

引用本文:段绍臻,马 钰,史艳莉,等. 施工初应力作用下内配十字形型钢的圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(1):85-93.

DUAN Shao-zhen, MA Yu, SHI Yan-li, et al. Analysis on Axial Compression Mechanical Behavior of Circular Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns with Inner Crossed Profiled Steel Under Construction Pre-load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 85-93.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01034

施工初应力作用下内配十字形型钢的圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析

段绍臻,马 钰,史艳莉,王文达

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:利用 ABAQUS 有限元软件分别建立考虑外钢管施工初应力和同时考虑钢管与型钢施工初应力的内配十字形型钢圆钢管混凝土轴压短柱数值模型,并对建模方法进行验证。计算施工初应力存在时内配型钢钢管混凝土轴压短柱的荷载-位移全过程曲线及其各部件的承载力分配曲线,并分析混凝土与钢管、混凝土与型钢的接触应力及应力发展状态。最后对初应力系数、构件长细比、钢管和型钢的含钢率、钢管和型钢的屈服强度以及混凝土的抗压强度等因素进行了参数分析。结果表明:考虑外钢管施工初应力对内配型钢钢管混凝土轴压构件力学性能的影响规律与其对钢管混凝土轴压构件力学性能的影响规律基本一致;外钢管和型钢施工初应力的同时存在使混凝土与钢管、型钢的相互作用时间延迟,减弱钢管对混凝土的套箍作用和混凝土对型钢的局部约束,使组合构件提前进入弹塑性阶段并扩大此阶段的范围,导致组合柱极限承载力随着初应力值的增大逐渐减小;构件长细比对轴压短柱的承载力影响系数有显著影响。

关键词:圆钢管混凝土;内配十字形型钢;施工初应力;轴压构件;力学性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0085-09

Analysis on Axial Compression Mechanical Behavior of Circular Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns with Inner Crossed Profiled Steel Under Construction Pre-load

DUAN Shao-zhen, MA Yu, SHI Yan-li, WANG Wen-da

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Using ABAQUS finite element software, the numerical models of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns with inner crossed profiled steel under axial pressure were established, which considered the construction pre-load of outer steel tube and the pre-load of steel tube and section steel construction respectively. And the modeling method was verified. The whole process load-displacement curves and the bearing capacity distribution curves of CFST with inner profiled steel considering construction pre-load were calculated respectively. The stress

收稿日期:2019-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51768038);甘肃省高校协同创新团队项目(2018C-08)

作者简介:段绍臻(1982-),女,河北邯郸人,副教授,工学博士,E-mail:dszbest@126.com。

通信作者:王文达(1976-),男,甘肃天水人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangwd@lut.cn。

development state and the contact stresses between concrete and outer tube, concrete and inner crossed profiled steel were analyzed respectively. Finally, the parameters of pre-load coefficient, component slenderness ratio, steel content of tube and profiled steel, yield strength of tube and profiled steel, and compressive strength of concrete were analyzed. The results show that the influence law of the construction pre-load of outer tube on the mechanical properties of axial compression member in CFST with inner profiled steel is the same as that on the common CFST. At the same time of the pre-loads of the outer steel tube and the profile steel, the interaction time of the concrete and the outer tube and the profile steel is delayed, and the sleeve of steel tube on concrete and the local restraint of concrete on profiled steel pipe are weakened, so that the composite member enters the elastoplastic stage in advance and expands the range of the next stage. The ultimate bearing capacity of composite columns decreases with the increase of the pre-load value. The slenderness ratio has a significant effect on the bearing capacity of the axial compression column.

Key words: circular concrete filled steel tube; inner crossed profiled steel; construction pre-load; axial compression member; mechanical behavior

0 引 言

随着造型新颖且功能复杂多样的高层和超高层建筑增多,普通钢管混凝土已经很难满足一些建筑的使用要求,这就需要承重柱在重载条件下不但要具有很高的承载力,而且应该具备较好的延性。内配型钢钢管混凝土与普通钢管混凝土相比,抗压承载力更高,塑性、韧性和抗火能力更好。在施工过程中,内配型钢钢管混凝土柱一般先安装内配型钢和空钢管,再进行节点和组合梁的装配,最后在钢管内浇筑核心混凝土,此阶段钢管和型钢成为混凝土浇筑模板及楼盖的竖向支撑。涉及到内配型钢钢管混凝土柱的节点形式主要分为 2 类构造:一类为钢梁仅与外钢管连接;另一类为钢梁穿心式构造节点。当外钢管截面尺寸较大时,钢管内部通过设置内隔板或短梁段,一侧与钢管内部焊接,另一侧和内部型钢的翼缘焊接,而外部的钢梁加工仍然和外钢管或外环板进行焊接即可,从而实现钢梁荷载传递给外钢管和内部型钢共同承担,节点典型构造示意如图 1 所示。第一类节点构造在混凝土凝固前,施工荷载和湿混凝土自重等仅在外钢管中产生纵向的初压应力;第二类穿心构造节点在施工期间会对外钢管和内部型钢同时产生初应力。施工初应力是由施工期间荷载引起的,钢管或型钢中会一直存在初应力,可能对内配型钢钢管混凝土柱后期的受力产生一定的影响。因此,针对上述 2 种工况,本文分别就施工初应力单独作用于外钢管和同时施加到外钢管与型钢时组合构件的力学性能进行分析。

