

不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件受弯性能研究

李德山¹, 王志滨^{2*}, 林继焜², 李玉甫¹, 陈文灿³

(1. 广东建设职业技术学院 土木工程学院, 广东 清远 511500; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108;
3. 中建八局第一建设有限公司, 济南 250100)

摘要: 为研究不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件的受弯性能, 文中建立了该类构件的有限元分析模型。基于有限元典型算例, 分析了其纯弯全过程的受力机理。并对该类构件进行了参数分析, 系统研究了混凝土强度、钢管屈服强度、纵筋屈服强度、钢管含钢率和纵筋配筋率对该类组合构件纯弯性能的影响规律。研究结果表明: 内置纵筋显著提高了该构件的抗弯承载力; 且组合构件的抗弯承载力随混凝土强度、钢管屈服强度、纵筋屈服强度、钢管含钢率和纵筋配筋率的增大而增大; 该组合构件的抗弯刚度随混凝土强度、钢管含钢率和纵筋配筋率的增大而增大, 随钢管和纵筋屈服强度的增大而减小。现有规范或文献中针对该类构件的抗弯性能计算方法, 存在对其抗弯刚度高估、抗弯承载力低估的问题。为此, 本文基于60个系统设计的有限元算例, 通过回归拟合建立了适用于该类构件的抗弯承载力与组合抗弯刚度的简化计算公式, 且简化计算结果与有限元模拟结果吻合较好。

关键词: 不锈钢筋; 不锈钢管海砂混凝土; 受弯性能; 有限元分析; 抗弯刚度; 抗弯承载力; 简化计算公式

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0119-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240801003

Bending Performance of Stainless Steel Bars-Sea Sand Concrete Filled Circular Stainless Steel Tubular Members

LI Deshan¹, WANG Zhibin^{2*}, LIN Jiting², LI Yufu¹, CHEN Wencan³

(1. College of Civil Engineering, Guangdong Construction Polytechnic, Qingyuan 511500, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Jinan 250100, China)

*Corresponding author: wangzhibin@fzu.edu.cn

Abstract: In this paper, a finite element (FE) analysis model was developed to investigate the flexural behavior of stainless steel bars-sea sand concrete filled circular stainless steel tubular specimen. Based on the FE model, the stress mechanism under pure bending was investigated. The influences of concrete strength, steel tubular yield strength, yield strength of the longitudinal bars, steel ratio of the steel tube, and longitudinal bar ratio on the bending performance of the composite member were investigated. The results highlight the significant enhancement in flexural

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 广东省普通高校特色创新类项目(2022KTSCX246), 广东建设职业技术学院校级科研项目(KY2023-08), 泉州市科技计划项目(2021C015R)

作者简介:

李德山(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事钢-混凝土组合结构、新型装配式结构方面的研究。E-mail: 502405506@qq.com。

通信作者:

王志滨(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢-混凝土组合结构的静力、抗震与抗火性能方面的研究。

E-mail: wangzhibin@fzu.edu.cn。

bearing capacity due to embedded longitudinal bars. Additionally, the flexural bearing capacity of the composite column increased with higher concrete strength, steel tubular yield strength, yield strength of the longitudinal bars, steel ratio of the steel tube, and longitudinal bar ratio. Moreover, the composite bending stiffness increased with higher concrete strength, steel ratio of the steel tube, and longitudinal bar ratio, while decreased with higher yield strength of the steel tube or longitudinal bars. The study also identified that current calculation methods overestimated the flexural stiffness but underestimated the flexural resistance of such members. Through 60 FE examples, simplified models for estimating the bending resistance and composite bending stiffness of such members were regressed. The simplified calculation results show good agreement with the FE predictions.

Keywords: stainless steel bar; sea sand concrete filled stainless steel tube; bending performance; finite element analysis; bending stiffness; flexural bearing capacity; simplified calculation formula

内置钢筋的钢管混凝土具有承载力高、塑性韧性好、抗火性能优越、抗震性能好、施工方便等优点,已逐渐在建筑工程、桥梁工程及海洋工程中得以应用^[1]。当前河砂资源日益枯竭,成为制约建筑业可持续发展的瓶颈;近年来,依托国家海洋强国战略导向,以储量丰富的海砂替代河砂作为混凝土中细骨料,已成为目前的研究热点。针对钢管混凝土组合结构,现有研究表明以海砂混凝土替代普通混凝土并不会影响该组合构件的力学性能^[2-3]。但海砂混凝土具有较强的腐蚀性,因此有研究者建议内置不锈钢管和不锈钢筋来提高其耐久性。目前不锈钢管及不锈钢筋已在多项实际工程中得到应用,不仅为我国海工建筑材料的优化升级提供了坚实技术支持,也积累了宝贵的工程经验。

该类新型构件称为内置不锈钢筋的不锈钢管海砂混凝土构件(图1),其有望兼具耐久性好、承载力高、塑性韧性好、抗火性能优越、抗震性能好、施工方便、外形美观等优点。此种结构既保留了钢管混凝土承载力高、抗震性能优越的优势,又实现了海砂资源的资源化利用与建筑材料的高效适配,契合绿色环保的工程设计理念,在沿海工程和海洋工程中具有广阔的应用前景。

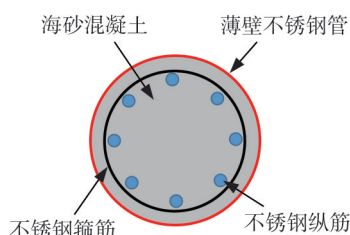


图1 不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件

Fig. 1 Stainless steel bars-sea sand concrete filled circular stainless steel tubular member

LIAO等^[2]、张伟杰等^[3]对不锈钢管海砂混凝土柱开展了轴压、纯弯两种静力加载工况的试验研究,研究表明:采用原状海砂和净化海砂作为细骨料的钢管混凝土,其静力性能基本与不锈钢管普通河砂混凝土的静力性能相同;海砂可替代普通河砂以形成不锈钢管海

