钢管开洞CFST方形柱轴压试验与承载力研究

温四清[1],袁焕鑫[2*],温永坚[1],何昆松[2],杜新喜[2]
(1.中信建筑设计研究总院有限公司,武汉 430014; 2.武汉大学 土木建筑工程学院,武汉 430072)

摘 要: 在钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)柱-钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)梁组合框架结构中,需在CFST柱的钢管上开设洞口,以便于RC梁与CFST柱完成节点连接。为探究开洞区域钢管壁厚、开洞尺寸对钢管开洞CFST方形柱轴压力学性能的影响,设计并制作了4根足尺钢管开洞CFST方形柱试件,开展柱试件轴压加载试验研究。结果表明:开洞区域钢管未加厚试件的破坏模式为开洞区域钢管鼓曲、混凝土短梁受压破坏;开洞区域钢管加厚试件则发生柱身中下部或中上部钢管局部鼓曲破坏。洞口边缘钢管会将部分轴力向内传递给内部混凝土;增大开洞区域钢管壁厚可提升钢管承担的轴力占比,使开洞区域的轴压承载力不低于完整无削弱截面的承载力;开洞尺寸对试件轴压承载力影响较小。文中还建立了钢管开洞CFST方形柱的轴压简化力学模型,将开洞钢管等效为4根压弯角钢,假定混凝土仍处于完全约束状态,推导得到了钢管开洞CFST方形柱的轴压承载力计算方法,并将计算结果与试验结果进行对比,验证了所提出计算方法的准确性。

关键词: 钢管混凝土; 方形柱; 钢管开洞; 轴压承载力; 简化力学模型; 计算方法
中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671－9379(2026)07－0056－09
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241127001

Axial Compressive Test and Load-Carrying Capacity of CFST Square Columns with Tube Openings

WEN Siqing[1], *YUAN Huanxin*[2*], *WEN Yongjian*[1], *HE Kunsong*[2], *DU Xinxi*[2]
(1. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China;
2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
*Corresponding author: yuanhx@whu.edu.cn

Abstract: In the application of composite frame structures with concrete-filled steel tubular (CFST) square columns and reinforced concrete (RC) beams, openings are introduced in the steel tubes of columns to facilitate RC beam-to-CFST column connections. To investigate the influence of steel tube wall thickness and opening size on the axial compressive behavior of CFST square columns with tube openings, four full-scale CFST square column specimens were designed and fabricated, and further subjected to axial compression tests. The results revealed that the failure mode of the non-thickened specimen in the opening zone was the buckling of the steel tube and compression failure of the concrete stub beam in the opening zone, while the specimen with a thickened opening zone exhibited local bulging failure in the middle-lower or upper parts of the column. It was found that part of the axial load undertaken by the steel tube was transferred to the concrete infill close to the opening edges. The steel tube in the opening zone could

收稿日期:2024-11-27
基金项目:国家自然科学基金(52278208)
作者简介:
温四清(1964—),男,硕士,正高级工程师,主要从事结构设计方面的研究。E-mail: wensq@citic.com。
通信作者:
袁焕鑫(1988—),男,博士,副教授,主要从事金属结构方面的研究。E-mail: yuanhx@whu.edu.cn。

undertake a higher proportion of axial load by increasing the thickness of steel tube in the opening zone; thereby ensuring the axial compression capacity of this zone could be no less than that of the full cross-section. The size of the opening in the opening zone had a relatively small impact on the axial compression capacity of the specimen. A simplified mechanical model for the CFST square columns with tube openings was developed. Specifically, the steel tube with openings was modeled as four angle steels under combined compression and bending, and the concrete infill was assumed to be fully confined. A calculation method for predicting the axial compression capacity of CFST square columns with tube openings was proposed, and the calculation results were compared with the test results, which verified the accuracy of the calculation method.

Keywords: concrete-filled steel tube (CFST); square column; tube opening; axial compressive capacity; simplified mechanical model; calculation method

钢管混凝土(concrete-filled steel tube,CFST)依靠钢管与混凝土协同受力,既能充分发挥钢材强度,又能通过钢管约束作用改善混凝土的力学性能[1-2]。CFST方形柱凭借施工便捷、建筑平面布置灵活等优势,在工程中得到广泛应用[3-4]。在CFST柱-钢筋混凝土(reinforced concrete,RC)梁组合框架结构中,梁柱节点连接是设计与施工的重点和难点。现行标准《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)[5]、《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)[6]针对RC梁与CFST柱的节点连接,提供了环形牛腿、承重销、RC环梁、穿筋单梁等多种构造形式。同时,国内外学者也针对此类节点开展了大量研究。陈庆军等[7]、TANG等[8]提出了一种节点区柱钢管不贯通式CFST柱-RC梁节点,柱钢管在节点处断开或在梁位开孔,梁纵筋贯通节点,通过增大节点区柱截面并配置钢筋保障节点承载力。林晓俊等[9]融合CFST与全螺栓装配式技术,提出了一种内置十字形芯筒CFST柱全螺栓装配式梁柱连接节点,构件由方钢管柱、自攻螺栓、高强螺栓、十字形芯筒、塞焊与混凝土组成。刘用等[10]针对外包U形钢-混凝土组合梁与方钢管混凝土柱的连接构造,分别设计了外环板、内隔板两类节点;U形钢上下翼缘与外环板或内隔板焊接,腹板直接焊接于方钢管柱壁,梁板纵筋可穿过CFST柱预留洞口,或与外环板焊接。胥兴等[11]提出了一种穿心式方钢管混凝土柱与U形钢-混凝土组合梁连接构造,通过在方钢管、U形钢上开设槽口,将型钢构件嵌入节点区域并在接口处施焊,实现梁柱可靠连接。MA等[12]研发了多种CFST叠合柱-RC梁节点构造,RC梁纵筋可穿过CFST叠合柱外侧RC区域并配套加强措施,也可与CFST叠合柱中焊接在钢管上的环板、套筒锚固。

