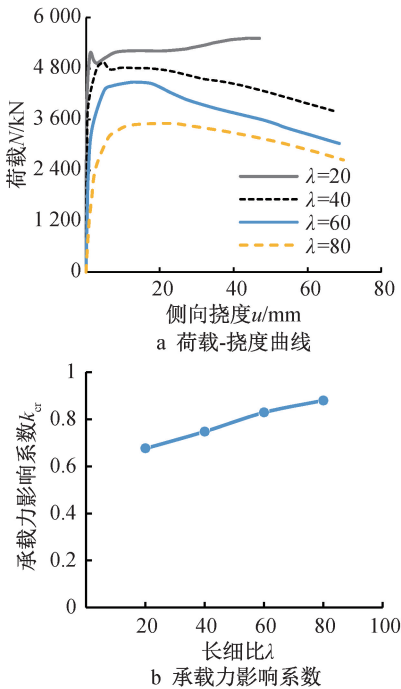


图 17 长细比的影响
Fig. 17 Effect of slenderness ratio

3.4 锥度

锥度对荷载-挠度曲线及承载力影响系数的影响如图 18 所示。由图 18a 可知,长细比一定时,随着锥度增大,试件破坏位置逐渐上移^[15],因此轴压承载力逐渐下降。由图 18b 可知,随着锥度增大,承载力影响系数仅变化了 2.3%,分析原因为虽然构件上部截面在减小,但钢管初应力是依据下底面计算的,因而施加的钢管初应力保持不变。

3.5 外钢管径厚比

外钢管不同径厚比(外钢管厚度不变)对荷载-挠度曲线及承载力影响系数的影响如图 19 所示,长细比为 36。由图 19a 可知,随径厚比增加,构件的轴压承载力显著增大;但由图 19b 可知,承载力影响系数受径厚比影响较小。

4 轴压构件承载力计算方法

考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压承载力计算参考文献[17-18]的计算思路,先给出普通轴压承载力计算方法,然后通过考虑钢管初应力对承载力的折减影响,即承载力影响系数,进而得到考虑钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压承载力。其中,圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱破坏集中在上端部,因此参考 Li

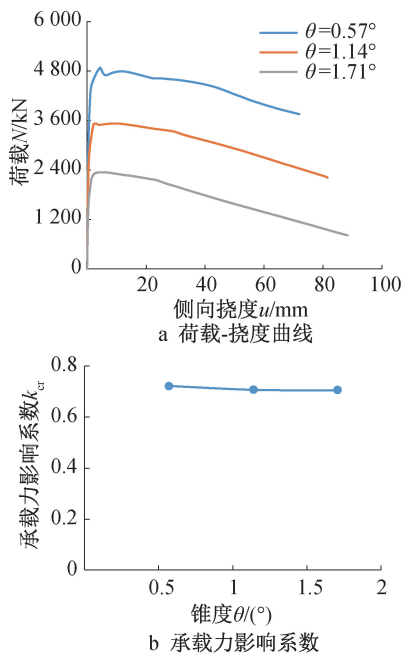


图 18 锥度的影响
Fig. 18 Effect of taper

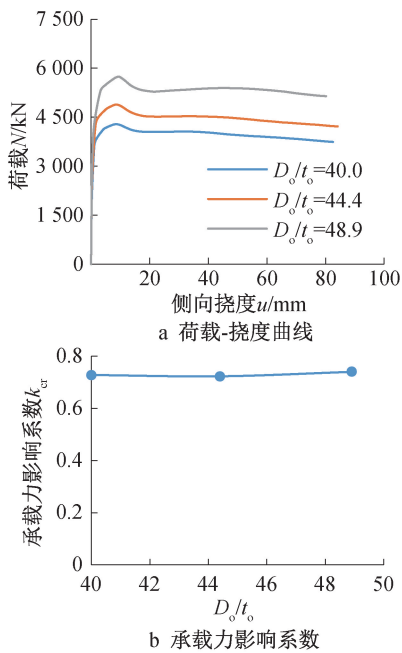


图 19 外钢管径厚比的影响

Fig. 19 Effect of outer steel tube diameter-thickness ratio

等^[13]建议的方法取其最小截面进行轴压承载力的计算:

$$N_{u0} = N_{osc,u} + N_{i,u} \tag{1}$$

式中: $N_{osc,u}$ 为外钢管与夹层混凝土的轴压承载力; $N_{i,u}$ 为内钢管的轴压承载力。

$$N_{osc,u} = f_{scy}(A_{so} + A_c) \tag{2}$$

$$f_{scy} = C_1 \chi^2 f_{yo} + C_2 (1.14 + 1.02\xi) f_{ck} \tag{3}$$

$$N_{i,u} = f_{yi} A_{si} \tag{4}$$

式中: A_{so} 和 A_c 分别为外钢管和夹层混凝土截面面积; C_1 和 C_2 为计算系数, $C_1 = \alpha / (1 + \alpha)$, $C_2 = (1 + \alpha_n) / (1 + \alpha)$; α 和 α_n 分别为外钢管含钢率及名义含钢率, $\alpha = A_{so} / A_c$, $\alpha_n = A_{so} / A_{ce}$, $A_{ce} = \pi (D - 2t_{so})^2 / 4$; A_{si} 为内钢管截面面积; ξ 为钢管约束效应系数, $\xi = \alpha_n f_{yo} / f_{ck}$ 。