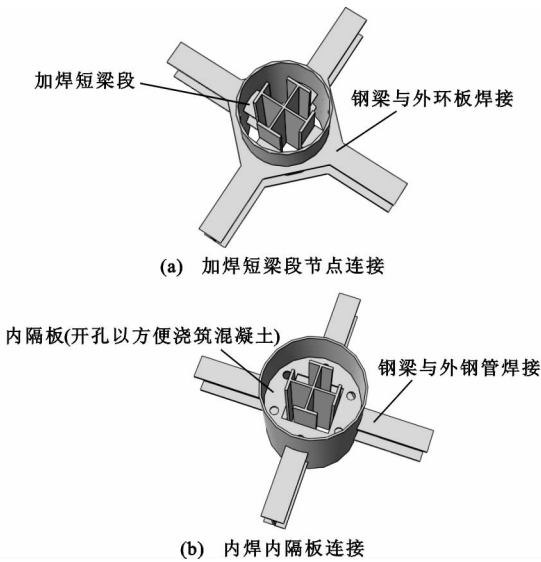


图 1 内配型钢钢管混凝土柱穿心节点
Fig. 1 Through-center Joints of Concrete Filled Steel Tube Column with Inner Crossed Profiled Steel

目前国内外相关学者对施工初应力问题已开展了一些研究:钟善桐等^[1-2]分析了初应力对钢管混凝土轴压、压弯扭构件承载力的影响;Han 等^[3]进行了初应力对方钢管混凝土偏压构件承载力影响的试验和有限元分析;王文达等^[4]分析了在施工阶段混凝土浇筑对方钢管混凝土受力性能的影响;Li 等^[5]开展了考虑内外钢管初应力作用的中空夹层钢管混凝土构件的试验和理论研究。同时,关于内配型钢钢管混凝土轴压短柱的基本力学性能已有不少学者进行了试验和理论研究^[6-20]。

鉴于对考虑施工初应力作用的内配型钢钢管混

凝土构件的研究较为缺乏,本文采用 ABAQUS 软件分别进行了施工初应力只作用于外钢管、同时作用于钢管和内配型钢 2 种受力情况下,内配十字形型钢圆钢管混凝土轴压短柱构件力学性能研究和参数分析。

1 模型的建立和验证

1.1 数值模型建立

利用 ABAQUS 对 2 类施工初应力作用下内配十字形型钢的圆钢管混凝土轴压短柱分别进行建模分析。核心混凝土采用韩林海^[11]提出的塑性损伤模型,钢管和型钢均采用韩林海^[11]提出的五段式二次塑流模型。轴压柱各部分组件均采用 8 节点减缩积分格式的三维实体单元。核心混凝土与钢管、内配型钢的法向界面模型采用硬接触,接触单元为面-面接触;切线方向的黏结滑移采用库仑摩擦模型,以此模拟接触界面切向力的传递;端板与混凝土、型钢、钢管之间采用绑定约束,确保加荷端板与各部件之间没有相对滑移。

模型施工初应力采用 ABAQUS 中的生死单元法实现,加载过程分为 2 个阶段:第一阶段,施工初应力施加在钢管和型钢(外钢管)上,而混凝土(型钢

和混凝土)被移除,初应力导致钢管和型钢(钢管)内产生初始压应力和初应变;第二阶段,激活核心混凝土(型钢和混凝土),构件所承受的正常使用寿命荷载由混凝土、型钢和钢管共同承担,采用位移加载,且第一阶段中的施工初应力在这一步仍然存在,直至组合柱破坏。

1.2 模型验证

为验证考虑施工初应力作用的内配型钢钢管混凝土轴压短柱构件数值模型的有效性,对已有的内配型钢钢管混凝土轴压试验、考虑钢管初应力的钢管混凝土轴压试验进行了计算。表 1 给出了相关试验试件的计算参数,数值计算结果与试验结果的荷载-纵向位移($N-u_m$)曲线、荷载-纵向应变($N-\epsilon$)曲线见图 2。由于试验中轴压短柱的两端为平板支座加载,而有限元模型中为了模拟轴压短柱的受力状态,其端部边界条件是理想化固端约束,因此有限元计算的荷载-位移曲线前期刚度与试验曲线略有差异。图 3 给出了内配型钢钢管混凝土轴压承载力 and 钢管初应力作用的钢管混凝土轴压承载力计算值 N_{uc} 与试验值 N_{ue} 的对比。数值计算值与试验值吻合良好,因此该建模方法可以用于考虑施工初应力作用下内配型钢钢管混凝土轴压短柱力学性能的分析。

表 1 试件主要参数及试验结果

Tab. 1 Main Parameters and Test Results of Specimens

试件编号	B/mm	t/mm	L/mm	e/mm	N_p/kN	β	f_{ty}/MPa	f_{cu}/MPa	N_{ue}/kN	N_{uc}/kN	数据来源
SP-1	120	2.65	360	0	211.00	0.50	340.00	20.1	625	663	文献[3]
SP-3	120	2.65	360	0	211.00	0.50	340.00	36.0	782	817	
SJ2	133	4.50	466	0	117.66	0.20	325.00	42.2	1 185	1 140	文献[12]
SJ4	133	4.50	466	0	264.74	0.45	325.00	42.2	1 162	1 078	
M-6	273	6.00	819	0	0.00	0.00	357.06	62.2	5 257	5 491	文献[8]
M-7	273	8.00	819	0	0.00	0.00	319.79	62.2	5 622	5 561	

注: B 为钢管直径; t 为钢管壁厚; L 为试件长度; e 为外荷载偏心距; N_p 为钢管初应力; β 为钢管初应力系数; f_{ty} 为钢管屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; N_{ue} 为极限荷载数值计算值; N_{uc} 为极限荷载试验值。

