

沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱承载力分析

张 镡

(福建省高速公路达通检测有限公司, 福州 350108)

摘 要:桥梁中的方钢管混凝土墩柱在服役过程中由于材料特性、昼夜和季节温差等因素影响,很可能产生沿边长分布的脱空缺陷。基于试验验证的有限元分析模型,从荷载-位移特征曲线、荷载分配比例和钢管-混凝土相互作用方面对比分析了沿边长脱空缺陷对方钢管混凝土轴压短柱力学性能的影响,并研究了脱空边数、脱空率、混凝土强度、钢材屈服强度、含钢率 5 个参数对沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱轴压承载力的影响。分析结果表明:轴压荷载作用下,与无脱空缺陷的方钢管混凝土柱构件相比,沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱的承载力降幅随着脱空边数、脱空率和钢材屈服强度的增大而增大,随着混凝土强度的增大而减小;当脱空率固定,脱空边数变化时,含钢率的变化对承载力降幅影响不明显;当脱空边数为 4,脱空率变化时,高含钢率构件随脱空率的增大,承载力降幅显著。基于脱空边数和脱空率对构件极限承载力的影响,提出了考虑沿边长脱空缺陷影响的方钢管混凝土轴压承载力的简化计算公式。

关键词:方钢管混凝土;沿边长脱空缺陷;轴压性能;有限元分析;简化计算方法

中图分类号:TU398⁺.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)04-0056-10

Analysis of axial compressive capacity of square concrete-filled steel tube columns with edge debonding defects

ZHANG Kai

(Fujian Expressway Datong Testing Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

Abstract: Square concrete-filled steel tubes (SCFST), commonly used as bridge pier columns, may develop edge-distributed debonding defects during service due to material properties and temperature variations over daily and seasonal cycles. Based on an experimentally validated finite element analysis model, a comparative analysis was conducted to assess the impact of such defects on mechanical behaviour of axially-loaded SCFST stub columns, focusing on load-displacement characteristic curves, load distribution ratios, and steel-concrete interface interaction. Furthermore, the influence of five key variables—number of debonded defects, debonding ratio, concrete strength, steel yield strength, and steel reinforcement ratio on the axial compressive capacity was extensively investigated. Compared with axially-loaded SCFST short columns without debonding defects, the results indicate that the reduction in axial bearing capacity of SCFST short columns with edge-distributed debonding defects increases with the increment of the debonded edges, debonding ratios and the yield

收稿日期:2024-11-20

基金项目:福建省交通运输科技项目(202046;202252)

作者简介:张 镡(1977—),男,福建闽侯人。高级工程师,主要从事组合结构、结构检测监测技术等方面的研究。

E-mail:2657999@qq.com。

strength of steel, while decreases with the increase of the concrete strength. The steel reinforcement ratio has minimal effects on reduction of axial bearing capacity, with the debonding ratio fixed by varying the number of debonded edges. Nevertheless, specimens with a higher steel reinforcement ratio and four debonded edges show a more significant decrease in bearing capacity with the debonding ratio increases. A simplified formula is proposed to predict the compressive capacity of SCFST short columns with edge debonding defects, accounting the effects of number of debonded edge and the debonding ratio.

Key words: square concrete-filled steel tube; edge-distributed debonding defects; axial compression performance; finite element analysis; simplified calculation method

钢管混凝土结构具有强度高、塑性和韧性好、施工方便等优势,在桥梁工程、高层建筑和地下结构等领域得到广泛应用^[1]。在桥梁中已有应用方钢管混凝土墩柱作为主要承重结构的实际工程,其在长期服役过程中由于混凝土收缩过大、温度分布不均匀、昼夜和季节温差变化等因素会导致钢管和混凝土之间存在沿不同边长分布的脱空缺陷,这可能对结构性能产生不利影响^[2]。

已有研究者针对钢管混凝土结构中的脱空问题开展了一系列试验和有限元分析研究。LIAO等^[3-6]系统地分析了带脱空缺陷圆钢管混凝土构件在压、弯及其复杂受力下的力学性能。王静峰等^[7-8]对带脱空缺陷的椭圆形钢管混凝土的轴压力学性能进行了研究。叶勇等^[9]采用有限元数值分析的方法对均匀分布脱空缺陷的方钢管混凝土短柱轴压力学性能进行了分析。尚天宇^[10]进行了核心混凝土密实度对方钢管混凝土柱轴压性能的影响研究,并提出了碳纤维布加固方案。上述研究表明:脱空缺陷会削弱钢管与混凝土之间的相互作用,降低钢管对混凝土的约束能力,以及混凝土对钢管的支撑效果,从而对构件的承载力、刚度和延性产生不利影响,导致实际工程结构存在安全隐患^[11]。然而,目前沿不同边长分布的脱空缺陷对方钢管混凝土构件力学性能的影响规律尚未明确,也未有相关性能评估方法。

为此,本文以沿边长脱空的方钢管混凝土短柱为研究对象,建立了对应的有限元分析模型,并开展了相关试验验证。研究了沿边长脱空的方钢管混凝土短柱在轴心受压作用下的荷载-位移特征曲线、荷载分配比例和界面接触行为,基于该模型,研究了脱空边数、脱空率、混凝土强度、钢材屈服强度和含钢率对方钢管混凝土构件轴压承载力的影响,提出了考虑脱空边数和脱空率影响的方钢管混凝土轴压承载力的简化计算方法,可为实际钢管混凝土结构脱空缺陷的评估与控制提供参考。

1 有限元模型的建立

1.1 钢材和混凝土本构关系模型

钢材的单轴应力-应变关系采用文献[1]中提供的二次塑流模型,满足 von Mises 屈服准则,其中钢材的弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu_s = 0.3$ 。

无脱空缺陷的方钢管混凝土构件核心混凝土采用文献[12]提出的考虑外钢管约束效应的混凝土单轴受压应力-应变关系模型。

对于沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱,脱空处的核心混凝土与钢管之间存在初始分离,有限元模拟时需要考虑到二者约束效应的削弱,经试算,沿 1~3 边脱空缺陷的构件采用文献[12]的约束混凝土本构模型时,有限元承载力计算值高于试验实测值。因此,沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土中核心混凝土受压应力-应变关系均采用文献[13]中的无约束素混凝土本构模型。

