

引用本文: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 Wen-da, LI Xian-jun, FAN Jia-hao. Design Method Research 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.

DOI: 10.19815/j.jace.2020.02013

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

王文达, 李鲜琚, 范家浩

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为使内置型钢钢管混凝土构件在实际工程应用中有矩可循、有法可依,采用 ABAQUS 有限元软件建立了内置型钢钢管混凝土构件轴压模型,通过与已有试验结果对比验证了数值模拟的可靠性。基于内置型钢钢管混凝土力学性能及工作机理,分析了混凝土强度、钢管强度、内置型钢强度、钢管含钢率以及内置型钢含钢率等参数对构件承载力的影响;以提出的计算方法为基础,分析了不同荷载效应比 ψ 对该类构件可靠度的影响。考虑实际工程参数,分别提出了内置型钢钢管混凝土轴压短柱强度承载力计算公式与内置型钢钢管混凝土长柱的稳定承载力计算公式,建议了内置型钢钢管混凝土轴压构件的设计方法。以稳定系数 φ 为参数,提出了内置型钢钢管混凝土轴压构件极限承载力与稳定承载力的统一计算方法。研究结果表明:基于提出的计算方法得到的内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力可靠度指标基本符合统一标准规范要求。

关键词:内置型钢钢管混凝土柱;轴压构件;有限元分析;设计方法;可靠度分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)06-0011-10

Design Method Research and Reliability Analysis of Concrete-filled Steel Tubular Columns with Inner Steel Under Axial Compression

WANG Wen-da, LI Xian-jun, FAN Jia-hao

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

Abstract: In order to make the concrete-filled steel tubular (CFST) members with inner steel has moment and laws to follow in practical engineering, the numerical model was established by ABAQUS, the reliability of numerical simulation was verified by comparing simulation results with experimental results. Based on the mechanical properties and working mechanism of CFST, the influences of various influencing parameters, such as concrete strength, steel pipe strength, built-in section steel strength, steel ratio of steel pipe and steel ratio of built-in section steel on the bearing capacity of components were analyzed. Based on the formula proposed, the influence of different load effect ratios ψ on the reliability of this type of component was analyzed. Considering the actual engineering parameters, the calculation formula of the strength and bearing capacity of the short columns of CFST with inner steel under axial compression was

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768038, 51468037)

作者简介: 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.edu.cn.

proposed, and the design method of this kind of component was suggested. Taking the stability coefficient φ as a parameter, the calculation formula of the stability and bearing capacity of the long columns of CFST with inner steel was proposed. The research results show that based on the calculation method proposed, the reliability index of the bearing capacity of this kind of component basically meets the requirements of the unified standard.

Key words: CFST column with inner steel; axial compressive member; finite element analysis; design method; reliability analysis

0 引言

内置型钢钢管混凝土柱(Concrete Filled Steel Tube with Encased Section Steel, SCFST)以钢管混凝土结构(Concrete Filled Steel Tube, CFST)为基础,将型钢内置于核心混凝土中,使其在定截面的条件下提升组合柱的极限承载能力,实现在可行性范围内的结构优化。内置型钢管混凝土柱常见截面类型如图 1 所示。中国目前建筑物趋势显著向高耸、大跨、重载方向发展,在重载方面有明显优势的内置型钢钢管混凝土柱有了愈加广泛的应用需求,因此该类构件受到工程界的关注,研究学者对此展开了系列研究。王清湘等^[1-4]对不同钢管截面类型的(圆形钢管或方形钢管以及 L 型)内置型钢钢管混凝土长短柱进行了轴压试验,对内置型钢钢管混凝土轴压构件的受力性能、工作机理、延性和极限承载力、稳定承载力进行研究,分析讨论了材料强度、约束效应系数、配骨指标、钢管含钢率、型钢含钢率以及延性约束指标等因素对该类构件承载力的影响^[5],基于不同理论研究,给出了不同的内置型钢钢管混凝土组合柱的承载力计算公式^[6-8]。

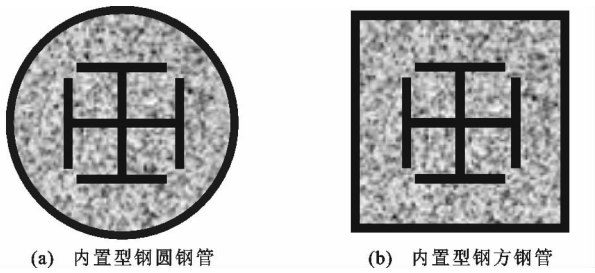


图 1 钢管截面
Fig. 1 Section of Steel Tube

中国尚无明确给出内置型钢钢管混凝土组合柱设计方法的规范,使该结构在实际应用中受到限制。本文基于专家学者提出的研究成果,对内置型钢钢管混凝土长短柱进行分析研究,提出了内置型钢钢管混凝土轴压构件的设计方法并对其可靠度进行分析,以期在实际工程的应用提供依据。

1 有限元模拟

1.1 有限元模型的建立

钢材材性均采用有明显屈服平台的二次塑流模型^[9],如图 2 所示,其中, σ 为应力, ϵ 为应变, f_p, f_y, f_u 分别为钢材的比例极限强度、屈服强度和极限抗拉强度, $\epsilon_e, \epsilon_{e1}, \epsilon_{e2}, \epsilon_{e3}$ 为应变特征值。

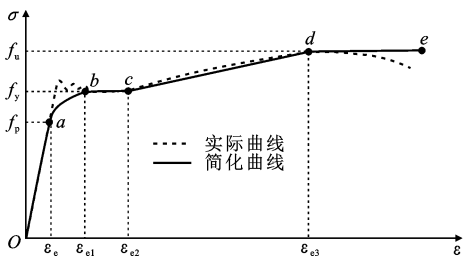


图 2 钢材应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain Curve of Steel

钢材弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^6$ MPa,泊松比 $\nu_s = 0.3$ 。混凝土材性采用刘威^[10]的总结,在其基础之上提出了修正后的适用于 ABAQUS 有限元计算的核心混凝土纵向应力-应变关系模型,表达式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \epsilon/\epsilon_0, y = \sigma/\sigma_0$; σ_0 为混凝土峰值应力, $\sigma_0 = f'_c, f'_c$ 为混凝土圆柱体抗压强度; ϵ_0 为混凝土峰值应变, $\epsilon_0 = \epsilon_e + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$, $\epsilon_e = (1\,300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$, ξ 为约束效应系数; β_0 为混凝土应力-应变曲线阶段与约束效应系数相关的变量; $\eta = 2$ 。

