

内置型钢的圆钢管混凝土构件轴压承载力计算方法

毛文婧, 史艳莉, 王文达

(兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为适应现代结构不断向高耸、重载、大跨等方向发展的趋势,将内置型钢钢管混凝土应用于柱结构设计中。采用 ABAQUS 有限元软件建立内置型钢圆钢管混凝土轴压短柱受力全过程分析的数值模型,对已有的内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力的试验数据进行计算和验证。分析了该类构件在轴压作用下的应力-应变全过程曲线、截面应力分布及各部件之间的相互作用力;探究了材料强度、型钢含钢率、钢管含钢率及型钢截面形式等主要参数对内置型钢钢管混凝土组合柱强度指标的影响规律。研究结果表明:内置型钢对核心混凝土形成了双重约束作用,使核心混凝土的强度有所提高;型钢、混凝土和钢管之间的协同工作有效提高了柱的承载力及延性;型钢含钢率和型钢截面形式对应变变化影响较小。最后,提出了适用于内置型钢圆钢管混凝土短柱轴压承载力的简化计算公式,公式计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 内置型钢钢管混凝土柱; 轴压; 有限元分析; 数值模拟; 承载力

中图分类号: TU 398⁺.9 文献标志码: A 文章编号: 1671-9379(2021)11-0037-10

DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.005

A Calculation Method for the Bearing Capacity of Steel Reinforced Concrete-Filled Circular Steel Tubular Stub Columns Subjected to Axial Compression

MAO Wenjing, SHI Yanli, WANG Wenda

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

MAO Wenjing;cemaowj@163.com

Abstract: A design of steel reinforced concrete-filled steel tubular column is applied to adapt to the development trend of tower, heavy-load and long-span. A finite element model(FEM) of steel reinforced concrete-filled circular steel tubular stub column is established to investigate its mechanical behavior under axial compression using ABAQUS. The existing test data of bearing capacity of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns are calculated and verified. The axial compressive stress-strain curve, section stress distribution, and the contact force between different components are analyzed. The influence of main parameters on the strength index of steel reinforced concrete filled steel tubular columns subjected to axial compression are studied. The parameters include steel strength, concrete strength, internal profiled steel ratio, steel tube ratio and section form of profiled steel. The results show that the core concrete strength increases because of a dual confine on core concrete from internal profiled steel. The bearing capacity and ductility of composite column are improved as profiled steel, concrete and steel tube work together. Finally, simplified formulas for predicting the ultimate bearing capacity of steel reinforced concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axial compression are proposed, and the calculation results agree well with test results.

收稿日期: 2020-06-09; 收到修改稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51468037, 51768038)

作者简介:

毛文婧(1990), 女, 博士研究生, 主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。E-mail: cemaowj@163.com。

史艳莉(1977), 女, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。

通信作者:

王文达(1976), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构、混合结构及结构抗火性能方面的研究。

E-mail: wangwd@lut.edu.cn。

Keywords: steel reinforced concrete-filled steel tubular column; axial compression; finite element analysis; numerical simulation; load bearing capacity

近年来,随着我国建筑结构的不断发展,越来越多的结构趋于向高耸、大跨、重载等方向发展,而框架柱作为结构承载的主要竖向构件,其强度、刚度和稳定性对整体结构的受力性能有很大影响。钢管混凝土结构由于具有承载力高、延性好、抗震和防火性能好、施工方便、工期短等优点,在工业厂房、地铁站台、高层和超高层建筑、住宅以及桥梁结构中得到了广泛应用^[1-2]。随着建筑结构高度的不断刷新,钢管混凝土结构的形式也在不断地发展,将型钢埋置于钢管混凝土中形成的内置型钢钢管混凝土结构可以进一步提高结构的整体刚度和极限承载力,并减小柱截面尺寸^[3]。王清湘等^[4-6]通过进行相同参数下的内置型钢钢管混凝土和钢管混凝土轴压承载力对比试验,发现核心混凝土中插入型钢后,其承载力提高了 14.8%,延性也有明显改善。内置型钢钢管混凝土应用于建筑结构中而展现出的诸多优良力学性能使其逐渐得到了学者的关注。

目前,已有部分学者对内置型钢钢管混凝土柱进行了研究,KATO^[7]、朱美春等^[8]对小截面尺寸、内置不同形式型钢的圆形或方形钢管混凝土轴压柱进行了试验研究;何益斌等^[9]、陈明杰^[10]、DING 等^[11]进行了不同几何参数、内置型钢形式和边界条件等内置型钢钢管混凝土轴压短柱的试验研究;刘晓等^[12]、赵同峰等^[13]均以韩林海^[14]提出的考虑钢管对核心混凝土约束作用的本构模型为基础,对核心混凝土的本构模型进行了修正,考虑型钢含钢率及强度对延性的提高作用;邓远征等^[15]、尧国皇等^[16]、孙珊珊等^[17]以及李敏^[18]给出了内置型钢圆钢管混凝土轴压短柱的承载力计算公式。

目前,国内钢结构设计规范或规程多以钢管混凝土构件为主,上述研究以及规范中均没有明确给出内置型钢后该类组合柱的设计方法,由于荷载取值、材料设计指标取值、规范可靠度指标等诸多方面的差异,欧洲规范 Eurocode 4^[19]中提出的在钢管中配置型钢或钢筋并填充混凝土的设计方法并不能直接用于我国的实际工程中。本文在现有试验及研究结果的基础上,对内置十字形圆钢管混凝土轴压短柱的受力机理进行了详细分析,对影响该类柱承载力的因素进行了研究,得到了内置不同形式型钢的圆形钢管混凝土短柱在轴向荷载作用下的承载力简化计算公式,以期为实际工程提供参考。

1 内置型钢钢管混凝土柱模型

内置型钢钢管混凝土柱的截面形式有很多种,目前工程中较常用的有内置十字形或工字形钢,外钢管为圆形、方形或矩形截面的组合柱。典型内置型钢钢管混

凝土构件的截面形式如图 1 所示。在核心混凝土中配置型钢,可以有效延缓或抑制核心混凝土中斜裂缝的产生和发展,提高柱的延性和整体稳定性。本文采用有限元软件 ABAQUS 建立内置十字形圆钢管混凝土柱分析模型,根据现有规范及试验数据,拟定了有限元分析的主要参数范围,如表 1 所示。模型主要参数包括柱的直径 D 、钢管壁厚 t 、型钢截面尺寸、边界条件、长细比 λ 、钢材与混凝土界面间的相互作用和材料强度。为真实模拟试验情况,在有限元中建立厚度为 10 mm 的加载板模型,以避免钢管和混凝土在受压过程中产生应力集中。