长柱轴压承载力计算为:

$$N_u = \varphi N_{u0}$$

(5)

式中: φ 为稳定系数,其计算方法有很多种,本文参考 Jia 等^[20] 建议的方法,计算简单且误差可保证。

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (L_e/d_e \leq 4) \\ 1 - (0.002L_e/d_e + 0.065) \sqrt{L_e/d_e - 4} & (4 < L_e/d_e \leq 25) \end{cases}$$

(6)

式中: L_e 为将圆锥形中空夹层钢管混凝土等效为中空夹层钢管混凝土后的长度, $L_e = \mu L$; μ 为换算系数, $\mu = 1 / \sqrt{4\gamma + 2}$; γ 为锥率, $\gamma = (D_o - D_i) / D_i$; d_e 为等效后的中空夹层钢管混凝土外钢管截面直径,近似取圆锥形中空夹层钢管混凝土 $3L/4$ 处截面。

圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压承载力公式得到的计算值 (N_{ucal}) 与试验值或模拟值 (N_u) 对比结果如图 20 所示。由图 20 可知,对于短柱, N_{ucal} / N_u 比值的平均值和标准差分别为 0.959 和 0.036;对于长柱, N_{ucal} / N_u 比值的平均值和标准差分别为 0.938 和 0.039。说明上述给出的轴压承载力计算方法结果较可靠。

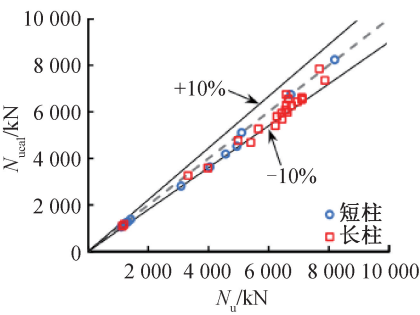


图 20 圆锥形中空夹层钢管混凝土公式验证
Fig. 20 Formula verification for tapered CFDST

对于承载力影响系数,由前述分析可知,承载力影响系数受长细比、初应力系数和空心率的影响。因此通过参数回归,给出了大空心率($\chi \geq 0.8$)圆锥形中空夹层钢管混凝土柱的承载力影响系数,如表 3 所示,其他结果采用线性内插确定,长细比为 20~80;对于考虑钢管初应力的短柱($\lambda < 20$)直接采用普通轴压承载力计算方法。

表 3 承载力影响系数

Table 3 Influence coefficient of bearing capacity

空心率	长细比	初应力系数				
		0	0.2	0.4	0.6	0.8
0.8	20	1	0.859	0.739	0.610	0.494
	40	1	0.894	0.782	0.680	0.575
	60	1	0.925	0.838	0.751	0.669
	80	1	0.991	0.939	0.900	0.833
0.9	20	1	0.849	0.704	0.559	0.414
	40	1	0.883	0.774	0.655	0.532
	60	1	0.925	0.835	0.737	0.648
	80	1	0.969	0.914	0.866	0.794

5 结语

- 1) 基于 ABAQUS 有限元软件建立了考虑内外钢管初应力的圆锥形中空夹层钢管混凝土柱轴压模型,并验证了模型可靠性,得到了考虑钢管初应力的全过程荷载-位移曲线及破坏形态。
- 2) 考虑钢管初应力的短柱荷载-位移曲线可分为 4 个阶段,长柱的荷载-挠度曲线主要分为 3 个阶段。考虑了钢管初应力,短柱承载力最大下降 5%;但长柱承载力显著下降。
- 3) 考虑钢管初应力后,内外钢管提前屈服,混凝土仍是达到构件轴压承载力时承担荷载最大。考虑钢管初应力对短柱各部件接触应力影响不显著,对长柱有一定影响。初应力系数、长细比和空心率是影响轴压构件承载力影响系数的主要因素。
- 4) 给出了圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压承载力计算方法。结合参数回归,给出了大空心率构件的承载力影响系数计算方法,进而可预测考虑内外钢管初应力的大空心率圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压柱的承载力。

参考文献:

[1] ZHAO X L, GRZEBIETA R. Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS inner and SHS outer) tubes [J]. Thin-walled structures, 2002, 40 (2) : 199-213.