在实际结构工程中,真正意义上的轴心受压构件是不存在的,而是考虑了初始缺陷引起的附加内力影响而成为的压弯构件,故采用有限元软件模拟分析时,取初始偏心距 $e_0 = l/1\,000$, l 为构件设计长度。

钢管与内置型钢均采用四节点完全积分格式的三维壳单元,在三维壳体单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分,核心混凝土部分采用八节

点完全积分格式的三维实体单元。

钢管、混凝土和加载板之间的接触均采用 Tie 绑定,钢管与核心混凝土采用库仑摩擦模型来模拟界面切向力的传递,计算时采用一个允许“弹性滑动”的罚摩擦公式,在滑动过程中界面剪应力保持不变,参考文献[11],圆钢管与核心混凝土界面摩擦因数取为 0.6,方钢管与核心混凝土界面摩擦因数取为 0.4。型钢采用 ABAQUS 软件中的 Embedded Region 命令将其嵌入混凝土中,不考虑型钢与核心混凝土之间的滑移,其处于理想状态下。

1.2 模型验证

采用上述方法建立的内置型钢钢管混凝土轴心受压构件有限元模型,可较为便利地模拟内置型钢钢管混凝土构件受轴压荷载作用下受力过程并计算构件轴力-纵向平均应变关系,图 3 给出了内置型钢钢管混凝土短柱荷载-纵向平均应变($N-\epsilon$)关系曲线和内置型钢钢管混凝土长柱荷载-纵向变形($N-u_m$)关系曲线,并与试验测量结果及其他学者计算结果对比^[11-14],其中参考文献曲线为参考文献中模拟计算的曲线。

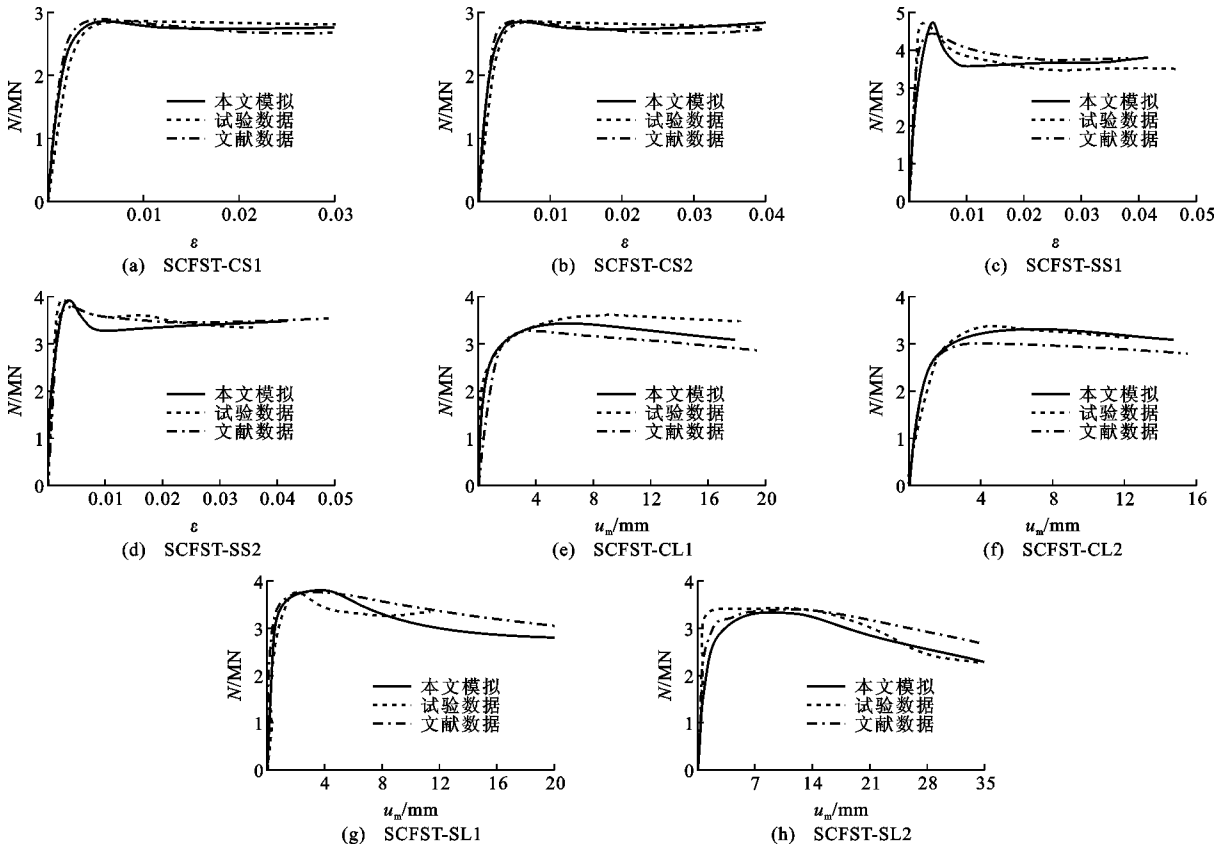


图 3 试验与模拟 $N-\epsilon, N-u_m$ 曲线对比

Fig. 3 Comparison Between Experimental and Simulated $N-\epsilon, N-u_m$ Curves

试件参数如表 1 所示, D 与 B 分别为圆钢管的截面外直径与方钢管的截面外边长, t 为钢管厚度, f_c 为核心混凝土轴心抗压强度, f_{ty} 为钢管屈服强度, f_{sy} 为内置型钢屈服强度, λ 为长细比,圆钢管 $\lambda=4l/D$,方钢管 $\lambda=2\sqrt{3}l/B$,约束效应系数 $\xi=f_{ty}A_{ty}/(f_cA_c)$, A_{ty} 为钢管截面面积, A_c 为混凝土横截面面积, ρ 为内置型钢率, $\rho=f_{sy}A_{sy}/(f_cA_c)$, A_{sy} 为内置型钢截面面积。试件编号“SCFST”代表内置型钢钢管混凝土柱,连接符后第 1 个字母 C,S 分别代表圆钢管和方钢管,第 2 个字母 S,C 分别代表短柱和长柱,即 SCFST-CS 为内置型钢圆钢管混凝土短