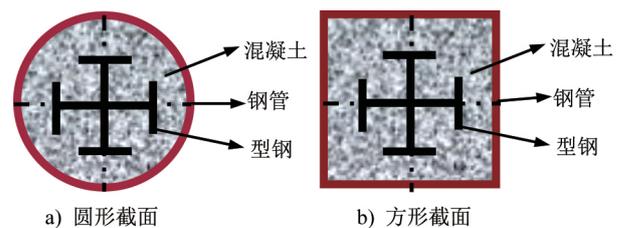


图 1 内置型钢钢管混凝土构件截面示意

Fig. 1 Schematic diagram of cross section of steel reinforced concrete-filled steel tubular columns

表 1 内置型钢钢管混凝土柱承载力分析参数

Tab. 1 Analysis parameters of bearing capacity of steel reinforced concrete-filled steel tubular columns

参数	取值	默认值
截面直径 D/mm	200, 400, 800, 1 000	400
混凝土强度 f_{cu}/MPa	30, 40, 50, 60, 90	60
钢管强度 f_{ty}/MPa	235, 345, 390, 420	345
型钢强度 f_{sy}/MPa	235, 345, 390, 420	345
钢管含钢率 α_{st}	0.04~0.20	0.10
型钢含钢率 α_{ss}	0.04~0.10	0.05
型钢形式	十字形钢, 工字形钢	十字形钢

1.1 模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 对内置型钢的钢管混凝土柱进行建模计算,各部件均采用 8 节点完全积分格式的三维实体单元 (C3D8)。参考界面传力性能的研究成果及文献^[14],钢管与核心混凝土、混凝土与内置型钢界面间的切向力采用库伦摩擦模型模拟,即假定界面可以传递剪应力,直至剪应力达到临界值 τ_{crit} ,界面间产生相对滑动;计算时采用允许“弹性滑动”的公式,界面剪应力在滑动过程中恒定取 τ_{crit} 不变,摩擦系数取 0.6。法向接触采用硬接触,即垂直于接触面的压力可以完全地在各

部件界面间传递。假定加载板与混凝土和型钢界面间没有黏结滑移,钢管、内置型钢和核心混凝土与加载板间均采用“Tie”绑定约束来保证加载端板与各部件间共同受力。有限元模型网格划分及边界条件如图 2 所示。

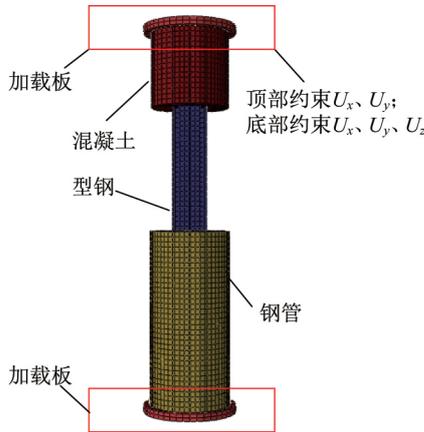


图 2 组合柱有限元模型
Fig. 2 FEM of composite column

钢管和内置型钢采用等向弹塑性模型,满足 von Mises 屈服准则,普通低碳钢采用二次塑流模型作为描述其塑性性能的应力-应变曲线(式(1)),高强钢采用文献[14]中的线性强化模型。

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

表 2 试件主要参数及试验结果

Tab. 2 Main parameters and test results of specimens

试件编号	$D \times t \times L / \text{mm}$	f_{cu} / MPa	f_{sy} / MPa	f_{ty} / MPa	λ	α_{ss}	N_{ue} / kN	N_{cal} / kN	N_{cal} / N_{ue}	数据来源
HS-A1	166 × 2.7 × 576	68.9	288.00	318.00	14	0.129 6	2 700	2 346	0.868 889	文献[4]
HS-A2	166 × 2.7 × 576	68.9	288.00	318.00	14	0.129 6	2 650	2 346	0.885 283	
HS-B1	168 × 3.7 × 586	68.9	288.00	318.00	14	0.129 6	2 835	2 556	0.901 587	
HS-B2	168 × 3.7 × 586	68.9	288.00	318.00	14	0.129 6	2 862	2 556	0.893 082	
HS-C1	216 × 3.0 × 760	68.9	288.00	269.00	14	0.071 9	3 640	3 437	0.944 231	
HS-C2	216 × 3.0 × 760	68.9	288.00	269.00	14	0.071 9	3 550	3 437	0.968 169	文献[9]
SC2	219 × 4.0 × 876	63.0	303.00	337.00	16	0.114 0	3 900	3 814	0.977 949	
SC3	219 × 4.0 × 876	63.0	308.00	337.00	16	0.139 6	4 504	4 023	0.893 206	
SC5	219 × 4.0 × 876	63.0	303.00	289.00	16	0.118 0	4 186	3 871	0.924 749	
M4	273 × 5.0 × 819	74.8	332.84	378.73	12	0.040 0	5 523	5 820	1.053 775	
M6	273 × 5.0 × 819	74.8	256.78	357.06	12	0.024 0	5 600	5 756	1.027 857	
M7	273 × 5.0 × 819	74.8	256.78	319.79	12	0.025 0	5 639	6 133	1.087 604	

注: D 为圆钢管横截面外径; t 为钢管壁厚; L 为构件在弯曲平面内的计算长度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{sy} 为型钢钢材屈服强度; f_{ty} 为钢管钢材屈服强度; λ 为构件长细比(参考圆钢管混凝土柱计算公式: $\lambda = 4L/D$); $\alpha_{ss} = A_{ss}/A_c$, 为型钢含钢率; N_{ue} 、 N_{cal} 分别为试验和有限元计算得到的承载力。

式中: $\epsilon_c = 0.8f_y/E_s$; $\epsilon_{e1} = 1.5\epsilon_c$; $\epsilon_{e2} = 10\epsilon_{e1}$; $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_{e1}$; $A = 0.2f_y/(\epsilon_{e1} - \epsilon_c)^2$; $B = 2A\epsilon_{e1}$; $C = 0.8f_y + A\epsilon_c^2 - B\epsilon_c$; f_y 为钢材屈服强度; E_s 为钢材弹性模量。