1.2 有限元模型的建立

考虑到钢管主要以鼓屈变形为主,钢管采用四节点减缩积分的 S4R 壳单元,可以更好地模拟平面方向的破坏形态,混凝土和端板则采用 C3D8R 实体单元模拟。为确保模型的计算精度,混凝土与钢管网格划分尺寸相同。

钢管与核心混凝土界面的接触,无论是无脱空的还是沿边长脱空的方钢管混凝土构件,法线方向的接触行为采用硬接触“Hard”模型模拟,始终允许接触应力在界面之间完全传递,切线方向采用库伦摩擦

“Friction”模型,界面摩擦系数取 $0.6^{[14]}$ 。参考文献[15],方钢管混凝土平均界面黏结力(τ_{bond})约为圆钢管混凝土的 0.75 倍,因此,对于方钢管混凝土短柱的 τ_{bond} 采用式(1)计算。

$$\tau_{\text{bond}} = 0.75 \times [2.314 - 0.0195(D/t)] \quad (1)$$

式中: D 为方形混凝土截面边长; t 为方钢管厚度。

方钢管初始缺陷会降低方钢管混凝土柱的承载力,减弱方钢管对混凝土的约束作用^[16]。为分析方钢管初始缺陷和混凝土脱空缺陷耦合对方钢管混凝土短柱轴压性能的影响,在已建模型的基础上,采用有混凝土支撑管壁的一阶屈曲模态来模拟实际初始缺陷分布^[17]。模型的上端通过参考点与端板平面耦合,在其 y 方向施加轴向位移加载,约束其他方向的自由度;模型底部端板固定,限制所有方向自由度,以模拟真实试验环境支座的边界条件。沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱有限元模型示意如图1所示,其中 U_i 为某方向的平动自由度; U_{Ri} 为某方向的旋转自由度的约束; $i=x,y,z$ 。

1.3 计算结果与试验结果比较

为了验证有限元模型的准确性,前期进行了5个方钢管混凝土短柱轴压试件试验,包括4个沿边长脱空缺陷试件和1个无脱空缺陷试件。试验参数为沿边长脱空数量,试件长度 $L=600$ mm、方钢管外边边长 $B=200$ mm、钢管壁厚 $t=4$ mm、脱空率为 1.1% (脱空率 $\chi=2d/B$, d 为脱空边到钢管内壁的距离)。试件的材料力学参数如表1所示。

表1 试件主要参数及试验结果

试件编号	脱空类型	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	N_{uc}/kN	N_{ue}/kN	$N_{\text{ue}}/N_{\text{uc}}$
CO-0	无脱空	58.0	378.8	3108.2	3054.2	1.018
CC-1	沿1边脱空	58.0	378.8	2869.1	2827.5	1.015
CC-2	沿2边(相邻)脱空	58.0	378.8	2765.3	2779.6	0.995
CC-3	沿3边脱空	58.0	378.8	2704.9	2716.6	0.996
CC-4	沿4边脱空	58.0	378.8	2656.3	2651.1	1.002

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_y 为钢材屈服强度; N_{uc} 为有限元模型轴压承载力计算值; N_{ue} 为试验轴压承载力实测值。

方钢管混凝土轴压试验的加载装置如图2所示。试件居中放置在反力墩和加载板之间。反力墩始终保持固定,液压伺服系统向上推动加载板对试件施加轴向荷载。同时,在加载板的四周角部竖向布置位移计,以测量试件的轴向位移。试验结果表明,随着脱空边数的增加,试件表面局部屈曲现象由试件端部向中部发展,这是因为脱空边数的增加导致试件内部的约束效应进一步减小,从而使得试件中部更容易出现应力集中。

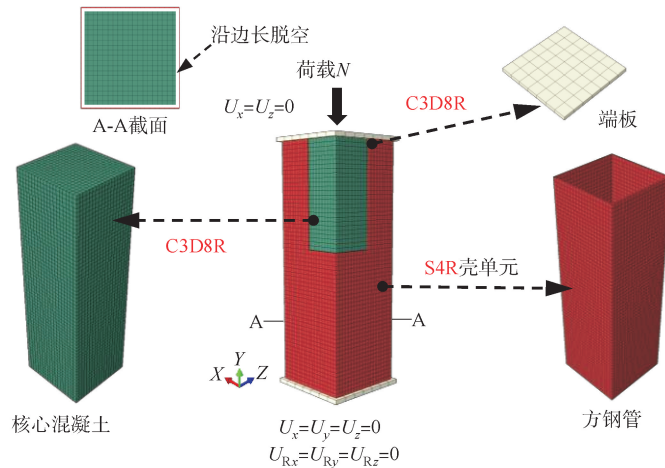
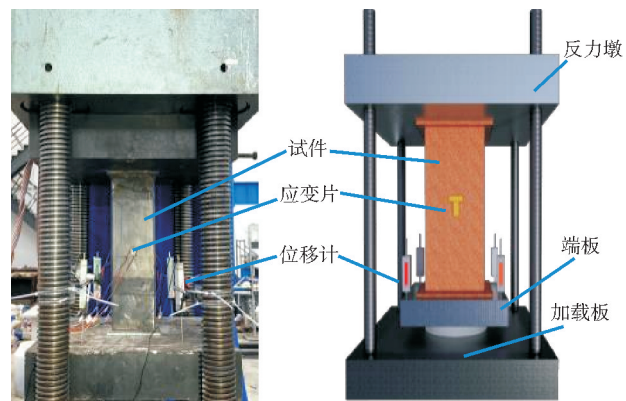


图1 方钢管混凝土短柱有限元模型示意



(a) 加载现场

(b) 加载装置示意

图2 试验装置

以沿 4 边脱空缺陷的方钢管混凝土试件为例,试验中观测的试件破坏过程为:加载初期的弹性阶段,试件表面未出现明显变化。随着加载荷载的增加,试件中部钢管出现微小的鼓屈,整体呈腰鼓状。试件承载力达到峰值后核心混凝土发生脆性破坏,外钢管中部向外鼓屈。峰值荷载后,试件中部鼓屈愈发明显,最终试件四周呈现腰鼓形破坏。基于所描述的有限元建模方法对试验进行模拟验证,图 3 给出了典型试件实际破坏模态与有限元模拟结果的对比,模拟的破坏模态与试验结果吻合较好。