表 1 模型基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Model

试件编号	D/mm	B/mm	t/mm	f_c/MPa	f_{ty}/MPa	f_{sy}/MPa	A_s/mm^2
SCFST-CS	450	450	10.0	50	345	345	2 887
SCFST-SS	400	400	9.5	50	345	345	2 887
SCFST-CL	450	450	10.0	50	345	345	2 887
SCFST-SL	400	400	9.5	50	345	345	2 887

注: A_s 为型钢的截面面积;短构件的 l 为 1 200 mm,长构件的 l 为 2 400 mm。

柱,SCFST-SS 为内置型钢方钢管混凝土短柱,SCFST-CL 为内置型钢圆钢管混凝土长柱,SCFST-

SL 为内置型钢方钢管混凝土长柱。

图 3 为不同类型试件的试验与模拟曲线对比。图 4 给出了内置型钢钢管混凝土构件轴压承载力的试验结果(N_{uc})与数值计算结果(N_{uc})的对比情况。结果表明:对于轴压承载力,内置型钢圆钢管混凝土短柱 N_{uc} 与 N_{uc} 比值的平均值和均方差分别为 1.020 05 和 0.000 98;内置型钢方钢管混凝土短柱 N_{uc} 与 N_{uc} 比值的平均值和均方差分别为 1.006 09 和 0.000 43;内置型钢圆钢管混凝土长柱 N_{uc} 与 N_{uc} 比值的平均值和均方差分别为 1.047 30 和 0.000 63;内置型钢方钢管混凝土长柱 N_{uc} 与 N_{uc} 比值的平均值和均方差分别为 1.000 11 和 0.000 15,可见数值模拟计算结果与试验结果吻合良好,建模方法合理。在试验数据缺少的情况下,有限元模拟计算可作为轴压承载力计算分析的依据。

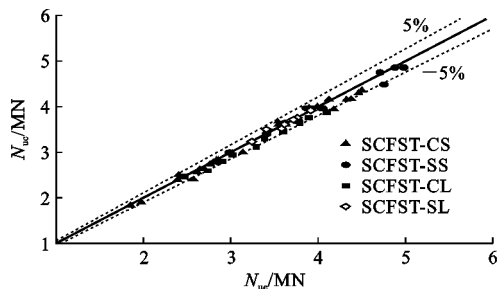


图 4 轴压承载力试验值与理论计算值对比

Fig. 4 Comparison Between Experimental Values and Theoretical Calculation Values of Axial Bearing Capacity

2 承载力计算

目前国内外研究者对此类轴压构件的研究基于不同的理论,采用不同方法,提出了参数各异的轴压承载力计算公式,如文献[15]把内置型钢钢管混凝土构件的轴压强度看作混凝土轴压强度与内部型钢轴压强度的简单叠加,提出其轴压承载力计算公式;Eurocode 4(2004)给出了内配钢骨钢管混凝土柱的承载力计算公式。

《钢管混凝土结构设计规范》(GB 50936—2014)[16]中 5.1.2 公式将钢管和核心混凝土看作整体,提出 f_{sc} 为钢管混凝土整体构件在应变为 ϵ_{sc} 时对应的强度。对于内置型钢钢管混凝土柱轴压承载力,仍可用钢管混凝土柱轴压承载力计算方法作为基础。本文以统一理论为理论基础,考虑内置型钢与钢管混凝土结构之间的相互影响,提出可供参考的承载力计算公式。