采用塑性损伤模型来模拟核心混凝土的塑性能。本文采用文献[20]中提出的适用于 ABAQUS 有限元分析的核心混凝土应力-应变本构模型,该模型考虑了约束效应系数 ξ 和混凝土强度 f'_c 的影响,具体表达式为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^{\gamma} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \epsilon/\epsilon_0$; $y = \sigma/\sigma_0$; $\sigma_0 = f'_c$; $\epsilon_0 = \epsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$; $\epsilon_c = (1\ 300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$; ϵ 、 σ 分别为材料应变和应力; ϵ_0 、 σ_0 分别为峰值应变和峰值应力; f'_c 为核心混凝土的圆柱体抗压强度; ξ 为约束效应系数。其余参数含义详见文献[14]。

式(2)的适用范围为: $\xi = 0.2 \sim 5.0$, $f_y = 200 \sim 700$ MPa, $f_{cu} = 30 \sim 120$ MPa, $\alpha_{st} = 0.03 \sim 0.20$ 。混凝土塑性损伤模型中采用能量破坏准则来定义混凝土受拉软化性能,断裂能及开裂应力取值参考文献[14]。

1.2 模型验证

目前搜集到的国内进行的内置型钢钢管混凝土轴压短柱的试验数据共有 47 份,包括 30 个圆形截面试件(直径 $D = 159 \sim 273$ mm,钢管壁厚 $t = 2.7 \sim 5.0$ mm)和 17 个方形截面试件(直径 $D = 195 \sim 210$ mm,钢管壁厚 $t = 2.1 \sim 5.6$ mm,内置 2 个工字形钢)。本文采用上述有限元建模方法,对这些已有的数据进行了计算,以验证上述建模方法及所选取材料模型的正确性,部分试件的尺寸及参数如表 2 所示。

表 2 中试件荷载-应变关系的对比如图 3 所示。可以看出,在弹性阶段,试验曲线与计算得到的曲线基本重合,而极限承载力有所差别,计算得到的承载力更保守,但二者整体偏差较小。这可能是由于内置型钢后核心混凝土受到钢管和型钢的双重约束,型钢包裹区域混凝土的强度有所提高。而在有限元计算中,所有区域的混凝土均采用相同的应力-应变本构模型。此外,试验中试件仅仅使钢管上表面与加载板焊接,而有限元计算中忽略了型钢、混凝土与加载板间的黏结滑移。图 4 为试件 M7

通过试验得到的破坏模式与计算结果的对比。可以看出,试件 M7 在轴向荷载作用下,靠近柱头钢管处有明显的局部鼓曲,计算得到的破坏模式与试验结果一致。图 5 为所搜集到的内置型钢钢管混凝土轴压短柱承载力的试验数据与计算得到的承载力的对比。 N_{cal}/N_{ue} 的平均值为 0.961,标准差为 0.066,变异系数为 6.84%。分析结果表明,采用上述建模方法得到的计算结果与试验结果基本吻合,有限元分析方法可以应用于内置型钢钢管混凝土短柱轴压性能的分析研究。