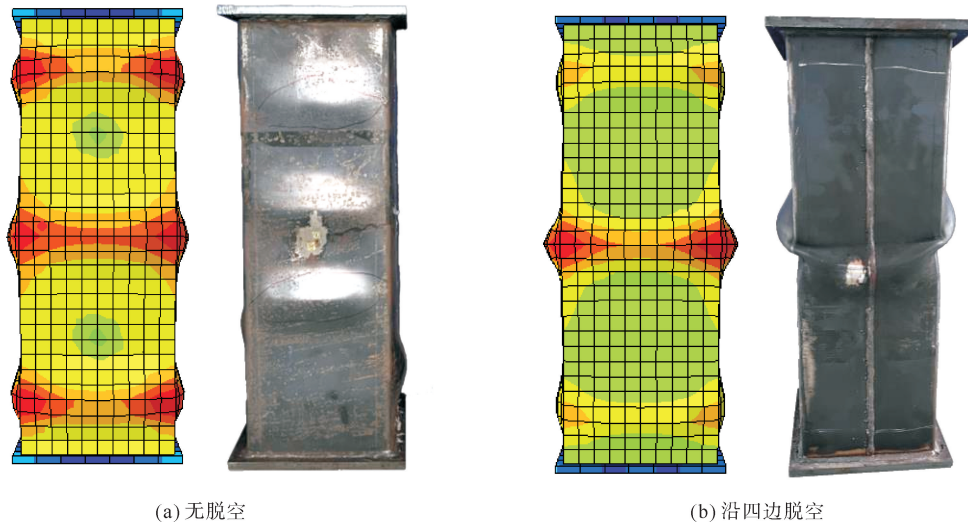


图 3 典型试件有限元与试验结果对比

有限元计算结果(N_{uc})与试验实测结果(N_{uc})的比较见表 1,荷载-位移($N-\Delta$)曲线对比如图 4 所示, N_{uc}/N_{uc} 的平均值和标准差分别为 1.005 和 0.011。由此可见,有限元建模方法合理,建立的有限元模型可以较准确地模拟沿边长脱空缺陷方钢管混凝土短柱的轴压行为。

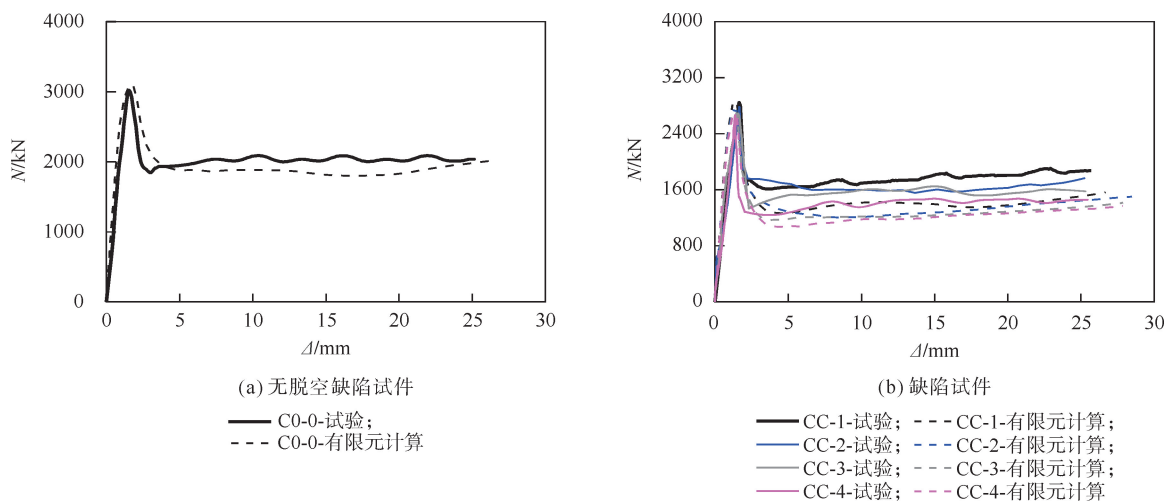


图 4 荷载-位移曲线试验与有限元比较

2 工作机理分析

在上述有限元模型的基础上,对典型构件的荷载-位移特征曲线、钢管与混凝土的荷载分配和二者间接触应力进行了分析。典型算例参数如下:脱空率 $\chi=2.2\%$,沿 4 边脱空缺陷,方钢管外边边长 $B=400\text{ mm}$,长度 $L=1200\text{ mm}$,厚度 $t=8\text{ mm}$,核心混凝土强度 $f_{cu}=60\text{ MPa}$,钢管的钢材屈服强度 $f_y=345\text{ MPa}$ 。

2.1 荷载-位移特征曲线全过程分析

图5对比了无脱空缺陷和沿4边脱空缺陷构件的全过程荷载-位移($N-\Delta$)特征曲线。为了便于分析,在沿4边脱空缺陷构件的荷载-位移曲线上标记了4个特征点,点A、B、C、D分别表示构件进入弹塑性阶段、达到峰值荷载、荷载下降段与平台段转折点、应变达到 $25\ 000\ \mu\epsilon$ 。

在O—A弹性阶段,混凝土的横向变形微小,钢管与混凝土相互独立工作,曲线呈线性关系,表明脱空对方钢管混凝土短柱的初始刚度影响较小。在A—B阶段,构件承载力持续上升,方钢管表现出良好的承载性能。随着位移的增加,在B—C阶段,可以明显观察到脱空构件的荷载峰值低于无脱空构件,并且下降趋势更为迅速,表明沿边长脱空缺陷对方钢管混凝土轴压短柱的性能造成了显著影响。沿4边脱空缺陷的轴压承载力较无脱空缺陷构件降低了12.77%,原因在于脱空缺陷导致了构件的核心混凝土未能获得外钢管的约束,从而提前发生脆性破坏,显著降低了承载力,此外,钢管与核心混凝土在此时发生应力重分布。在C—D阶段,荷载-位移曲线保持稳定发展,最后呈小幅上升趋势,该阶段混凝土横向变形增大,与钢管发生接触,二者间的相互作用增加了构件的承载力,并且在脱空构件中效果更为显著。