2.1 参数分析

在钢管混凝土构件中内置型钢对构件承载力的

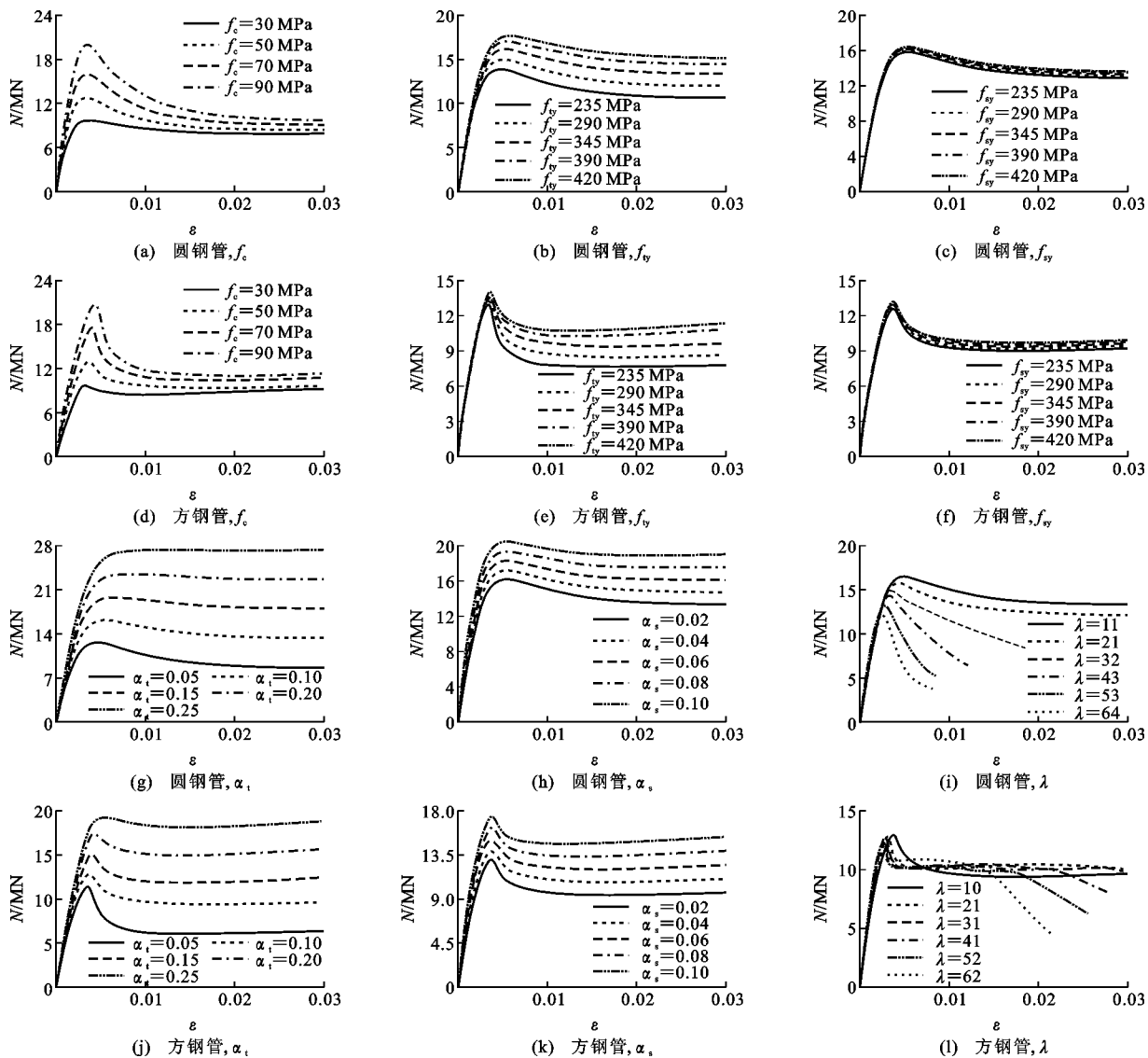
提升,不是钢管混凝土承载力与型钢承载力的简单叠加,参考文献[17]提出:因为型钢的存在使核心混凝土斜裂缝的产生得到延缓,从而构件的承载力得到提高;核心混凝土对内置型钢的约束作用也增强了型钢局部屈曲强度。型钢与钢管混凝土之间的相互作用使其所组成的内置型钢钢管混凝土组合构件并不仅仅是两者的叠加,而是更加优化的组合结构形式,为了确定内置型钢钢管混凝土柱承载力的影响因素,做如下参数分析。

2.1.1 核心混凝土轴心抗压强度

图 5(a),(d)为核心混凝土轴心抗压强度 f_c 不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\epsilon$ 关系曲线。在其他参数不变,只改变 f_c 的条件下,构件的极限承载力随着 f_c 的提高而提高。当 $f_c \geq 50$ MPa 时,随着混凝土强度的增加,承载力提高幅度有所下降,即以 $f_c = 50$ MPa 为界限,构件极限承载力的涨幅呈现先增加后减小的趋势,说明相同 f_c 的改变量对极限承载力影响不同, f_c 对轴压构件极限承载力的增强效果在 50~70 MPa 区间达到峰值。随着 f_c 的增加,承载力在到达峰值点后,荷载下降幅度加快,构件延性降低。4 个不同混凝土强度的构件在弹性阶段曲线没有重合,呈现差异性,是因为这个时候材料都处于弹性阶段,钢材与混凝土一般处于单独受力,此时由混凝土主要承担荷载,故混凝土强度不同是使该段曲线不重合的主要原因;进入弹塑性阶段后,抗压强度增大幅度明显;随着 f_c 的增加,达到极限承载力时构件的屈服应变增加,之后 f_c 影响逐渐减小;内置型钢方钢管轴压构件相较圆钢管而言,两者 $N-\epsilon$ 曲线趋势大致相同,构件的极限承载力随着 f_c 的提高而提高,但是等量 f_c 的变化对内置型钢方钢管混凝土构件抗压承载力的增强效果更加明显。

2.1.2 钢管屈服强度

图 5(b),(e)为钢管屈服强度 f_{ty} 不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\epsilon$ 关系曲线。在其他参数不变,只改变 f_{ty} 的条件下,构件的极限抗压强度随着 f_{ty} 的提高而提高。随着 f_{ty} 的提高,对构件极限承载力的增幅影响基本不变。随着 f_{ty} 的增加,承载力到达峰值点后,荷载下降逐渐平缓,构件延性提高。此时构件在弹性阶段曲线重合,因为混凝土强度相同,在此阶段单独受力情况下承载力是近似相同的,而钢管强度的不同并不会改变混凝土的材性,只会在相互作用时改变其受力状态,故在弹性阶段时强度相同的核心混凝土荷载, $N-\epsilon$ 关系曲

图 5 不同参数 SCFST 的 $N-\varepsilon$ 关系曲线Fig. 5 $N-\varepsilon$ Curves of SCFST Under Various Parameters

线相同;进入弹塑性阶段后,构件承载力增大幅度明显;随着 f_{ty} 的提高,达到极限承载力时构件的屈服应变基本保持不变,之后 f_{ty} 的影响也基本保持不变。内置型钢方钢管轴压构件相较圆钢管而言,两者 $N-\varepsilon$ 曲线趋势大致相同, f_{ty} 对内置型钢方钢管混凝土构件的影响如 f_c 一样,等量 f_{ty} 的变化对内置型钢方钢管混凝土构件抗压承载力的增强效果更加明显。随着 f_{ty} 的提高,对方钢管构件承载力的增幅效果减弱,承载力增长率逐渐降低。这是因为相较方钢管而言,圆钢管对核心混凝土的约束作用更强,受力更加均匀,传力效果更优。

2.1.3 型钢屈服强度

图 5(c), (f) 为型钢屈服强度 f_{sy} 不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\varepsilon$ 关系曲线。在其

