

# 配筋空心方钢管高强混凝土轴压中长柱 有限元分析

杨志坚,崔维哲,李帼昌

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究配筋空心方钢管高强混凝土轴压中长柱受力性能,改善传统空心钢管混凝土的力学性能,并为该类型柱的设计及试验研究提供依据。方法 基于有限元分析软件 ABAQUS,对配筋空心方钢管高强混凝土轴压中长柱的力学性能进行有限元分析,在分析受力全过程的基础上,重点分析长细比、钢管宽厚比、混凝土强度、钢管强度、管桩类型、配筋率等参数对轴压力学性能的影响,并基于统一理论提出承载力计算公式。结果 配筋空心方钢管高强混凝土轴压中长柱各组分之间组合作用良好,内置管柱、增大钢管宽厚比、减小长细比及缩小夹层混凝土强度与管柱混凝土强度差距可以改善构件的延性、提升构件组合作用;笔者提出的修正公式计算结果精确且安全。结论 提高配筋空心方钢管高强混凝土的钢管强度、增大宽厚比、减小夹层混凝土与管柱混凝土强度差距可有效改善空心钢管混凝土脆性破坏,充分发挥构件的性能。

**关键词** PHC 管桩;空心柱;方钢管;有限元分析;中长柱

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Reinforced Hollow High Concrete Filled Square Steel Tube Medium and Long Columns under Axial Compression

YANG Zhijian, CUI Weizhe, LI Guochang

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

**Abstract:** In order to improve the mechanical properties of traditional hollow concrete filled steel tube columns, finite element analysis of the axial force performance of reinforced hollow high strength concrete filled square steel tube columns was carried out using the finite element software ABAQUS, based on the analysis of the whole force process of reinforced hollow high strength

收稿日期:2022-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52178148,51808353);辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10);辽宁省教育厅项目(LJKZ0598)

作者简介:杨志坚(1984—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

concrete filled square steel tube members. The effects of parameters such as length to slenderness ratio, steel tube width to thickness ratio, concrete strength, steel tube strength, type of pipe pile and reinforcement ratio on the axial compressive mechanical properties were focused on, and the load carrying capacity correction formulae were proposed based on the unified theory. It is found that the member combination of reinforced hollow high strength concrete filled square steel tube axial compression medium-length column is better, and the built-in pipe column, increasing the width-thickness ratio, reducing the length-thinness ratio and narrowing the strength gap between the interlayer concrete and the pipe column concrete can significantly improve the member ductility and enhance the combined effect, and the proposed bearing capacity calculation formula is accurate and safe.

**Key words:** PHC pipe piles; hollow column; square steel tube; finite element analysis; medium and long column

钢管混凝土结构因承载能力高、延性好、安装方便等力学和施工优势,广泛应用于高层、超高层建筑和大跨度桥梁<sup>[1-2]</sup>。离心空心钢管混凝土作为钢管混凝土的一种结构形式,相较于钢管混凝土具有以下特点:离心成型、蒸汽养护,缩短工期、中空部位布置各种管线;减少混凝土用量,节省材料,减轻结构自重;组装方便,被广泛应用于输电塔、变电站塔以及建筑基础中<sup>[3]</sup>。

对于空心钢管混凝土柱,王宏伟等<sup>[4]</sup>进行了空心钢管混凝土轴压短柱试验,指出构件承载力随着空心率的增大呈下降趋势,且空心率越大构件的荷载-位移曲线下降段斜率越大;Y. G. Zhao<sup>[5]</sup>通过试验研究和理论分析指出空心率和径厚比的增加会降低圆形空心钢管混凝土轴压短柱的极限承载力和延性,混凝土强度和钢管强度的增大会提高轴压短柱的极限承载力。对于配筋钢管混凝土,陈宗平等<sup>[6]</sup>对配筋方钢管混凝土柱的受压力学性能的影响进行试验研究,发现配置钢筋对破坏形态没有明显的影响,随着螺旋箍筋配筋率的提升,荷载位移曲线由下降型转变为强化型,破坏预兆明显;H. S. Hu 等<sup>[7]</sup>对配筋钢管混凝土柱的研究发现配置螺旋箍筋可以有效改善构件的延性,改善程度随着螺旋箍筋体积比及屈服强度的增加而增加。F. X. Ding 等<sup>[8]</sup>、A. Xiamuxi 等<sup>[9]</sup>研究表明,钢筋可以减轻混凝土材料不均匀性造成的不利影响,提高混凝土

芯的强度和变形能力,还可提高约束效应、延性以及构件的屈服后变形能力。基于上述分析,笔者课题组<sup>[10]</sup>提出了一种新型的配筋空心方钢管高强混凝土柱,用于改善空心钢管混凝土构件的力学性能,解决了由加工工艺限制的空心钢管混凝土空心率较大问题。

此前,韩嘉明<sup>[11]</sup>、李旭<sup>[12]</sup>、张亚雯<sup>[13]</sup>研究了配筋空心方钢管高强混凝土柱的轴压及受弯性能,结果表明,方形轴压短柱整体表现为剪切破坏;峰值荷载前,钢管在中截面处发生局部屈曲;随着钢管壁厚的增大和钢筋的配置,构件的延性和承载力随之提高;对纯弯构件的初始刚度和承载力影响参数主要为钢管厚度和强度。在实际工程中钢管混凝土柱多作为受压构件且长细比较大,易发生失稳破坏,因此需要对该类组合中长柱的轴压力学性能进行研究。鉴于此,笔者通过有限元分析软件对该类型柱的受力全过程进行分析,研究管柱类型、钢管宽厚比、夹层混凝土强度、钢材强度、配筋率等参数对轴压力学性能的影响,并提出适用于该类型柱的承载力计算公式。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 建模基本信息