上述各类节点构造虽各有适用场景并已投入工程应用,但也存在构造复杂、加工精度要求高、现场施工难度大等问题。例如穿筋单梁、矩形CFST柱-RC梁穿筋节点、方钢管混凝土柱与U形钢-混凝土组合梁穿心连接等构造,对开孔、开槽及现场安装定位精度要求较高;RC环梁、柱钢管不贯通式CFST柱-RC梁节点需额外消耗建材、占用建筑使用空间,且计算方法较为复杂。

结合实际工程应用需求,温永坚等[13]提出了钢管开洞、钢筋直穿式CFST柱-RC梁节点构造,在CFST柱与RC梁相交位置的钢管上开设矩形洞口,RC梁纵筋直接穿过洞口贯穿节点,梁柱混凝土在洞口处整体浇筑成型。该节点构造简单,可大幅降低现场施工难度;前期针对该类梁柱节点的试验研究[14]表明其具有良好的抗震性能。但钢管开洞会削弱柱截面,其对柱轴压承载力的影响机理仍有待系统研究。

基于以上背景,本文设计并制作了4根足尺寸钢管开洞CFST方形柱试件,完成轴压加载试验;主要分析了开洞区域钢管壁厚、开洞尺寸对试件破坏形态、刚度、承载力等力学性能的影响,揭示钢管开洞CFST方形柱的轴压受力机理,建立轴压简化力学模型,推导并验证轴压承载力计算方法。

1 轴压试验概况

1.1 试件设计与制作

本次试验共设计了4根截面尺寸为450 mm×450 mm的足尺钢管开洞CFST方形柱试件(ZY-1~ZY-4),试件相关参数见表1,几何尺寸与构造细节见图1。柱身钢管采用厚度为10 mm的Q355B钢板焊接而成,钢管内部填充C35普通混凝土。柱身四周设有4根长度为200 mm的RC短梁,混凝土强度等级同样为C35;梁纵筋采用HRB400钢筋,箍筋采用HPB300钢筋,混凝土保护层厚度为25 mm。试件ZY-1、ZY-2在各梁柱相交位置开设两个带倒角的矩形洞口,两洞口间钢板高度为100 mm,洞口尺寸为250 mm×150 mm;试件ZY-3、ZY-4在各梁柱相交位置开设1个带倒角的矩形洞口,洞口尺寸为250 mm×400 mm。RC梁上、下纵筋分别从对应上、下洞口贯穿CFST柱,梁与柱的混凝土在洞口位置融为一体。为抵消柱身开洞带来的截面削弱效应,除试件ZY-1外,其余试件在700 mm高度的开洞区域加厚钢管,试件ZY-2、ZY-3、ZY-4开洞区域的钢管壁厚分别为16 mm、20 mm、24 mm。

表1 各试件主要参数

Table 1 Key parameters of specimens

试件编号	H/mm	$b_c\times h_c\times t_c$/mm	$b_b\times h_b$/mm	$b_o\times h_o$/mm	n_o/个	t_j/mm	h_j/mm
ZY-1	1 600	450×450×10	250×450	250×150	8	10	700
ZY-2				250×150	8	16	
ZY-3				250×400	4	20	
ZY-4				250×400	4	24	

注：H为不含端板的试件总高；b_c、h_c、t_c分别为柱身钢管截面宽、高、壁厚；b_b、h_b分别为梁截面宽和高；b_o、h_o、n_o分别为洞口宽、高、总数量；t_j为开洞区域的钢管壁厚；h_j为开洞区域加厚钢管的高度。

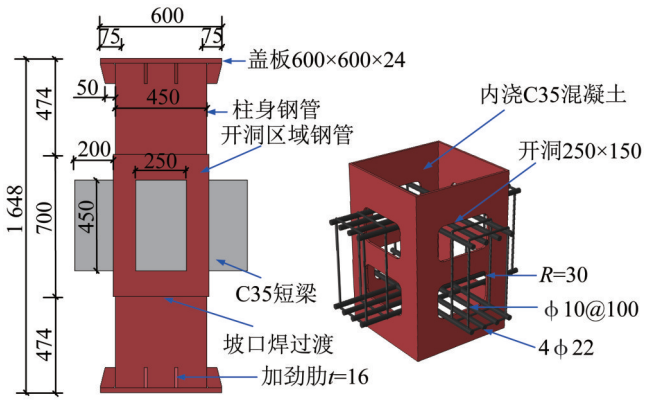


图1 试件几何尺寸与开洞构造（单位：mm）

Fig. 1 Geometric dimensions and tube openings of specimens (unit: mm)

1.2 材料力学性能

根据《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[15]加工拉伸试件，每种厚度钢板、每种直径钢筋各制作3个拉伸试件，全部试件取自同批次钢板、钢筋，总计18个拉伸试件。柱身钢板、梁钢筋的实测力学性能指标见表2。同期浇筑3组同养护条件的C35混凝土标准立方体试块，按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[16]开展轴压试验，测得混凝土立方体抗压强度标准值为33.5 MPa。