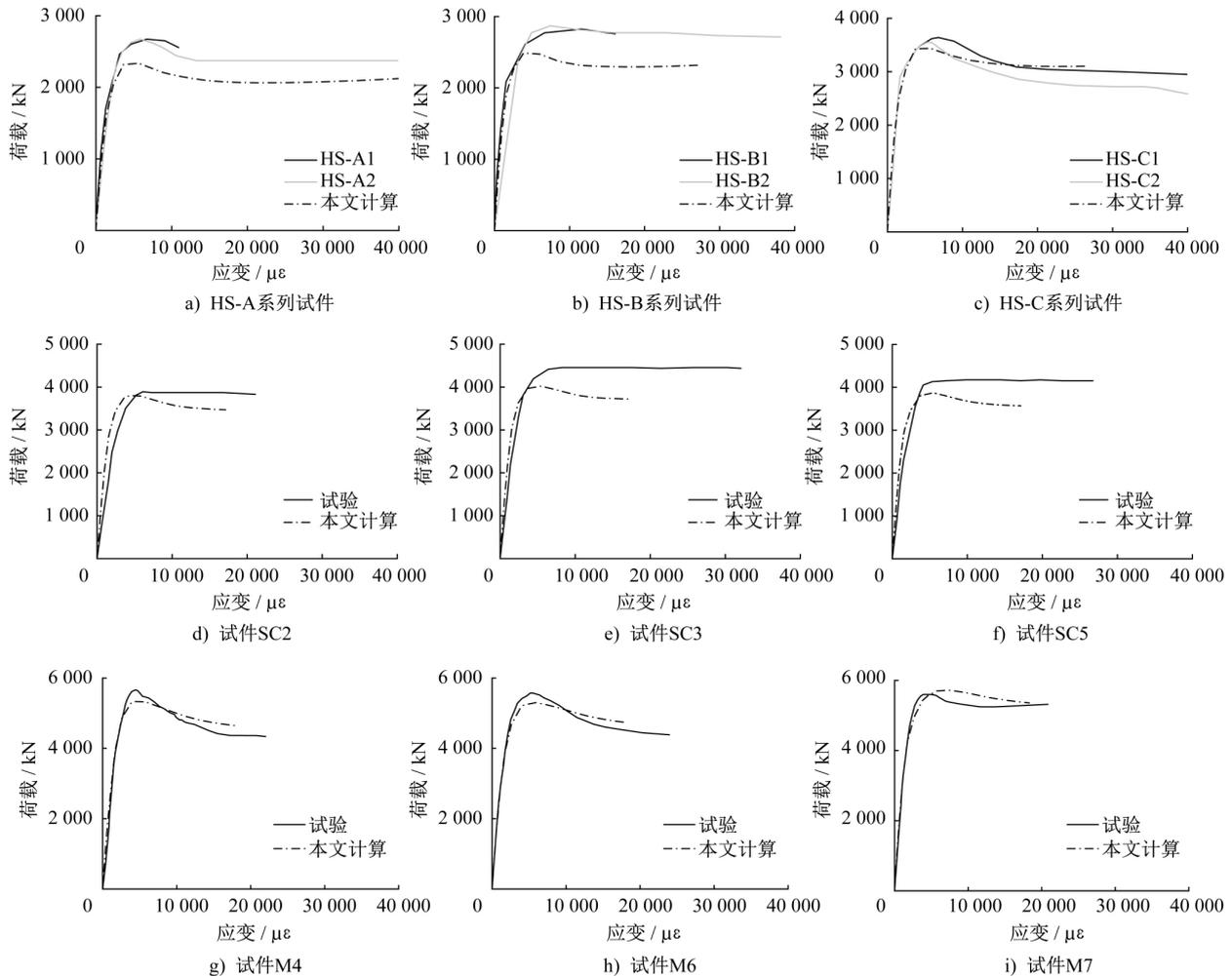


图 3 轴压荷载-平均纵向应变关系曲线

Fig. 3 Axial compression load-average longitudinal strain curves

2 受力性能分析

采用上述建模方法建立内置十字形钢圆钢管混凝土柱有限元模型,分析其受力过程及工作机理。

内置型钢圆钢管混凝土柱的名义应力-应变关系及各部件应力-应变关系在受力过程中的变化规律如图 6 所示。为了使对比更清晰,将钢管和型钢的应力均除以 10。从图中可以看出,在内置型钢钢管混凝土柱尚未达到极限承载力时钢材已经发生屈服,且钢管和内置型钢几乎同时屈服,此时核心混凝土达到抗压强度值 f'_c ,应力继续

增大。内置型钢钢管混凝土柱达到极限强度时,由于圆钢管对混凝土均匀且较好的约束效应,核心混凝土纵向应力的峰值点略有滞后。随着核心混凝土应力的降低,组合柱强度也随变形的增加而逐渐降低,由于此算例较大的约束效应系数,其应力-应变关系曲线的下降段较为平缓,表现出较好的延性。

图 7 为钢管中截面点处纵向应力和横向应力在受全过程中的变化。钢管在受力初期纵向应力大幅增加,随轴向力的增大,试件中截面逐渐发生鼓曲。此时核心混

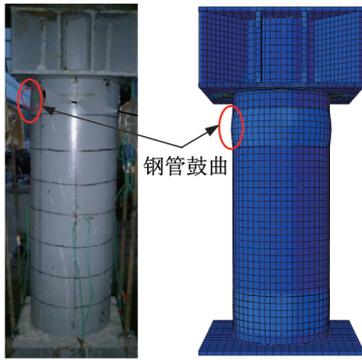


图 4 试件 M7 的试验与模拟破坏模式对比

Fig. 4 Comparison between test and simulated failure modes of specimen M7

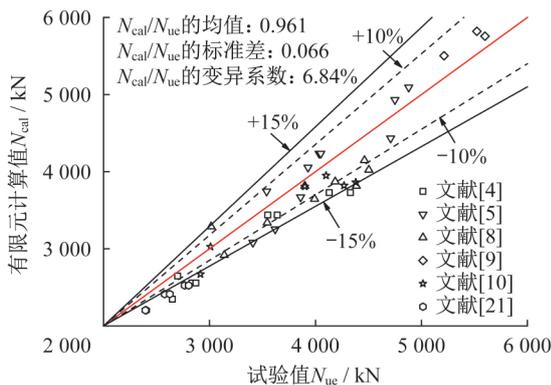


图 5 承载力试验结果与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between test results and simulation results of bearing capacity

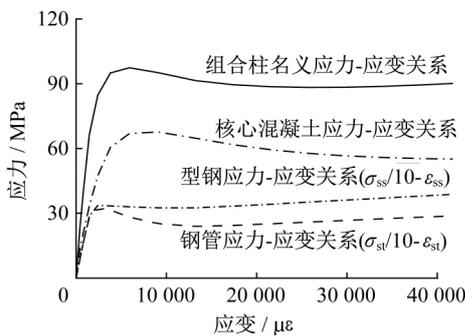


图 6 内置型钢钢管混凝土柱受轴压作用时应力-应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of steel reinforced concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compression

混凝土的横向变形大于钢管的横向变形,从而使混凝土与钢管之间产生相互作用力。随后,钢管横向应力开始增加,钢管折算应力达到屈服后纵向应力开始下降,此时钢管进入塑性变形,纵向应力和横向应力间满足 von Mises 屈服准则。随着钢管钢材进入强化阶段,纵向应力和横向应力又有增大的趋势,但幅度不大。

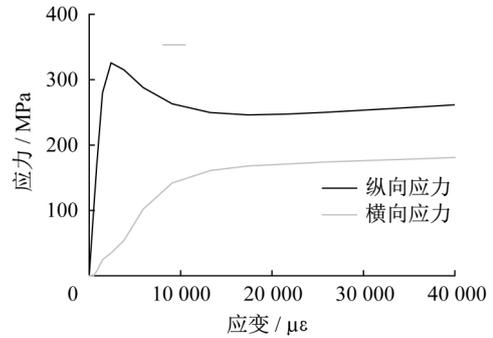


图 7 钢管应力-应变关系曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of steel tube

图 8 给出了内置型钢钢管混凝土柱在不同高度处钢管应力的变化,图中纵向应力为负值,横向应力为正值。可以看出:内置型钢钢管混凝土柱不同高度处纵向应力与横向应力的变化规律与图 7 中的分析较为一致;钢管不同高度处纵向应力几乎同时达到峰值并发生屈服,横向应力在 1/2 柱高处,即在中截面达到最大值,并向两端靠近加载板方向递减,这与短柱在轴压作用下的变形有关。图 9 为型钢纵向应力-应变关系曲线。从图中可以看出:受荷初期腹板和翼缘上的应力变化一致,应力均迅速增加;腹板略先于翼缘屈服,型钢中心点由于处于截面的几何中心,故其强化最为明显。