配筋空心方钢管高强混凝土中长柱的截面形式、简化模型的单元选取及接触设置如图1所示,其中普通钢筋、箍筋以及预应力筋均采用两节点的桁架单元(Truss);钢管采用

四节点缩减积分格式壳单元(S4R),混凝土、加劲肋与刚性承载板均采用八节点缩减积分

三维实体单元(C3D8R)。

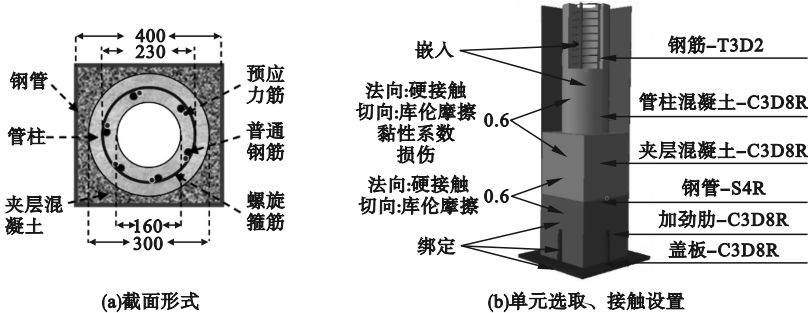


图 1 构件的截面形式、单元选取、接触设置

Fig. 1 The section form,element selection and contact setting of component

由预应力筋、螺旋箍筋、普通钢筋组成的钢筋笼通过 Embedded 命令嵌入到管柱混凝土中;管柱与夹层混凝土之间采用内聚力-摩擦混合模型定义面-面接触<sup>[14]</sup>,法向设置为硬接触,切向设置为库伦摩擦类型的罚函数,摩擦系数为 0.6,并设置黏性系数;夹层混凝土与钢管之间,法向接触采用硬接触,切向关系采用库伦摩擦力模型,摩擦系数取 0.6;钢管、刚性端板、加劲肋之间通过 Tie 约束进行绑定。

钢管网格采用四边形结构化网格划分,考虑到加劲肋与钢管的绑定约束处加劲肋网格较小,当钢管在该处网格较大时,绑定约束会使钢管网格产生畸变,导致结构收敛困难,因此有必要对钢管在中部处的网格进行细化处理,混凝土、刚性端板、加劲肋均采用六面体结构化网格划分。

设置两个分析步分别施加预应力、轴向位移,预应力筋采用降温法施加预应力,对上下盖板均施加平面外转动约束,对加载端施加线位移,另外一端进行固接。考虑到初始缺陷的影响对柱施加  $L/1\ 000$  的初始偏心。

1.2 材料的本构关系

该模型普通钢筋、螺旋箍筋、预应力筋屈服强度分别为 400 MPa、650 MPa、1 420 MPa,钢筋采用高强钢材二折线模型,钢管及加劲肋采用低碳钢五折线模型<sup>[15]</sup>。

管柱混凝土和夹层混凝土均采用混凝土

损伤塑性模型<sup>[15]</sup>进行模拟。为了考虑构件尺寸效应,笔者采用 X. B. Zhao 等<sup>[16]</sup>提出的约束混凝土峰值应力和峰值应变的尺寸效应公式,见式(1)和式(2)。对于混凝土受拉软化性能,采用文献[15]中的直接输入断裂能来定义混凝土受拉行为。

$$\gamma_{\sigma} = \frac{0.7 - 0.99\rho/f_c'}{\sqrt{1 + 0.034 \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} (1 - 3\rho/f_c')}} + 0.63. \quad (1)$$

$$\gamma_{\varepsilon} = 1.4\gamma_{\sigma} - 0.4. \quad (2)$$

式中: $\gamma_{\sigma}$ 、 $\gamma_{\varepsilon}$ 、 $A_c$ 和 $\rho$ 分别为峰值轴向应力和峰值轴向应变、混凝土截面积和围压的尺寸效应系数。通过 $\gamma_{\sigma}$ 、 $\gamma_{\varepsilon}$ 分别替换原式中<sup>[15]</sup>的 $\sigma$ 、 $\varepsilon$ ,在混凝土的受压应力-应变关系中考考虑尺寸效应。

1.3 模型验证

为了验证有限元模型,对文献[13]试验进行有限元对比分析。表 1 给出了试件具体参数及试验与有限元结果,图 2 为有限元与试验曲线的对比,其中 ARHCFST-2 与 FEA-ARHCFST-2 分别为试件 2 的试验与有限元模拟荷载-纵向位移曲线,其中 A 代表轴压, R 代表配筋, H 代表空心, CFST 指代钢管混凝土;  $N$  为构件承载力;  $\Delta$  为构件轴向位移;  $N_e$ 、 $N_c$  分别为试验与有限元模拟的峰值承载力;  $\Delta_e$ 、 $\Delta_c$  分别为试验与有限元峰值承载力所对应的轴向位移。