他参数不变的情况下,构件的极限承载力随着 f_{sy} 的提高而提高,因为有限元模拟模型内置型钢截面面积较小, $N-\varepsilon$ 关系曲线提升不是很明显,随着 f_{sy} 的提高,对构件承载力的增幅影响基本不变。随着 f_{sy} 的增加,承载力到达峰值点后,荷载下降平缓,构件延性提高。 $N-\varepsilon$ 曲线起伏与参数 f_{ty} 的 $N-\varepsilon$ 关系曲线基本保持一致。内置型钢方钢管混凝土轴压短柱在 f_{sy} 增加时,构件承载力的涨幅是处于上升状态, f_{sy} 的改变对构件极限承载力的增幅效果逐步加强。

对于内置型钢钢管混凝土轴压柱而言,单位面积上相同的钢管屈服强度和型钢屈服强度变量,即 $\Delta f_{ty} = \Delta f_{sy}$, 对内置型钢圆钢管混凝土构件截面承载力贡献基本相等,而单位截面面积的钢管屈服强度增加,对内置型钢方钢管混凝土柱而言却不及型

钢屈服强度增加对构件极限承载力的提升效果,即相同单位面积的钢管屈服强度变量对内置型钢圆钢管混凝土截面承载力贡献小于型钢屈服强度变量。

2.1.4 钢管含钢率

图 5(g),(j)为钢管含钢率 α_t 不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\epsilon$ 关系曲线。在其他参数不变的情况下,构件极限承载力随着 α_t 的提高而提高,在核心混凝土与型钢截面面积一定的情况下, α_t 的增加意味着钢管截面面积的增加。由图 5(g),(j)知,构件极限承载力增幅速度随着 α_t 的增加而加快,并且随着 α_t 的增加, $N-\epsilon$ 曲线过峰值点后的下降阶段趋于平缓,构件延性增强,对内置型钢方钢管轴压短构件延性影响尤为明显。

2.1.5 型钢含钢率

图 5(h),(k)为型钢含钢率 α_s 不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\epsilon$ 关系曲线。由此可见,在其他参数不变的情况下,构件整体截面面积及钢管截面面积不变的情况下, α_s 的增加意味着型钢截面面积增加,核心混凝土面积减小。构件极限承载力随着 α_s 的提高而提高,提高幅度随着 α_s 的增加逐渐减小, $N-\epsilon$ 曲线起伏变化基本保持一致,整体构件的延性增加。

对于内置型钢钢管混凝土轴压柱而言, α_t 对应力-应变曲线的影响基本不变, α_s 对应力-应变的影响随着 α_s 的增加, $N-\epsilon$ 曲线幅度逐渐减小,单位截面面积对极限承载力的贡献基本一致。

2.1.6 长细比

图 5(i),(l)所示为长细比不同时内置型钢钢管混凝土轴心受压构件 $N-\epsilon$ 关系曲线。在其他参数不变的情况下,一定范围的内置型钢钢管混凝土轴压长柱承载力随着长细比的增加而降低,其抗压强度由材料强度控制转为稳定性决定。随着长细比的增加,构件的延性降低,可以看出圆钢管构件受长细比影响更加明显。

2.2 承载力指标的确定

由上述可知,相同材料作为不同构件有不同的工作机理和受力性能,对于内置型钢钢管混凝土柱,在一定截面的情况下,除截面尺寸及材料强度等因素,还需考虑不同材料间的相互作用,将内置型钢与钢管混凝土两者的截面抗压强度作为统一整体进行计算。其中内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力计算公式中的承载力指标影响参数见表 2。

2.3 承载力计算方法

合理利用有限元软件建模分析,建立参数如下:

表 2 内置型钢钢管混凝土构件承载力指标影响参数
Tab. 2 Main Indices for Load-bearing Capacity of CFST Columns with Encased Section Steel

影响参数	取值范围	数据来源
f_{ty}/MPa	235~500	《特殊钢管混凝土构件设计规程》(CECS 408:2015)
f_{sy}/MPa	235~500	《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)
f_c/MPa	20~90	《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)
ξ	0.2~5.0	《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)
ρ	0.2~2.5	《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)

f_{ty} 与 f_{sy} 取值范围为 235~420 MPa, f_c 取值范围为 20~90 MPa, ξ 取值范围为 0.2~2.5, ρ 取值范围为 0.2~2, 截面尺寸 $D(B') \times t = 150 \sim 550 (195 \sim 600) \text{ mm} \times 4.5 \sim 20 \text{ mm}$ 的内置型钢钢管混凝土轴压构件模型,利用计算所得数据进行数学统计分析,参考相关文献[9],对内置型钢钢管混凝土轴压短柱极限承载力 N_{uo} 提出以下计算公式

$$N_{uo} = A_{tcs} f_c (A' + B' \xi + C' \xi^2 + D' \rho + E' \rho^2) \quad (2)$$

式中: A' 为约束效应系数; B' 为截面形式对约束效应产生影响的系数; C' 为材料强度比对约束效应产生影响的系数; D' 为截面形式对内置型钢率产生影响的系数; E' 为混凝土强度对内置型钢率产生影响的系数; A_{tcs} 为构件截面面积。

参考文献[9],内置型钢钢管混凝土轴压长柱稳定承载力 N_u 可引入轴压稳定系数 φ 进行计算

$$N_u = \varphi N_{uo} \quad (3)$$

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

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

式中: $\bar{\lambda}_{tcs}$ 为构件的正则长细比, λ_{tcs} 为构件长细比, $\lambda_{tcs} = l_0 / i_{tcs}$, l_0 为构件计算长度, i_{tcs} 为构件的回转半径, $i_{tcs} = \sqrt{I_{tcs} / A_{tcs}}$; E_{tcs} 为构件的弹性模量。

内置型钢钢管混凝土构件计算承载力参数取值见表 3。

2.4 计算方法比较

图 6 给出了本文所提内置型钢钢管混凝土轴压极限承载力计算公式的计算结果(N_{uc})与轴压承载力的试验结果(N_{ue})对比情况,表 4 给出了公式计算结果与试验结果的对比数理分析,结果表明:公式计算结果与试验结果吻合良好。