1.3 轴压试验装置与测点布置

采用30 000 kN电液伺服压力试验机开展轴压试验研究，试验加载装置如图2所示。试件底部设置球形铰支座，试件端面与支座之间铺设石英砂找平。正式加载前先预加载至1/10设计荷载，以检验加载设备与数据采集系统的准确性。正式加载分为两个阶段：先采用力控制加载，加载速率为5 kN·s^{-1}；荷载达到设计荷载的80%时切换为位移控制，加载速率为0.2 mm·min^{-1}。当试件承载力下降至峰值荷载的85%以下或变形过大时，判断试件丧失承载能力，终止试验。

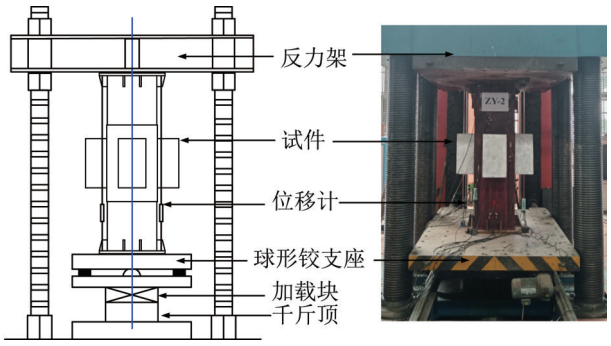


图2 轴压试验加载装置

Fig. 2 Loading setup of axial compressive test

在各试件上布置位移和应变测点，其中位移测点布

表2 钢板和钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel plates and rebars

钢材牌号	$t(d)$/mm	E_s/GPa	f_y/MPa	ε_y/(×10^{-6})	f_u/MPa	$\varepsilon_u/\varepsilon$	A/%
Q355B	10	206.5	360.5	2 110	510.5	0.102	27.3
	16	202.2	433.8	2 032	585.2	0.151	25.7
	20	200.1	412.5	2 617	572.2	0.139	23.8
	24	201.3	435.4	2 135	589.5	0.136	20.7
HRB400	22	206.9	406.3	1 926	597.8	0.159	15.2
HPB300	10	204.3	450.0	2 759	601.3	0.087	12.5

注：E_s为钢材弹性模量；f_y、ε_y分别为钢材屈服强度和对应的应变值；f_u、ε_u分别为钢材抗拉强度和对应的应变值；A为断后伸长率。

置如图2所示，即在柱身四角各布置1个位移计以测量柱身轴向变形。应变片布置如图3所示，具体布置方案如下：(1) 在距离柱顶、柱底225 mm的柱身中部各布置两个应变花，用于测量柱身的纵向和横向应变，测点编号为Z1、Z2，Z1-L、Z1-T分别表示柱身测点Z1的纵向和横向应变；(2) 在开洞区域各洞口边缘分别布置8个单向应变片，监测洞口钢管纵向应变，测点编号为C1～C8；(3) 在混凝土短梁距洞口100 mm处的纵向钢筋上分别布置1个单向应变片，用于测量纵向钢筋应变，测点编号为SL、SR、XL、XR，其中SL表示左侧上部纵筋，XL表示左侧下部纵筋。

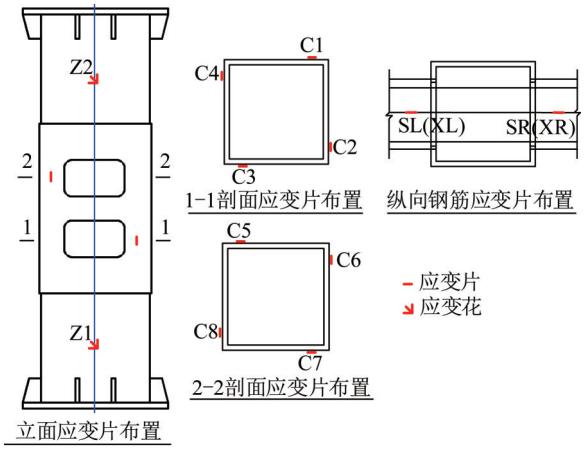


图3　应变片布置示意图

Fig. 3　Arrangement diagram of strain gauges

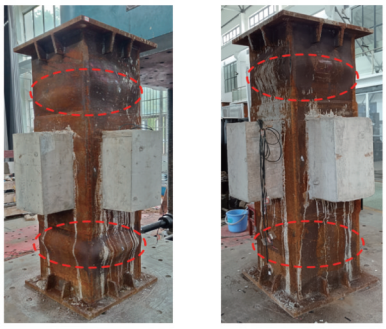
2　轴压试验结果分析

2.1　试件破坏形态

4根试件的破坏形态见图4。加载至屈服荷载前，4根试件均无明显变形，整体处于弹性工作阶段；荷载达到屈服荷载时，试件ZY-1洞口角钢出现轻微鼓曲，混凝土短梁开始出现斜向裂缝，其余试件开洞区域钢管无明显变形；加载至极限荷载时，试件ZY-1洞口角钢出现明显鼓曲，混凝土短梁产生较宽的斜向裂缝，试验过程中持续出现混凝土压碎、钢管与混凝土剥离的声响，承载力开始下降，试件压缩变形持续增大，开洞区域角钢向外鼓曲严重，判断试件破坏并停止加载，如图4a)所示；相反，试件ZY-2、ZY-3、ZY-4达到极限荷载时，开洞区域钢管未出现明显变形，试件ZY-2柱身上部四周钢管发生局部鼓曲(图4b))，试件ZY-3、ZY-4柱身上、下部四周钢管均出现鼓曲(图4c)、d))，达到极限荷载后3根试件仍可继续承载，直到柱身钢管产生较大鼓曲变形后判断试件破坏并停止试验。对比4根试件破坏模式可知，加厚节点开洞区域钢管，能够提升钢管对内部混凝土的约束能力，有效避免洞口区域钢管发生鼓曲破坏。