砂混凝土构件,其力学性能良好。

万城勇等^[4]、陈宗平等^[5]、XIAMUXI等^[6]、周济等^[7]针对配筋钢管混凝土柱的轴压、偏压力学性能进行了试验研究及数值模拟,其研究表明:在钢管混凝土柱内部配置钢筋可显著提升其轴压承载力、偏压承载力和变形性能。郑永乾等^[8]针对不锈钢管约束钢筋再生混凝土短柱开展了轴压试验研究,并提出其轴压承载力和刚度设计方法。魏华等^[9]、查晓雄等^[10]对内置碳素钢筋的圆钢管普通混凝土构件进行了纯弯试验,最终提出其受弯承载力计算方法。PROBST等^[11]对足尺配筋碳素钢管混凝土的受弯性能开展了试验研究,考察横向抗剪钢筋对构件抗弯承载力的影响。

目前,国内外对于配筋钢管混凝土构件静力性能的研究已较为充分,但针对内置不锈钢筋的不锈钢管海砂混凝土构件,其受弯性能研究尚未见相关报道。由于不锈钢的材料性能与普通钢材的材料性能存在明显差异,因此有必要深入研究该类新型组合构件的受弯性能,并确定其抗弯承载力与组合抗弯刚度的计算方法。

1 有限元模型

本文采用有限元软件ABAQUS,针对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件的受弯性能开展机理分析与参数化研究。在该纯弯工况下的有限元模型中,将海砂混凝土区分为箍筋内混凝土及箍筋外混凝土。研究结果表明:对于不锈钢管海砂混凝土,其核心混凝土受到不锈钢管的约束作用,该约束效应与来自普通钢管的约束效应并无显著差异^[12],同时海砂混凝土的抗压强度、抗折强度与同级别的普通河砂混凝土的对应值相差较小^[13]。在建立的有限元分析模型中,箍筋内混凝土采用文献^[14]中提出的考虑钢管与箍筋双重约束的本构模型;箍筋外混凝土采用TAO等^[15]提出的钢管约束混凝土本构模型;碳素钢采用TAO等^[15]建议的四段式弹塑性模型;不锈钢采用WANG等^[16]建议的奥氏体不锈钢本构模型。不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土纯弯构件有限元模型如图2所示。

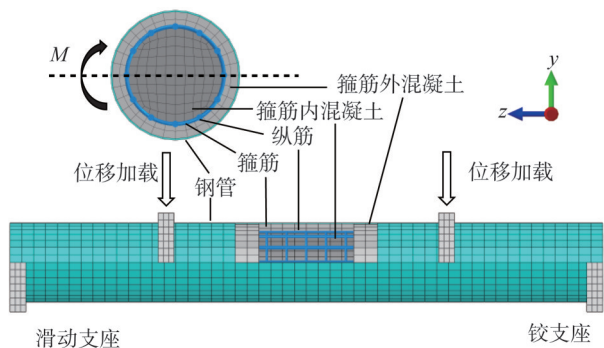


图2 不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stainless steel bars-sea sand concrete filled circular stainless steel tube

有限元模型中混凝土、钢筋与钢管分别采用 C3D8R 实体单元、T3D2 桁架单元与 S4R 壳单元模拟。不锈钢管内表面与箍筋外混凝土外表面采用法向硬接触与切向库伦摩擦模型描述其接触关系,摩擦系数取 0.25;箍筋内混凝土与箍筋外混凝土设置绑定约束;不锈钢筋笼与混凝土之间采用嵌入约束。构件两端分别设置铰支座与滑动支座,在构件四分点位置施加位移荷载。

目前关于不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件,其纯弯性能的相关试验研究尚未见相关报道,考虑到该类构件与文献[9-11]中试验试件(试件 N45LB-B、R-1、c-s)在结构形式及受力性能上的相似性,本文采用上述文献的试验结果来验证以上有限元模型的合理性。图3给出了试件 N45LB-B、R-1、c-s 的弯矩(M)-曲率(Φ)其试验与有限元模拟结果的对比曲线,其中 D 为试件截面直径; t_s 为钢管壁厚; L 为试件长度; f_{ys} 为碳素钢管屈服强度; f_{yb} 为碳素钢筋屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度。结果表明:试验实测曲线与有限元模拟曲线总体吻合良好,表明本文建立的有限元模型适用于不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件受弯性能分析,具有较高的计算精度。

2 工作机理分析

根据工程中常见钢管混凝土组合结构的截面尺寸、材料强度及径厚比,设计了不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土典型构件(以下简称典型构件),具体参数如下:构件截面直径 $D=400$ mm;构件长度 $L=3\ 000$ mm;钢管壁厚 $t_s=4.8$ mm;不锈钢管屈服强度 $\sigma_{0.2s}=300$ MPa;纵筋屈服强度 $\sigma_{0.2r}=300$ MPa;箍筋屈服强度 $\sigma_{0.2v}=300$ MPa;混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=60$ MPa;钢管含钢率 $\alpha_s=A_s/(A_c+A_r)=5.0\%$ (其中 A_s 、 A_r 和 A_c 分别为钢管、纵筋和混凝土的截面面积);纵筋配筋率 $\rho_r=A_r/(A_c+A_r)=3.1\%$ (采用 $12\Phi 20$);箍筋体积配箍率 $\rho_v=\pi d_v^2/(D_{cor}S)=1.5\%$ (采用 $\Phi 12@100$,箍筋圈内径 $D_{cor}=300$ mm, d_v 和 S