[2] YUAN W B, YANG J J. Experimental and numerical studies of short concrete-filled double skin composite tube columns under axially compressive loads [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 80 : 23-31.

[3] 邓然,周绪红,王宇航,等. 圆台形大空心率中空夹层钢管混凝土构件压扭性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (3) : 136-147.

[4] DENG R, ZHOU X H, WANG Y H, et al. Compression-torsion behavior of tapered concrete-filled double-skin steel tubular members with large hollow ratio [J]. Journal of building structures, 2024, 45 (3) : 136-147.

[4] 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.

SHI Y L, ZHANG C F, XIAN W, et al. Research on mechanical behavior of tapered concrete-filled double skin steel tubular members under eccentric compression[J]. Journal of building structures, 2021, 42(5): 155-164,176.

[5] DING F X, WANG W J, LU D R, et al. Study on the behavior of concrete-filled square double-skin steel tubular stub columns under axial loading[J]. Structures, 2020, 23: 665-676.

[6] 黄宏,郭晓宇,陈梦成. 圆中空夹层钢管混凝土压扭构件试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(1): 101-110.

HUANG H, GUO X Y, CHEN M C. Experimental study of concrete-filled double skin steel tube members (CHS inner and CHS outer) subjected to compression and torsion[J]. Journal of experimental mechanics, 2015, 30(1): 101-110.

[7] 廖栩,李吉人,王庆利. 轴压荷载下中空夹层钢管混凝土抗扭性能试验研究[J]. 建筑结构,2022,52(6):90-96,125.

LIAO X, LI J R, WANG Q L. Experimental study on torsional behavior of concrete-filled double skin steel tubes under axial load[J]. Building structure, 2022, 52(6): 90-96,125.

[8] ZHAO H, WANG R, HOU C C, et al. Performance of circular CFDST members with external stainless steel tube under transverse impact loading [J]. Thin-walled structures, 2019, 145:106380.

[9] 郭金龙,潘爽,付诗琦. 侧向冲击作用后圆中空夹层钢管混凝土长柱的竖向剩余承载性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(6): 203-215.

GUO J L, PAN S, FU S Q. Study on the vertical residual bearing behaviors of circular concrete-filled double-skin steel tubular long columns after lateral impact [J]. Engineering mechanics, 2025, 42(6): 203-215.

[10] LI W, WANG T, HAN L H. Seismic performance of concrete-filled double-skin steel tubes after exposure to fire: experiments [J]. Journal of constructional steel research,2019,154:209-223.

[11] 王文达,张丽丽,纪孙航,等. 中空夹层钢管混凝土风力机塔架风振性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(2): 26-39.

WANG W D, ZHANG L L, JI S H, et al, Study on wind vibration performance of concrete-filled double skin steel tubular wind turbine tower [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2023, 40(2): 26-39.

[12] LI W, REN Q X, HAN L H, et al. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns[J]. Thin-walled structures,2012,57:37-48.

[13] LI W, HAN L H, REN Q X, et al. Behavior and calculation of tapered CFDST columns under eccentric compression[J]. Journal of constructional steel research,2013,83:127-136.

[14] SHI Y L, JI S H, WANG W D, et al. Axial compressive behaviour of tapered CFDST stub columns with large void ratio[J]. Journal of constructional steel research,2022,191:107206.

[15] 韩林海,尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J]. 土木工程学报,2003,36(4):9-18.

HAN L H, YAO G H. Effect of initial stress on bearing capacity of concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. China civil engineering journal,2003, 36(4): 9-18.

[16] PATEL V I, LIANG Q Q, HADI M N S. Behavior of biaxially-loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns with preload effects [J]. Thin-walled structures, 2014, 79:166-177.

[17] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 4版. 北京: 科学出版社,2022.

HAN L H. Concrete-filled steel tubular structures-theory and application[M]. 4 edition. Beijing: Science Press, 2022.

[18] 贾志路,史艳莉,王文达,等. 钢管初应力对内配型钢的圆钢管混凝土柱受压性能影响[J]. 建筑结构学报,2022,43(6): 63-74.

JIA Z L, SHI Y L, WANG W D, et al. Study on compressive performance of steel-reinforced concrete-filled circular steel tubular members considering preload on steel tubes[J]. Journal of building structures, 2022, 43(6): 63-74.

[19] LI W, HAN L H, ZHAO X L. Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes[J]. Thin-walled structures, 2012, 56: 9-20.

[20] JIA Z L, SHI Y L, WANG W D, et al. Compression-bending behaviour of steel-reinforced concrete-filled circular steel tubular columns with preload[J]. Structures, 2022, 36: 892-911.