



建筑结构学报
Journal of Building Structures
ISSN 1000-6869, CN 11-1931/TU

《建筑结构学报》网络首发论文

题目: 钢管初应力对内配型钢的圆钢管混凝土受压构件力学性能影响研究
作者: 贾志路, 史艳莉, 王文达, 鲜威
DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0796
收稿日期: 2020-12-10
网络首发日期: 2021-06-03
引用格式: 贾志路, 史艳莉, 王文达, 鲜威. 钢管初应力对内配型钢的圆钢管混凝土受压构件力学性能影响研究[J/OL]. 建筑结构学报.
<https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0796>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

钢管初应力对内配型钢的圆钢管混凝土受压构件力学性能影响研究

贾志路, 史艳莉, 王文达, 鲜威

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 为研究考虑钢管初应力后对内配型钢圆钢管混凝土构件后期力学性能影响, 共设计了 12 根内配型钢圆钢管混凝土柱进行受压试验研究, 主要参数有初应力系数和偏心距。通过试验获得试件的破坏过程及形态, 并分析不同参数对实测荷载-变形曲线和其受力性能的影响规律。试验结果表明: 不同初应力系数及偏心距对试件破坏形态影响较小, 但不同长细比使试件破坏过程有所差异; 随着初应力系数的变化, 轴压短试件极限承载力影响较小; 但在偏压作用时考虑钢管初应力对试件受力性能有一定影响, 即随着初应力系数增大承载力下降, 偏心距对试件承载力影响明显大于钢管初应力的影响。另外基于试验结果验证了有限元模型的可靠性, 通过有限元模型分析了考虑钢管初应力与否时钢管与混凝土间相互作用和各部件承载力的分配, 并进一步分析了不同参数对构件承载力影响系数的影响, 基于此建议了考虑钢管初应力时内配型钢圆钢管混凝土受压作用的承载力计算方法。

关键字: 内配型钢圆钢管混凝土; 初应力; 破坏形态; 极限承载力; 有限元分析; 计算方法

中图分类号: TU398^{+.9}

文献标识码: A

Study on the compressive performance of steel-reinforced concrete-filled circular steel tubular members considering preload on steel tubes

JIA Zhilu, SHI Yanli, WANG Wenda, XIAN Wei

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

Abstract: To study the influence of the preload effect on the later mechanical performance of steel-reinforced concrete-filled circular steel tubular (SRCFST) members, this paper conducted an experimental study on 12 circular SRCFST columns subjected to compressive loads. The main testing parameters were the preload ratios and eccentric ratios. The entire testing process of all specimens and the failure mode were obtained, and the influences of different parameters on the measured load-deformation curves and its mechanical behaviors were analyzed. The testing results show that different preload ratios and eccentric ratios have little effect on the failure mode of specimens, however, the specimens exhibit distinct failure process due to the varying of slenderness ratios. With the varying of the preload ratio, the ultimate bearing capacity of the axial compression stub column decreases slightly. However, the preloads on the steel tube have a certain influence on the mechanical behavior of the specimen under eccentric compression, with the increase of the preload ratio, the axial bearing capacity decreases, and the influence of eccentricity on the bearing capacity of the specimen is obviously greater than that of the preloads. Based on the testing results, the validity of the finite element model was verified. Through the verified finite element model, the interaction between steel tube and concrete, and the distribution of bearing capacity of each component were discussed, as well as the influence of various parameters on the influential coefficient of bearing capacity was further analyzed. Finally, the compressive bearing capacity calculation method of SRCFST members considering the preload on steel tube was proposed.

Keywords: steel-reinforced concrete-filled steel tube (SRCFST); preload effect; failure mode; ultimate bearing

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768038)。

作者简介: 贾志路, 出生于 1991 年, 男, 博士研究生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究。E-mail: cejiiazl@163.com

通信作者: 王文达, 出生于 1976 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构研究。E-mail: wangwd@lut.edu.cn

收稿日期: 2020 年 12 月 10 日

0 引言

内配型钢钢管混凝土与传统钢管混凝土相比,具有承载力高、延性耗能好以及抗震性能强等优点,因此其在高层或超高层建筑中有越来越多的应用^[1-2]。同时,对于内配型钢钢管混凝土构件在轴压^[2]、弯剪^[3-4]、受扭^[5]、撞击^[6]和抗火^[7-8]等方面已开展了相关试验和理论研究并取得了阶段性成果。主要研究结果表明:内置钢管有效提高了构件承载力和延性,并明显改善混凝土受力性能。然而,由于内配型钢钢管混凝土节点构造形式不同^[9],建筑结构在施工过程中,可能钢管会先作为竖向支撑而承担部分施工荷载。由于施工荷载和湿混凝土自重等导致钢管与混凝土共同作用前,钢管首先产生纵向应力,即钢管施工初应力,因此合理确定钢管初应力对内配型钢钢管混凝土构件力学性能的影响很有意义^[10-11]。

目前,考虑钢管初应力对钢管混凝土力学性能的影响在国内外研究比较常见。如早期时候有黄世娟^[12]、查晓雄^[13]等人进行过试验研究,但并未深入分析钢管初应力对构件内部受力机理的影响。之后,韩林海等^[14-15]对有无初应力的方钢管混凝土柱进行了压弯性能研究,通过对参数分析建议了考虑钢管初应力的压弯构件承载力计算公式。Liew 等^[16]对考虑钢管初应力的圆钢管混凝土构件进行研究得到初应力系数小于 0.2 时对短柱承载力影响可以忽略。Huang 等^[17]对考虑钢管初应力的圆钢管混凝土进行了研究,同样得到初应力系数较小时对短柱承载力影响比较小,但对长柱影响不可忽略。Patel 等^[18]基于纤维模型法对考虑钢管初应力的矩形钢管混凝土进行了研究。除了对考虑钢管初应力的钢管混凝土进行研究外, Li 等^[19]对中空夹层钢管混凝土考虑初应力的影响进行了研究。可以看到钢管初应力对组合构件力学性能的影响得到了广泛的关注。无论如何,目前对内配型钢钢管混凝土构件考虑钢管初应力影响的研究却很少,而且由于型钢的嵌入,其与钢管混凝土受力也有显著差异,不能直接采用钢管混凝土的研究结果进行应用。

基于上述讨论,本文对 12 根内配型钢钢管混凝土构件考虑钢管初应力的影响进行了试验研究,重点分析了试件破坏形态和不同参数对承载力的影响,即偏心距和初应力系数。另外,结合数值模拟进一步对受压机理进行了研究,最后建议了考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土构件轴压承载能力的计算公式,以期工程实践提供理论参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与加工

试验共设计了 12 根内配工字钢圆钢管混凝土构件,截面尺寸如图 1 所示,钢管直径 $D=140\text{mm}$,壁厚 $t=3.5\text{mm}$,其中 8 根试件考虑了钢管有初应力情况。试验研究参数包括:偏心率、初应力系数、长细比。限于传感器数量,试验分三批完成,因此每次试验配制的混凝土强度稍有差异。试件相关信息如表 1 所示,表中参数含义为:试件编号中第一个字母 C 代表圆截面,第二个字母 S、M、L 分别代表短柱($\lambda \leq 16$)、中长柱($16 < \lambda \leq 32$)和长柱($\lambda > 32$),第三个字母和第一个数字代表初应力系数等级,最后一个数字代表偏心率等级; L 为试件总长度,含端板(厚 16mm); e/r 为偏心率(其中 e 为偏心距, r 为试件半径); $\beta=(N_p/A_{st}\phi f_y)$ 为初应力系数,其中 N_p 为施加在钢管上的初始荷载, A_{st} 为外钢管截面面积, ϕ 为空钢管构件的轴心受压稳定系数; f_y 为外钢管屈服强度; $\lambda(=4L_0/D)$ 为长细比, L_0 为试件有效长度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; N_{ue} 为试验测得的受压极限承载力; N_{ur} 为有限元计算得到的受压极限承载力。