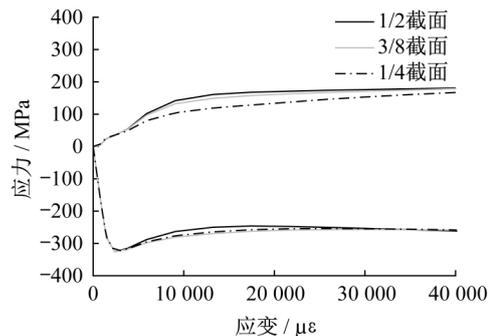


图 8 不同高度处钢管截面应力变化

Fig. 8 Stress distribution of steel section with different heights

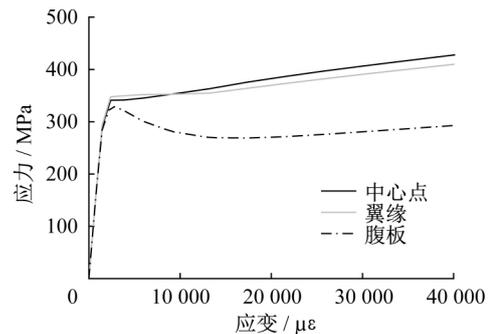


图 9 型钢纵向应力-应变关系曲线

Fig. 9 Longitudinal stress-strain curves of profiled steel

图 10 为由算例得到的典型的 $\sigma_{sc}-\epsilon$ 关系曲线,其中 σ_{sc} 为内置型钢钢管混凝土柱的名义应力。参考文献[22]对特征点的取值方法,将 $\sigma_{sc}-\epsilon$ 曲线大致分为以下几个阶段:当钢管钢材折算应力达到比例极限时, a 点作为弹性段终点,其对应的荷载为极限荷载的 60%~70%; b 点为弹塑性性段的终点,即钢管折算应力达到屈服强度;随后进入塑流段 bc ,此时核心混凝土纵向应力达到极限强度;该算例约束效应系数较小, $\sigma_{sc}-\epsilon$ 关系曲线在 c 点后经历了短暂的强化,之后进入下降段 cde ,其中 d 点取应变达到 2 倍极限应变时对应的应力点, e 点对应的应变为 20 000 $\mu\epsilon$ 。

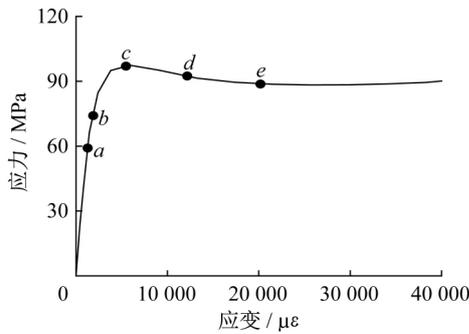


图 10 典型 $\sigma_{sc}-\epsilon$ 关系曲线
Fig. 10 Typical $\sigma_{sc}-\epsilon$ curve

图 11 给出了图 10 中各特征点对应的中截面核心混凝土纵向应力的分布。从图中可以看出:弹性段核心混凝土应力较小,直到钢材屈服时才基本达到 f'_c ,整体截面应力分布较均匀;试件达到极限承载力时,由于型钢对中心处混凝土形成了二次约束,型钢包裹的核心混凝土区域的纵向应力最大,达到了 $1.5f'_c$,型钢翼缘与混凝土接触位置的应力分布有较明显的梯度; d 点时中心部分核心混凝土应力持续增加,应力随中心距的增加而均匀递减;在应变为 20 000 $\mu\epsilon$ 时,全截面的核心混凝土纵向应力都减小了,但中心部分的应力值仍达到了 $1.6f'_c$ 。由此可知内置十字形钢包裹部分混凝土形成了较强的双重约束作用,其应力值与型钢包裹外混凝土应力有较大差距,这使得核心区混凝土强度进一步提高。

3 轴压强度承载力计算

目前 Eurocode 4^[19] 给出了内置型钢(钢筋)的圆形或矩形钢管混凝土组合柱的承载力计算公式,如式(3)所示,该公式为几种部件强度的简单叠加;文献[4]、[9]、[15]、[18]等用经验系数回归的方法给出了以约束效应系数、型钢含钢率为参数的内置型钢圆钢管混凝土组合柱的承载力计算公式,但公式中对参数的考虑不够完善,且未对内置型钢的形式进行区分。

$$N_{pl,rd} = A_n f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3)$$

式中: $N_{pl,rd}$ 为组合柱轴压承载力; A_n 为钢管截面面积; f_{yd}

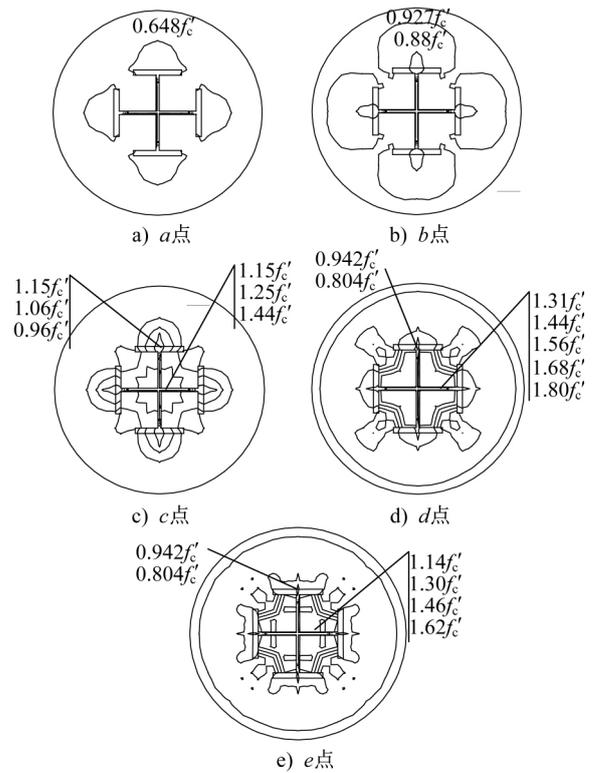


图 11 核心混凝土截面纵向应力分布
Fig. 11 Longitudinal stress distribution of core concrete section

为钢管强度; A_c 为混凝土截面面积; f_{cd} 为混凝土强度; A_s 为配置型钢或钢筋的截面面积; f_{sd} 为型钢或钢筋对应的强度。

《钢管混凝土结构技术规范》(GB 5093—2014)^[23] 中公式 5.1.2 将钢管和核心混凝土看作一个整体,给出了钢管混凝土轴压强度承载力计算公式:

$$N_u = A_{sc} f_{scy} \quad (4)$$

式中: A_{sc} 为组合柱截面面积; f_{scy} 为组合柱在应变为 ϵ_{scy} 时对应的强度。

通过上述分析,内置型钢钢管混凝土柱承载力的计算仍然可以以钢管混凝土柱设计方法为基础。本文基于公式(4),采用型钢含钢率 α_{ss} 来表征型钢对组合柱的贡献,对影响该类构件承载力的因素进行计算和分析,给出了内置工字形钢和十字形钢两种型钢截面形式的圆钢管混凝土柱的承载力计算公式。