2 施工初应力作用下的受力性能分析

2.1 施工初应力系数

为分析施工初应力对内配型钢钢管混凝土轴压构件受力性能的影响,只考虑外钢管初应力的内配型钢钢管混凝土柱的初应力系数 β 参考韩林海^[11]的定义,而对于施工初应力同时作用于外钢管和型钢的内配型钢钢管混凝土柱,初应力系数 β 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{N_p}{N_{uss} + N_{ust}} \\ N_{uss} &= \varphi_{ss} f_y A_{ss} \\ N_{ust} &= \varphi_{st} f_y A_{st} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: N_{ust} 为钢管的轴心受压承载力; N_{uss} 为型钢的轴心受压承载力; φ_{st} 为空钢管构件的轴心受压稳定系数; φ_{ss} 为十字形型钢的轴心受压稳定系数; A_{st} 为钢管横截面面积; A_{ss} 为型钢净截面面积。

利用 ABAQUS 分别建立外钢管施工初应力作用和型钢、钢管共同施工初应力作用下,内配十字形型钢圆钢管混凝土轴压柱的典型算例并分析其受力性能。基于相关设计规范和工程常用参数范围,取典型算例参数如下:钢管外径 $D=450\text{ mm}$,钢管厚度 $t=10\text{ mm}$,柱长 $L=1\ 350\text{ mm}$,钢管内填 C60 混凝土,钢管的屈服强度 $f_{ty}=345\text{ MPa}$,型钢的屈服强度 $f_{sy}=345\text{ MPa}$,型钢选用 I25b 工字钢,钢管的含钢率 $\alpha_{st}=0.095$,型钢的含钢率 $\alpha_{ss}=0.082$,初应

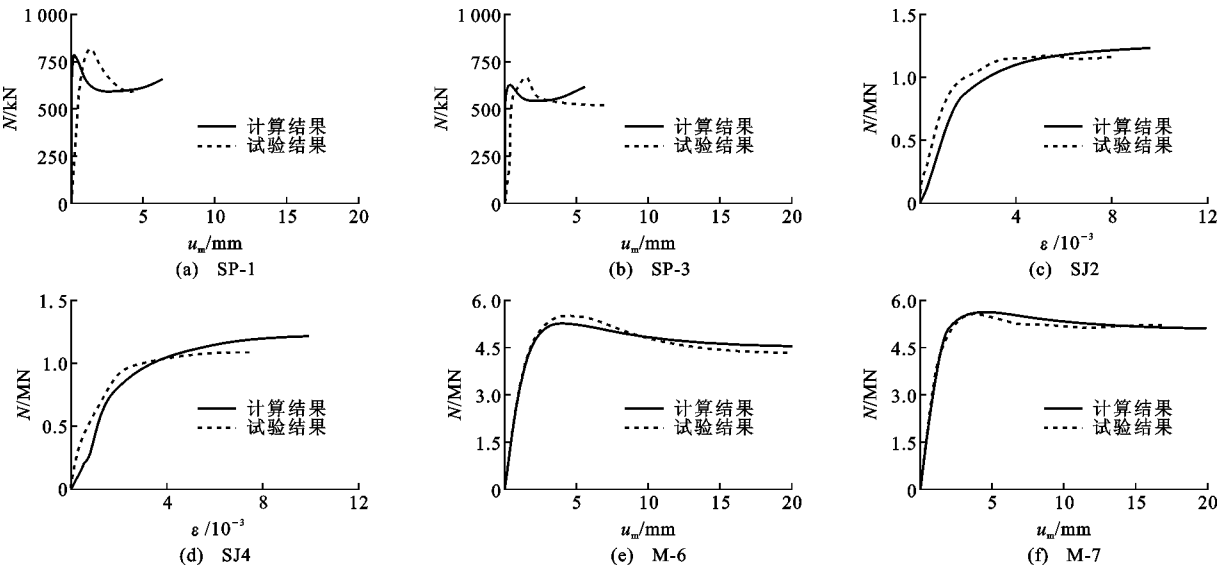


图 2 计算结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparisons Between Calculation Results and Test Results

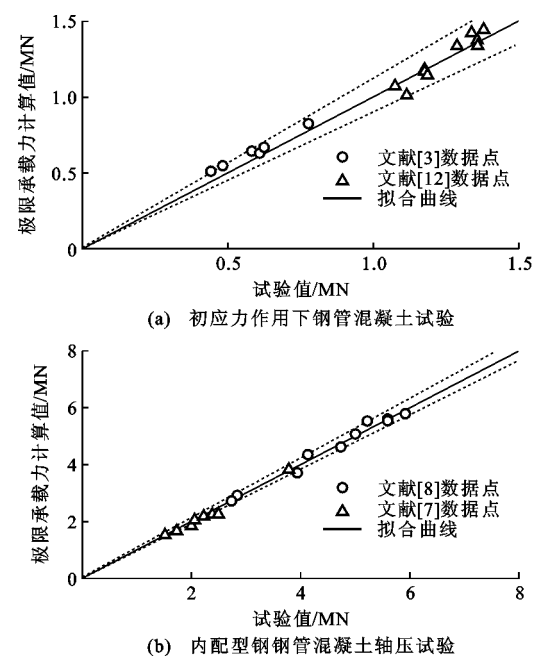


图 3 极限承载力计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparisons Between Calculation Results of Ultimate Bearing Capacity and Test Results