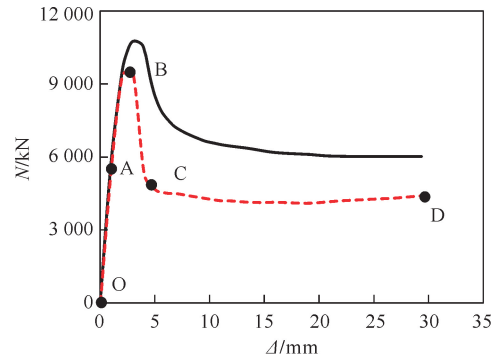


图5 各模型荷载-位移特征曲线

— 无脱空; - - - 沿4边脱空

2.2 钢管与混凝土的荷载分配比例

无脱空和沿4边脱空缺陷的方钢管混凝土短柱在受荷全过程中钢管和核心混凝土的荷载分配如图6所示,可知:在轴压荷载作用下,无论是否存在脱空缺陷,钢管均先发生屈服。然而,对于核心混凝土而言,脱空缺陷的存在降低了钢管对混凝土的约束效应,削弱了混凝土的承载力,同时也导致钢管未能得到混凝土的有效支撑,从而过早屈服。这也是脱空缺陷对方钢管混凝土短柱轴压性能造成影响的主要因素^[9]。

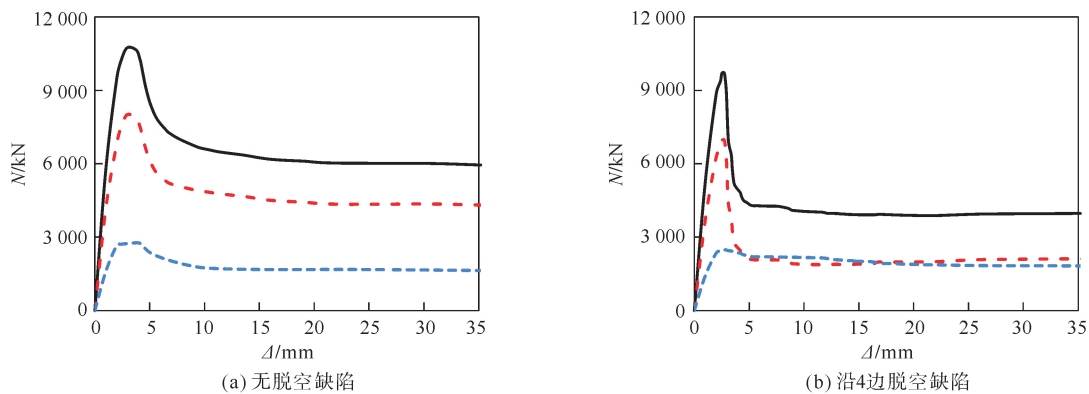


图6 方钢管混凝土短柱荷载分配变化规律

— 钢管混凝土; - - - 钢管; - · - 核心混凝土

2.3 钢管与混凝土相互作用分析

钢管混凝土结构的优越力学性能主要依赖于钢管和核心混凝土之间的相互作用,上述结果表明脱空缺陷的存在会削弱这种相互作用,改变荷载的传递机制。因此,将通过分析轴压全过程中二者之间的法向接触应力发展规律,阐明沿不同边长脱空缺陷对方钢管混凝土构件接触关系的影响机理。

从图7所示的方钢管混凝土构件跨中截面的钢管与核心混凝土的接触应力-位移($\sigma-\Delta$)关系曲线可见:无论是否存在脱空,边中部(测点1—3、7—11、15—17)的接触应力均为0,这是因为在受力过程中钢管的横向变形鼓屈,钢管与混凝土之间未产生接触,二者没有相互作用,同时,这种情况也使得构件角部(测点4—6、12—14)的接触应力更为集中。

如图7(b)所示,脱空侧角部边缘(测点4)的接触应力远小于无脱空侧角部边缘(图7(a)测点4、6、12、

14),表明垂直于脱空边方向的约束受到削弱,而平行于脱空边方向的钢管与混凝土依然保持一定的约束。

由图 7(c)可见,对于沿 4 边脱空缺陷的构件,荷载达到极限承载力时,混凝土与钢管间还存在空间,直至构件发生较大变形鼓屈后才与钢管发生接触。接触后,钢管对混凝土的约束同无脱空构件,构件角部接触应力最大,而其他位置的接触应力始终为 0。值得注意的是,所有沿边长脱空缺陷的构件,其接触应力较无脱空缺陷构件出现了明显的延迟,且沿边长脱空缺陷构件的最大接触应力远大于无脱空缺陷构件。这表明脱空缺陷的存在改变了轴力的传递机制,阻断了荷载由钢管向混凝土的传递路径,导致二者接触的延迟,并使得应力集中更加显著,从而对方钢管混凝土构件的承载力产生了不利影响。