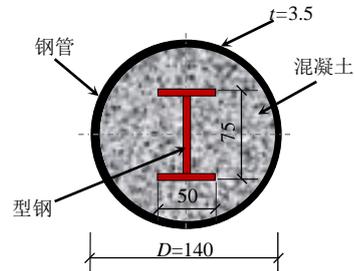


图 1 试件截面尺寸(单位: mm)

Fig.1 Section size of specimens (unit: mm)

对于考虑钢管初应力的试件,首先各配件在加工厂制作完成,端板为边长 160mm,厚 16mm 的方钢板,型钢为焊接组装,截面尺寸为高(h) \times 宽(b) \times 腹板厚(t_w) \times 翼缘厚(t_f)=75mm \times 50mm \times 3mm \times 3mm。承力钢板为边长 390mm,厚 20mm 的方钢板,并在上表面焊接有加劲肋;然后进行组装焊接,在组装过程中,先将工字钢对准下端板中心进行焊接,其次将圆钢管套在工字钢外面,并同样对中下端板与其焊接,对有初应力的试件将承力钢板焊接于指定位置,待试件组装完成后运至实验室,至此空试件基本制作完成,如图 2 所示。

1.2 钢材实测力学性能

钢材均采用 Q235B 钢,材性试验依据《金属材料拉伸试验室温试验方法》(GB/T228.1-2010)^[20]进行,钢

材标准件分别从预留的各钢管和钢板上截取制作而成，测得各材料力学性能指标如表 2 所示，其中 t 为钢管或

表 1 试件主要信息

Table 1 Details of specimens

序号	试件编号	$D \times t \times L$ /mm	λ	e/mm	e/r	N_p/kN	f_{cu}/MPa	β	N_{ue}/kN	N_{ur}/kN	N_{ur}/N_{ue}
1	CSP0-0	140×3.5×420	11	0	0	0	51.33	0	1420	1328.8	0.936
2	CSP1-0	140×3.5×420	11	0	0	81.0	51.33	0.2	1420	1309.0	0.922
3	CSP2-0	140×3.5×420	11	0	0	162.0	51.33	0.4	1420	1308.2	0.921
4	CMP0-0	140×3.5×700	19	0	0	0	44.8	0	1220	1159.0	0.950
5	CMP0-1	140×3.5×700	19	40	0.56	0	44.8	0	600	584.0	0.973
6	CMP1-0	140×3.5×700	19	0	0	80.0	44.8	0.2	1200	1084.1	0.903
7	CMP1-1	140×3.5×700	19	40	0.56	80.0	44.8	0.2	600	555.0	0.925
8	CMP2-1	140×3.5×700	19	40	0.56	160.0	44.8	0.4	590	533.0	0.903
9	CLP0-1	140×3.5×1400	39	20	0.28	0	45.0	0	710	678.3	0.955
10	CLP1-0	140×3.5×1400	39	0	0	76.0	45.0	0.2	1000	919.1	0.919
11	CLP1-1	140×3.5×1400	39	20	0.28	76.0	45.0	0.2	700	636.1	0.909
12	CLP1-2	140×3.5×1400	39	40	0.56	76.0	45.0	0.2	510	476.8	0.935



图 2 施加钢管初应力前的试件

Fig.2 the specimens before preload

表 2 钢材力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of steel

类别	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa	μ_s
圆钢管	3.5	271	388	1.79×10^5	0.26
钢板	3.0	335	472	2.02×10^5	0.28

钢板厚度， f_y 为钢材屈服强度， f_u 为钢材极限强度， E_s 为弹性模量， μ_s 为泊松比。

1.3 试验装置与加载

试验加载分两步进行，首先是钢管初应力的施加，其加载装置示意如图 3(a)所示，施加初应力之前上端板未焊接，为了将初始荷载有效的传递给钢管并便于后期承载力试验的进行，在距离其顶部和底部 80mm 处焊接两个承力钢板，在钢板四个方向分别预留孔洞，具体加

载过程为将空钢管置于试验机上施加预先定义的初始荷载，然后将螺杆穿过预留孔洞初拧在量程为 15T 的拉式传感器上，如图 3(b)所示，最后采用扳手对称拧紧螺母，直至每个传感器读数达到 $1/4N_p$ ，同时试验机读数变为零，进而确保钢管受力均匀，螺杆直径为 $\Phi 20$ ，中长柱初应力施加后的照片如图 3(b)，短柱和长柱加载方法也类似。

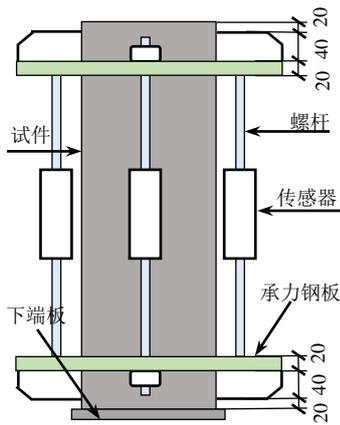
在初应力施加若干天后，保持初应力基本不变，若卸载过大时适当进行补载，待初应力基本稳定后浇筑混凝土并养护，在养护后期焊接好上端板。后期加载试验在本校土木工程防灾减灾重点实验室的 200T 压力机上进行，测量内容主要有轴压承载力，轴压短试件的轴向位移，中长试件和长试件的侧向挠度，试件外钢管表面的纵向与横向应变，试验加载如下图 4 所示。所有试件沿圆周布置成对环向和纵向应变片测点 S1~S4，布置简图如图 5 所示。

本次试验采用荷载分级加载制，在弹性范围内荷载的加载水平设定为预估极限荷载的 1/15，当外钢管应变达到屈服应变后，荷载加载水平调整为预估极限荷载的 1/20，在接近极限承载力时缓慢连续加载，当荷载下降到预估极限荷载的 85% 左右时停止试验加载。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及破坏形态