表 1 验证模型的参数及结果

Table 1 The parameters and results of the validated model

试件编号	$L/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$f_{\text{cul}}/\text{MPa}$	$f_{\text{cu2}}/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$d/\text{mm}$	$N_e$	$N_c$	$N_c/N_e$
ARHCFST-1	1 200	400	5	80	71.5	358	16	10 119	9 642	0.952 8
ARHCFST-2	1 200	400	5	80	71.5	358	16	10 822	10 352	0.956 5
ARHCFST-3	1 200	400	6	80	71.5	356	16	10 613	10 372	0.977 2
ARHCFST-4	1 200	400	6	80	71.5	356	16	10 869	10 449	0.961 3
ARHCFST-5	1 200	400	8	80	71.5	363	16	11 426	11 598	1.015 1

注: $L$ 为构件长度; $B$ 为构件宽度; $t$ 为钢管厚度; $f_{\text{cul}}$ 为管柱混凝土抗压强度; $f_{\text{cu2}}$ 为夹层混凝土抗压强度; $f_y$ 为钢管屈服强度; $d$ 为普通钢筋直径; $N_e$ 为试验峰值承载力; $N_c$ 为有限元模拟极限承载力。

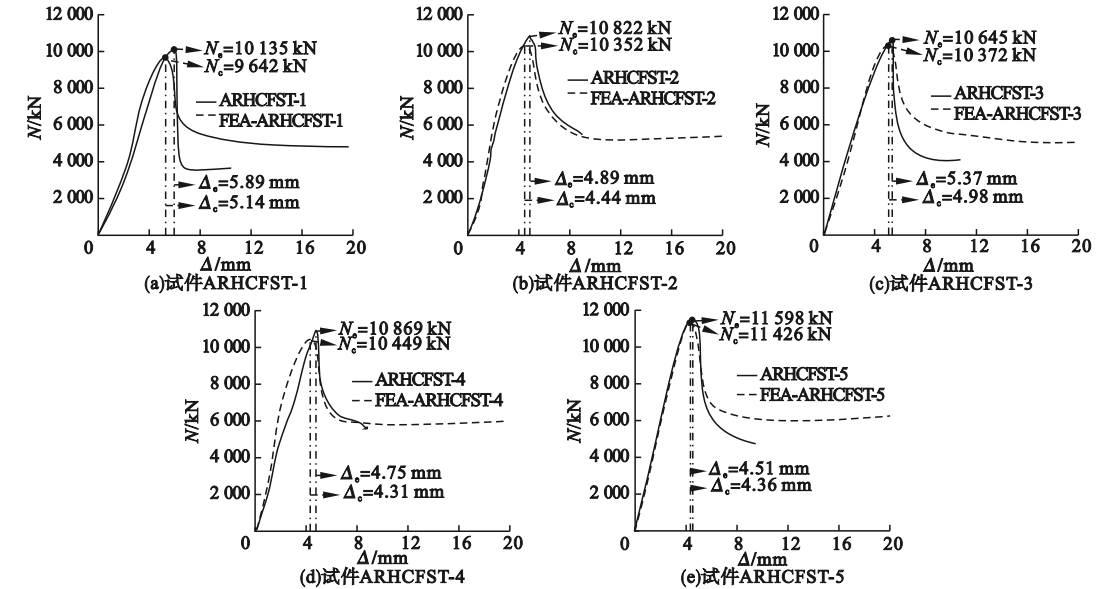


图 2 有限元结果对比

Fig. 2 The comparison of finite element results

从表 1 和图 2 可以看出,有限元分析的极限承载力、初始刚度、弹性刚度与试验结果吻合良好。图 2 中试件 ARHCFST-4 在峰值前试验与有限元出现较大偏差,是由于试件 ARHCFST-4 试件在峰值前跨中部位处钢管

出现部分鼓曲,导致试件轴向位移快速增大,但整体曲线相差不大。图 3 为试验与有限元的破坏形态对比,有限元模型可以很好地模拟试件各个部件的破坏形态。

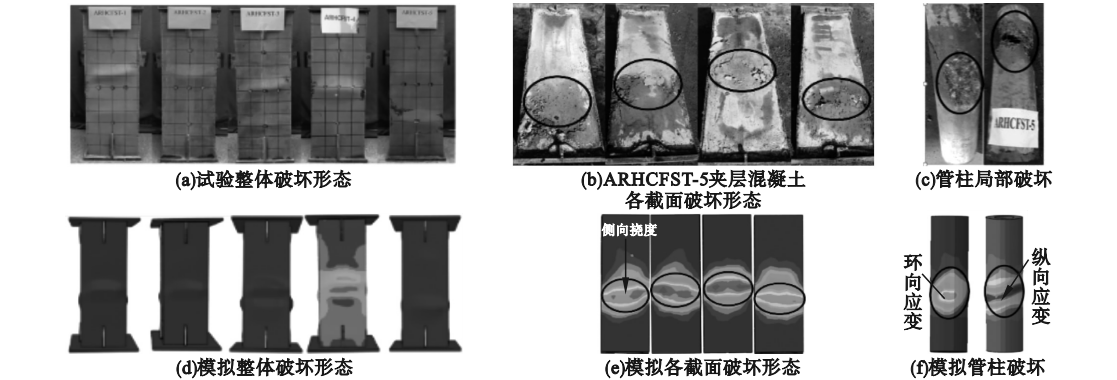


图 3 破坏形态对比

Fig. 3 The comparison of failure modes



2 有限元分析

2.1 典型构件分析

2.1.1 荷载-跨中挠度分析

典型构件的荷载-跨中挠度曲线如图4所示,典型构件具体参数列于图中。

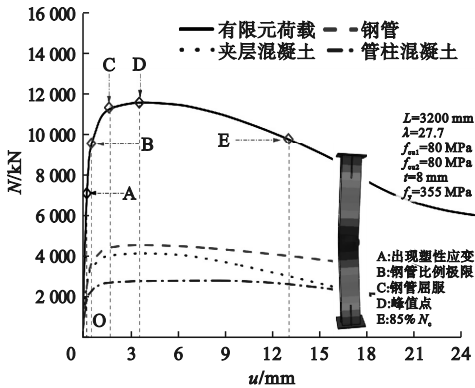


图4 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 The load-mid span deflection curve