a) 试件ZY-1　　b) 试件ZY-2



c) 试件ZY-3　　d) 试件ZY-4

图4　试件破坏形态

Fig. 4　Failure modes of specimens

2.2　荷载–应变曲线

对比4根试件各测点应变发展规律，可分析开洞尺寸、开洞区域钢管壁厚对试件各部位屈服状态与应变发展的影响。试件截面均为双轴对称截面，如图3所示。选取代表性测点数据绘制曲线，从开洞区域两个剖面各取一个测点应变作为代表；每个试件柱身任取一处测点的横向、纵向应变；纵筋选取任意一侧上下纵筋应变。试验得到的荷载-应变曲线如图5所示，图例中L、T分别代表纵向和横向应变，C1、C8代表应变片测点偏号，SL表示左侧上部纵筋，XL表示左侧下部纵筋。

图5a)为各试件开洞区域钢管测点的荷载-应变曲线。相同荷载作用下，开洞区域钢管的应变从大到小依次为ZY-1，ZY-2，ZY-3，ZY-4，应变大小与洞口钢管壁厚成反比；增大开洞区域钢管壁厚，可显著降低开洞区域钢管的应变，从而减小钢管应力。荷载加载至8 700 kN时，试件ZY-1的C1测点应变发生反向变化，说明该处钢板达到临界屈曲状态，随后逐渐产生平面外鼓曲；外凸位置压应变减小，并逐渐转为拉应变，与试件ZY-1开洞区域角钢发生明显鼓曲变形的破坏现象相吻合。相反，其余试件的荷载-应变曲线无明显应变反转，表明其余试件开洞区域钢管未达到临界屈曲状态。

图5b)为各试件柱身钢管测点的荷载-应变曲线。从图中可以看出，试件ZY-1纵向始终受压，横向始终受拉；加载至极限荷载80%前曲线保持线性，纵向应变始终大

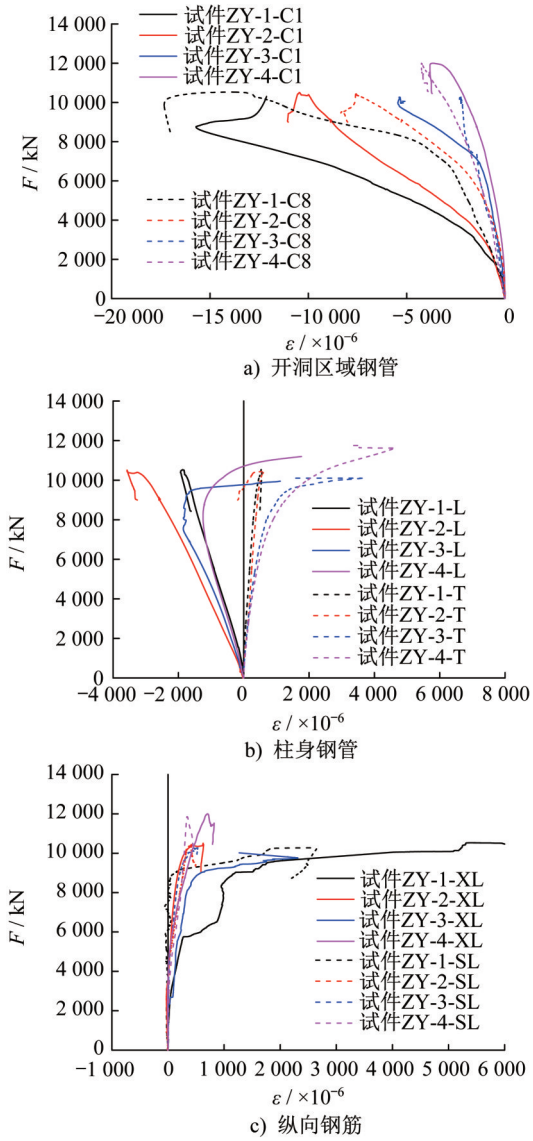


图5 试件荷载–应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves of specimens

于横向应变，说明此时试件主要以纵向承压为主，整个加载过程中柱身钢管应变值偏小；试件ZY-2柱身应变发展趋势与试件ZY-1柱身应变发展趋势接近，但试件ZY-2纵向应变更大，且荷载-应变曲线存在明显应变反转点，说明柱身截面达到临界屈曲状态，钢管发生外凸鼓曲变形，与试件ZY-2实际破坏形态一致；试件ZY-3和ZY-4加载至极限荷载65%前处于线性阶段，随后纵向荷载-应变曲线发生明显反转，柱身钢管达到临界屈曲状态，发生外鼓屈曲，与试验现象匹配。

图5c)为各试件短梁纵向钢筋测点的荷载-应变曲线，所有纵向钢筋均承受受拉应力，拉应变随荷载提升持续增大。荷载超过8 700 kN时，试件ZY-1纵向钢筋拉应变快速增大，远超钢筋的屈服应变，说明此时混凝土短梁在洞口区域承受剧烈挤压，钢管与内填混凝土之间轴力传递量较大，这与试件ZY-1混凝土短梁出现多条斜向裂缝相吻合；反观加厚开洞区域钢管的其余试件，开洞区域钢管承担的轴力占比提升，钢筋的拉应变均较小，说明增加开洞区域钢管壁厚可降低洞口区域钢管、内填混凝土的平均压应力，避免洞口内填混凝土平均压应力骤增。