2.1.1 试验加载过程现象



(a) 装置示意图



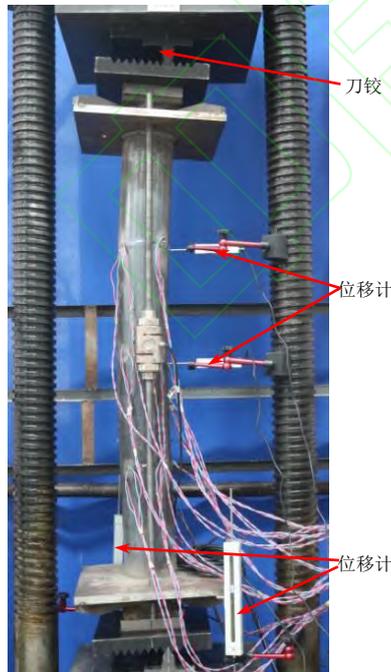
(b) 施加初应力后照片

图3 钢管初应力加载装置

Fig.3 Loading device considering the preload effect



(a) 短柱



(b) 长柱

图4 承载力阶段加载试验

Fig.4 Loading test during the bearing capacity stage

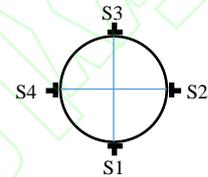


图5 应变测点布置

Fig.5 Arrangements of strain gauges

在试验加载过程中，对于无初应力的短试件（CSP0-0），在加载初期构件整体无明显变形，该阶段持续时间较长，当轴向荷载达到极限承载力的65%左右时，核心混凝土开始发出间歇的轻微开裂声，此时用手触摸试件可以感觉到轻微的整体鼓曲，继续加载达到极限承载力附近时，在试件中部局部鼓曲的同时，由于初始缺陷等原因导致上端板的下部也出现了局部鼓曲，如图6(a)所示。

对于考虑钢管初应力的轴压短试件（CSP1-0和CSP2-0），直至轴向荷载达到极限承载力的65%左右时，与无初应力试件变化类似，之后随荷载的增大以及承力钢板上加劲肋的加强作用，柱端未产生鼓曲，试件上承力钢板的下端和下承力钢板的上端开始有鼓曲产生，试件中截面均匀变粗但无局部鼓曲，此现象持续至试验结束。

对于无初应力的轴压中长柱（CMP0-0），试件开始无变形，随着施加荷载的增大，当试件接近极限承载力时，试件开始出现侧向弯曲，达到极限承载力后由于初偏心产生二阶弯矩效应使构件弯曲程度加快。对有初应力的轴压中长柱（CMP1-0），破坏过程与CMP0-0基本类似。对无初应力的偏压中长柱（CMP0-1），在加载初

期侧向弯曲不明显，而在达到极限承载力时，试件侧向挠度开始比较显著，最终试件中部钢管受压侧出现鼓曲。对有初应力的偏压中长柱（CMP1-1、CMP2-1）出现侧向弯曲的时间稍迟于 CMP0-1，这是因为 CMP0-1 试件为第一根试验试件，分析可能是由于后期试验加载速率较快导致在达到轴压承载力时试件弯曲较快。

对于长柱系列，轴向受压试件（CLP1-0）在加载初期侧向弯曲挠度不明显，当在达到极限承载力之前试件开始出现侧向弯曲，由于长细比较大，相比中长柱，在同一荷载时长柱侧向弯曲变形更大。另外随偏心率的增大，试件侧向弯曲变形速率也逐渐加快。

2.1.2 破坏形态

典型试件内部破坏形态分别如图 6~7 所示。短柱内部破坏形态如图 6 所示，由图 6(a)知当无初应力时钢管鼓曲主要集中在柱中和端部区域，剖开钢管后混凝土无压碎产生，但沿纵向有短而密的微小竖向裂缝，同时混凝土表层有剥落；继续凿开混凝土后可以看到型钢与混凝土接触良好，型钢破坏趋势与试件整体趋势相同。如图 6(b)所示为有初应力的试件（CSP2-0），核心混凝土同样是有细微竖向裂缝，而且整体基本无压碎，型钢与混凝土接触完好。

由于偏压试件的最终破坏形态均为失稳破坏，因此仅给出了不同初应力系数时中长柱的内部破坏形态，如图 7 所示。无初应力的试件 CMP0-1 在受拉侧裂缝较多，而有初应力的试件（CMP1-1 和 CMP2-1）裂缝发展基本无差异，但均少于无初应力试件 CMP0-1，这是因为无初应力试件 CMP0-1 加载程度相对较大。对比不同初应力系数试件 CMP0-1、CMP1-1、CMP2-1 可知，初应

力系数对型钢破坏无影响，型钢仅随试件整体破坏而变化。

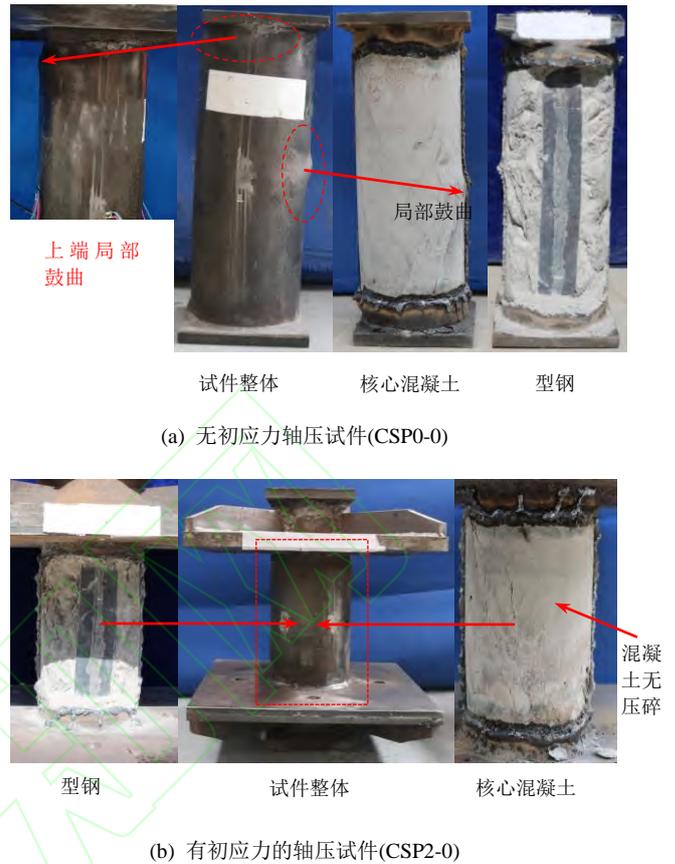


图 6 短柱内部破坏形态

Fig.6 Inner failure modes of short column

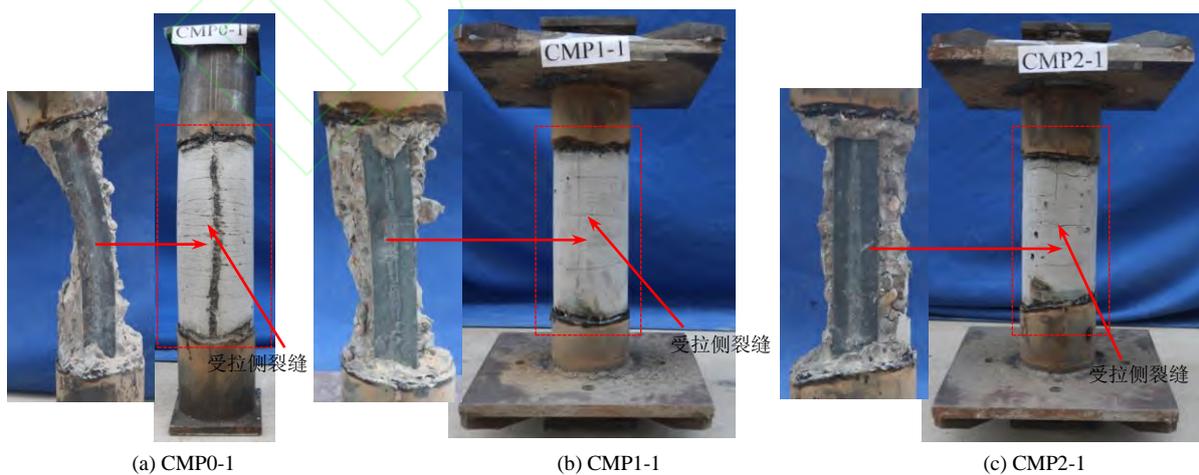


图 7 偏压试件内部破坏形态

Fig.7 Inner failure modes of specimens under eccentric compression

2.2 试件荷载-变形曲线

在承载力阶段，试验过程中记录了试件的荷载-轴

向位移曲线以及荷载-侧向挠度曲线。随长细比的增大，构件破坏模式会发生显著变化，而中长柱以及长柱的破

坏形态主要表现为失稳破坏,因此对短柱而言给出了荷载-轴向位移曲线,对中长柱和长柱给出了荷载-柱中侧向挠度曲线如图8所示。由图8知,对于轴压短柱不论是否考虑钢管初应力,试件在达到极限承载力时对应变形均较小,后期表现出较好的抗压性能,延性较好。偏