力系数 β 的变化范围选为 $0 \sim 0.8$ 。

2.2 荷载-位移全过程分析

图 4 分别给出 2 种工况下施工初应力系数范围为 $0 \sim 0.8$ 时,内配十字形型钢圆钢管混凝土轴压短柱荷载-应变($N-\epsilon$)关系曲线。由图 4(a)可以看出:外钢管的初应力和初应变对内配型钢钢管混凝土组合弹性模量和极限承载力无明显影响,但极限承载力所对应的应变值随着初应力系数的增大而增大,这与钢管初应力对钢管混凝土轴压短柱力学性能的

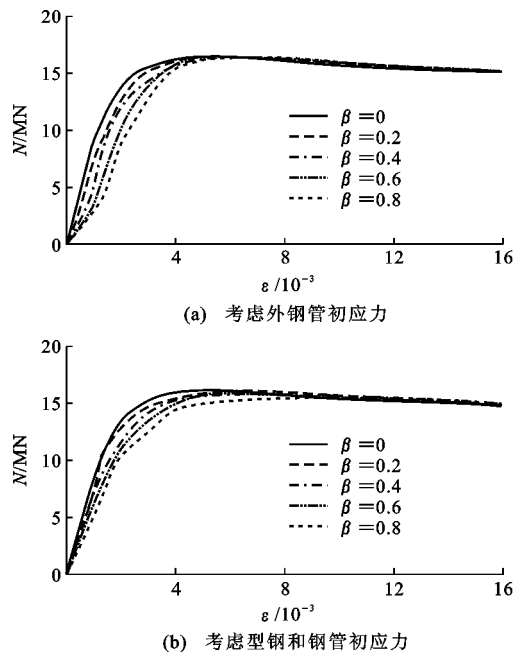


图 4 不同初应力作用下 $N-\epsilon$ 曲线

Fig. 4 $N-\epsilon$ Curves Under Different Pre-loads

影响类似。由图 4(b)可以看出:当同时考虑外钢管和型钢的施工初应力时,随着 β 的增大,轴压短柱的极限承载力降低,而相同承载力所对应的应变随着初应力系数的增大而增大。

图 5 给出不考虑施工初应力和同时考虑钢管和型钢施工初应力时,内配型钢钢管混凝土轴压构件典型 $N-\epsilon$ 全过程分析,实线为不考虑施工初应力,虚线为考虑外钢管和型钢施工初应力。 $N-\epsilon$ 全过程中, A_1 点为钢管应力达到钢材的比例极限点, B_1 点为组合构件的极限承载力点。

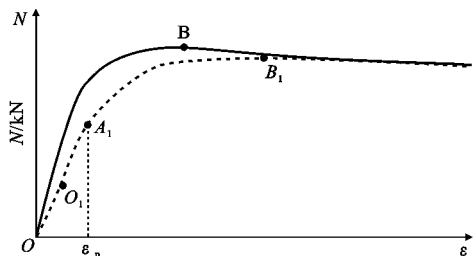


图 5 典型 $N-\varepsilon$ 曲线
Fig. 5 Typical $N-\varepsilon$ Curves

OO_1 为施工初应力段:此阶段型钢和外钢管承担施工荷载,二者内部存在初应变和初应力。考虑钢管和型钢施工初应力的组合构件正常使用阶段从 O_1 点开始,而无初应力是从 O 点开始。

O_1A_1 段为组合柱的弹性段:从 O_1 点开始,组合构件中混凝土、型钢和钢管三者共同工作,进入弹性阶段,此时这三者之间的相互作用较小,均处于单向受力状态。由于内配型钢钢管混凝土在轴向压力作用下,当钢管应力达到比例极限时,钢管与混凝土、型钢之间开始产生相互作用力,进入弹塑性阶段;施工初应力的存在使钢材的比例极限比无初应力时提前达到,因此初应力的存在使得组合构件提前进入弹塑性阶段。

A_1B_1 段为组合柱弹塑性阶段:当纵向总应变达到 ε_p 时组合构件进入弹塑性阶段,钢材已提前屈服,但核心混凝土并未达到极限承载力,依靠钢材的塑性发展;到 B_1 点时组合构件达到极限荷载,较无初应力时的极限荷载 B 点降低。施工初应力作用下组合构件的弹塑性范围较无初应力时增大,且随着施工初应力系数的增加而增加。由于钢材的泊松比与其应力状态相关,施工初应力的存在使钢管对核心混凝土的套箍力及混凝土对型钢的约束紧箍力产生延迟,延长了弹塑性工作阶段。

2.3 荷载分配

图 6 给出了轴压短柱各组件轴力分配的曲线,图 7 给出了考虑钢管和型钢施工初应力与否时组合构件达到极限承载力时各组件承担的荷载占组合柱极限承载力的比例。由图 6 可见:不考虑施工初应力时,混凝土、钢管、型钢承担的荷载所占比例分别为 50.7%,27.4%,21.9%;考虑施工初应力时,混凝土、钢管、型钢承担的荷载比例变化分别为 46.9%,29.4%,23.7%。这表明在施工初应力的影响下核心混凝土对构件极限承载力的贡献下降,钢管、型钢的贡献提高。