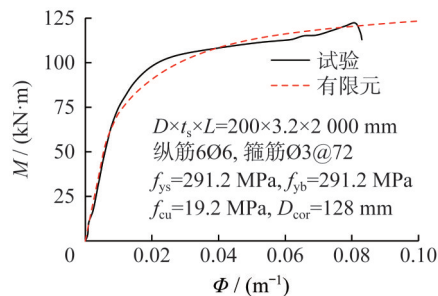
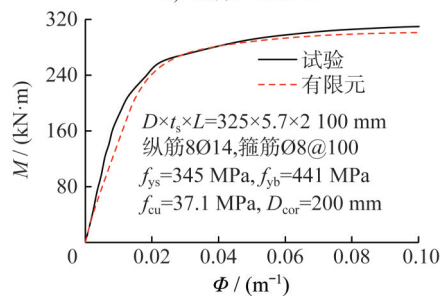
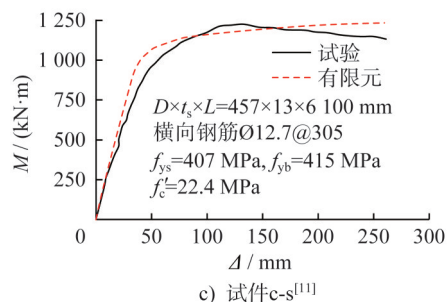
a) 试件 N45LB-B^[9]b) 试件 R-1^[10]c) 试件 c-s^[11]

图3 试验数据与有限元模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between test data and FE simulation results

分别为箍筋直径和间距)。

2.1 弯矩-曲率曲线

图4给出了不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土典型构件、圆形不锈钢管海砂混凝土对比构件、碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件及各组件的弯矩(M)-曲率(Φ)曲线。圆不锈钢管海砂混凝土纯弯对比构件除了未配置钢筋笼外,其余参数均与典型构件相同;碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件中的钢筋与钢管均采用碳素钢,核心混凝土采用普通混凝土,其余参数均与典型构件相同。典型构件的 $M-\Phi$ 曲线分为三个阶段:OA段(弹性阶段,A点时钢管屈服)、AB段(弹塑性阶段,B点时钢管最大拉应变达到 $10\ 000\ \mu\epsilon$)、BC段(破坏阶段,C点时构件曲率达到 $0.2\ m^{-1}$),曲线特征点如图4所示。

由图4a)可知:与圆形不锈钢管海砂混凝土对比构件相比,典型构件的抗弯承载力和峰值曲率分别提高了 39.83% 、 10.49% ;与碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件相比,典型构件的抗弯承载力和峰值曲率分别提高了

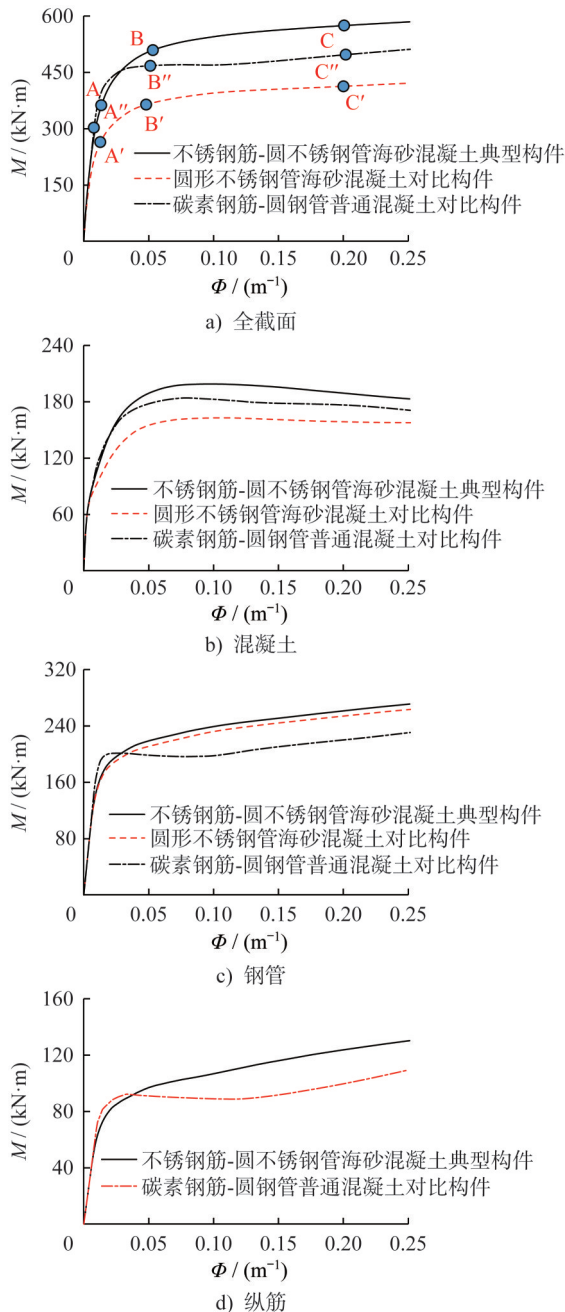


图4 各构件的 $M-\Phi$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison of $M-\Phi$ curves of different members

8.91%、3.66%。本文取 $M-\Phi$ 曲线达到20%抗弯承载力时的割线斜率作为构件的组合抗弯刚度 B_{sc} ^[1],与圆形不锈钢管海砂混凝土对比构件和碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件相比,典型构件的 B_{sc} 分别提高了9.26%和降低了2.01%,降低的原因是和碳素钢相比,不锈钢较早地进入非线性阶段导致其组合抗弯刚度降低。

由图4b)可知:与圆形不锈钢管海砂混凝土对比构件和碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件相比,B点时典型构件的混凝土所承担的弯矩分别提高了23.90%、7.01%。主要原因是钢管与钢筋笼的双重约束效应提高

了混凝土的抗压承载力;且与碳素钢筋相比,不锈钢筋的后期强度更高。

由图4c)和图4d)可知:典型构件与未配筋构件的钢管弯矩-曲率曲线基本重合;在加载后期,典型构件中的不锈钢纵筋承担的弯矩荷载,高于碳素钢筋-圆钢管普通混凝土对比构件中的碳素纵筋承担的弯矩荷载。

2.2 截面应力分布

图5给出了典型构件跨中截面的混凝土纵向应力分布,图6给出了典型构件的钢管跨中截面纵向、环向应力分布(其中拉应力为正,压应力为负),结合图4、5、6分析可知:

(1) OA段:典型构件处于弹性阶段,此时钢管环向应力值较小,对混凝土尚未产生明显的约束作用。达到A点时,钢管受拉区边缘纵向应力开始屈服;混凝土最大纵向压应力($-0.79f_c'$)出现在受压区边缘。

(2) AB段:典型构件进入弹塑性阶段,各组件的纵向应力值继续发展,钢管受拉区边缘塑性开始发展,中和轴逐渐向受压区移动,同时钢管的环向拉应力持续增长。达到B点时,受拉区钢管基本屈服,其最大纵向拉、压应力值分别达到 $1.34\sigma_{0.2s}$ 、 $-0.89\sigma_{0.2s}$ 。钢管环向拉应力最大值($0.41\sigma_{0.2s}$)、最小值($0.29\sigma_{0.2s}$)分别出现在拉、压区边缘。受压区边缘的混凝土最大纵向压应力值为 $-1.19f_c'$,说明在不锈钢管与不锈钢筋笼的双重约束作用下,核心混凝土抗压承载力显著提高。

(3) BC段:此时典型构件的钢管应力继续增大,中和轴位置不断向受压区移动。在箍筋约束作用下,其内部受压区混凝土的纵向压应力仍在增大,而箍筋外受压区混凝土的纵向应力逐渐减小。达到C点时,钢管大部分截面屈服,其纵向拉、压应力最大值分别达到 $1.64\sigma_{0.2s}$ 、 $-1.02\sigma_{0.2s}$,钢管环向拉应力最大和最小值分别为 $0.55\sigma_{0.2s}$ 、 $0.44\sigma_{0.2s}$ 。受压区混凝土的纵向压应力最大值达到 $-1.34f_c'$,位于箍筋约束区域。

2.3 约束应力分析

图7给出了典型构件的不锈钢管和不锈钢箍筋约束应力(p)-曲率(Φ)曲线,不锈钢箍筋有效约束应力 f_l' 根据文献[17]中的相关公式进行计算,可以发现:两种约束应力均在弹性段(OA段)就开始发展,钢管受拉区边缘测点的接触应力增长最快;在达到抗弯极限承载力(B点)前,钢管接触应力发展更快,达到B点后,箍筋环向约束应力大小及增长趋势与钢管受压区边缘测点的接触应力对应值相近。

3 参数分析

基于对以上典型构件的分析,本文进一步研究如下

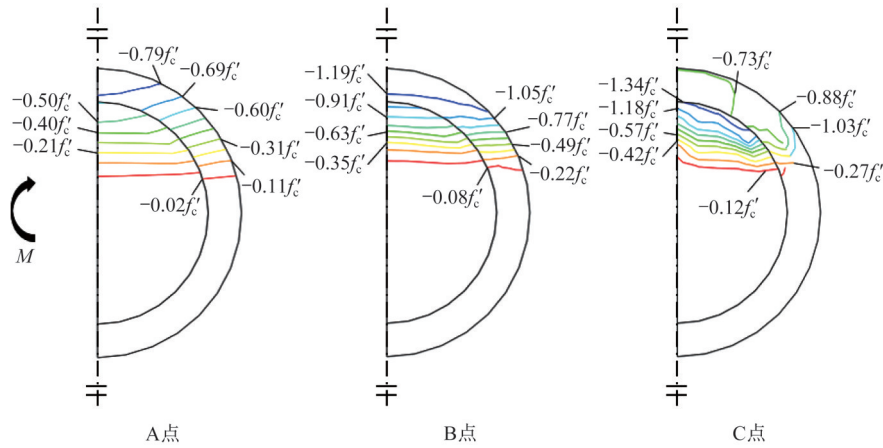


图5 典型构件的混凝土纵向应力分布

Fig. 5 Concrete longitudinal stress distribution of typical members

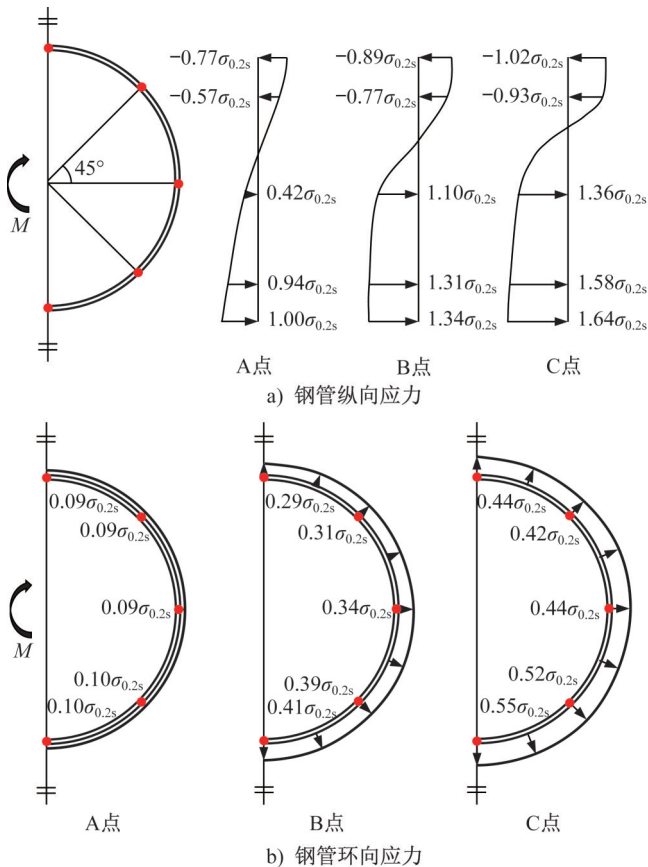


图6 典型构件的钢管应力分布

Fig. 6 Steel tube stress distribution of typical members

主要参数对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件的纯弯性能的影响： $f_{cu}=30、60、90、120$ MPa； $\sigma_{0.2s}=200、350、500、650$ MPa； $\sigma_{0.2r}=175、350、500、650$ MPa； $\alpha_s=5.0\%、10.0\%、15.0\%、20.0\%$ ； $\rho_r=3.1\%、3.8\%、4.5\%、5.3\%$ 。