表 3 内置型钢钢管混凝土构件计算承载力参数取值

Tab.3 Parameter Value of Calculation Formula for Load-bearing Capacity of SCFST

影响系数	B'	C'	D'	E'
圆钢管	1.30	$0.004\,5-1.5(f_c/f_{ty})$	0.8	$-0.000\,60(f_c-20)-0.01$
方钢管	0.85	$0.900-6.75(f_c/f_{ty})$	0.8	$-0.002\,85(f_c/20)-0.01$

注: $A'=1.212$ 。

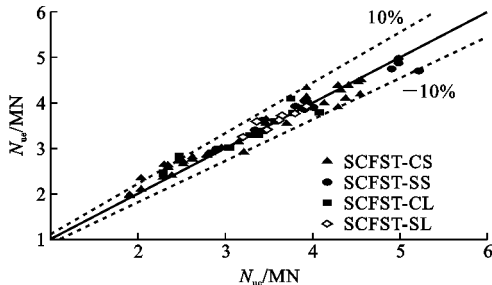


图 6 公式计算结果与试验结果对比

Fig.6 Comparison Between of Calculation Formula and Experimental Results

表 4 公式计算结果与试验结果对比数理分析

Tab.4 Mathematical Analysis of Comparison Between Formula Calculation and Experimental Results

试件编号	SCFST-CS	SCFST-SS	SCFST-CL	SCFST-SL
平均值	1.000 06	1.000 36	1.001 76	1.009 84
均方差	0.007 59	0.001 51	0.001 52	0.000 67

3 可靠度

结构可靠性是在一定的时间内,规定的条件下完成预定结构功能的能力,而可靠度则为对可靠性的量化指标(概率值)^[18]。内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力计算方法中的设计参数等一切不确定因素都为基本随机变量,如截面几何尺寸、材料强度、荷载变异性与计算方法不定性。本文以式(2)为计算方法,对内置型钢钢管混凝土轴压短构件的可靠度进行分析。

3.1 极限状态方程

极限状态是一个结构能够使用的最低状态,以安全等级为二级,考虑分项系数设计方法,结构极限状态方程用函数 Z 表示为

$$Z=K_0R-\gamma_0(\gamma_GS_{GK}+\gamma_QS_{QK})=0 \quad (6)$$

式中: K_0 为计算模式不定性; R 为结构抗力; γ_0 为结构重要性系数; S_{GK} 为永久荷载效应标准值; S_{QK} 为可变荷载效应标准值; γ_G 、 γ_Q 分别为恒载和活载的荷载分项系数。

根据荷载效应对承载力不利情况区分,由永久

荷载控制时, $\gamma_G=1.35$, $\gamma_Q=1.4$;由可变荷载控制时, $\gamma_G=1.2$, $\gamma_Q=1.4$ 。

3.2 抗力统计参数的计算

影响结构构件抗力函数的随机变量因素很多,确定统计参数及分布类型十分困难。为了确定构件计算模式的不定性,需先计算构件承载力实测值与计算值的比值,得出计算模式不定性的均值系数和变异系数。再根据数理统计结合误差传递函数式,进行相关计算^[19]。

$$\mu_R=\mu_{KP}\mu_{RP} \quad (7)$$

$$\delta_R^2=\delta_{KP}^2+\delta_{RP}^2 \quad (8)$$

式中: μ_R 、 δ_R 分别为构件抗力平均值和变异系数; μ_{KP} 、 δ_{KP} 分别为构件计算模式不定性的均值系数和变异系数; μ_{RP} 、 δ_{RP} 分别为构件抗力函数平均值和变异系数。

计算本文抗力函数的统计参数,即

$$\mu_{RP}=\mu_{A_{ics}}\mu_{f_c}(1.212+B'\mu_{\xi}+\mu_C\mu_{\xi}^2+D'\mu_{\rho}+\mu_E\mu_{\rho}^2) \quad (9)$$

$$\sigma_{RP}^2=(1.212+B'\mu_{\xi}+\mu_C\mu_{\xi}^2+D'\mu_{\rho}+\mu_E\mu_{\rho}^2)^2\mu_{f_c}^2\sigma_{A_{ics}}^2+(1.212+B'\mu_{\xi}+\mu_C\mu_{\xi}^2+D'\mu_{\rho}+\mu_E\mu_{\rho}^2)^2\sigma_{f_c}^2\mu_{A_{ics}}^2+(\mu_{A_{ics}}\mu_{f_c})^2[(B'+2\mu_C\mu_{\xi})^2\sigma_{\xi}^2+(D'+2\mu_E\mu_{\rho})^2\sigma_{\rho}^2]+2\mu_{A_{ics}}(\mu_{\xi}^2\sigma_c^2+\mu_{\rho}^2\sigma_E^2) \quad (10)$$

式中: σ_{RP} 为抗力 R_p 的标准差。

3.3 荷载与抗力统计参数

在分析结构可靠度时,各种荷载效应的组合情况影响较大,设计基准期内最大活荷载由任意时刻持久性活荷载与设计基准期内最大临时性荷载相组合。常考虑以下 3 种最常见的荷载效应组合: S_G+S_{LB} , S_G+S_{LZ} , S_G+S_{LW} ,其中, S 为荷载效应,下标 G,L,W 分别表示永久荷载、可变荷载和风荷载,下标 B,Z 分别表示办公室活荷载和住宅建筑的楼盖活荷载。通过查阅相关文献资料^[18-21]及计算相关抗力函数统计参数,对计算可靠度所需荷载与抗力统计参数统一归纳,如表 5 所示。

3.4 可靠度分析

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[21],确定了相关计算参数之后,即可进行可靠度分析,分析时基本参数如下:混凝土采用 C30,C50,C70;钢管及内置型钢采用 Q235,Q345;内置型钢分别采用 I20b,I36a,I45b;钢管壁厚 $t=10,15,20$ mm;荷载效应比 ϕ 取值为 0.25,0.5,1,1.5,2.0;内置型钢圆钢管混凝土截面直径 $D=B=500$ mm,当钢管壁厚改变时,只改变核心混凝土面积,截面直径不变。基本参数为混凝土 C50,钢材采用 Q235,内置型钢采用 I36a,钢管壁厚 $t=10$ mm。