压试件达到极限承载力后受二阶弯矩的影响侧向弯曲开始快速增大,荷载明显下降。为进一步研究不同参数对试件力学性能的影响,随后给出了不同参数下试件荷载-变形曲线的对比。

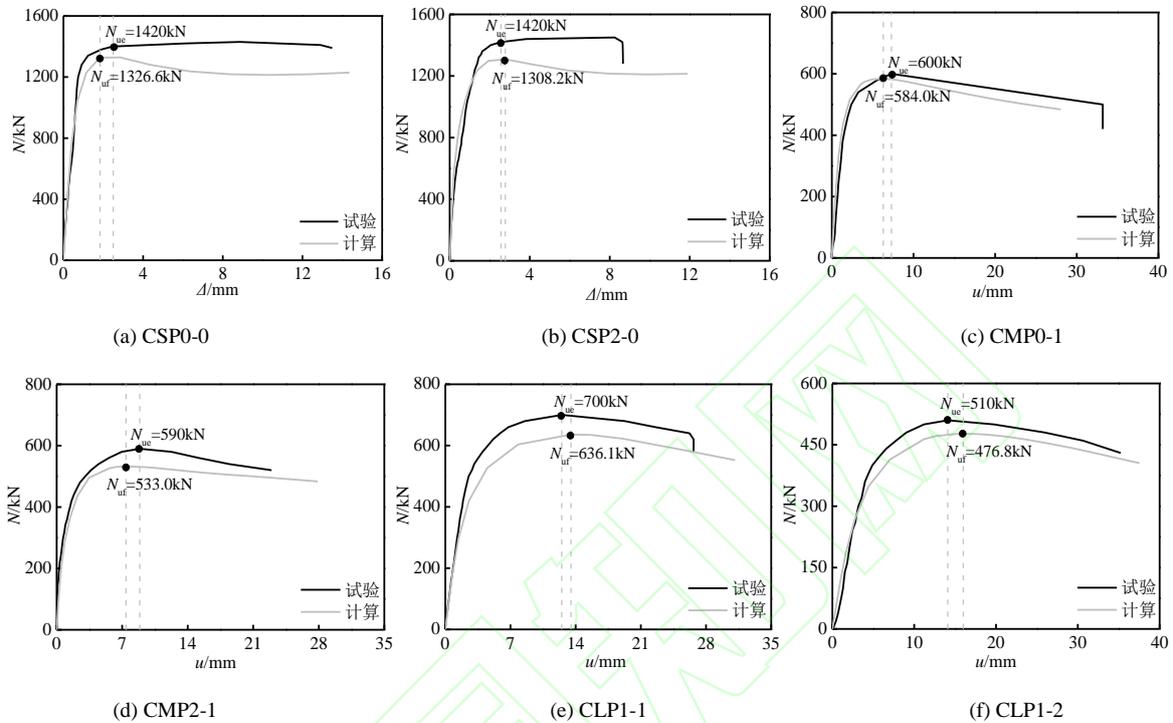


图8 荷载-变形关系曲线

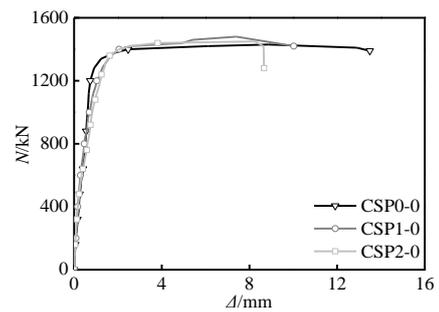
Fig.8 Load-deformation curves

2.2.1 初应力系数的影响

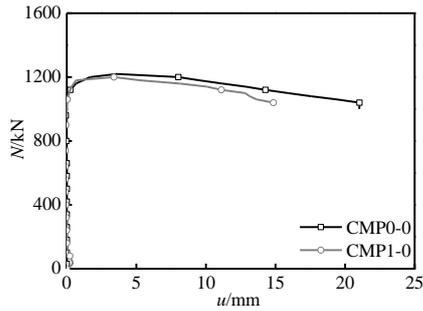
图9为不同初应力系数时内配型钢管混凝土柱荷载-变形曲线。由图9(a)知对轴压短柱而言,不同初应力系数对试件承载力基本无影响,短柱承载力均为1420kN,因为钢管初应力系数通常限制在0.6^[21]或0.8^[16]以内,此时钢管在初应力作用下为弹塑性阶段。当进入承载力阶段时,随着荷载的增加,初应力传感器上的荷载逐渐减小直至消失,整个过程中试件在轴压作用下均匀受力。通过分析知初应力使钢管进入承载力阶段后提前达到屈服,但对混凝土和型钢影响不大,而试件达到极限承载力时,钢管仍保持在屈服阶段,因此极限承载力无明显变化。

对于轴压中长柱,如图9(b)所示,考虑初应力与否试件CMP1-0较CMP0-0极限承载力下降1.7%,表明 $\beta=0.2$ 时对试件极限承载力已有影响,但构件弹性阶段刚度基本不受初应力影响;如图9(c)在偏压作用时,对比试件CLP0-1和CLP1-1,极限承载力从710kN降为700kN, $\beta=0.2$ 的长试件对应极限承载力下降1.4%。这是因为随着钢管初应力系数的增大,钢管环向膨胀比较

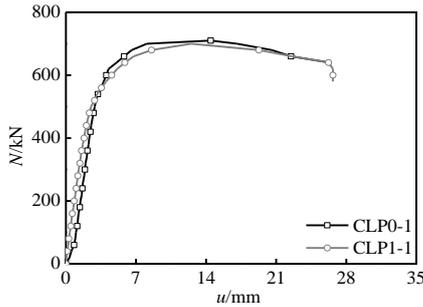
显著,当试件失稳破坏时,钢管产生侧向弯曲,此时受压一侧的环向应力对核心混凝土约束减弱,从而试件承载力有所下降。