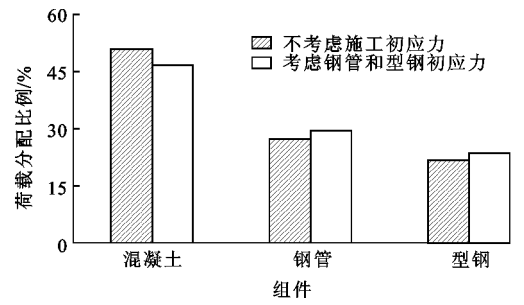


图 6 各组件荷载分配比例
Fig. 6 Load Distribution Proportion of Each Component

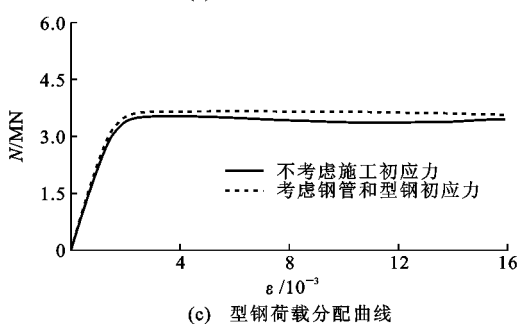
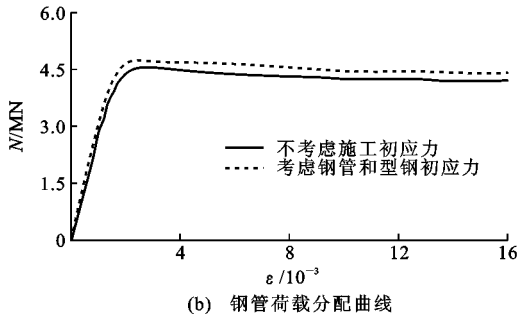
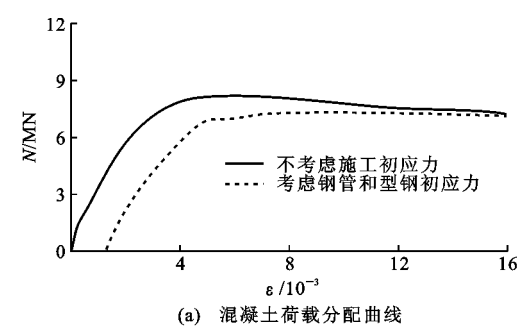


图 7 施工初应力对荷载分配的影响
Fig. 7 Influence of Construction Pre-load on Load Distribution

2.4 混凝土与型钢、钢管之间的相互作用

图 8 给出了考虑 2 类施工初应力与否的情况下内配型钢钢管混凝土轴压短柱达到极限承载力时,跨中截面 3 个测点的型钢与混凝土之间的接触应力曲线。从图 8 可以看出:在不考虑施工初应力时,腹板核心区约束效果更优于翼缘边缘处,因此型钢翼缘上 1 点的接触应力明显小于腹板 2,3 点;当考虑钢管初应力时,1 测点的接触应力较之无初应力

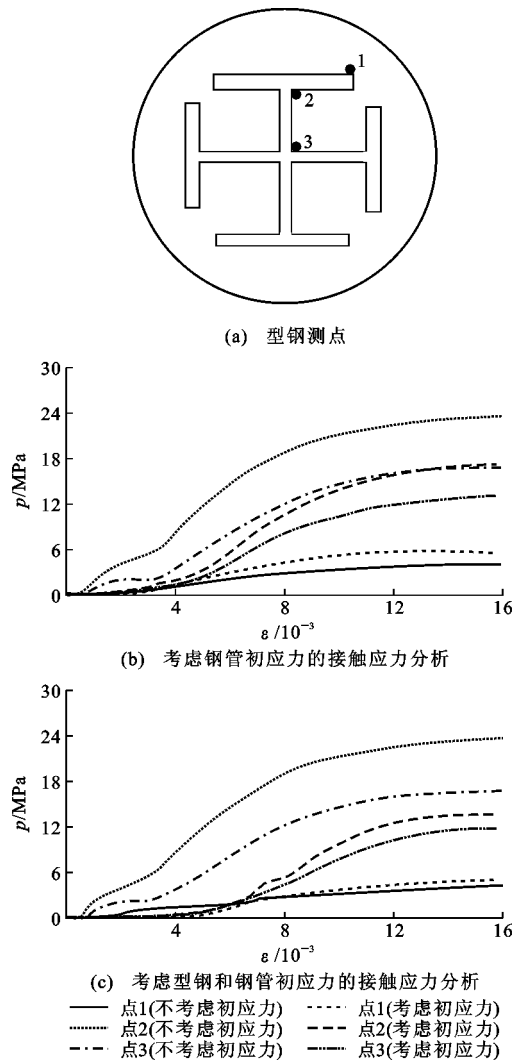


图 8 型钢与混凝土相互作用

Fig. 8 Interaction Between Profiled Steel and Concrete

的情况略有增加,但 2,3 测点的接触应力减小,且型钢与混凝土的相互作用时间明显延迟;当同时考虑钢管和型钢的施工初应力时,3 个测点的接触应力减小程度均大于只考虑钢管初应力的情况,且型钢与混凝土相互作用时间的延迟趋势愈加明显。

图 9 给出了考虑 2 类施工初应力与否的情况下内配型钢钢管混凝土轴压短柱达到其极限承载力时,跨中截面钢管对其内部核心混凝土的约束应力-轴向应变($p-\epsilon$)关系曲线。

从图 9 可以看出:当考虑 2 类施工初应力时,钢管与混凝土之间产生相互作用的时间均延迟,相同的轴向应变所对应的约束应力值均小于不考虑初应力的情况,且在同时考虑型钢和外钢管初应力时,降低程度愈加明显。施工阶段的初应力使钢管表面产生微变形和微损伤,导致钢管与混凝土在相互作用时界面接触不严,降低了正常使用阶段钢管对混凝土