表 5 荷载与抗力统计参数

Tab. 5 Statistical Parameters of Load and Resistance			
指标分类	参数	μ_{KP}	δ_{KP}
作用效应	S_G	1.060 000	0.070 000
	S_{LB}	0.700 000	0.290 000
	S_{LZ}	0.859 000	0.233 000
	S_{LW}	0.999 000	0.193 000
混凝土	C30	1.410 000	0.190 000
	C50	1.320 000	0.135 000
	C70	1.280 000	0.110 000
钢材	Q235	1.080 000	0.080 000
	Q345	1.090 000	0.070 000
几何参数	A_{tcs}	1.000 000	0.050 000
计算模型	SCFST-CS	1.000 058	0.087 151
	SCFST-CL	1.001 761	0.038 941
	SCFST-SS	1.000 359	0.038 896
	SCFST-SL	1.009 838	0.026 105

结构在安全等级为二级时的可靠度指标 $\beta=3.2$ 为延性破坏,则暂规定可靠度指标范围为 3.2 ± 0.25 。内置型钢钢管混凝土轴压构件可靠度计算结果如图 7 所示。可知,随着荷载效应比 ψ 的增加,可靠度指标 β 逐渐减小,主要是因为活载与恒载相较而言,变异性大,故可靠度随着 ψ 的增加而降低。各参数对方钢管与圆钢管的影响趋势不变,只是因为抗力函数不同,故对结构可靠度的影响程度不同。

对于内置型钢圆钢管混凝土轴压构件,在基本参数不变,内置型钢采用 I45b, $\psi=2.0$ 时,可靠度指标 $\beta=3.028\ 7$ 最小;基本参数不变,钢管壁厚 $t=20\text{ mm}$, $\psi=0.25$ 时,可靠度指标 $\beta=5.145\ 2$ 最大;对于内置型钢方钢管混凝土轴压构件而言,在基本参数不变,钢管壁厚 $t=20\text{ mm}$, $\psi=2.0$ 时,可靠度指标 $\beta=2.803\ 9$ 最小;不考虑荷载类别的情况下,基

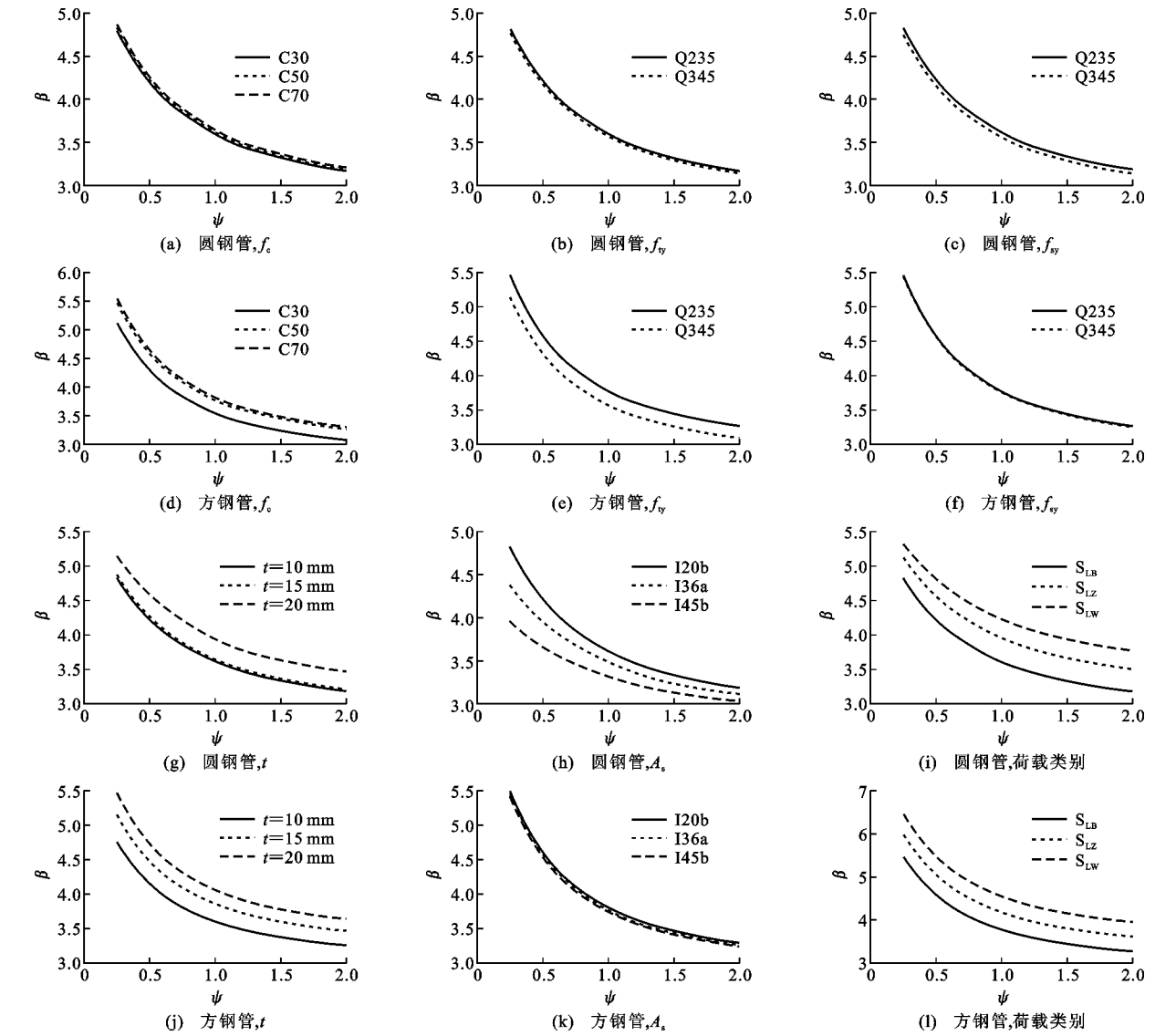


图 7 不同影响参数 SCFST 的 β - ψ 关系曲线

Fig. 7 β - ψ Curves of SCFST Under Various Parameters

本参数不变,混凝土采用 C70, $\phi=0.25$ 时,可靠度指标 $\beta=5.537$ 最大。

随着 f_c 的增加,圆钢管的 β 逐渐降低,方钢管的 β 逐渐增加;可靠度指标 β 随着 f_{ty} 和 f_{sy} 的增加逐渐降低;可靠度指标 β 随着 t 的增加,圆钢管不均匀增大,而方钢管逐渐降低;可靠度指标 β 随着内置型钢面积的增加而降低。