(a) 短柱轴压作用时

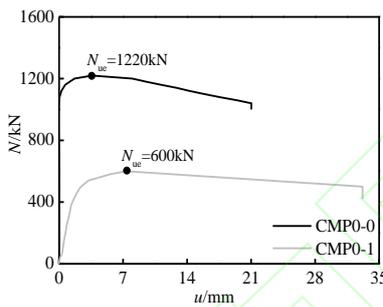


(b) 中长柱轴压作用时

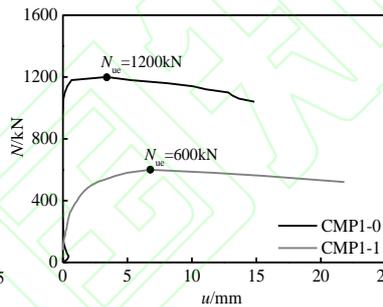


(c) 长柱偏压作用下

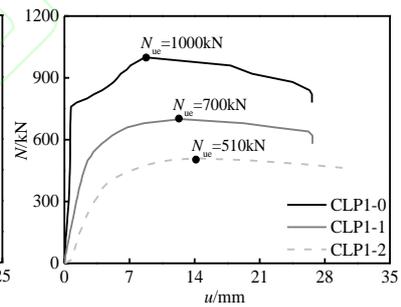
图 9 初应力对试件荷载-变形曲线的影响



(a) 中长柱无初应力



(b) 中长柱有初应力



(c) 长柱有初应力

图 10 偏心距对试件荷载-挠度曲线的影响

Fig.10 Effect of the eccentricity on load-deflection curve of specimens

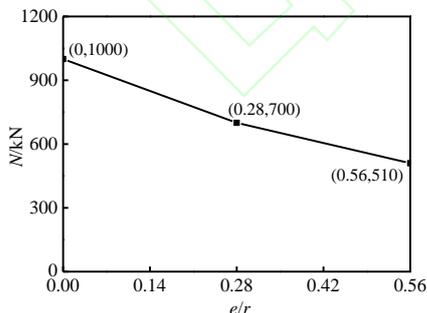


图 11 偏心距对极限承载力影响

Fig.11 Effect of the eccentricity on ultimate bearing capacity

2.3 钢管屈服时试件承载力

为了分析钢管初应力对钢管屈服时对应试件承载力影响，得到了对应试件承载力(N_y)变化如图 12 所示。

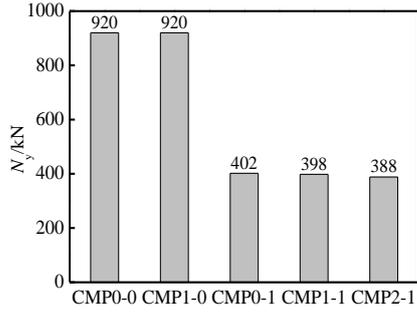
Fig.9 Effect of the preload on load-deformation curve

通过对初应力的影响分析，在本文试验研究范围内 $\beta \leq 0.4$ 时对轴压短试件承载力基本无影响，对长试件极限承载力有一定影响。

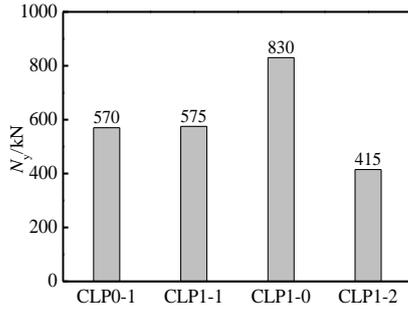
2.2.2 偏心距的影响

图 10 为偏心距对内配型钢钢管混凝土构件荷载-挠度曲线的影响。由图可以看出随着偏心距的增大，试件极限承载力下降显著，同时弹性阶段刚度也减小，而对应的挠度则增大；对于长柱在不同偏心距时各极限承载力的变化分析如图 11 所示，随着偏心距的增大极限承载力下降率逐渐降低。对比图 10(a)和(b)知，无初应力时偏心距使试件极限承载力降低 50.8%；有初应力时偏心距使极限承载力降低 50%，这表明偏心距对极限承载力的影响远大于初应力对极限承载力的影响。

由图 12(a)知，轴压中长柱时不同初应力系数对钢管屈服时对应试件承载力基本无影响，如试件 CMP0-0 和 CMP1-0，此时试件承载力均为 920kN。当偏压中长试件时，不同初应力系数下承载力开始有变化，说明在偏心作用时初应力系数开始有影响。当长试件时，承载力(N_y)随初应力系数变化很小；但随偏心距的增大承载力逐渐减小。这是因为试验初期，钢管对混凝土约束比较弱，因此初应力系数的变化对前期承载力影响不显著。



(a) 中长柱



(b) 长柱

图 12 钢管屈服时试件承载力

Fig.12 Bearing capacity of specimens when steel tube yields

3 有限元分析

3.1 模型建立

3.1.1 材料属性

考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土受压模型与普通钢管混凝土受压建模差异不大,仅增加一步考虑钢管初应力计算即可。因此,混凝土选取 ABAQUS 提供的损伤塑性模型,受压本构参见 Han^[22]建议的应力-应变关系;对于混凝土受拉性能采用能量破坏准则^[23]进行计算。钢管和型钢则均采用弹塑性模型,相应的应力-应变关系表达如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right] & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$, $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$, $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$, $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$, $A = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$, $B = 2A\varepsilon_{e1}$, $C = 0.8f_y + A\varepsilon_{e2} - B\varepsilon_e$ 。

3.1.2 单元和接触

由于钢管和型钢厚度相对整个截面尺寸较小,钢管

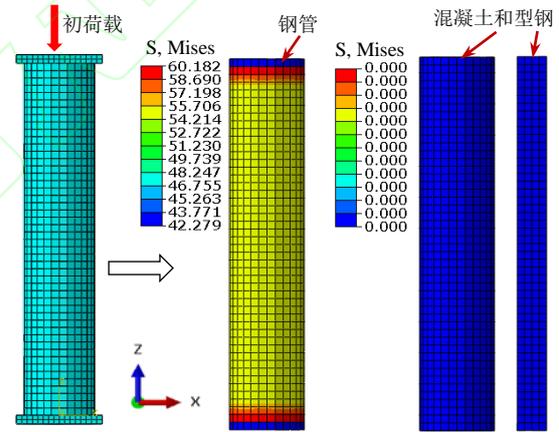
和型钢采用减缩积分的壳体单元(S4R),混凝土和端板采用 8 节点的减缩积分实体单元(C3D8R)。钢管与混凝土为面面接触,法向方向为防止穿透,采用硬接触,切线方向为库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.6;型钢采用“Embedded Region”约束方式嵌入在混凝土内。

3.1.3 边界条件和网格

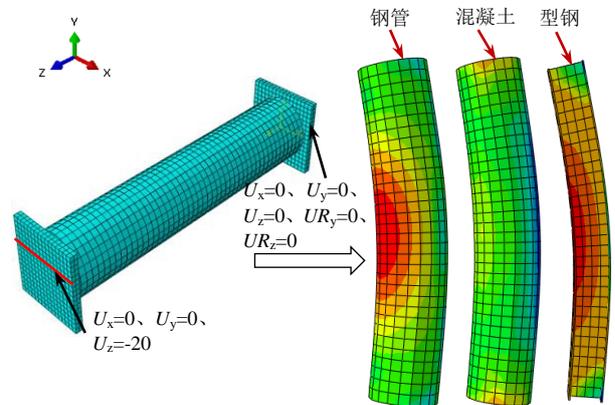
模型计算分两步进行,在初应力阶段,先给钢管施加初应力,由于假设钢管为轴压受力,因此在此阶段试件一端为固定约束,另一端施加轴向荷载。待初应力阶段计算结束后,激活混凝土和型钢,此时对于轴压试件,一端继续为固定约束,另一端试件通过位移加载;对于偏压试件,一端采用铰接约束,另一端施加位移荷载 $U_z = -20\text{mm}$,典型中长构件(CMP1-0)模型的网格和加载过程如图 13 所示。