(1)弹性段(O-A):A点管柱出现塑性应变,荷载为峰值承载力的61.4%。由图4可以看出构件的跨中侧向挠度较小,特征点A所对应的跨中挠度仅为峰值荷载跨中挠度的8.1%。

(2)弹塑性段(A-C):随着构件承载力的继续增加,构件整体刚度降低,夹层混凝土与管柱由弹性状态进入弹塑性状态,特征点B时钢管受压区 Mises 应力达到比例极限。

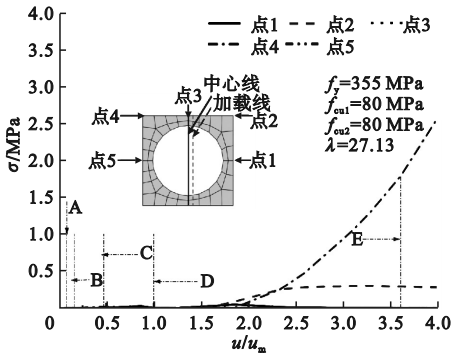
特征点B所对应的挠度值为极限荷载所对应挠度值的47.3%,特征点C时钢管受压侧达到屈服,荷载为极限承载力的97.9%。

(3)塑性强化段(C-D):构件受压侧中截面处的钢管屈服区域向端部及受拉侧延伸,跨中区域的普通钢筋和螺旋箍筋开始屈服;随着荷载继续增加,屈服区域同钢管一样向两端及受拉区延伸,钢管对混凝土约束作用在此阶段明显增强。由图4可看出构件中截面挠度快速增大,此阶段终点D时,构件达到极限承载力( $N_e = 11\,604\text{ kN}$ ),钢管和混凝土分担的荷载达到最大。

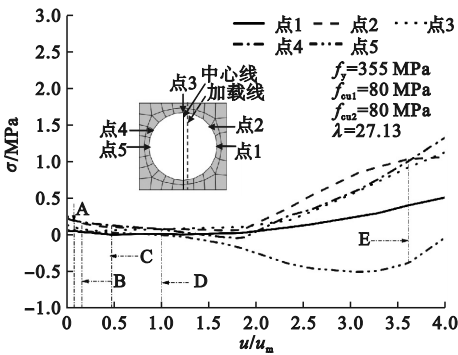
(4)下降阶段(D-E):构件跨中挠度快速增长,构件呈偏压破坏,构件中心线两侧的纵向应力差异变大;受压区钢管在中截面附近产生鼓曲,夹层混凝土由于缺少钢管的约束,塑性变形快速增大,钢管和夹层混凝土承担荷载快速下降,管柱混凝土由于箍筋的约束,塑性变形较小,仍能分担较大的荷载。特征点E时构件的承载力为极限承载力的85%,挠度值为极限承载力时挠度的3.61倍。

2.1.2 接触应力分析

图5为夹层混凝土与钢管、管柱混凝土跨中截面各个区域的接触应力-跨中挠度比值曲线, $u_m$ 为峰值荷载对应的跨中挠度。



(a)夹层混凝土与钢管



(b)夹层混凝土与管柱混凝土

图5 接触应力-跨中挠度比值曲线

Fig. 5 The contact stress-mid span deflection ratio curve

由图5(a)可以看出,特征点C之前,夹层混凝土与钢管之间的基础应力基本为0,接触应力主要发生在构件挠曲变形快速增长的承

载力下降阶段的夹层混凝土角部位置处,位于平板区域的点1、点3、点5在承载力下降阶段的接触应力出现小幅的增长,但由于钢管的

鼓曲又快速下降。特征点 E 时,点 2、点 4 位置处的接触应力分别为 0.384 MPa、1.81 MPa,由于钢管在受压侧跨中区域产生鼓曲,因此受压侧角部接触应力比受拉侧小很多。

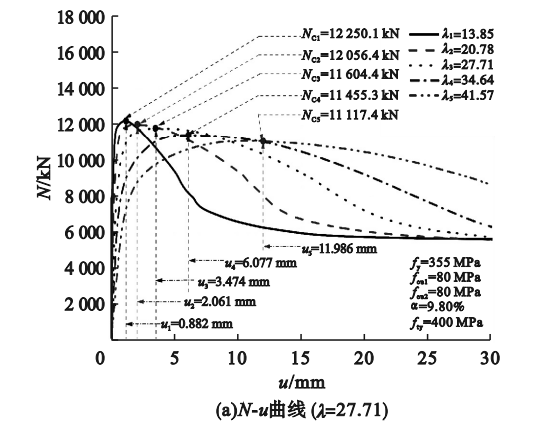
由图 5(b)可以看出,加载初期管柱混凝土与夹层混凝土之间接触应力与夹层混凝土与钢管之间的接触表现一致,特征点 D 之前显的相互作用,承载力下降阶段,位于受压侧平板区域的点 1 接触应力增长最为缓慢,位于受拉侧平板区域的点阶段构件挠曲变形快速增长,构件的挠曲变形快于混凝土的横向膨胀,夹层混凝土与管柱混凝土出现了剥离的趋势,位于角部方向上的点 2、点 4 接触应力快速增长,与钢管接触应力趋势一致。