2.3 荷载–位移曲线

试验测得荷载-位移曲线如图6所示，其中屈服承载力采用双斜线作图法确定[17]。从图中可知，试件ZY-1、ZY-2、ZY-3的屈服荷载较为接近，试件ZY-4的屈服荷载最高；试件ZY-1与ZY-2的峰值荷载仅相差0.19%，基本一致，表明对于开设双小孔的试件，在开洞区域等面积补强加厚钢管后，增加壁厚对试件轴压极限承载力的影响较弱。原因是洞口范围内的内填混凝土同时受到RC梁的约束作用，短梁与内部配筋的加强作用与加厚钢管效果相近。开设单一大洞口的试件差异显著，试件ZY-4相比试件ZY-3的峰值荷载提高了17.05%，这是因为开设单一大洞相对于开设双小洞对钢管截面的削弱程度更大，因此增加钢管壁厚对极限承载力的提升效果更突出；开大洞更便于钢筋布置与现场施工，工程适用性更强。对比试件ZY-2、ZY-3峰值荷载，二者仅相差2.5%，表明开洞尺寸对试件轴压极限承载力影响有限。两类试件破坏均发生在无洞口的柱身区段，试件轴压极限承载力由非开洞区域钢管混凝土截面控制。从试件的初始刚度分析，试件ZY-1的初始刚度最低，其余3根试件的初始刚度基本一致。洞口开设会削弱钢管对混凝土的约束，降低试件的初始刚度；加厚洞口钢管可有效提高试件的初始刚度。

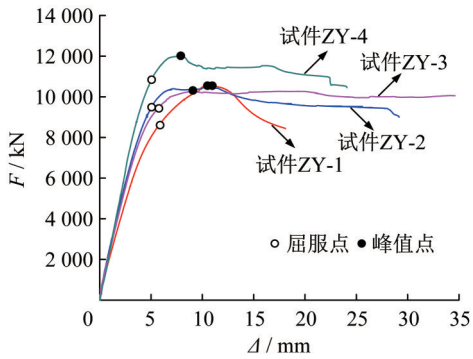


图6 试件荷载–位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of specimens

已有学者[18]系统梳理国内外钢管混凝土轴压承载力计算规范，主要分为四类：采用拟混凝土理论的欧洲规范EN 1994-1-1[19]、采用拟钢理论的英国设计规程BS 5400-5:2005[20]、采用叠加理论的《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2018)[21]、采用统一理论的《钢管

混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)[22]。采用钢板、混凝土材性试验实测强度,依据钢管原截面尺寸,分别按各规范计算公式计算CFST柱的承载力,将规范计算结果与试验结果进行比较,各试件的承载力指标见表3,表中N_1~N_4分别为各规范轴压承载力设计值,N_y、N_u分别为试验实测的屈服荷载和极限承载力,f_y为钢材屈服强度,f_c为混凝土抗压强度,A_s、A_c分别为钢管、混凝土的横截面面积,A_{sc}为组合柱的横截面面积,f_{sc}为组合强度,ξ为约束系数,B和C为截面形状指标。从表中可以得出,规范计算值与试验屈服荷载的平均比值为0.93,规范计算值与试验极限承载力的平均比值为0.81,现有规范计算公式对开洞CFST方柱轴压承载力的计算结果整体偏保守,根源在于规范默认对截面削弱构件统一折减。此外,采用《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)[22]统一理论计算结果与试验结果较为接近,该规范充分考虑了钢管约束效应带来的混凝土承载力提高。

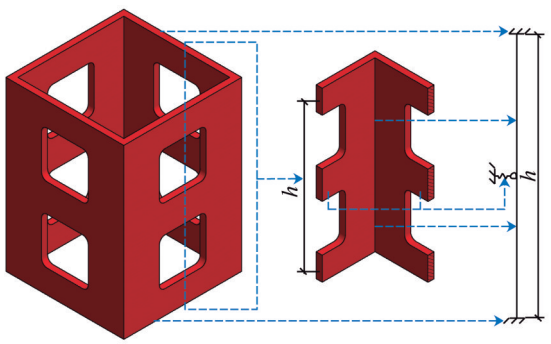
表3　规范承载力计算结果与试验结果对比

Table 3　Comparison of bearing capacity between calculated results by codes and test results

试件编号	承载力试验值		承载力规范计算值											
			EN 1994-1-1[19] $N_1=A_sf_y+0.85A_cf_c$			BS 5400-5:2005[20] $N_2=0.95A_sf_y+0.45A_cf_c$			CECS 159—2018[21] $N_3=A_sf_y+A_cf_c$			GB 50936—2014[22] $N_4=A_{sc}f_{sc}$ $f_{sc}=(1.212+B\xi+C\xi^2)f_c$ $\xi=A_sf_y/A_cf_c$		
—	N_y/kN	N_u/kN	N_1/kN	$\frac{N_1}{N_y}$	$\frac{N_1}{N_u}$	N_2/kN	$\frac{N_2}{N_y}$	$\frac{N_2}{N_u}$	N_3/kN	$\frac{N_3}{N_y}$	$\frac{N_3}{N_u}$	N_4/kN	$\frac{N_4}{N_y}$	$\frac{N_4}{N_u}$
ZY-1	8 505	10 529	8 468	1.00	0.81	8 338	0.98	0.79	8 931	1.05	0.85	9 364	1.10	0.89
ZY-2	9 324	10 509		0.91	0.81		0.89	0.79		0.96	0.85		1.00	0.89
ZY-3	9 315	10 252		0.91	0.83		0.89	0.81		0.96	0.87		1.01	0.92
ZY-4	10 911	12 000		0.78	0.70		0.76	0.69		0.82	0.75		0.85	0.78
平均值	—	—	—	0.90	0.79	—	0.88	0.77	—	0.95	0.83	—	0.99	0.87
标准差	—	—	—	0.08	0.05	—	0.08	0.05	—	0.08	0.05	—	0.09	0.05