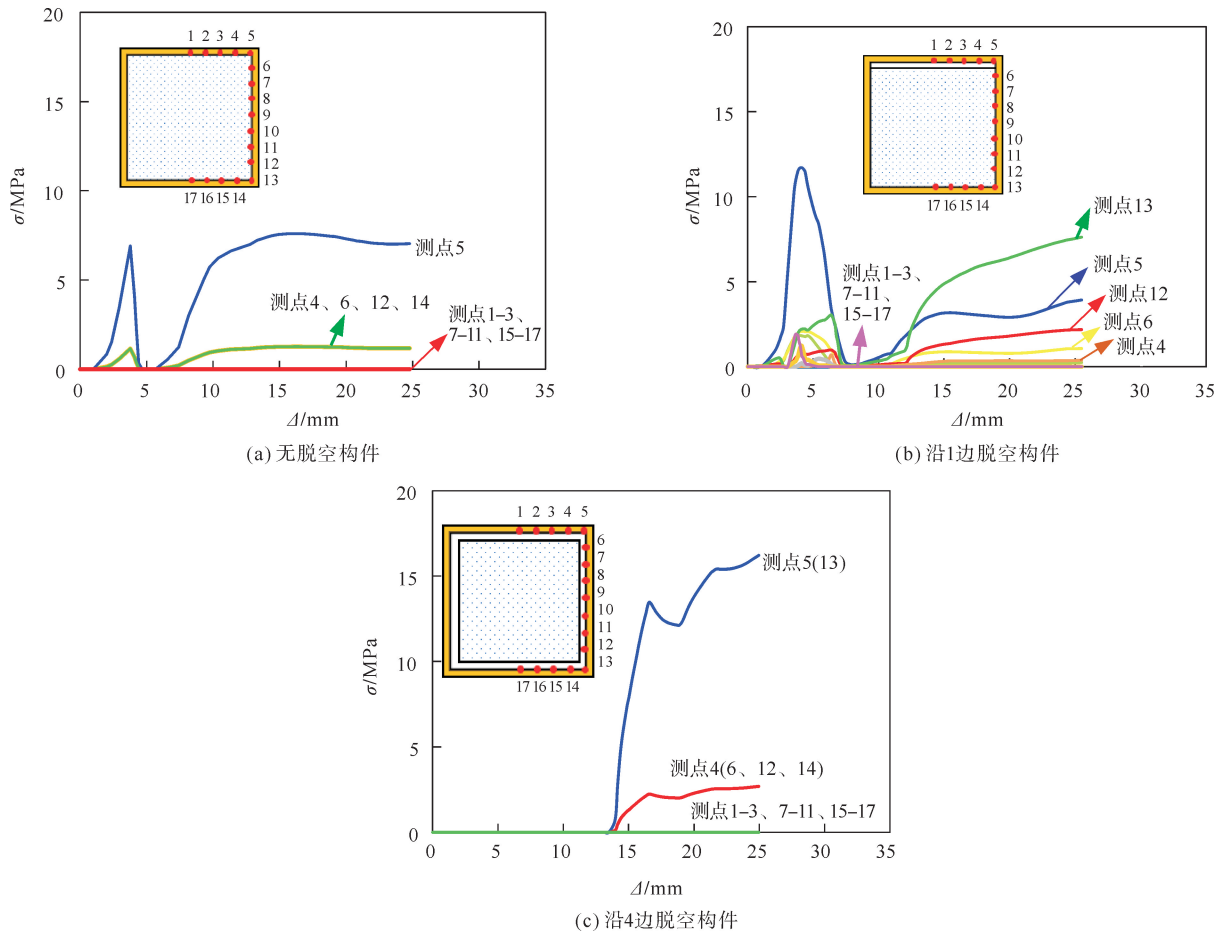


图 7 接触应力-轴向位移关系曲线

3 参数分析与简化计算公式

3.1 参数分析

3.1.1 脱空边数对承载力系数的影响

为了研究脱空边数(n)和脱空率(χ)对方钢管混凝土受力性能的影响,对 $\chi = 2.2\%$ 时不同脱空边数构件在不同参数下的轴压承载力进行了分析,图 8 展示了混凝土强度(f_{cu})、钢材屈服强度(f_y)、含钢率(α_s)对承载力系数-脱空边数($S-n$)关系曲线的影响。定义承载力系数 $S = N_u / N_{u, \text{无脱空}}$,其中, N_u 和 $N_{u, \text{无脱空}}$ 分别为沿边长脱空与无脱空构件的轴压承载力。结果表明:脱空边数 n 会显著影响承载力系数 S ,随着脱空边数 n 的增加, S 整体呈下降趋势。

由图 8(a)可见,随着混凝土强度(f_{cu})的增大,沿边长脱空缺陷对构件轴压承载力的不利影响呈减小趋势。当沿 3 边脱空时, f_{cu} 由 30 MPa 增加到 90 MPa, S 的降幅由 18.2% 降至 4.1%,而在沿 4 边脱空的情况下, S 的降幅由 19.0% 减小至 13.0%,降幅相对较小。由钢管混凝土的约束效应计算可知,当混凝土

强度较低时,钢管对混凝土的约束作用较强,脱空缺陷对承载力的影响更为显著。随着混凝土强度的提高,其自身的承载能力增强,对钢管约束的依赖程度减弱,从而减少了脱空缺陷对承载力的影响。然而,在沿4边脱空时,钢管与混凝土完全脱离,缺乏相互作用,即使混凝土强度提高,其承载能力的提升也有限。