表 2 构件参数设计

Table 2 The parameter design of component

长细比	钢管壁厚/mm	钢管屈服强度/MPa	夹层混凝土抗压强度/MPa	钢筋直径/mm
13.85、20.78	5	235	60	空心
27.71、34.64	6	355	70	0
41.57、55.43	8	390	80	12
62.35、69.28	10	420	90	16
76.21、83.14	12	460	100	20

长细比对构件荷载-跨中挠度 ( $N-u$ ) 曲线、 $SI$  及  $DI$  的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着长细比的增大,构件的初始刚度及  $DI$  均呈下降趋势,长细比由 13.85 增加到 83.14 时,极限承载力下降 30.43%,  $SI$  由 1.075 减小到 0.748,长细比改变对构件峰后阶段的剩余承载力影响较小。



2.2 参数分析

为了进一步研究配筋空心方钢管高强混凝土中长柱的受力性能,分析长细比、含钢率、钢管屈服强度、夹层混凝土强度、配筋率对配筋空心方钢管高强混凝土中长柱峰值承载力、跨中挠度  $u$ 、延性系数  $DI$  以及强度增强系数  $SI$  的影响。螺旋箍筋采用  $\Phi 4@45$  钢筋,强度为 650 MPa,预应力筋采用 6 $\Phi 7.1$  钢筋,强度为 1 420 MPa,普通钢筋强度为 400 MPa。构件的具体参数如表 2 所示。其中,空心为内部既不包含预应力筋、螺旋箍筋,也不包含普通钢筋,且管柱混凝土与夹层混凝土统一浇筑,一个整体,0 为仅不包含普通钢筋,管柱混凝土与夹层混凝土分别浇筑。

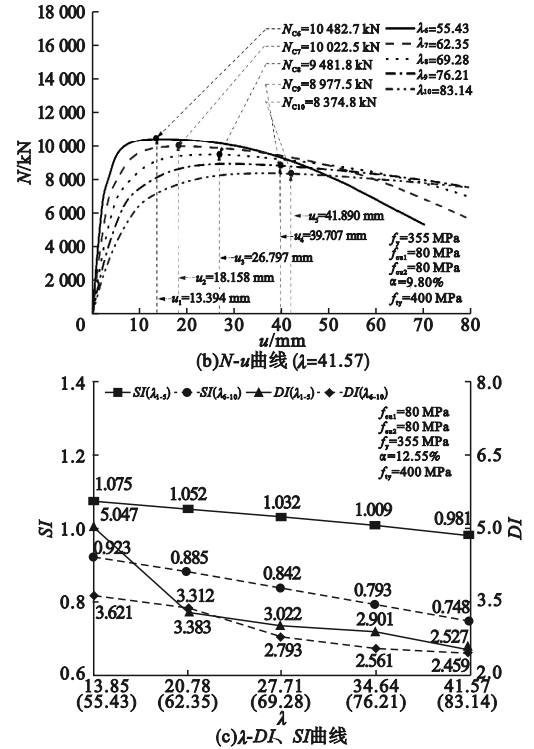


图 6 柱长细比的影响

Fig. 6 The effect of column slenderness ratio

含钢率对构件  $N-u$  曲线、 $SI$  及  $DI$  的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着含钢率的提高,柱的初始刚度及峰值荷载均有所提高,含钢率由 5.98% 增加到 15.36%,构件的极限承载力增加了 31.5%,柱的  $DI$  及  $SI$  随着含钢率的增大表现为先增大后减小, $SI$  和  $DI$

最大值出现在含钢率为 9.80% 时;这是因为含钢率的增加可有效提高钢管对混凝土柱的约束效果,延后钢管混凝土柱局部鼓曲,提高极限承载力,改善延性;当含钢率较大时,试件内部混凝土先被压碎,不能充分发挥钢管的性能,构件的  $SI$  与  $DI$  出现下降。