3.1 承载力应变指标

根据全过程分析,文献[14]中建议的钢管混凝土组合柱 $\sigma_{sc}-\epsilon$ 关系全曲线上应变指标 ϵ_{scy} 的计算公式如式(5)所示。该计算仍以上文典型算例的截面尺寸及参数范围为基准,结合相应规范及结构发展的需求,在如下参数范围内,即 $f_{sy}(f_{ty}) = 235 \sim 500$ MPa, $f_{cu} = 30 \sim 90$ MPa, 型钢含钢率 $\alpha_{ss} = 0.04 \sim 0.01$, 钢管含钢率 $\alpha_{st} = 0.05 \sim 0.20$ 计算

内置型钢后组合柱应变的变化情况,以确定纵向应变指标。

$$\epsilon_{scy} = 1\ 300 + 12.5 f'_c + (600 + 33.3 f'_c) \xi^{1.2} \quad (5)$$

为节省篇幅,图 12 和图 13 分别取参数范围内的部分混凝土强度及型钢强度,研究型钢含钢率对内置十字形圆钢管混凝土组合柱名义应力的影响。从图中可以看出,当混凝土强度或型钢强度保持不变时,型钢含钢率对峰值应力有较大的影响,但对与图 10 对应的各特征点的应变值影响不大,且内置型钢后组合柱与钢管混凝土柱的应变变化不大,其他混凝土强度及型钢强度下应力-应变曲线呈现出的规律较为一致。

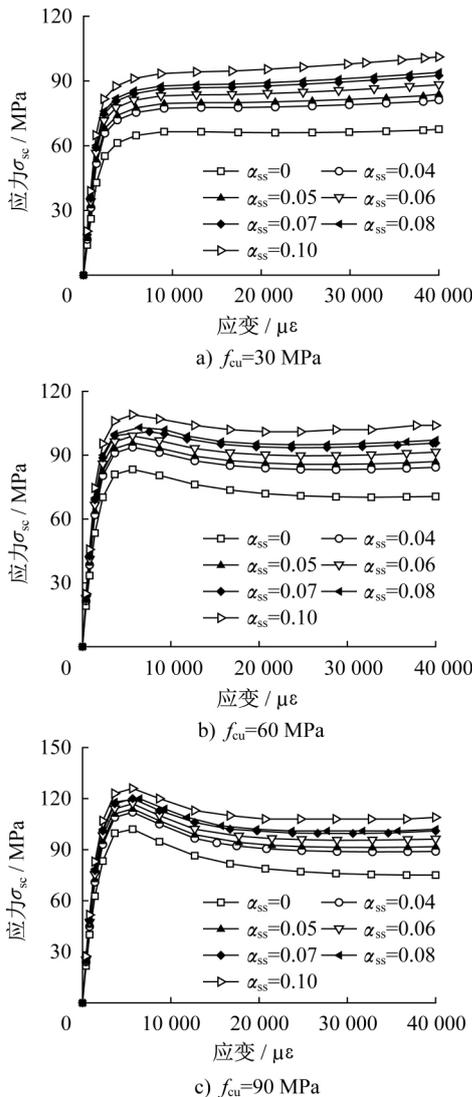


图 12 不同混凝土强度下型钢含钢率分析
Fig. 12 Steel ratio analysis of profiled steel with different concrete strengths

图 14 对比了不同型钢截面形式下型钢含钢率对组合柱名义应力-应变关系曲线的影响,图中空心图例表示内置十字形钢,实心图例表示内置工字形钢(篇幅所限,图例中未进行标注)。从图中可以看出,不同的内置型钢截面

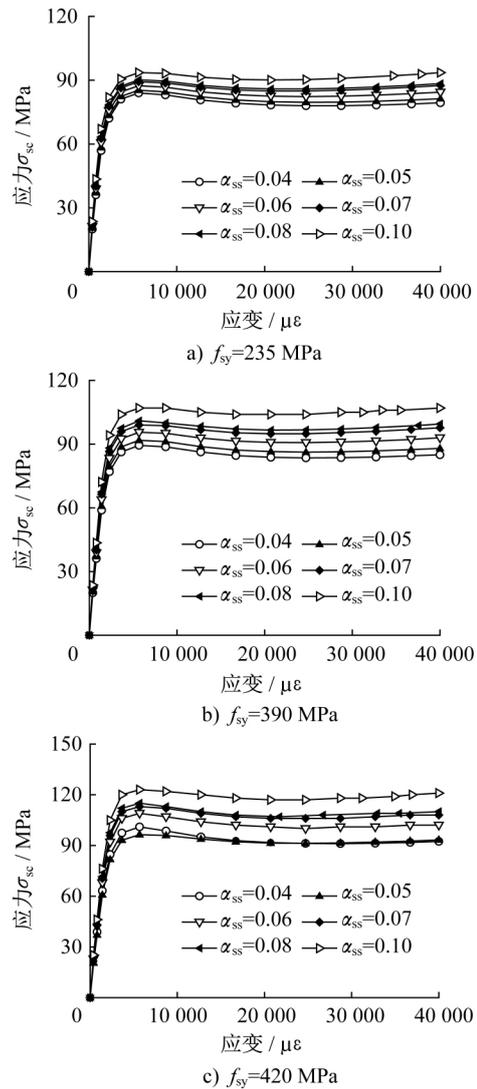


图 13 不同型钢强度下型钢含钢率分析
Fig. 13 Steel ratio analysis of profiled steel with different strengths

形式对特征点应变的影响较小,各曲线峰值应变几乎相等。因此对于内置型钢钢管混凝土,在工程常用参数范围内,仍可采用公式(5)来计算应变指标 ϵ_{scy} 。

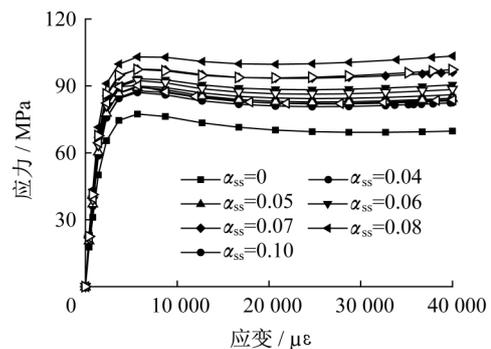


图 14 不同型钢截面形式下含钢率分析
Fig. 14 Steel ratio analysis with different profiled steel forms

3.2 承载力指标确定

取与本文 3.1 节中相同范围的参数,并定义系数 $\gamma = f_{scy}/f_{ck}$ (f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值),计算不同参数下内置十字形钢圆钢管混凝土柱轴心抗压强度指标的变化规律。