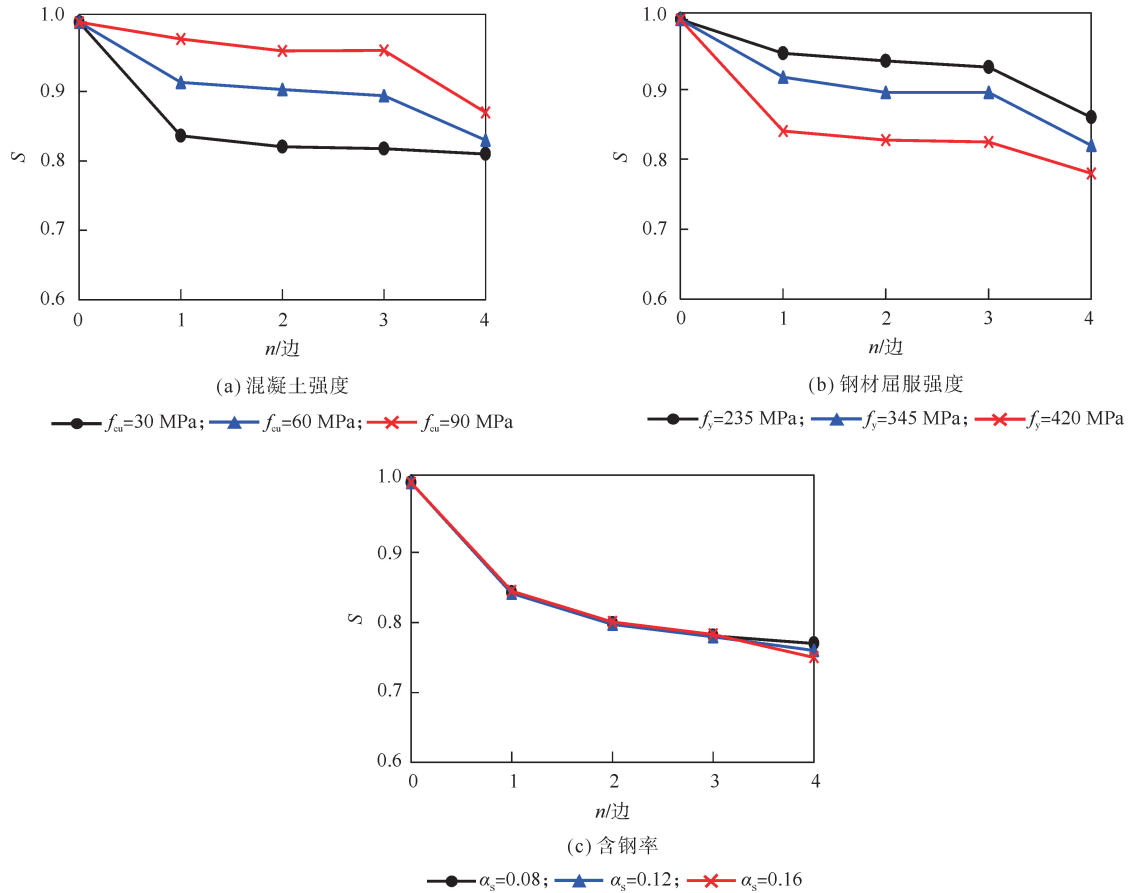


图8 不同参数对承载力系数-脱空边数关系曲线的影响

由图8(b)可见,随着钢材屈服强度(f_y)的增大,沿边长脱空缺陷对构件轴压承载力的不利影响也随之增大。以沿4边脱空缺陷构件为例, f_y 由235 MPa提高至420 MPa时, S 的降幅由14%增加至22%。其原因在于较高的屈服强度使得钢管有更强的变形能力,但由于脱空缺陷的存在,钢管无法有效约束混凝土,导致应力集中更加显著,承载能力的下降也更为明显。

由图8(c)可见,图中的3条曲线几乎重合,说明在不同的含钢率(α_s)下,沿边长脱空缺陷对承载力的影响趋势相似, α_s 的增加对改善脱空缺陷的不利影响作用有限。原因在于 α_s 的增加增强了钢管本身的承载能力和对核心混凝土的约束作用,然而,当存在脱空缺陷时,钢管和混凝土的接触区域减少,导致钢管无法充分发挥其对混凝土的约束作用。因此, α_s 没有显著改变脱空缺陷对承载力的削弱效应。

3.1.2 脱空率对承载力系数的影响

图9展示了脱空边数 $n=4$ 的方钢管混凝土构件混凝土强度(f_{cu})、钢材屈服强度(f_y)、含钢率(α_s)对承载力系数-脱空率($S-\chi$)关系曲线的影响。结果表明:脱空率 χ 会显著影响承载力系数 S ,随着脱空率 χ 的增加, S 整体亦呈下降趋势。

由图9(a)可见,在不同混凝土强度(f_{cu})条件下,随着脱空率 χ 的增大,脱空边数 $n=4$ 的方钢管混凝土构件承载力系数 S 均显著降低。其中,当 $f_{cu}=30$ MPa且脱空率 $\chi=3.0\%$ 时,构件的承载力系数较无脱空缺陷的构件下降了21.3%,降幅最为显著。主要原因是:对于低强度等级混凝土而言,其本身抗压性能较弱,对钢管约束的依赖性更强,因此在存在脱空缺陷时,性能衰减更为明显。

由图 9(b)可见,在不同钢材屈服强度(f_y)下,随着脱空率 χ 的增大,脱空边数 $n=4$ 的构件承载力系数 S 均呈显著下降趋势。其中,当 $f_y=420$ MPa 且脱空率 $\chi=3.0\%$ 时,构件的承载力系数相较于无脱空缺陷的构件下降了 23.4%,降幅最为明显。主要原因是:在无脱空状态下,较高的钢材屈服强度可使钢管对核心混凝土提供更强的约束作用,从而显著提升核心混凝土的承载性能;然而,当构件存在沿边长分布的脱空缺陷时,钢管与混凝土之间的有效接触被削弱,高强钢管的约束能力无法充分发挥,二者协同工作机制遭到破坏,导致构件承载性能大幅下降。因此,钢材强度越高,受脱空影响所带来的性能折减越显著。