3.2 模型验证

基于上述建模方法,得到实测荷载-变形曲线与数值结果对比如图 8 所示,由图可以看出有限元计算结果与试验结果吻合较好,其中所有试件 N_{uf}/N_{ue} 比值的平均值为 0.929,标准差为 0.021。图 14 为考虑钢管初应力的轴压中长柱(CMP1-0)试验最终破坏形态与有限元结



(a) Step1: 仅给钢管施加初应力



(b) Step2: 整个构件施加荷载

图 13 有限元模型加载示意

Fig.13 Loading diagram of finite element model

果的对比,可以看出构件失稳破坏时最大应力主要集中在柱中受压位置。通过以上对比分析,整个模型计算结果基本可靠,可进行后续的受力分析。



(a) 试验结果 (b) 模拟结果

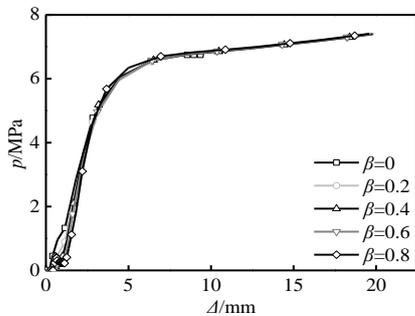
图 14 破坏形态对比(CMP1-0)

Fig.14 Comparisons of failure modes

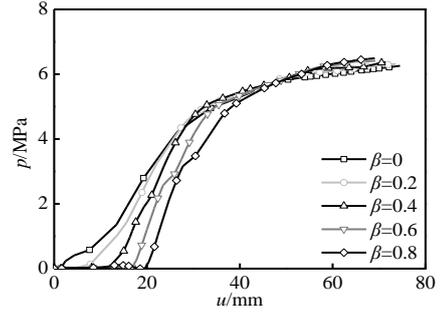
3.3 钢管与混凝土相互作用力及各部件荷载分配

如图 15 为不同初应力系数时构件柱中钢管与混凝土间的相互作用力。图 16 为考虑钢管初应力与否构件各部件承担荷载对比情况。由图 15(a)分析得到,对于短柱,随钢管初应力系数增大,在同一位移下,钢管与核心混凝土之间的相互作用力基本相同,说明考虑钢管初应力对混凝土的约束没有增强,结合图 16(a)可知短试件的承载力变化不大,从而各部件承担荷载也相差不多。

由图 15(b)可知偏压作用时,随着钢管初应力系数的增大,在加载初期,钢管与核心混凝土的相互作用力出现有延迟,混凝土受到的三向约束随之延缓,由此核心混凝土抗压强度提高程度减弱。结合图 16(b)得到长构件承载力与不考虑钢管初应力的构件相比明显下降,其中混凝土承担荷载明显降低。



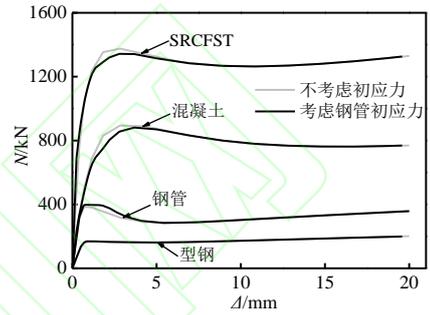
(a) 轴压短柱



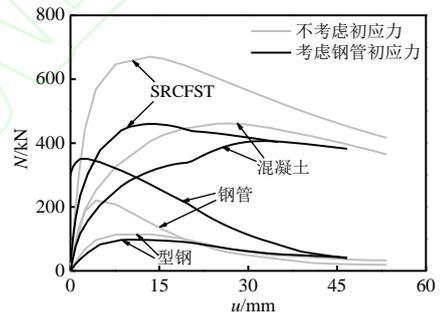
(b) 偏压长柱

图 15 钢管与混凝土间相互作用力

Fig.15 Interaction between steel tube and concrete



(a) 轴压短柱



(b) 偏压长柱

图 16 试件各部件荷载分配

Fig.16 Load distribution of each component

3.4 参数分析

为了解不同参数对考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土受力性能影响,以便为承载力计算提供依据,设计了一组典型算例。圆钢管直径为 400mm,厚度为 10mm,试件有效长度 4m(不含端板),钢管和型钢屈服强度均为 345MPa,型钢截面尺寸为 $h \times b \times t_w \times t_f = 250 \text{mm} \times 120 \text{mm} \times 8 \text{mm} \times 8 \text{mm}$,混凝土强度采用 C50,钢管含钢率为 0.11,型钢含钢率为 0.034。定义承载力影响系数 $k_p = N_{up} / N_u$,其中 N_{up} 和 N_u 分别为考虑初应力系数与否时构件的极限承载力。

3.4.1 短柱($\lambda=12$)时初应力系数的影响

由于轴压短柱与轴压长柱在破坏上有差异,轴压短柱主要为腰鼓破坏或剪切破坏^[10],因此需对不同钢管初

应力系数时的短柱进行单独分析。如图 17 为不同初应力系数时 k_p 的变化规律，通过分析可知初应力系数小于 0.8 时， k_p 下降不超过 2.5%。由此得到对于轴压短柱，考虑钢管初应力与否对构件承载力影响不大。

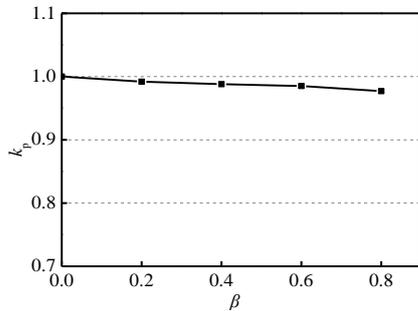


图 17 β 对 k_p 影响

Fig.17 Effect of the β on k_p

3.4.2 长细比的影响

图 18 为考虑钢管初应力时不同长细比对承载力影响系数 k_p 的影响。由图分析，相比于短柱，当长柱在同一长细比时，随初应力系数增大， k_p 下降明显；但当初应力相同时，若 $\lambda < 80$ 时，随长细比增大， k_p 变化不明显，若 $\lambda \geq 80$ 时， k_p 明显增大，其原因同文献[10]的解释。

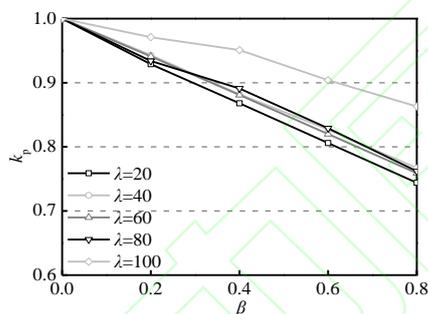


图 18 长细比对 k_p 影响

Fig.18 Effect of the slenderness ratio on k_p

3.4.3 偏心率的影响

图 19 为考虑钢管初应力时不同偏心率对承载力影响系数 k_p 的影响。由图可知，当同一初应力系数时，随偏心距增大， k_p 逐渐增大，这是因为当偏心距较大时，构件在承载力阶段柱中截面受拉侧区域急剧增大，但初始阶段的钢管受压则延缓受拉应力增大，从而构件失稳破坏延缓，进而承载力降低也延缓。另外，相同偏心距时，随初应力系数增大， k_p 下降明显，这可以通过前文钢管与混凝土之间的相互作用力进行解释，由于初始阶段，钢管主要轴向受压，而随着侧向变形增加，钢管对混凝土的约束受初应力影响出现延迟，因此核心混凝土承担的荷载减小，进而构件总荷载也降低。