图 15 为不同混凝土强度下 γ 与约束效应系数 ξ 之间的关系曲线,图 16 为混凝土强度及钢管强度相同时,不同型钢钢材强度下 γ 与型钢含钢率 α_{ss} 之间的关系曲线(为节省篇幅,只选取上述典型算例中的混凝土和钢管材料强度)。可以看出,当约束效应系数 $\xi < 2$ 时,钢管强度 f_{ty} 对 γ 影响很小,可以忽略,随着 ξ 值的增大,不同钢管强度下 γ 值的差异逐渐增大,但整体仍相差不大。型钢强度 f_{sy} 对 γ 值影响较小, γ 与 ξ 之间成二次函数关系, α_{ss} 与 γ 成线性关系,其他相应参数下的规律较为一致。参考《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28:2012)^[24] 中对圆钢管混凝土截面约束效应系数的建议取值范围,取约束效应系数 ξ 为 0.5 ~ 2.5,在此范围内可认为钢管强度对 γ 值影响较小。

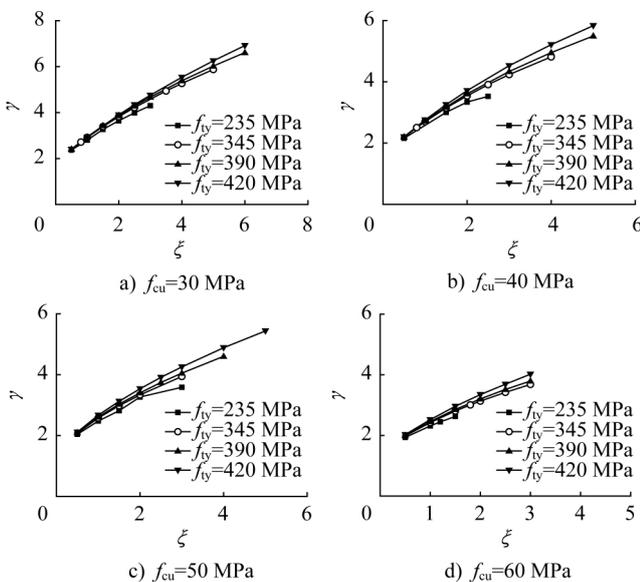


图 15 不同混凝土强度下 γ - ξ 关系曲线

Fig. 15 γ - ξ curves with different concrete strengths

采用相同的计算方法,对内置工字形钢圆钢管混凝土柱进行计算,并对计算数据进行回归处理得到约束效应系数 ξ 、型钢含钢率 α_{ss} 与强度指标 f_{scy} 之间的函数关系为:

$$f_{scy} = (A + B\xi + C\xi^2 + D\alpha_{ss})f_{ck} \quad (6)$$

$$A = 1.212 \quad (7)$$

$$B = \begin{cases} 0.14f_{ty}/235 + 0.912 & \text{(十字形钢)} \\ 0.1715f_{ty}/235 + 1.1535 & \text{(工字形钢)} \end{cases} \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} -0.0732f_{ck}/20 + 0.0257 & \text{(十字形钢)} \\ -0.09447f_{ck}/20 + 0.001794 & \text{(工字形钢)} \end{cases} \quad (9)$$

$$D = \begin{cases} 4.284f_{sy}/235 + 0.192 & \text{(十字形钢)} \\ 0.4387f_{sy}/235 - 0.3902 & \text{(工字形钢)} \end{cases} \quad (10)$$

考虑材料本构模型的合理性及应用的便利性,式(6)在如下参数范围内适用: $f_{ty} = 200 \sim 500$ MPa, $f_{sy} = 200 \sim 500$ MPa, $f_{cu} = 30 \sim 90$ MPa, $\alpha_{ss} = 0.04 \sim 0.10$, $\alpha_{st} = 0.04 \sim 0.20$ 。

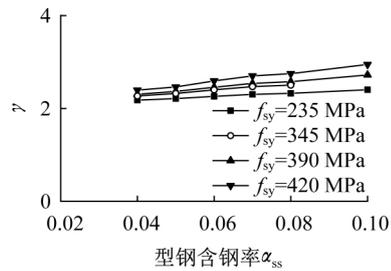


图 16 γ - α_{ss} 关系曲线

Fig. 16 γ - α_{ss} curves

3.3 公式验证及对比

内置型钢圆钢管混凝土截面轴压承载力按文献[4]、[9]、[15]、[18]和[19]中拟合公式及本文式(6)~式(10)的计算结果 N_{uc} 与收集到的试验结果 N_{uc} 的对比如表 3 和图 17 所示。

表 3 内置型钢钢管混凝土柱轴压承载力简化计算值与试验值对比

Tab.3 Comparison between simplified calculation and test results of axial compression bearing capacity of steel reinforced concrete-filled steel tubular stub columns

公式来源	N_{uc}/N_{uc}	μ	N_{uc}/N_{uc} 均方差
文献[4]	0.732~1.328	1.031	0.084
文献[9]	0.791~1.421	0.954	0.137
文献[15]	0.738~1.122	1.047	0.084
文献[18]	1.230~1.898	1.094	0.096
文献[19]	1.023~1.474	1.255	0.114
本文式(6)~式(10)	0.845~1.324	1.007	0.064

注: μ 为 N_{uc}/N_{uc} 的平均值。

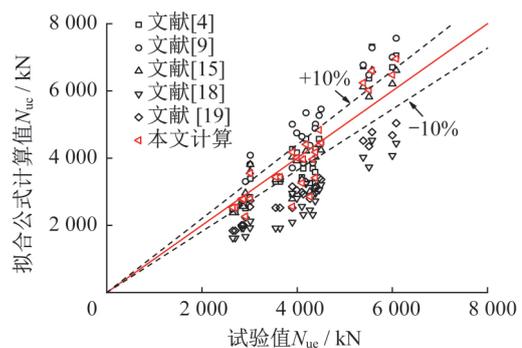


图 17 轴压承载力计算结果与试验结果对比

Fig. 17 Comparison between calculation results and test results of bearing capacity under axial compression

图 17 和表 3 中结果显示: Eurocode 4^[19] 给出的公式计算结果较为保守, N_{ue}/N_{uc} 的均值和均方差分别为 1.255、0.114; 文献[4]、[9]、[15]、[18]中部分 N_{ue}/N_{uc} 值偏差较大, 误差超过了 $\pm 10\%$; 本文公式计算所得的 N_{ue}/N_{uc} 的均值和变异系数分别为 1.006 6、0.063 6。可见采用本文公式(6)~(10)计算得到的内置型钢圆钢管混凝土柱轴压承载力与试验值最为接近, 且总体上略偏于安全。