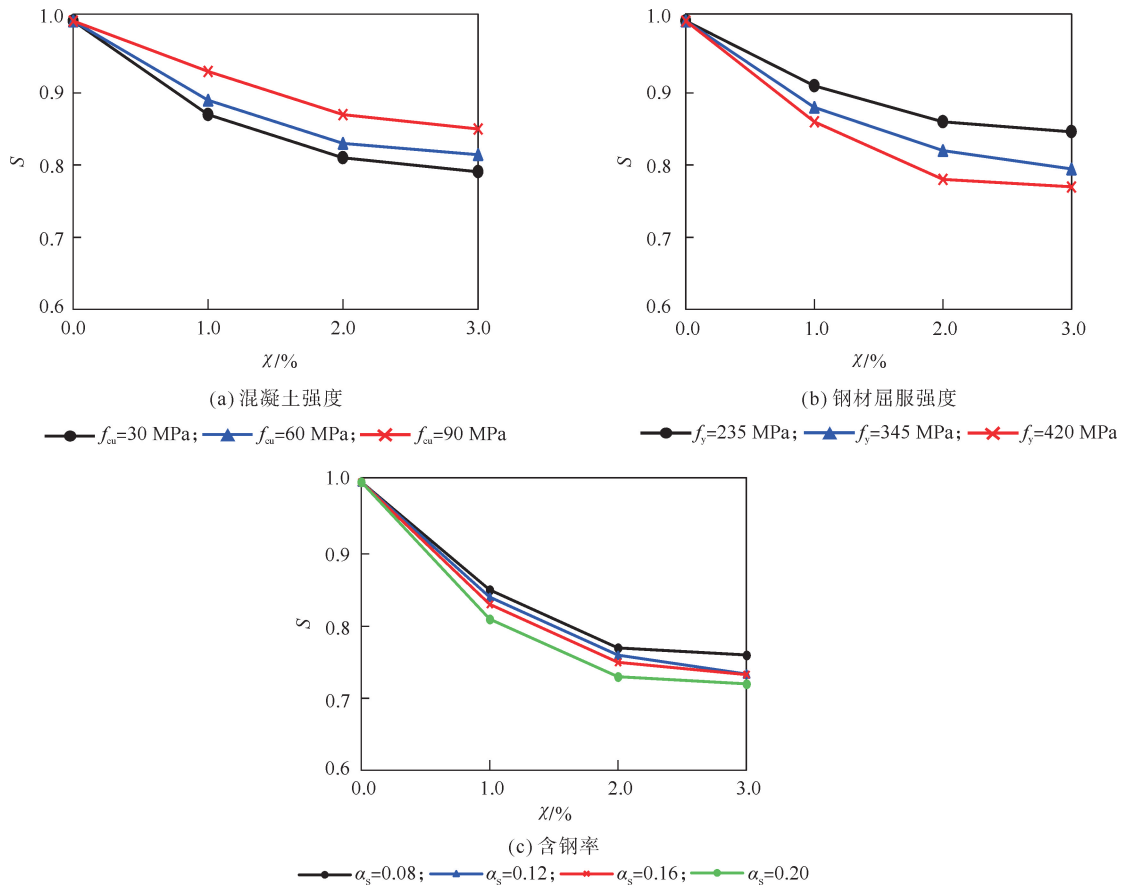


图 9 不同参数对承载力系数-脱空率关系曲线的影响

由图 9(c)可见,在不同含钢率(α_s)条件下,随着脱空率 χ 的增大,脱空边数 $n=4$ 的方钢管混凝土构件承载力系数 S 均显著下降。其中,当 $\alpha_s=0.20$ 且脱空率 $\chi=3.0\%$ 时,构件的承载力系数较无脱空缺陷的构件下降了 28.1%,降幅最大。主要原因为:在较高含钢率条件下,无脱空时,高含钢率使得钢管与核心混凝土间的相互作用对承载性能的贡献较大;但当存在脱空缺陷时,钢管与混凝土的有效接触面积减少,约束和支撑协同作用被严重削弱,导致钢材无法充分发挥其增强作用,从而造成性能下降更加明显。相较而言,低含钢率构件中钢管承载力与约束本就较弱,脱空引起的协同削弱程度有限,因此承载力系数的下降幅度较小。

3.2 简化计算公式

韩林海等^[1]提出了适用于方钢管混凝土构件轴压强度承载力 $N_{u,Han}$ 的计算公式:

$$N_{u,Han} = A_{sc} f_{sc} \tag{2}$$

$$A_{sc} = A_s + A_c$$

式中: f_{sc} 为钢管混凝土构件的抗压强度设计值,按式(3)、式(4)计算; A_{sc} 为方钢管混凝土柱横截面面积; A_s 为钢管横截面面积; A_c 为混凝土横截面面积。

$$f_{sc} = (1.18 + 0.85\theta_{sc})f_c \quad (3)$$

$$\theta_{sc} = \alpha_s f_y / f_{ck} \quad (4)$$

式中: f_c 为混凝土抗压强度设计值; θ_{sc} 为钢管混凝土约束效应系数; α_s 为含钢率; f_y 为钢管屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

试验实测结果 N_{uc} 与式(2)计算结果 $N_{u,Han}$ 的对比如表2所示, $N_{u,Han}/N_{uc}$ 比值的平均值为1.06, 式(2)的计算结果偏高, 不能精确地预测沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱的承载力, 因此本文在试验研究和参数分析的基础上对式(2)进行合理修正。

从上述参数研究中发现, 脱空边数和脱空率对构件极限承载力有着显著影响, 通过参数分析结果, 拟合得到考虑脱空率和脱空边数的折减系数

k_1 、 k_2 。在式(2)的基础上, 提出考虑沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式式(7):

$$k_1 = e^{-12.51\lambda} \quad (5)$$

$$k_2 = -0.046n + 1.198 \quad (6)$$

$$N_u = k_1 k_2 A_{sc} f_{sc} \quad (7)$$

式中: λ 为边长脱空率; n 为脱空边数; N_u 为沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土短柱轴压承载力。

式(7)的适用范围为脱空率 $\lambda = 0.0\% \sim 3.0\%$, 核心混凝土强度 $f_{cu} = 30 \sim 90$ MPa, 钢材屈服强度 $f_y = 235 \sim 420$ MPa, 含钢率 $\alpha_s = 0.08 \sim 0.20$ 。

图10为简化公式式(7)计算结果 N_u 与本文沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土试验实测结果 N_{uc} 和有限元分析结果 N_{uc} 的对比。结果表明: 计算结果与试验结果吻合较好, 差值范围在 $\pm 5\%$ 以内, 公式计算结果(N_u)与试验结果(N_{uc})比值的平均值和标准差分别为1.008和0.028, 公式计算结果(N_u)与有限元计算结果(N_{uc})比值的平均值和标准差分别为0.998和0.036。可见该公式具有较高的计算精度, 可为工程应用提供参考。

4 结论

通过有限元数值分析的方法, 建立了轴压作用下沿不同边数脱空缺陷的方钢管混凝土短柱的精细化数值模型, 对其在轴压作用下的受力机理进行了系统化的参数分析, 可以得到以下相关结论:

1) 构件轴压承载力随着脱空边数的增加呈持续下降趋势, 沿4边脱空缺陷的构件较无脱空缺陷构件降低了12.77%。

2) 脱空缺陷的存在会削弱方钢管混凝土短柱的约束效应, 改变荷载的传递机制, 导致构件接触应力发生延迟, 局部应力集中更加明显。

3) 特征参数分析表明, 方钢管混凝土短柱在轴压荷载作用下的承载力随脱空边数和脱空率的增大而明显减小; 脱空率恒定时, 随着脱空边数的增大, 低核心混凝土强度或者高钢材屈服强度的构件, 与对应的无脱空构件相比, 轴压承载力降幅明显, 而含钢率的变化对其承载力降幅影响不明显; 脱空边数恒定时, 随着脱空率的增大, 低核心混凝土强度、高钢材屈服强度或高含钢率的构件, 与对应的脱空构件相比, 轴压承载力降幅显著。