3　钢管开洞柱轴压简化力学模型

结合前文试验数据与规范计算结果可知,若柱轴压破坏发生在钢管开洞区域,破坏位置必然位于洞口范围内。CFST方形柱中钢管对内填混凝土的约束作用有限,混凝土强度提升幅度较低[23];钢管开洞会进一步削弱对内填混凝土的约束作用,但洞口区域内填混凝土同时受到RC梁的约束作用,2.3节中的分析结果也证实该约束效应较为明显,因此在分析柱轴压受力性能时仍将开洞区内填混凝土视为受约束状态。从几何形态上,开洞区域钢管可等效为4根角钢,如图7所示。考虑到未开洞区域钢管的刚度远大于开洞区域钢管的刚度,因此角钢两端按固定支座处理;单侧开设双洞口时,两洞口之间钢板可作为角钢中部弹性支座;单侧开设单一大洞时,无中部弹性支座。



注:去掉弹性支座并令h=h_o即为单侧开一个洞的分析模型

图7　开洞区域钢管分析模型

Fig. 7　Analysis model of steel tube in the opening area

开洞区域钢管同时承受轴向压力、内部混凝土受压膨胀产生的侧向压力,因此单根角钢按压弯构件分析。计算角钢弯矩时,偏安全取完整截面1/4钢管对应的混凝土侧向压力作为单根角钢横向荷载。图8给出了内填混凝土侧向压应力p与钢管平均横向应力σ_θ的平衡关系,由此可推导垂直角钢y-y轴、作用于剪心的横向线荷载q,计算公式见式(1)。

同时,建立CFST方形柱的有限元模型,通过有限元分析可得到钢管横向应力σ_θ的取值。有限元计算结果显示钢管横向应力不超过钢材屈服强度的3%;考虑有限元模型整体刚度偏大,会低估各部分的变形与界面相互作用,设计计算时偏安全统一取σ_θ=0.03f_y。

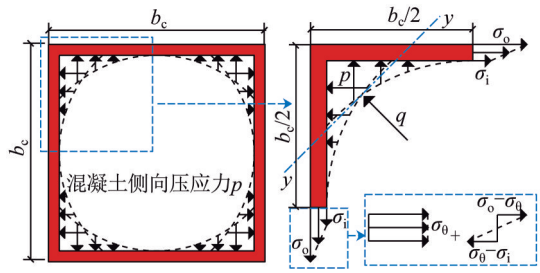


图8 内填混凝土侧向压应力与钢管横向应力关系

Fig. 8 Relationship between lateral pressure from concrete infill and hoop stress in steel tube

$$q=\sqrt{2}\int_{b_c/2}^{b_c-t_c} p\mathrm{d}x=\sqrt{2}\,\sigma_\theta\,t_c \tag{1}$$

4 钢管开洞柱轴压承载力计算方法

4.1 轴压承载力计算方法

开洞区域钢管角部计算简图如图9所示，其中N_s为单根角钢轴压承载力，I_y为角钢围绕y-y轴的截面惯性矩，K为单根角钢两侧洞口间钢板的弹性线刚度之和，可按式(2)计算。

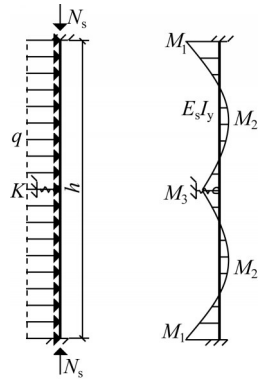


图9 开洞区域钢管角部计算简图

Fig. 9 Calculation diagram for corner of steel tube in the opening area

$$K=\begin{cases}0 & (\text{单侧开一个洞口})\\ E_s(h-2h_o)t_j/b_o & (\text{单侧开两个洞口})\end{cases} \tag{2}$$

式中：t_j为开洞区域的钢管壁厚；b_o、h_o分别为洞口的宽度和高度，在保证开洞区域截面的极限承载力高于未削弱截面的极限承载力条件下，b_o不应超过$0.7b_c$，h_o不应超过$1.5h_c$。

采用杆系线弹性分析方法，规定弹性支座受拉为正，角钢端部、1/4高度、1/2高度处的弯矩M_1、M_2、M_3可以分别由式(3)～(5)计算。

$$M_1=\frac{qh^2}{48}\left(4-\frac{3}{1+192\dfrac{E_sI_y}{h^3K}}\right) \tag{3}$$

$$M_2=-\frac{qh^2}{96} \tag{4}$$

$$M_3=\frac{qh^2}{48}\left(\frac{3}{1+192\dfrac{E_sI_y}{h^3K}}-2\right) \tag{5}$$