4 结论

本文基于 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了内置型钢圆钢管混凝土柱数值模型, 通过对内置型钢圆钢管混凝土柱在轴压作用下的受力性能和影响参数进行计算分析, 可得到以下主要结论:

(1) 将内置型钢圆钢管混凝土应用于柱结构设计中时, 内置型钢的存在对核心混凝土中心区域产生了双重约束作用, 使混凝土强度得到强化, 约束作用加强, 对该类柱承载力和延性的提高有重要作用。

(2) 由于核心混凝土本构关系仍采用钢管混凝土中的混凝土本构模型, 内置型钢的有无、型钢强度及型钢截面形式对应变指标影响不大, 因此仍可采用钢管混凝土柱应变指标的计算方法来计算内置型钢圆钢管混凝土轴压短柱的应变指标。

(3) 通过数值回归方法, 本文给出了内置型钢圆钢管混凝土柱的承载力计算公式, 在给定的参数适用范围内, 计算结果与试验结果吻合较好, 可用于指导内置型钢圆钢管混凝土柱的工程设计。

参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 8-32.
ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures[M] 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 8-32. (in Chinese)
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 3-5.
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 3-5. (in Chinese)
- [3] ESPINOS A, ROMERO M L, LAM D. Fire performance of innovative steel-concrete composite columns using high strength steels[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 106: 113-128. DOI:10.1016/j.tws.2016.04.014.
- [4] 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试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 44-49. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2003.06.007.
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, 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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2003.06.007. (in Chinese)
- [5] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.035.
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.035. (in Chinese)
- [6] 王清湘, 赵大洲, 关萍. 轴心受压钢管-钢管混凝土组合短柱力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 36-40. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2004.03.008.
WANG Qinxian, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. Study of the mechanical properties of axially loaded section steel and steel tube short columns filled with steel-reinforced concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 36-40. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2004.03.008. (in Chinese)
- [7] KATO B. Column curves of steel-concrete composite members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 39(2): 121-135. DOI:10.1016/s0143-974x(96)00030-2.
- [8] 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. DOI:10.15951/j.tmgxb.2006.06.006.
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, 2006, 39(6): 35-41. DOI:10.15951/j.tmgxb.2006.06.006. (in Chinese)
- [9] 何益斌, 肖阿林, 郭健, 等. 钢管-钢管自密实高强混凝土轴压短柱承载力——试验研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 29-33. DOI:10.13577/j.jnd.2010.0405.
HE Yibin, XIAO Alin, GUO Jian, et al. Bearing capacity of stub columns composed of structural steel and self-compacting high-strength concrete-filled steel tube: experimental research[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 29-33. DOI:10.13577/j.jnd.2010.0405. (in Chinese)
- [10] 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 Mingjie. Study on the mechanical properties of CFST column with the built-in cross I shape column [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 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. DOI:10.1016/j.tws.2017.07.021.
- [12] 刘晓, 王连广, 王兵. 钢管-钢管混凝土组合短柱轴压承载力研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 589-592, 608.

- LIU Xiao, WANG Lianguang, WANG Bing. On the axial-load bearing capacity of short steel tube column reinforced with structural steel and concrete [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(4): 589-592, 608. (in Chinese)
- [13] 赵同峰, 李宏男, 刘宏. 方钢管钢骨混凝土轴压短柱极限承载力计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 220-223.
- ZHAO Tongfeng, LI Hongnan, LIU Hong. Ultimate bearing capacity calculation on axially-loaded short columns of square steel tube filled with steel-reinforced concrete[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29(2): 220-223. (in Chinese)
- [14] 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: 186-195.
- HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structure—theory and practice[M] 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 186-195. (in Chinese)
- [15] 邓远征, 王清湘. 钢骨-钢管混凝土轴压短柱承载力研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(S1): 291-293. DOI: 10. 13204/j. gyjz2005. s1. 090.
- DENG Yuanzheng, WANG Qingxiang. Study on load-carrying capacity on steel-concrete-filled steel tube column [J]. Industrial Construction, 2005, 35 (S1): 291-293. DOI: 10. 13204/j. gyjz2005. s1. 090. (in Chinese)
- [16] 尧国皇, 孙素文, 李秀明. 轴心受压型钢-钢管混凝土柱力学性能的研究[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(6): 26-32.
- YAO Guohuang, SUN Suwen, LI Xiuming. Research on hollow steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to axial-compression[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(6): 26-32. (in Chinese)
- [17] 孙珊珊, 赵均海, 薛颢, 等. 钢骨-方钢管自密实高强混凝土短柱的轴压承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 95-99.
- SUN Shanshan, ZHAO Junhai, XUE Hao, et al. Axial bearing capacity of square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 95-99. (in Chinese)
- [18] 李敏. 钢管钢骨混凝土组合柱抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2012.
- LI Min. Study on seismic performance of the steel tube filled with steel-reinforced concrete composite column [D]. Shenyang: Shenyang University, 2012. (in Chinese)
- [19] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings; EN 1994-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [20] 刘威, 韩林海. 钢管混凝土受轴向局压荷载时的工作机理研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 19-27. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2006. 06. 004.
- LIU Wei, HAN Linhai. Behaviors of concrete-filled steel tubes subject axial local compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 19-27. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2006. 06. 004. (in Chinese)
- [21] 杨包生, 李斌, 吴波, 等. 钢骨-钢管混凝土组合柱轴压承载力试验和有限元分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(3): 268-270. DOI: 10. 16559/j. cnki. 2095-2295. 2008. 03. 019.
- YANG Baosheng, LI Bin, WU Bo, et al. Experimental research and finite element analysis on behavior of axially loaded circular steel tube column filled with steel-reinforced concrete[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008, 27(3): 268-270. DOI: 10. 16559/j. cnki. 2095-2295. 2008. 03. 019. (in Chinese)
- [22] 潘友光, 钟善桐. 钢管砼的轴压本构关系(上)[J]. 建筑科学学报, 1990, 11(1): 10-20. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 1990. 01. 002.
- PAN Youguang, ZHONG Shantong. Constitutive relationship of concrete filled steel tubes under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 1990, 11(1): 10-20. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 1990. 01. 002. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [24] 中国工程建设标准化协会. 钢管混凝土结构技术规程: CECS 28:2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures: CECS 28:2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)