4) 基于参数分析结果, 提出了适用于沿边长脱空缺陷的方钢管混凝土轴压短柱的轴压承载力简化计

表2 N_{uc} 与 $N_{u,Han}$ 对比结果

编号	N_{uc}/kN	$N_{u,Han}/\text{kN}$	$N_{u,Han}/N_{uc}$
CC-1	2827.50	2940.60	1.04
CC-2	2779.64	2918.62	1.05
CC-3	2716.62	2906.78	1.07
CC-4	2651.11	2889.71	1.09
均值			1.06
方差			0.02

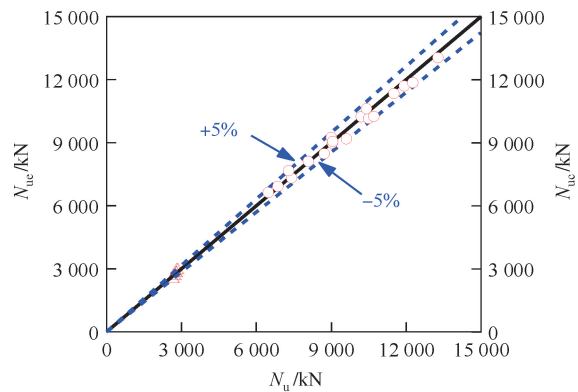


图10 式(7)计算值与试验值和模拟值的对比

△试验结果值; ○有限元计算值

算公式。

参考文献(References):

- [1] 韩林海,陶忠,刘威. 钢管混凝土结构:理论与实践[J]. 福州大学学报(自然科学版),2001,29(6):24-34.
HAN Linhai,TAO Zhong,LIU Wei. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition),2001,29(6):24-34.
- [2] 常晨晓. 脱空缺陷对方钢管混凝土柱的承载力影响程度模拟分析[D]. 焦作:河南理工大学,2023.
CHANG Chenxiao. Simulation analysis on the influence of void defect on the bearing capacity of concrete-filled square steel tubular columns[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2023.
- [3] LIAO F Y, HAN L H, HE S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research,2011,67(12):1922-1935.
- [4] LIAO F Y, HAN L H, TAO Z. Behaviour of CFST stub columns with initial concrete imperfection: Analysis and calculations[J]. Thin-Walled Structures,2013,70(9):57-69.
- [5] 廖飞宇,李艳飞,尧国皇,等. 带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土构件拉弯试验和承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(5):165-176.
LIAO Feiyu,LI Yanfei,YAO Guohuang,et al. Mechanical behavior and design approach of concrete filled steel tubes with circular-segment gap under combined actions of tension and bending[J]. Journal of Building Structures,2021,42(5):165-176.
- [6] 廖飞宇,韩浩,王宇航. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究[J]. 土木工程学报,2019,52(7):57-68.
LIAO Feiyu,HAN Hao,WANG Yuhang. Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular(CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(7):57-68.
- [7] 沈奇罕,王静峰,李景哲. 带球冠形脱空缺陷椭圆钢管混凝土短柱轴压性能及计算方法研究[J]. 工程力学,2022,39(12):141-150.
SHEN Qihan,WANG Jingfeng,LI Jingzhe. Experimental investigation and design of axially loaded concrete filled elliptical steel tubular stub columns with spherical gaps[J]. Engineering Mechanics,2022,39(12):141-150.
- [8] 王静峰,刘伟,沈奇罕,等. 考虑环向脱空影响的椭圆钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(2):50-63.
WANG Jingfeng,LIU Wei,SHEN Qihan,et al. Investigation of axially-loaded concrete-filled elliptical steel tubular short columns considering the effect of circumferential gap[J]. Journal of Building Structures,2023,44(2):50-63.
- [9] 叶勇,李威,陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报,2015,36(S1):324-329.
YE Yong,LI Wei,CHEN Jinyang. FEA on compressive behavior of square CFST short columns with circumferential gap between concrete and tube[J]. Journal of Building Structures,2015,36(S1):324-329.
- [10] 尚天宇. 核心砼密实度缺陷对方钢管混凝土柱轴心受压性能的影响[D]. 焦作:河南理工大学,2023.
SHANG Tianyu. Effect of core concrete density defect on axial compression performance of concrete filled square steel tubular column[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2023.
- [11] 张建威,廖飞宇,张伟杰. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件压弯剪复合受力作用下的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(S1):251-256.
ZHANG Jianwei,LIAO Feiyu,ZHANG Weijie. Cyclic behavior of concrete-filled steel tubular members with circumferential gap under combined compression-bending-shear loading[J]. Journal of Building Structures,2019,40(S1):251-256.
- [12] 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.
- [13] ATTARD M M,SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete[J]. Aci Materials Journal,1996,93(5):432-442.
- [14] HAN L H,YAO G H,TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion[J]. Thin-Walled Structures,2007,45(1):24-36.
- [15] MORISHITA Y,TOMII M,YOSHIMURA K. Experimental studies on bond strength in concrete filled square anoctagonal steel tubular columns subjected to axial loads[J]. Transactions of Japan Concrete Institute,1979(1):351-358.
- [16] 王志滨,陶忠,韩林海. 初始缺陷对薄壁方钢管混凝土轴压力学性能的影响分析[J]. 工业建筑,2006(11):19-22.
WANG Zhibin,TAO Zhong,HAN Linhai. Effect of initial imperfection on mechanical property of stub columns of square concrete-filled thin-walled steel tubes[J]. Industrial Construction,2006(11):19-22.
- [17] LAMA L,ZHOU F,BHATT N R. Structural performance and design of stainless steel SHS-concrete-carbon steel CHS double-skin stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2022,190(3):107155.

(责任编辑 赵金环;英文校审 杨国涛)