图8给出了 f_{cu} 、 $\sigma_{0.2s}$ 、 $\sigma_{0.2r}$ 、 α_s 及 ρ_r 对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件有限元计算抗弯承载力($M_{u,FE}$)的影响规律。由图8可知： $M_{u,FE}$ 随 f_{cu} 、 $\sigma_{0.2s}$ 、 $\sigma_{0.2r}$ 、 α_s 及 ρ_r 的增大而增大。具体分析如下：当 f_{cu} 由30 MPa提高至

120 MPa时,该构件的 $M_{u,FE}$ 提高了21.70%；当 $\sigma_{0.2s}$ 由200 MPa提高至650 MPa时,其 $M_{u,FE}$ 提高了94.70%；当 $\sigma_{0.2r}$ 由175 MPa提高至650 MPa时,其 $M_{u,FE}$ 提高了43.65%；当 α_s 由5.0%提高至20.0%时,其 $M_{u,FE}$ 提高了118.87%；当 ρ_r 由3.1%提高至5.3%时,其 $M_{u,FE}$ 提高了18.93%。

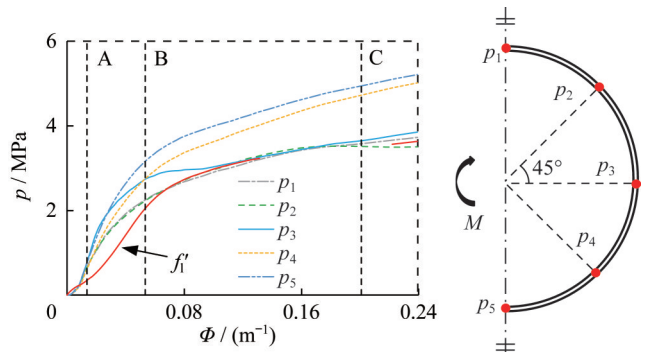


图7 典型构件的约束应力(p)-曲率(Φ)曲线

Fig. 7 Constraint stress(p)-curvature(Φ) curves of typical members

图9给出了 f_{cu} 、 $\sigma_{0.2s}$ 、 $\sigma_{0.2r}$ 、 α_s 及 ρ_r 对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件有限元计算抗弯刚度($B_{sc,FE}$)的影响规律。由计算结果可知： $B_{sc,FE}$ 随 f_{cu} 、 α_s 及 ρ_r 的增大而增大,但随 $\sigma_{0.2s}$ 及 $\sigma_{0.2r}$ 的增大而减小,主要原因在于:较高屈服强度的钢材因应力水平较低而应变发展滞后,为平衡内力,核心混凝土需承担更大压应变,导致截面整体曲率增大。具体分析如下:当 f_{cu} 由30 MPa提高至120 MPa时,其 $B_{sc,FE}$ 提高了75.73%；当 $\sigma_{0.2s}$ 由200 MPa提高至650 MPa时,其 $B_{sc,FE}$ 降低了20.50%；当 $\sigma_{0.2r}$ 由175 MPa提高至650 MPa时,其 $B_{sc,FE}$ 降低了11.57%；当 α_s 由5.0%提高至20.0%时,其 $B_{sc,FE}$ 提高了70.39%；当 ρ_r 由3.1%提高至5.3%时,其 $B_{sc,FE}$ 提高了10.86%。

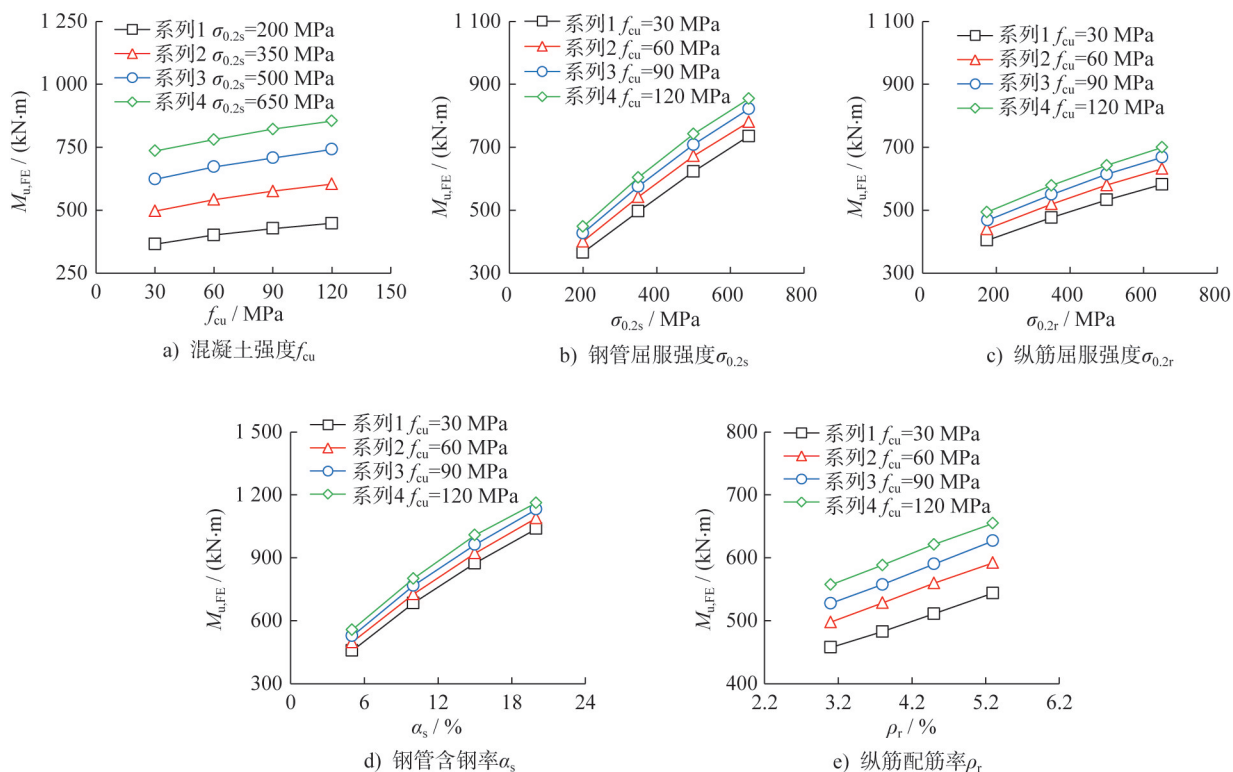


图8 各参数对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件抗弯承载力的影响

Fig. 8 Influences of parameters on bending capacity of stainless steel bars-sea sand concrete filled circular stainless steel tubular member