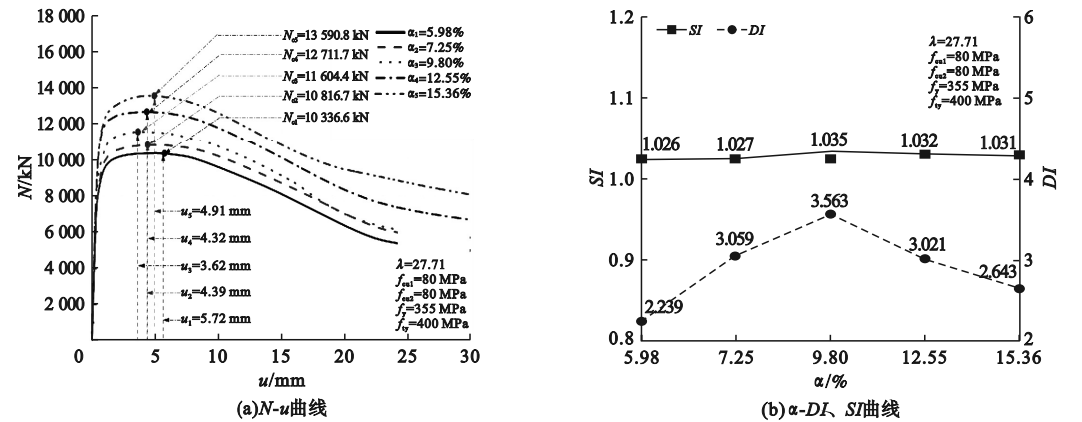


图 7 含钢率的影响

Fig. 7 The effect of steel content

钢管强度对构件的  $N-u$  曲线、 $SI$  及  $DI$  的影响如图 8 所示。由图 8 可知,构件极限承载力随着钢管强度的提高而增大,初始刚度受钢管强度变化影响较小,长细比为 27.71 的构件,钢管强度由 235 MPa 提高到 460 MPa,极限承载力增大 34.5%, $DI$  由 2.38 增加到 3.87, $SI$  没有明显变化;长细比为 41.57 的构件,钢管强度由 235 MPa 提高到 460 MPa,极限承载力增大 37.8%, $DI$  由 1.98 增加到 2.84, $SI$  由 0.967 提高到 0.992;可以发现增大相同的钢管强度下,构件的极限承载力增加比例、各部件之间的相

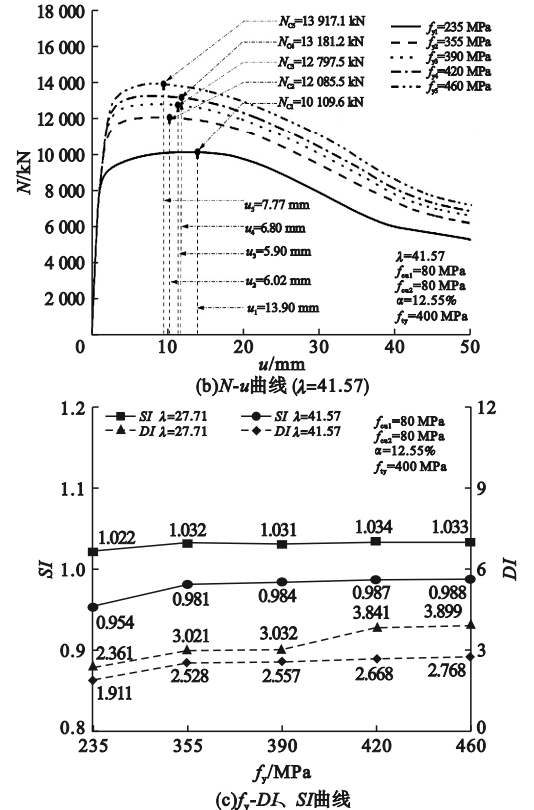


图 8 钢管强度的影响

Fig. 8 The effect of steel tube strength

互作用随着长细比的增大逐渐提高。

夹层混凝土强度对构件  $N-u$  曲线、 $SI$  及

DI 的影响如图 9 所示。由图 9 可知,构件的极限承载力随着混凝土强度的提高而增大,但混凝土强度的提高对初始刚度无明显影响;长细比为 27.71 的构件,混凝土强度由 60 MPa 增加到 100 MPa,极限承载力增大 16.81%, $DI$  先增大后减小,最大值出现在混凝土强度为 90 MPa 时,混凝土强度的提高对构件  $SI$  值没有明显影响;长细比为 41.57 的构件,混凝土强度由 60 MPa 提高到 100 MPa,构件极限承载力增大 16.13%, $DI$  由 60 MPa 的 2.361 增加到 90 MPa 的 2.724,再下降到 100 MPa 的 2.644, $SI$  变化趋势同长细比为 27.71 的构件相同;夹层混凝土强度与管柱混凝土强度差值越小,构件的力学性能越优异;在不同长细比下,由混凝土强度的改变引起的构件极限承载力、 $DI$  及  $SI$  的变化规律表现一致。

管柱类型、钢筋直径对构件荷载-跨中挠度曲线、 $SI$  及  $DI$  的影响如图 10 所示。由图 10 可知,构件形式对构件的初始刚度影响不大,配置 PRC 管柱的组合构件相较于空心钢