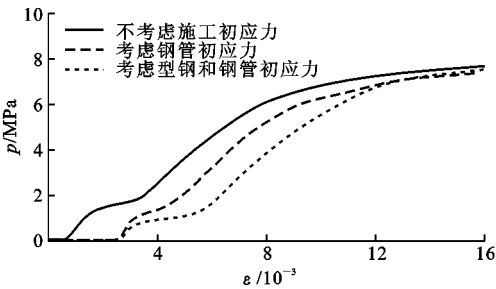


图 9 钢管与混凝土相互作用

Fig. 9 Interaction Between Steel Tube and Concrete

土的套箍约束作用,因此在考虑施工初应力时,外钢管对核心混凝土约束应力减小。

2.5 应力发展和应力分布

图 10,11 分别为钢管、混凝土应力-应变全过程曲线。不考虑施工初应力时,在加荷初期,钢管的纵向应力、环向应力值均增大;当 Mises 应力达到钢材的屈服强度时,纵向应力达到峰值,此后纵向应力值下降而环向应力持续增长;核心混凝土在钢管的约束作用下环向应力和纵向应力逐渐增加。考虑外钢管和内配型钢共同施工初应力时,施工阶段钢管与混凝土未接触,在弹性阶段钢管纵向应力按比例线性增大,但环向应力延迟出现,且此阶段混凝土未产生应力;随着持荷增加,钢管由于施工初应力的影响虽提前屈服,但核心混凝土并未达到其极限承载力,伴随钢管的塑性发展,钢管与混凝土的相互作用加剧,使钢管和混凝土的环向应力持续增长,但相同应变对应的环向应力值小于不考虑初应力的情况。总体来说,2 种初应力情况下钢管的 Mises 应力、纵向和环向应力在后期均与不考虑初应力时的情况有所重合,但同时考虑型钢与钢管初应力时混凝土的环向应力和纵向应力较只考虑外钢管初应力时减小。

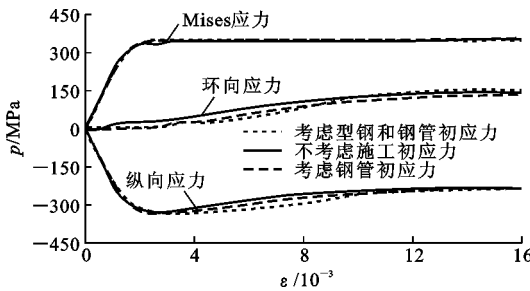


图 10 钢管应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain Curves of Steel Tube

图 12 给出的是考虑钢管和型钢施工初应力时组合构件中型钢的纵向应力云图,受拉为正,受压为负。从图 12 可看出:由于轴向压力的作用,组合构件中内配型钢的跨中截面纵向应力最大,并向两端

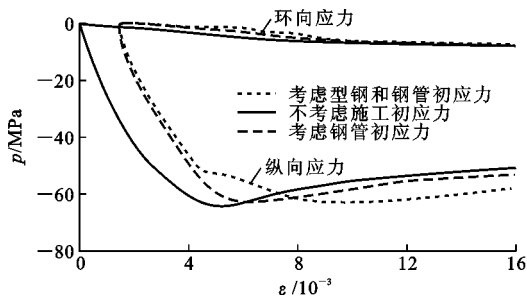


图 11 混凝土应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain Curves of Concrete

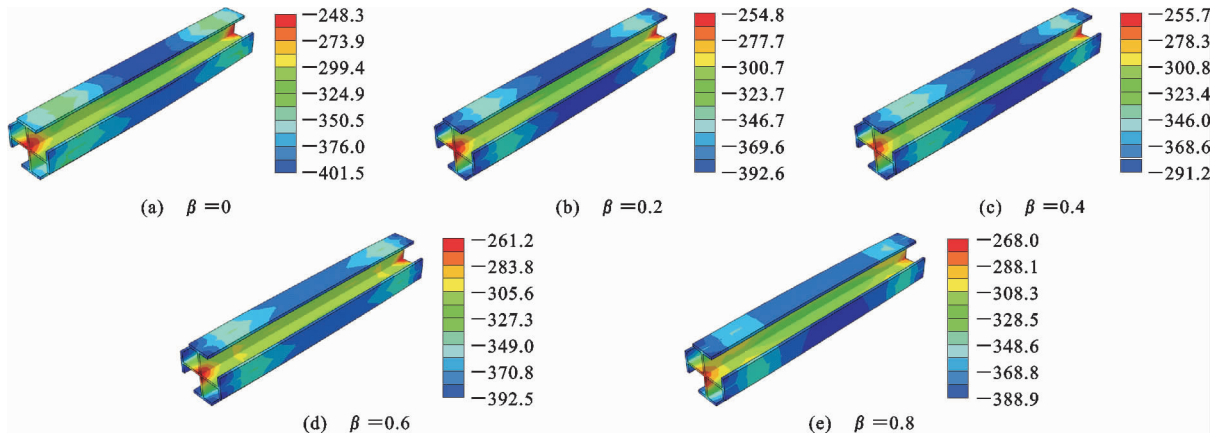


图 12 不同初应力系数时型钢纵向应力云图 (单位:MPa)

Fig. 12 Longitudinal Stress Nephograms of Profiled Steel with Different Pre-load Coefficients (Unit:MPa)

式中: N_{up} , N_u 分别为同时考虑钢管和型钢施工初应力影响和不考虑施工初应力内配型钢钢管混凝土轴压构件的极限承载力。

以下将对影响承载力影响系数的主要参数进行分析,主要包括:初应力系数 β 、构件长细比 λ 、钢管的含钢率 α_{st} 、型钢的含钢率 α_{ss} 、钢管的屈服强度 f_{ty} 、型钢的屈服强度 f_{sy} 以及混凝土的抗压强度等级 f_{cu} 。基于相关设计规范和工程常用参数范围,确定典型算例的参数如下:钢管外径 $D=450$ mm,采用 C60 混凝土,钢管和型钢均采用 Q345 钢,钢管的含钢率 $\alpha_{st}=0.095$,型钢的含钢率 $\alpha_{ss}=0.082$ 。