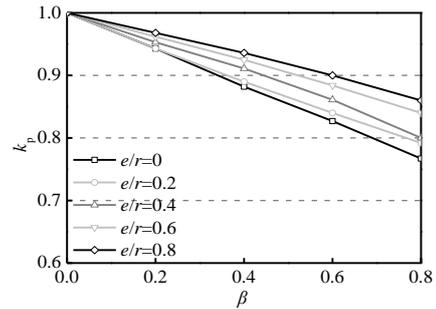


图 19 偏心率对 k_p 影响

Fig.19 Effect of the eccentricity on k_p

3.4.4 型钢截面厚度的影响

相比于钢管混凝土，内配型钢钢管混凝土由于型钢插入显著提高了构件的承载力，并减缓了核心混凝土剪切裂缝的发生^[1-3]。另外，型钢截面尺寸的变化对抗扭承载力也有影响^[5]，因此对于考虑钢管初应力的构件，需分析改变型钢尺寸是否对承载力有影响。由此给出了相同型钢含钢率($\alpha_s=0.034$)时，不同型钢厚度对承载力影响系数 k_p 的影响，如图 20 所示。通过分析知，改变型钢厚度对 k_p 基本无影响，主要原因是钢管有初应力时仅影响核心混凝土受力，对型钢则基本无影响。

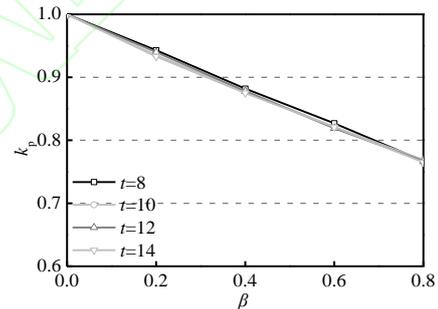


图 20 型钢截面厚度对 k_p 影响

Fig.20 Effect of the section thickness of profiled steel on

k_p

3.4.5 型钢截面尺寸影响

图 21 为不同型钢截面尺寸对构件承载力影响系数 k_p 的影响。当型钢含钢率和型钢厚度相同时，在同一初应力系数下，改变型钢截面尺寸对 k_p 影响也不大。其原因同 3.4.4 部分分析一样，钢管初应力的变化主要对核心混凝土产生影响。

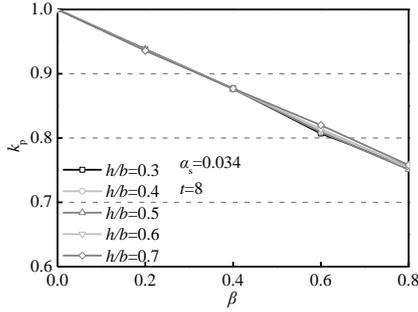


图 21 型钢截面尺寸对 k_p 影响

Fig.21 Effect of the section size of profiled steel on k_p

4 承载力计算方法

为了得到考虑钢管初应力的内配工字钢圆钢管混凝土构件受压承载力计算方法,基于普通受压承载力计算公式,通过考虑钢管初应力后的承载力影响系数以计算其承载力,此方法对实际工程应用也很方便。目前,对于内配型钢圆钢管混凝土轴压构件的计算方法已有很多研究,参考相关规范^[24],课题组在前期得到了如下计算方法^[25]:

对于轴压短柱:

$$N_0 = A_{ics} f_{ck} (1.212 + B_0 \xi + C_0 \xi^2 + D_0 \rho + E_0 \rho^2) \quad (2)$$

其中: f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度,计算方法参考文献[10]; $\xi (=f_{ty} A_t / f_{ck} A_c)$ 为钢管约束效应系数; $\rho (=f_{sy} A_s / f_{ck} A_c)$ 为型钢约束效应系数; B_0 为截面形式对钢管约束效应产生影响的系数, $B_0 = 1.3$; C_0 为材料强度比对约束效应产生影响的系数, $C_0 = 0.0045 - 1.5(f_c / f_{ty})$; D_0 是截面形式对内置型钢约束产生影响的系数, $D_0 = 0.8$; E_0 是混凝土强度对内置型钢约束产生影响的系数, $E_0 = -0.0006(f_{ck} - 20) - 0.01$ 。公式适用范围为: $f_{ty} = 235 \sim 420 \text{MPa}$, $f_{sy} = 235 \sim 420 \text{MPa}$, $f_{cu} = 30 \sim 100 \text{MPa}$, $\xi = 0.2 \sim 2.5$, $\rho = 0.2 \sim 2$, $D = 120 \sim 500$ 。

对于轴压长柱计算:

$$N_u = \varphi N_0 \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{ics} = \frac{\lambda_{ics}}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ics}}{E_{ics}}} \approx 0.01 \lambda_{ics} (0.001 f_{ty} + 0.92) \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{1}{2 \bar{\lambda}_{ics}^2} \left[\bar{\lambda}_{ics}^2 + (1 + 0.25 \bar{\lambda}_{ics}) - \sqrt{\left[\bar{\lambda}_{ics}^2 + (1 + 0.25 \bar{\lambda}_{ics}) \right]^2 - 4 \bar{\lambda}_{ics}^2} \right] \quad (5)$$

式中: λ_{ics} 为构件长细比; $\bar{\lambda}_{ics}$ 构件正则长细比; φ 为稳定系数。

图 22 为该计算方法得到的结果与相关试验结果对比情况。通过分析,对于短柱, N_{cal}/N_{ue} 的平均值为 0.964, 标准差为 0.047; 对于长柱, N_{cal}/N_{ue} 的平均值为 0.997, 标准差为 0.051。可见,该承载力计算方法误差范围在 10% 以内。

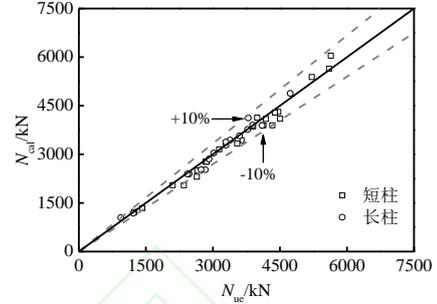


图 22 轴压构件承载力计算结果与试验结果比较

Fig.22 Comparison of bearing capacity between calculated and test results

另外通过回归分析得到了内配型钢钢管混凝土考虑钢管初应力后承载力影响系数 k_p 计算公式如下:

$$k_p = 1 - f(\lambda_0) \cdot f(e/r) \cdot \beta \quad (6)$$

$$f(\lambda_0) = \begin{cases} -0.884 \lambda_0^2 + \lambda_0 - 0.11 & (\lambda_0 < 1) \\ -0.17 \lambda_0^2 + 0.3 \lambda_0 + 0.06 & (\lambda_0 \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\lambda_0 = \lambda/80$;

$$f(e/r) = 1.5 - 0.2 \frac{e}{r} - 0.6 \left(\frac{e}{r} \right)^2 \quad (8)$$

基于上述得到的承载力影响系数 k_p 与数值模拟结果进行对比,得到如图 23 所示对比情况。由图可知,简化计算方法与数值结果吻合较好,分析知有限元得到的承载力影响系数 k_{p-FEM} 与理论计算得到的 k_{p-cal} 比值的平均值为 0.974, 标准差为 0.039。