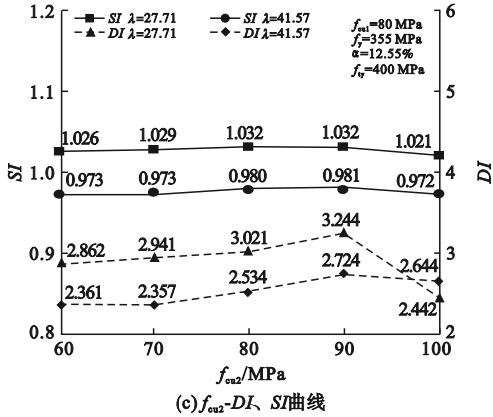
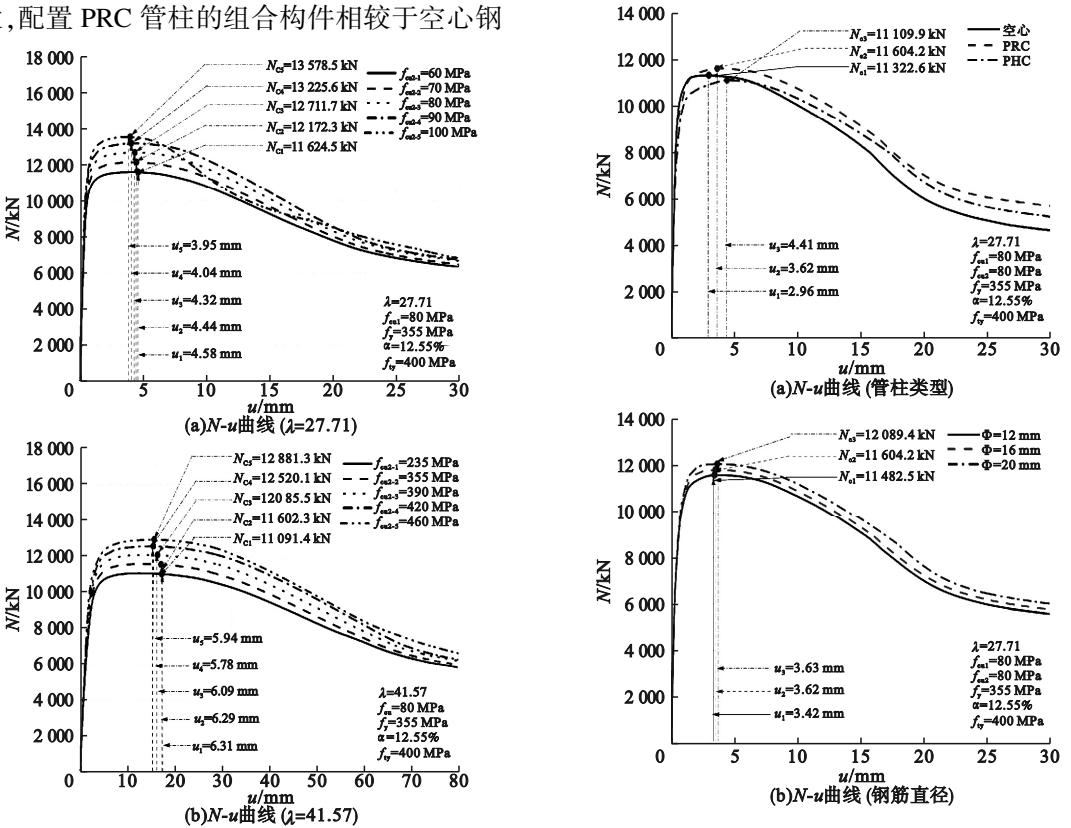


图 9 混凝土强度的影响

Fig. 9 The effect of concrete strength

管混凝土构件,具有更高的承载力及  $DI$ ;相较于配置 PHC 管柱的组合构件,增配普通钢筋的构件具有更大的  $SI$  及峰值承载力,可以充分发挥构件的性能。增大钢筋直径对构件初始刚度无明显影响,钢筋直径由 12 mm 增加到 16 mm、20 mm,峰值承载力分别增大了 1.1%、5.2%,构件的  $DI$  及  $SI$  受钢筋直径改变影响较小。





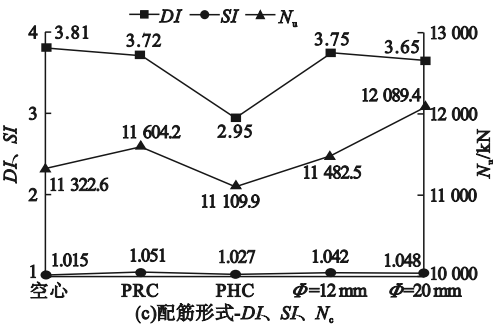


图 10 管柱类型及钢筋直径影响  
Fig. 10 The effect of pipe column type and reinforcement diameter

3 承载力公式计算

通过以上分析可以发现,管柱与夹层混凝土具有良好的组合作用,因此在计算配筋空心方钢管混凝土柱的极限承载能力时可参考查晓雄教授提出的空心钢管混凝土柱的承载力计算公式<sup>[3]</sup>,对式中材料分项系数  $B$ 、 $C$  进行修正,计算公式见式(3)~(11)。其中,  $f_{ck,eq}$  表示换算后混凝土受压强度标准值;  $f_{ck1}$ 、 $f_{ck2}$  分别为管柱混凝土、夹层混凝土受压强度标准值;  $A_{c1}$ 、 $A_{c2}$  分别为管柱混凝土、夹层混凝土截面面积。

$$N_1 = \varphi_1 (f_{sc} A_{sc} + f_{ry} A_{ry} + f_{ry1} A_{ry1}). \tag{3}$$

$$f_{sc} = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_{ck,eq}. \tag{4}$$

$$B = 0.2975 \cdot f_y / 213 + 0.223. \tag{5}$$

$$C = -0.06375 \cdot f_{ck,eq} / 14.4 + 0.109. \tag{6}$$

$$f_{ck,eq} = \frac{f_{ck1} A_{c1} + f_{ck2} A_{c2}}{A_{c1} + A_{c2}}. \tag{7}$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2\lambda^{*2}} \left[ \lambda^{*2} + (1 + 0.25\lambda^*) - \sqrt{(\lambda^{*2} + (1 + 0.25\lambda^{*2}) - 4\lambda^{*2})} \right]. \tag{8}$$

$$E_{sc} = \frac{f_y A_s + f_{ck1} A_{c1} + f_{ck2} A_{c2}}{A_s + A_{c1} + A_{c2}}. \tag{9}$$