根据上述计算式分析可知，K在0～+∞区间变化时，M_1绝对值始终大于M_2、M_3，因此取由式(3)计算的M_1作为压弯角钢所受最大弯矩M_y。

按照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[24]中压弯构件的计算公式(6)～(8)，求解单根角钢的轴压承载力N_s。

$$\frac{N_{s1}}{A_s}\pm\frac{M_y}{\gamma_yW_{ny}}\leqslant f_y \tag{6}$$

$$\frac{N_{s2}}{\varphi_yA_s}+\frac{\beta_{my}M_y}{\gamma_yW_{1y}(1-0.8N_s/N'_{Ey})}\leqslant f_y \tag{7}$$

$$N'_{Ey}=\pi^2E_sA_s/(1.1\lambda_y^2) \tag{8}$$

$$N_s=\min(N_{s1},\ N_{s2}) \tag{9}$$

式中：N_{s1}、N_{s2}分别为强度和稳定验算得到的轴压承载力；A_s为单个角钢截面积；M_y为角钢所受最大弯矩；γ_y为截面塑性发展系数，取1.0；W_{ny}为绕y-y轴的净截面模量；φ_y为弯矩作用平面内轴心受压构件稳定系数；W_{1y}为弯矩作用平面内对角钢肢尖的毛截面模量；λ_y为弯矩作用平面内角钢的长细比，可按计算长度为$0.5h$计算；β_{my}为等效弯矩系数，按无侧移框架柱两端支承构件在端弯矩和横向荷载同时作用时的情况考虑。

同时，开洞区域钢管内混凝土的轴压承载力可由式(10)计算。

$$N_c=f_c'A_c \tag{10}$$

式中：f_c'=$0.79f_{cu,k}$，为标定峰值压应力的混凝土圆柱体抗压强度[4,23]；A_c为钢管内填混凝土的截面面积。

最后，考虑开洞区域钢管与内填混凝土各自的轴压承载力，按式(11)将二者相加即为钢管开洞CFST方形柱的轴压承载力N_0。

$$N_0=N_c+4N_s \tag{11}$$

4.2 计算方法验证

将本文4根钢管开洞CFST方形柱试件的实际几何、材料参数代入4.1节公式计算，结果如表4、图10所示；其中N_0为采用式(11)的计算结果，N_y、N_u分别为试验实测的屈服荷载与极限承载力。从表4中可以看出，式(11)计算的承载力N_0与实测屈服荷载N_y平均比值为1.10，标准差为0.10，与实测极限承载力N_u平均比值为0.96，标准差为0.06，可见公式计算的计算结果偏于保守，计算精度满足设计需要，表明所提出的计算方法可准确预测钢管开洞CFST方形柱的轴压承载力。

表4　式(11)承载力计算结果与试验结果对比

Table 4　Comparison of bearing capacity between formula (11) calculated results and test results

试件编号	试验值		式(11)计算结果N_0/kN	$\frac{N_0}{N_y}$	$\frac{N_0}{N_u}$
	N_y/kN	N_u/kN			
ZY-1	8 505	10 529	10 379	1.22	0.99
ZY-2	9 324	10 509		1.11	0.99
ZY-3	9 315	10 252		1.11	1.01
ZY-4	10 911	12 000		0.95	0.86
平均值	—	—	—	1.10	0.96
标准差	—	—	—	0.10	0.06

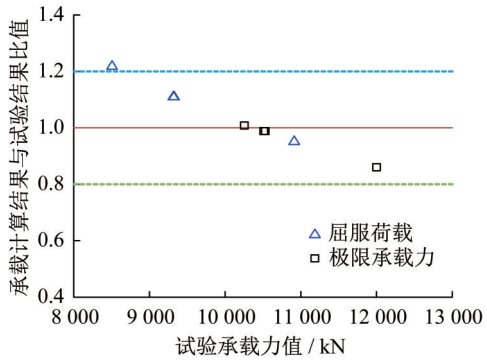


图10　公式承载力计算结果与试验结果对比

Fig. 10　Comparison of bearing capacity between formula calculated results and test results

5　结论

本文以4根足尺钢管开洞CFST方形柱为研究对象，开展轴压加载试验，系统探究该新型节点柱的轴压力学性能，主要结论如下：

(1) 开洞区域钢管壁厚直接控制试件破坏模式，未加厚洞口钢管试件发生洞口钢管鼓曲、混凝土短梁受压破坏；加厚洞口钢管后，试件破坏转移至柱身中上部或中下部，表现为柱身钢管局部鼓曲。

(2) 增大开洞区域钢管壁厚可提升钢管分担的轴力占比，减小钢管与内部混凝土界面的轴力传递，降低洞口区域钢管、混凝土平均压应力。

(3) 在洞口区域采用加厚钢管实现等面积补强的前提下，开洞尺寸对试件轴压极限承载力影响微弱；加厚洞口钢管可使开洞区段承载力超过完整无削弱截面，同时提升试件初始刚度，具备工程落地应用条件。

(4) 现有国内外钢管混凝土规范计算公式对开洞CFST方形柱承载力计算整体偏保守。本文建立了钢管开洞CFST方形柱的简化力学模型，推导了配套轴压承载力计算公式；与试验数据对比结果表明，该计算方法具有较高的精度。

本文研究成果适用于装配式混合框架结构，后续将针对该类节点的抗震性能、抗剪承载力开展专项试验研究。

参考文献：

[1] 韩林海，陶忠．方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]．土木工程学报，2001，34(2)：17-25．DOI：10.15951/j.tmgcxb.2001.02.004.
HAN Linhai，TAO Zhong．Study on behavior of concrete filled square steel tubes under axial load [J]．China Civil Engineering Journal，2001，34(2)：17-25．DOI：10.15951/j.tmgcxb.2001.02.004.(in Chinese)