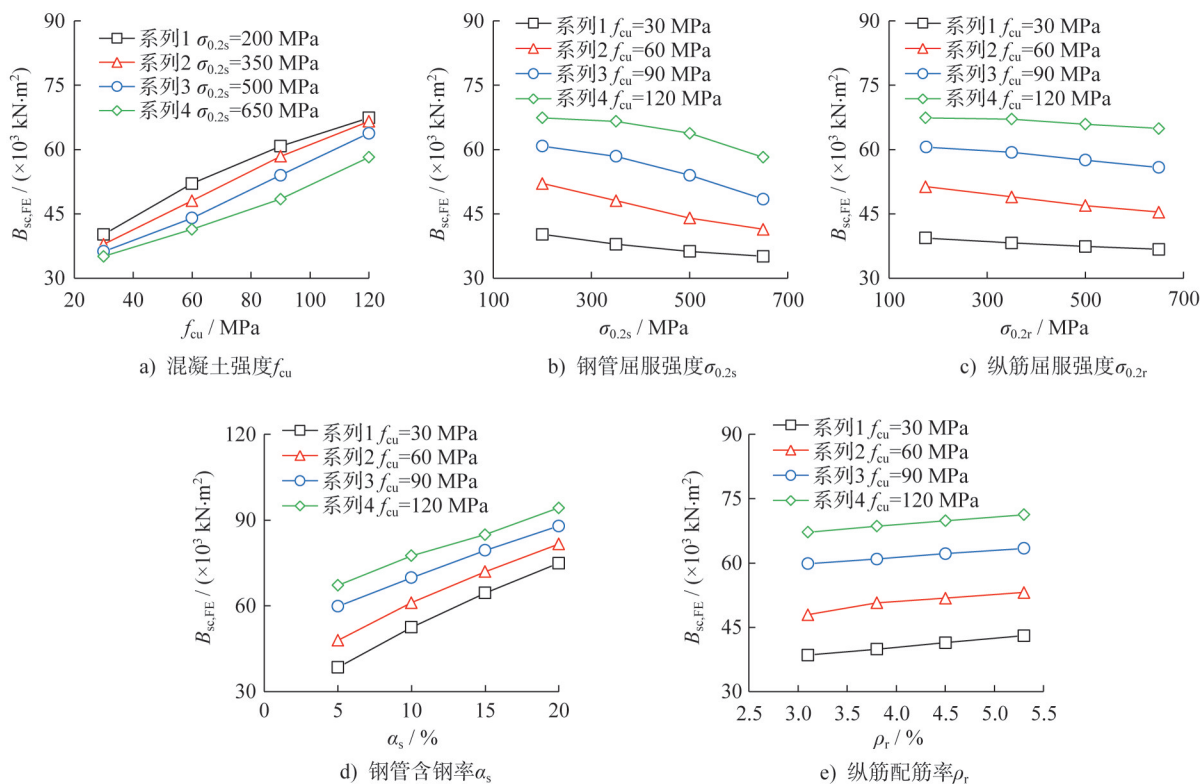


图9 各参数对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件抗弯刚度的影响

Fig. 9 Influences of parameters on bending stiffness of stainless steel bars-sea sand concrete filled circular stainless steel tubular member

4 简化计算

4.1 组合抗弯刚度

4.1.1 欧洲规范 EC4

欧洲规范 EC4^[18]中建议了碳素钢筋-圆钢管混凝土抗弯刚度(B_{scc1})的计算公式:

$$B_{scc1} = E_s I_s + E_r I_r + 0.6 E_c I_c \quad (1)$$

式中: E_s 、 E_r 、 E_c 分别为钢管、纵筋和混凝土的弹性模量; I_s 、 I_r 、 I_c 分别为以上三者的惯性矩。

4.1.2 本文模型

本文基于60个系统设计的有限元算例,通过回归拟合建立了适用于不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件抗弯刚度(B_{scc2})的计算公式:

$$B_{scc2} = E_s I_s + E_r I_r + \beta_c E_c I_c \quad (2)$$

$$\beta_c = 5.1 - 1.35 \xi_s^{0.39} \alpha_s^{0.24} - 3.98 \left(\frac{\sigma_{0.2r}}{f_c'} \right)^{0.02} \rho_r^{-0.005} \quad (3)$$

式中: ξ_s 为钢管约束效应系数, $\xi_s = \alpha_s \sigma_{0.2s} / f_c'$ 。

图10a)和图10b)分别给出了由公式计算的 B_{scc1} 、 B_{scc2} 与有限元计算结果 $B_{sc,FE}$ 的对比, $B_{scc1}/B_{sc,FE}$ 与 $B_{scc2}/B_{sc,FE}$ 的平均值 μ 和标准差 S_D 均在图中给出。可见:欧洲规范 EC4对碳素钢筋-圆钢管混凝土构件的抗弯刚度计算结果存在高估现象,本文建议的简化公式具有更高的精度。

4.2 抗弯承载力

4.2.1 欧洲规范 EC4

欧洲规范 EC4^[18]基于极限平衡理论建议了碳素钢筋-圆钢管混凝土构件抗弯承载力的计算方法。图11为该构件达到抗弯极限承载力时的截面应力分布,通过轴力平衡方程可确定中和轴的位置 h_n ,且构件抗弯承载力(M_{uc1})可由力矩平衡方程计算获得。