3.1 钢管屈服强度

图 13(a)给出了不同钢管屈服强度时组合柱承载力影响系数的变化规律。由图 13(a)可见:外钢管屈服强度增大有利于提高组合构件的极限承载力,而施工阶段初应力对极限承载力的影响更加显著;当 β 一定时, k_p 随着钢管屈服强度的增大而减小的趋势。

3.2 型钢屈服强度

图 13(b)给出了不同型钢屈服强度时组合柱承载力影响系数的变化规律。由图 13(b)可见:由于

呈对称递减趋势;随着初应力系数的增大,型钢截面的纵向应力逐渐增大。

3 轴压短柱承载力影响系数及参数分析

为进一步分析施工初应力对内配型钢钢管混凝土轴压短柱受力性能的影响,定义其承载力影响系数 k_p 的表达式为

$$k_p = \frac{N_{up}}{N_u} \quad (2)$$

内配型钢钢管混凝土轴压短柱的极限承载力受到材料性质、几何条件和施工初应力的共同影响,而型钢屈服强度变化发挥的作用相对较小,因此它的改变对组合柱极限承载力的影响不是很显著。

3.3 混凝土强度

图 13(c)给出了承载力影响系数随混凝土强度的变化规律。混凝土强度越大,钢管、型钢和混凝土共同受力阶段组合柱混凝土部分所做贡献越多;相反,施工阶段的初应力对钢管和型钢影响越小,则承载力影响系数越大。

3.4 钢管含钢率

图 13(d)给出了承载力影响系数随钢管含钢率的变化规律。随着钢管含钢率的增大,外钢管对核心混凝土的套箍约束作用加强,对整个组合构件的影响增大,且施工阶段的初应力对后期极限承载力的影响也会越显著,因此, k_p 随着钢管含钢率的增大而逐渐减小。

3.5 型钢含钢率

图 13(e)给出了承载力影响系数随型钢含钢率的变化规律。型钢含钢率对组合构件承载力的影响与其屈服强度对组合构件的影响类似。

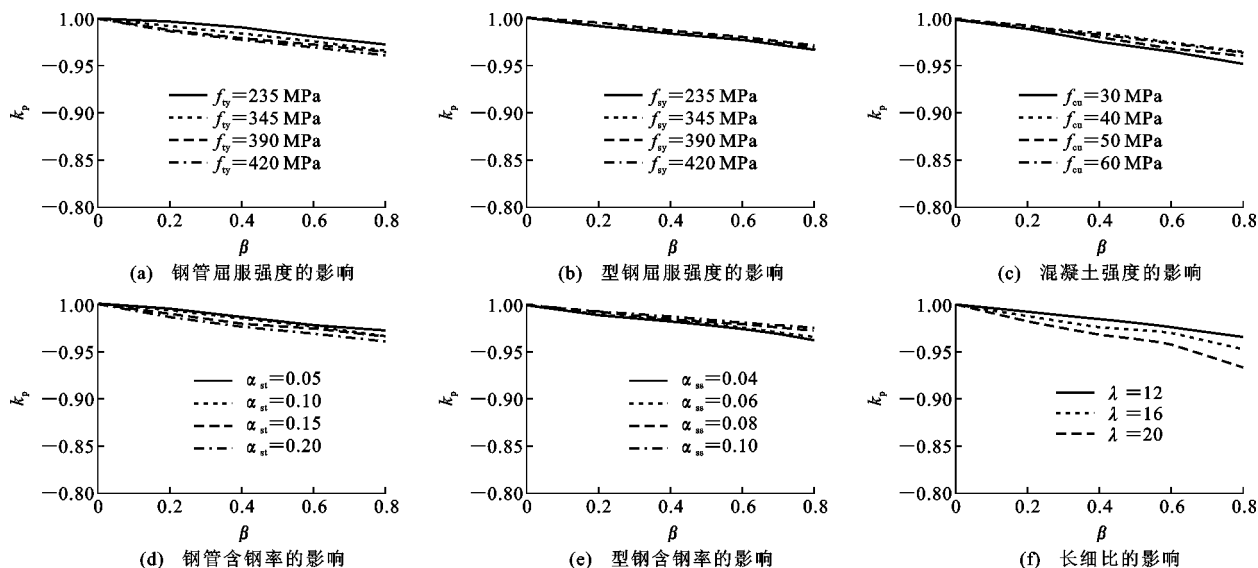


图 13 不同参数对承载力影响系数的影响

Fig. 13 Effects of Different Parameters on Influence Coefficients of Bearing Capacity

3.6 长细比

图 13(f)给出了不同长细比 λ ($\lambda = 4L/D$) 时组合柱承载力影响系数的变化规律。在其他参数固定的情况下,改变组合柱的长度,得出不同长细比时构件的极限承载力在施工初应力影响下的变化。由图 13(f)可见:承载力影响系数 k_p 与长细比 λ 有很大的关系,当 β 一定时, k_p 随着长细比的增大而减小。

4 结 语

(1)外钢管的施工初始应力对内配型钢钢管混凝土轴压短柱的组合弹性模量和极限承载力无明显影响,但极限承载力所对应的应变值随着初应力系数的增大而增大。

(2)外钢管和型钢施工初应力的共同存在导致混凝土与钢管、型钢的相互作用时间延迟,使内配型钢钢管混凝土轴压构件提前进入弹塑性阶段并扩大此阶段的范围,使组合柱极限承载力随着施工初应力值的增大而降低。

(3)通过参数分析表明:构件长细比 λ 对内配型钢钢管混凝土轴压短柱的承载力影响系数 k_p 有显著影响, k_p 随长细比的增大而逐渐降低。

参考文献:

References:

- [1] 钟善桐,查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土构件承载力影响的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(3): 13-22.
ZHONG Shan-tong, ZHA Xiao-xiong. Research on the Influence of Initial Stress in Steel Tube on Load

Carrying Capacity for Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(3): 13-22.