$$\lambda_1^* = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{sc}}{E_{sc}}}. \tag{10}$$

$$\lambda_2^* = 0.01\lambda (0.001f_y + 0.781). \tag{11}$$

图 11 为使用修正后承载力计算公式的

计算结果与有限元计算结果对比。可以看出,两者吻合良好且计算结果均偏于保守,大部分误差在 5% 以内,可以用于配筋空心钢管高强混凝土轴压中长柱的承载力计算。

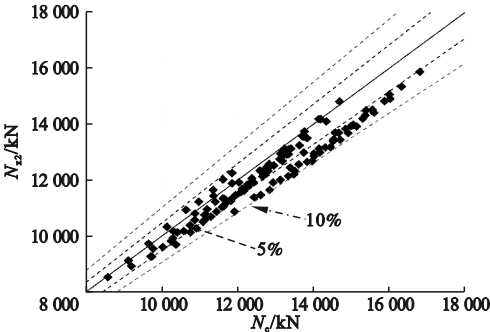


图 11 公式计算值与有限元模拟值对比  
Fig. 11 The comparison between formula calculation and finite element simulation

4 结 论

(1) 配筋空心方钢管高强混凝土柱各组成部分之间在各阶段协同工作良好,管柱混凝土内部的钢筋笼在下降阶段开始发挥作用,预应力筋可以有效延缓受拉侧构件破坏,接触应力主要集中在跨中受拉侧角部约束区与受压侧钢管局部鼓曲上下位置角部约束区。

(2) 随着钢管屈服强度、钢管宽厚比、夹层混凝土强度的增大,普通强度钢筋的增配,构件的极限承载能力及延性也随之增大,长细比提高会降低构件的极限承载力与延性;在长细比较大时,增大材料强度可以有效提高构件力学性能及经济效益。

(3) 基于统一理论,结合有限元模拟结果,对规范中的材料分项系数进行重新拟合,并加入长细比稳定系数,获得了配筋空心方钢管轴压中长柱的计算公式,计算结果与试验结果吻合良好,推导出的公式适用于配筋空心方钢管高强混凝土轴压中长柱构件。

## 参考文献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社,2003.  
(ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures [M] Beijing: Tsinghua University Press,2003.)
- [2] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures; members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100(9):211-228.
- [3] 查晓雄. 空心 and 实心钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2011.  
(ZHA Xiaoxiong. Hollow and solid concrete filled steel tubular structures [M] Beijing: Science Press,2011.)
- [4] 王宏伟,徐国林,钟善桐. 空心率对空心钢管混凝土轴压短柱工作性能及承载力影响的研究[J]. 工程力学,2007,24(10):112-118.  
(WANG Hongwei, XU Guolin, ZHONG Shantong. Study on influence of hollow ratio to bearing capacity of H-CFST [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(10):112-118.)
- [5] ZHAO Y G, YAN X F, LIN S Q. Compressive strength of axially loaded circular hollow centrifugal concrete-filled steel tubular short columns [J]. Engineering structures, 2019, 201(15):109-121.
- [6] 陈宗平,经承贵,宁璠. 螺旋筋增强方钢管混凝土柱的轴压性能及参数分析[J]. 土木工程学报,2018,51(1):13-22.  
(CHEN Zongping, JING Chenggui, NING Fan. Axial compressive behavior and parametric analysis of spiral reinforcement concrete filled square steel tubular columns [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(1):13-22.)
- [7] HU H S, WANG H Z, GUO Z X, et al. Axial compressive behavior of square spiral-confined high-strength concrete-filled steel-tube columns [J]. Journal of structural engineering, 2020, 146(7):04020136.
- [8] DING F X, ZHU J, CHENG S S, et al. Comparative study of stirrup-confined circular concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. Thin walled structures, 2018, 123(7):294-304.
- [9] XIAMUXI A, MAIMAITIMIN M, LIU X, et al. Experimental study on transverse reinforcements of reinforced concrete-filled steel tubular column [J]. Engineering structures, 2019, 199(15):109422. 1-109422. 14.
- [10] 杨志坚,韩嘉明,雷岳强,等. 一种新型的配筋空心钢管高强混凝土柱:CN208533868U [P]. 2019-02-22.  
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, LEI Yueqiang, et al. A new type of reinforced hollow high strength concrete-filled steel tube column: CN208533868U [P]. 2019-02-22.)
- [11] 韩嘉明. 配筋空心钢管高强混凝土轴压短柱有限元分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020.  
(HAN Jiaming. Finite element analysis of reinforced hollow high strength concrete filled steel tube short columns under axial compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [12] 李旭. 配筋空心方钢管高强混凝土轴压短柱力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2022.  
(LI Xu. Behavior of reinforced hollow high strength concrete-filled square steel tube short columns under axial compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.)
- [13] 张亚雯. 配筋空心方钢管高强混凝土纯弯构件受力性能分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2021.  
(ZHANG Yawen. Flexural behaviour of reinforced hollow square steel tube high strength concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [14] 周剑. 预制混凝土空心模剪力墙应用技术研究[D]. 北京:清华大学,2015.  
(ZHOU Jian. Study on the application technology of shear walls with precast concrete hollow moulds [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [15] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press,2007.)
- [16] ZHAO X B, LIANG H J, LU Y Y, et al. Size effect of square steel tube and sandwiched concrete jacketed circular RC columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 166:105912.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)