4.2.2 文献模型

文献[10]基于统一理论及极限平衡理论,推导了双钢管混凝土构件受弯承载力的计算方法。对于碳素钢筋-圆钢管混凝土构件,文献[10]将纵筋等效成内钢管,并采用以上方法求得该类构件的受弯承载力(M_{uc2})。

4.2.3 本文模型

本文基于60个有限元算例回归了不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件的抗弯承载力(M_{uc3})计算公式:

$$M_{uc3} = \gamma_m W_{scm} f_{scy} + W_r \sigma_{0.2r} \quad (4)$$

$$\gamma_m = 2.04 - 1.17 \xi_s^{-0.19} + 1.4 \left(\frac{\sigma_{0.2v}}{f_c'} \right)^{0.38} \rho_r^{0.63} \quad (5)$$

$$f_{scy} = N_{cfst} / A_{sc} \quad (6)$$

$$N_{cfst} = \eta_s \sigma_{0.2s} A_s + \eta_c f_c' A_c \quad (7)$$

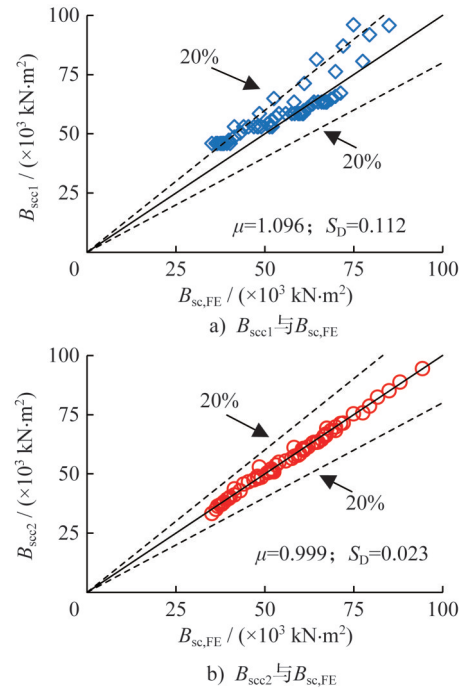


图10 B_{scc1} 、 B_{scc2} 与 $B_{sc,FE}$ 的对比

Fig. 10 Comparison between B_{scc1} , B_{scc2} and $B_{sc,FE}$

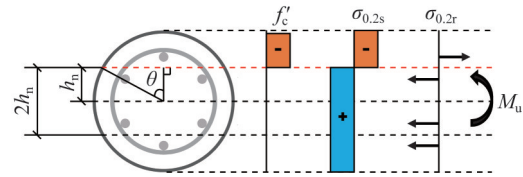


图11 碳素钢筋-圆钢管混凝土极限弯矩时的应力分布

Fig. 11 Stress distribution under ultimate moment of carbon steel bars-round CFST

$$\eta_s = 0.035 - 0.05 \xi_s^{2.14} \quad (8)$$

$$\eta_c = 1.12 + 1.65 \xi_s^{1.15} + 1.57 \xi_v^{1.18} \quad (9)$$

式中: $\xi_v = \rho_v \sigma_{0.2v} / f_c'$; ξ_s 为箍筋约束效应系数; γ_m 为抗弯承载力计算系数; W_{scm} 和 W_r 分别为钢管混凝土和纵筋的截面抗弯模量; N_{cfst} 为不锈钢管混凝土轴压承载力; f_{scy} 为不锈钢管混凝土轴压强度指标; A_{sc} 为柱横截面面积; η_s 和 η_c 分别为不锈钢管和混凝土的材料修正系数。

图12a)、b)和c)分别给出了公式计算结果 M_{uc1} 、 M_{uc2} 、 M_{uc3} 与有限元计算结果 $M_{u,FE}$ 的对比,其中 $M_{uc1}/M_{u,FE}$ 、 $M_{uc2}/M_{u,FE}$ 、 $M_{uc3}/M_{u,FE}$ 的平均值 μ 和标准差 S_D 均列于图12中。可见,欧洲规范 EC4对不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土受弯构件的抗弯承载力计算结果偏于保守;文献[10]建议的理论公式计算结果离散性偏大;基于本文模型建立的计算公式具有更好的拟合效果。因此,本文提出的公式适用于内填海砂混凝土或普通混凝土的不锈钢筋-不锈钢管构件抗弯承载力计算。

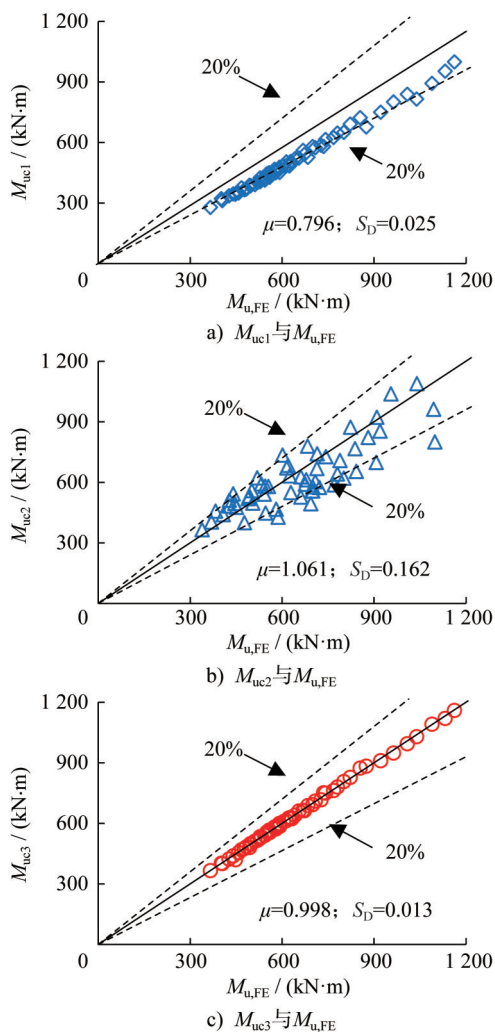


图 12 M_{uc1} 、 M_{uc2} 、 M_{uc3} 与 $M_{u,FE}$ 对比

Fig. 12 Comparison between M_{uc1} , M_{uc2} , M_{uc3} and $M_{u,FE}$

5 结论

本文研究不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件的纯弯性能,得出以下结论:

(1) 文中建立了该类组合构件的有限元模型,相较于未配置钢筋的圆形不锈钢管海砂混凝土构件,内置不锈钢筋后该类构件的抗弯承载力和抗弯刚度分别提高了39.83%、9.26%。在受力全过程中不锈钢筋和不锈钢管均提供了有效的约束作用。

(2) 基于有限元模型开展参数分析发现:不锈钢筋-圆不锈钢管海砂混凝土构件抗弯承载力随混凝土强度、钢管屈服强度、纵筋屈服强度、钢管含钢率和纵筋配筋率的增大而增大;组合抗弯刚度随混凝土强度、钢管含钢率和纵筋配筋率的增大而增大,随钢管和纵筋屈服强度的增大而减小。

(3) 现有规范和文献中的计算方法,存在对该类构件抗弯刚度高估,对其抗弯承载力低估的问题。本文基于60个有限元算例回归了该类构件的抗弯承载力和抗

弯刚度的简化计算公式,且简化计算结果与有限元计算结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 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 Linhai. Concrete filled steel tubular structures—theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [2] LIAO F Y, HOU C, ZHANG W J, et al. Experimental investigation on sea sand concrete-filled stainless steel tubular stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 46-61. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.12.009.
- [3] 张伟杰, 廖飞宇, 侯超, 等. 不同细骨料下不锈钢管混凝土构件受弯性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 200-214. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.10.0746.
ZHANG Weijie, LIAO Feiyu, HOU Chao, et al. Effect of fine aggregate type on flexural behavior of concrete-filled stainless steel tubular members under pure bending [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10): 200-214. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.10.0746. (in Chinese)
- [4] 万城勇, 查晓雄. 配筋钢管混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 259-266. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.039.
WAN Chengyong, ZHA Xiaoxiong. Experiment study of reinforced concrete filled steel tubular columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (Suppl.1): 259-266. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.039. (in Chinese)
- [5] 陈宗平, 经承贵, 徐金俊, 等. 方钢管螺旋筋复合约束混凝土柱轴压机理及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 47-56. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.05.006.
CHEN Zongping, JING Chenggui, XU Jinjun, et al. Mechanism and load-bearing capacity of square steel tubular and spiral stirrup composite confined-concrete stub columns under axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 47-56. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.05.006. (in Chinese)
- [6] XIAMUXI A, MAIMAITIMIN M, LIU X R, et al. Experimental study on transverse reinforcements of reinforced concrete-filled steel tubular column [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109422. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109422.
- [7] 周济, 陈宗平, 周春恒, 等. 螺旋筋约束增强钢-混凝土组合方柱偏压性能及承载力计算[J]. 工程力学, 2023, 40(1): 212-228. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.08.0613.
ZHOU Ji, CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, et al. Eccentric compression behavior and bearing capacity calculation of steel-concrete composite square columns confined with spiral bars [J]. Engineering Mechanics, 2023,

- 40 (1) : 212-228. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750.2021.08.0613.(in Chinese)
- [8] 郑永乾,何多艺,MBANDA Erneste.不锈钢管约束钢筋再生混凝土短柱轴压受力性能研究[J].建筑结构学报,2024,45(2):175-188.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0386.
ZHENG Yongqian, HE Duoyi, ERNESTE M. Axial compressive behavior of recycled reinforced concrete stub columns confined by stainless steel tubes [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(2) : 175-188. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2022.0386.(in Chinese)
- [9] 魏华,张斌,王海军,等.配筋圆钢管混凝土梁受弯力学性能的试验研究[J].沈阳工业大学学报,2006,28(4):461-465. DOI:10.3969/ j.issn.1000-1646.2006.04.026.
WEI Hua, ZHANG Bin, WANG Haijun, et al. Experimental investigation on behavior of reinforced concrete filled circular steel tubular beams [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28 (4) : 461-465. DOI: 10.3969/ j. issn. 1000-1646.2006.04.026.(in Chinese)
- [10] 查晓雄,陈德劲,王维肖,等.内配加劲件钢管混凝土构件受弯性能理论与试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(增刊1):471-477.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.S1.066.
ZHA Xiaoxiong, CHEN Dejin, WANG Weixiao, et al. Theoretical and experimental study on flexural behavior of concrete-filled steel tubular members with internal stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Suppl.1):471-477. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.S1.066.(in Chinese)
- [11] PROBST A D, KANG T H, RAMSEYER C, et al. Composite flexural behavior of full-scale concrete-filled tubes without axial loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136 (11) : 1401-1412. DOI: 10.1061/(ASCE)st.1943-541x.0000241.
- [12] HAN L H, XU C Y, TAO Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSST) columns and joints: Summary of recent research [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 152: 117-131. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2018.02.038.
- [13] GUO M H, HU B, XING F, et al. Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117339. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2019.117339.
- [14] WANG Z B, YE C H, ZHAO C G, et al. Axial compression behaviors of reinforced sea-sand concrete filled circular stainless steel tubular stub columns [J]. Steel and Composite Structures, 2025, 56 (2) : 177-192. DOI: 10.12989/scs. 2025. 56.2.177.
- [15] TAO Z, WANG Z B, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 121-131. DOI:10.1016/j.jcsr.2013.07.001.
- [16] WANG X Q, TAO Z, SONG T Y, et al. Stress - strain model of austenitic stainless steel after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99:129-139. DOI:10.1016/j.jcsr.2014.04.020.
- [17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114 (8) : 1804-1826. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [18] EN 1994-1-1-2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures[S].