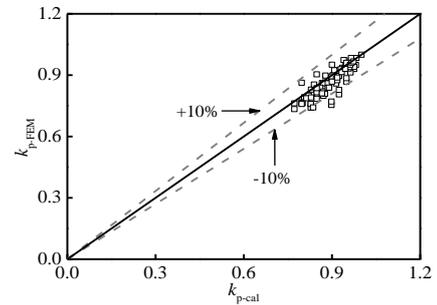


图 23 k_p 简化计算与数值模拟结果对比

Fig.23 Comparison of k_p between simplified calculation and numerical simulation results

基于以上得到的普通轴压承载力计算公式和考虑钢管初应力的承载力影响系数,得到了如下图 24 所示的考虑钢管初应力后内配型钢钢管混凝土试验结果与

简化计算方法的对比情况,其中理论计算得到的承载力 N_{cal} 与试验得到的承载力 N_{ue} 比值的平均值为 0.963, 标准差为 0.032, 可见本文建议的计算方法对于考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土轴压构件计算基本可靠。

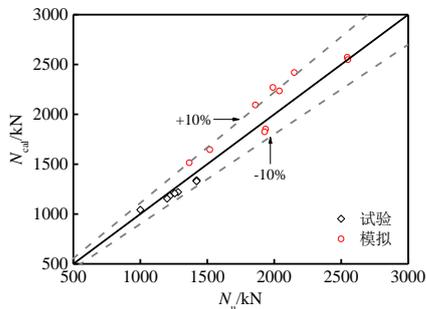


图 24 考虑钢管初应力的构件承载力计算与试验结果对比

Fig.24 Comparison between calculation and test results of bearing capacity of specimens considering preload

5 结论

通过对考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土构件进行试验和数值分析,可初步得到如下结论:

(1) 试验过程中不同初应力系数对试件破坏形态影响无明显差异;而不同长细比试件破坏过程有差异,短柱在达到极限承载力后开始有明显鼓曲,中长柱在达到极限承载力时开始产生侧向弯曲,长柱则比中长柱弯曲变形进一步提前。

(2) 基于试验得到了试件荷载-变形关系曲线,通过参数分析可知,初应力系数小于 0.4 时对短试件极限承载力影响较小,但对中长柱和长柱则产生一定影响;偏心距对试件极限承载力影响显著;偏心距越大,极限承载力对应挠度越大。

(3) 采用本文试验数据验证了有限元模型的可靠性,通过数值模拟分析得到偏压作用时考虑钢管初应力对长构件受力影响比较明显;并在此基础上进行了参数分析,其中型钢含钢率相同时改变型钢尺寸或厚度对考虑钢管初应力的内配型钢钢管混凝土承载力无影响。

(4) 通过试验和数值模拟给出了考虑钢管初应力后的承载力影响系数 k_p ,并基于内配型钢圆钢管混凝土轴压计算公式建议了考虑钢管初应力后内配型钢圆钢管混凝土受压承载力计算方法。

参 考 文 献

[1] 朱美春,王清湘,冯秀峰.轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J].土木工程学报,2006,39(6):35-41.(ZHU Meichun,WANG Qingxiang,

FENG Xiufeng. Behavior of axially-loaded square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 39(6): 35-41. (in Chinese))

[2] DING F X, ZHANG T, LIU X M, et al. Behavior of steel-reinforced concrete-filled square steel tubular stub columns under axial loading [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 737-748.

[3] SHI Y L, XIAN W, WANG W D, et al. Experimental performance of circular concrete-filled steel tubular members with inner profiled steel under lateral shear load [J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109746.

[4] SHI Y L, XIAN W, WANG W D, et al. Mechanical behaviour of circular steel-reinforced concrete-filled steel tubular members under pure bending loads [J]. Structures, 2020, 25: 8-23.

[5] WANG W D, JIA Z L, SHI Y L, et al. Performance of steel-reinforced circular concrete-filled steel tubular members under combined compression and torsion [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106271.

[6] XIAN W, WANG W D, WANG R, et al. Dynamic response of steel-reinforced concrete-filled circular steel tubular members under lateral impact loads [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 151: 106736.

[7] TAN Q H, GARDNER L, HAN L H, et al. Fire performance of steel reinforced concrete-filled stainless steel tubular (CFSST) columns with square cross-sections [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 143: 106197.

[8] MAO W J, WANG W D, XIAN W. Numerical analysis on fire performance of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns with square cross-section [J]. Structures, 2020, 28: 1-16.

[9] 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 Shaozhen,MA Yu,SHI Yanli,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. (in Chinese))

[10] 韩林海.钢管混凝土结构-理论与实践(第三版)[M].

- 北京: 科学出版社, 2016. (HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice (3rd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [11] AHMED M, LIANG Q Q, PATEL V I, et al. Nonlinear analysis of square concrete-filled double steel tubular slender columns incorporating preload effects [J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 110272.
- [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 Shijuan, ZHONG Shantong, YAN Shanzhang, et al. Experimental research of prestress effect on bearing capacity of concrete filled steel tubular axial compressive members [J]. *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 1996, 29(6): 44-50. (in Chinese))
- [13] 查晓雄, 钟善桐. 钢管初应力对钢管混凝土压弯、压弯扭构件工作性能的影响[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1997, 30(2): 45-53. (ZHA Xiaoxiong, ZHONG Shantong. The behavior effect on concrete filled steel tubular members subjected to compression-bending/compression-bending-torsion under the initial stress of steel tube [J]. *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 1997, 30(2): 45-53. (in Chinese))
- [14] 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 Linhai, YAO Guohuang. Effect of initial stress on bearing capacity of concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(4): 9-18. (in Chinese))
- [15] HAN L H, YAO G H. Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(12): 1455-1475.
- [16] LIEW J Y R, XIONG D X. Effect of preload on the axial capacity of concrete-filled composite columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65: 709-722.
- [17] 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.
- [18] PATEL V I, LIANG Q Q, HADI M. Behavior of biaxially-loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns with preload effects [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 79: 166-177.
- [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] 金属材料 拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Metallic materials: tensile testing: part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [21] 钟善桐, 查晓雄. 高层建筑中钢管混凝土偏压柱施工初应力的限制[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(1): 21-25. (ZHONG Shantong, ZHA Xiaoxiong. The limitation of erected initial stress for concrete filled steel tube beam-column in tall building [J]. *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 1999, 32(1): 21-25. (in Chinese))
- [22] HAN L H, YAO G Y, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(1): 24-36.
- [23] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773-782.
- [24] 钢管混凝土结构技术规范: GB50936-2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB50936-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [25] 王文达, 李鲜琚, 范家浩. 内置型钢钢管混凝土轴压构件设计方法研究及可靠度分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(6): 11-20. (WANG Wenda, LI Xianjun, FAN Jiahao. Research on the design method and reliability analysis of concrete-filled steel tubular columns with inner steel under axial compression [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(6): 11-20. (in Chinese))