- [2] 查晓雄,钟善桐. 用有限元法分析钢管初应力对钢管混凝土轴压构件基本性能的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(1): 41-49.
ZHA Xiao-xiong, ZHONG Shan-tong. The Behavior Effect on Concrete Filled Steel Tubular Members Subjected to Compression Under the Initial Stress of Steel Tube Based on the Finite Element Method[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(1): 41-49.
- [3] HAN L H, YAO G H. Behaviour of Concrete-filled Hollow Structural Steel (HSS) Columns with Preload on the Steel Tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(12): 1455-1475.
- [4] 王文达,于清. 混凝土浇筑过程中方钢管柱的力学性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(1): 6-11.
WANG Wen-da, YU Qing. Behavior of Square Steel Tubular Columns During Concrete Pouring[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(1): 6-11.
- [5] 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.
- [6] 赵大洲. 钢管-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
ZHAO DA-Zhou. Study on the Mechanical Properties

- of Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced High-strength Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [7] 王清湘, 赵大洲, 关 萍. 钢管-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的实验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 44-49.
- WANG Qing-xiang, ZHAO Da-zhou, GUAN Ping. Study on the Mechanical Properties of Axially Loaded Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced High-strength Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 44-49.
- [8] 陈明杰. 钢管-钢管高强混凝土柱力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- CHEN Ming-jie. Study on the Mechanical Properties of CFST Column with the Built-in Cross Shape Column [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [9] 王清湘, 赵大洲, 关 萍. 轴心受压钢管-钢管高强混凝土组合柱承载力的研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 195-201.
- WANG Qing-xiang, ZHAO Da-zhou, GUAN Ping. The Load-bearing Capacity of Axially Loaded Circular Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced High-strength Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 195-201.
- [10] 毛文婧, 史艳莉, 王文达. 内配型钢圆钢管混凝土轴压短柱在不同含钢率下承载力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(增): 63-70.
- MAO Wen-jing, SHI Yan-li, WANG Wen-da. Analysis on Axial Compressive Bearing Capacity of Circular Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Internal Profiled Steel Under Different Steel Ratio[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S): 63-70.
- [11] 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 Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 黄世娟, 钟善桐, 闫善章, 等. 初应力对钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(6): 44-50.
- HUANG Shi-juan, ZHONG Shan-tong, YAN Shan-zhang, et al. Experimental Research of Prestress Effect on Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tubular Axial Compressive Members[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996, 29(6): 44-50.
- [13] 王文达, 韩林海. 钢管混凝土结构施工阶段力学性能分析[J]. 工业建筑, 2004, 34(6): 65-67, 58.
- WANG Wen-da, HAN Lin-hai. Analysis of Mechanical Behaviour of Concrete Filled Steel Tubular Structures During Construction [J]. Industrial Construction, 2004, 34(6): 65-67, 58.
- [14] 徐 悟, 于 清, 尧国皇. 初应力对钢管混凝土叠合柱轴压性能影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(5): 556-562.
- XU Wu, YU Qing, YAO Guo-huang. Effect of Preload on the Axial Capacity of CFST Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(5): 556-562.
- [15] 陈彦玉. 钢管初应力及长期荷载作用下内配型钢钢管混凝土柱力学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- CHEN Yan-yu. Behavior of Concrete Filled Tubular Members with Inner Profiled Steel Under Initial Stresses on Steel Tubes as Well as Long-term Sustained Loads [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [16] HUANG F Y, YU X M, CHEN B C, et al. Study on Preloading Reduction of Ultimate Load of Circular Concrete-filled Steel Tubular Columns [J]. Thin-walled Structures, 2016, 98: 454-464.
- [17] 王永宝, 赵人达, 吴德宝. 初应力和黏结滑移对钢管混凝土长期变形的影响[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(12): 2306-2313, 2381.
- WANG Yong-bao, ZHAO Ren-da, WU De-bao. Time-dependent Behavior of Concrete-filled Steel Tube Considering Initial Stress and Bond-slip Effect [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(12): 2306-2313, 2381.
- [18] 周桂林, 罗赤宇, 陈常清, 等. 江门市海逸酒店结构设计[J]. 广东土木与建筑, 2014(8): 3-7.
- ZHOU Gui-lin, LUO Chi-yu, CHEN Chang-qing, et al. The Structural Design of the Haiyi Hotel in Jiangmen [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2014(8): 3-7.
- [19] 王文达, 郑 龙, 魏国强. 穿心构造的钢管混凝土柱-钢梁节点抗连续性倒塌性能分析与评估[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 39-47.
- WANG Wen-da, ZHENG Long, WEI Guo-qiang. Resistance to Progressive Collapse Performance Analysis and Assessment of CFST-steel Beam Joints with Through-center Construct [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6): 39-47.
- [20] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
- GB 50936—2014, Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures[S].