4 结 语

(1)通过对 68 个内置型钢钢管混凝土轴压构件的有限元模拟研究,比较分析荷载-纵向平均应变曲线与试验曲线,两者吻合良好。以此建模方法所计算的内置型钢钢管混凝土轴压构件数据可作为数值分析、量化极限承载力的准确依据。模拟计算承载力低于构件实际承载力,具有安全储备。

(2)通过对内置型钢钢管混凝土参数分析研究,可得影响轴压构件截面承载力的主要因素。将材料强度和截面面积与内部构件相互作用综合考虑,以参考文献[9]承载力计算公式为基础,提出影响约束效应系数与内置型钢率的系数 B', C', D' 与 E' , 建议了设计方法。在给定的参数适用范围内,计算结果与试验结果吻合良好。

(3)由本文提出的承载力计算方法为抗力函数,对内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力可靠度在不同荷载效应比 ϕ 的影响下进行分析。结果表明,内置型钢钢管混凝土轴压构件承载力可靠度指标基本符合统一标准要求。计算方法简单有效且精度较高,可以作为工程应用公式。

参考文献:

References:

[1] 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.

[2] 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 Mei-chun, WANG Qing-xiang, FENG Xiu-feng. Behavior of Axially-loaded Square Steel Tube Short Columns Filled with Steel-reinforced Self-consolidating High-strength Concrete[J]. China Civil Engi-

neering Journal, 2006, 39(6):35-41.

[3] 杜国锋,宋 鑫,余思平. 内置钢筋组合 L 形截面钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8):82-89.
DU Guo-feng, SONG Xin, YU Si-ping. Experimental Research on Axially Loaded Composite L-section Steel Tubular Short Columns Filled with Steel-reinforced Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8):82-89.

[4] 丁发兴,李 刚,龚永智,等. 钢管-圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(9):3625-3630.
DING Fa-xing, LI Gang, GONG Yong-zhi, et al. Behavior of Tubular Stub Columns of Axially Loaded Steel-reinforced Concrete-filled Circular Steel [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(9):3625-3630.

[5] 史艳莉,王文达,王亚伟. 内配型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能及参数分析[J]. 工程力学, 2014, 31(增):201-206.
SHI Yan-li, WANG Wen-da, WANG Ya-wei. Mechanical Behavior and Parametric Study of Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Encased Profiled Steel Under Axial Compression[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S):201-206.

[6] HE Y B, XIAO A L. Limit Analysis of Steel Tubular Columns Filled with Structural Steel[C] //ASCCS. Proceedings of the 8th International Conference on Steel-concrete Composite and Hybrid Structures. Harbin:ASCCS, 2006:544-550.

[7] 肖阿林,何益斌,黄 频,等. 钢管-钢管高强混凝土长柱稳定承载力分析[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2008, 25(1):61-64.
XIAO A-lin, HE Yi-bin, HUANG Pin, et al. Analysis of Stability Bearing Capacity of Steel Tubular Slender Columns Filled with Steel-reinforced-concrete [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(1):61-64

[8] 何益斌,肖阿林,黄 频. 钢管-钢管混凝土轴压中长柱极限承载力研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(6):29-33.
HE Yi-bin, XIAO A-lin, HUANG Pin. Study on the Ultimate Bearing Capacity of Axially Loaded Steel Tubular Slender Columns Filled with Steel-reinforced Concrete[J]. Building Structure, 2009, 39(6):29-33.

[9] 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 Struc-

- tures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [10] 刘 威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
LIU Wei. Research on Mechanism of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Local Compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [11] 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.
- [12] 何益斌, 肖阿林, 郭 健, 等. 钢骨-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.
HE Yi-bin, XIAO A-lin, 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.
- [13] ZHU M C, LIU J X, WANG Q X, et al. Experimental Research on Square Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced Self-consolidating High-strength Concrete Under Axial Load[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2278-2286.
- [14] 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.
YANG Bao-sheng, 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.
- [15] 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 Guo-huang, SUN Su-wen, LI Xiu-ming. 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.
- [16] 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].
- [17] WANG Q X, ZHAO D Z, GUAN P. Experimental Study on the Strength and Ductility of Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced Concrete[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 907-915.
- [18] 陈周熠, 易伟建, 赵国藩, 等. 带圆钢管的劲性高强混凝土轴压短柱的承载力及可靠度分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(4): 6-11.
CHEN Zhou-yi, YI Wei-jian, ZHAO Guo-fan, et al. Ultimate Strength of High Strength Concrete Columns Reinforced with Concrete Filled Steel Tube Under Axial Compression and Their Reliability Analysis[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2005, 32(4): 6-11.
- [19] 肖阿林, 何益斌, 黄 频, 等. 型钢-钢管混凝土短柱轴压承载力可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 29-35.
XIAO A-lin, HE Yi-bin, HUANG Pin, et al. Reliability Analysis of Load-bearing Capacity of Axially Loaded CFT-encased Steel Columns[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 29-35.
- [20] 罗丽娟, 熊 帆, 陈 悦, 等. 基于 ANSYS 和 JC 法的滑坡抗滑桩结构可靠度分析[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 33-38.
LUO Li-juan, XIONG Fan, CHEN Yue, et al. Reliability Analysis of Anti-slide Pile Based on JC Method and ANSYS[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 33-38.
- [21] GB 50068—2018, 建筑结构可靠性设计统一标准[S].
GB 50068—2018, Unified Standard for Reliability Design of Building Structures[S].