[2] 高春彦，王延彬，孙凯琦，等．改进型钢管混凝土柱-H型钢梁槽形端板节点抗震性能研究[J]．建筑钢结构进展，2025，27(8)：1-12.DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20240312002.
GAO Chunyan，WANG Yanbin，SUN Kaiqi，et al．Seismic performance of improved conrete-filled steel tubular column to H-shaped steel beam groove end-plate joint[J]．Progress in Steel Building Structures，2025，27(8)：1-12.DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20240312002.(in Chinese)

[3] 程卫红，储德文，时继瑞．T形钢管混凝土柱-H形钢梁侧接板式节点承载力研究[J]．建筑钢结构进展，2025，27(7)：54-63.DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20240223001.
CHENG Weihong，CHU Dewen，SHI Jirui．Bearing capacity of joints with side-connected plates between T-shaped concrete-filled steel tubular column and H-shaped steel beam[J]．Progress in Steel Building Structures，2025，27(7)：54-63．DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20240223001.(in Chinese)

[4] 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)

[5] 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]．(in Chinese)

[6] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S]．
JGJ 138—2016 Code for design of composite structures[S]．(in Chinese)

[7] 陈庆军，蔡健，杨平，等．节点区柱钢管不贯通式钢管混凝土柱-梁节点抗震性能[J]．土木工程学报，2009，42(12)：33-42.DOI：10.15951/j.tmgcxb.2009.12.010.
CHEN Qingjun，CAI Jian，YANG Ping，et al．Seismic behavior of concrete filled steel tubular column-beam joints with discontinuous column tubes[J]．China Civil Engineering Journal，2009，42(12)：33-42.DOI：10.15951/j.tmgcxb.2009.12.010.(in Chinese)

[8] TANG X L，CAI J，CHEN Q J，et al．Seismic behaviour of

through-beam connection between square CFST columns and RC beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 151-166. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.03.010.

[9] 林晓俊,张爱林,张艳霞,等.方钢管混凝土柱全螺栓装配式连接节点抗震性能数值分析[J].建筑钢结构进展,2025,27(4):56-68.DOI:10.13969/j.jzgjgjz.20231020001.
LIN Xiaojun, ZHANG Ailin, ZHANG Yanxia, et al. Numerical analysis of seismic performance of fully bolted prefabricated CFSST column connection joints[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(4): 56-68. DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20231020001.(in Chinese)

[10] 刘用,郭兰慧,张素梅.方钢管混凝土柱-外包U形钢混凝土组合梁节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(6):131-140.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.06.014.
LIU Yong, GUO Lanhui, ZHANG Sumei. Cyclic loading tests of composite joints between concrete-filled square steel tubular column and composite beam with U-shaped steel girder[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 131-140.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.06.014.(in Chinese)

[11] 胥兴,程睿,江世永,等.方钢管混凝土柱与U形钢-混凝土组合梁穿心式连接抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊2):83-90.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0010.
XU Xing, CHENG Rui, JIANG Shiyong, et al. Experimental studies on seismic performance of square concrete-filled steel tubular column to U-shaped steel-concrete composite beam joints under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Suppl.2): 83-90. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0010.(in Chinese)

[12] MA D Y, HAN L H, ZHAO X L. Seismic performance of the concrete-encased CFST column to RC beam joint: Experiment[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 154: 134-148. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.11.030.

[13] 温永坚,温四清,罗奎,等.一种钢筋直穿式钢管混凝土柱RC梁连接节点:CN213805826U[P].2021-07-27.
WEN Yongjian, WEN Siqing, LUO Kui, et al. A connection node for steel reinforced concrete columns and reinforced concrete beams: CN213805826U[P]. 2021-07-27.(in Chinese)

[14] 袁焕鑫,吴志康,杜新喜,等.钢筋贯通式混凝土梁-开洞方钢管混凝土柱节点受力性能试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(4):356-365.DOI:10.14188/j.1671-8844.2022-04-005.
YUAN Huanxin, WU Zhikang, DU Xinxi, et al. Experimental study on structural performance of joint between RC beam with continuous reinforced bars and CFST column with rectangular openings[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(4): 356-365. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2022-04-005.(in Chinese)

[15] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature[S].(in Chinese)

[16] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].(in Chinese)

[17] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的"屈服点"定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3):36-46.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.(in Chinese)

[18] 吴丽丽,韩港豪,武海鹏,等.十字形多腔组合轻型钢管混凝土柱轴压试验及承载力计算[J].工程力学,2026,43(1):109-119.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2023.06.0454.
WU Lili, HAN Ganghao, WU Haipeng, et al. Axial compression test and bearing capacity calculation of cross-shaped multi-cavity composite light-weight concrete-filled steel tubular stocky columns[J]. Engineering Mechanics, 2026, 43(1): 109-119. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.06.0454.(in Chinese)

[19] EN 1994-1-1 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures: part 1-1: general rules for buildings[S].

[20] BS 5400-5: 2005 Steel, concrete and composite bridges: Part 5: Code of practice for the design of composite bridges[S].

[21] CECS 159—2018 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].CECS 159—2018 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members[S].(in Chinese)

[22] 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].(in Chinese)

[23] 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. Study on working mechanism of concrete filled steel tube under local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.(in Chinese)

[24] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].(in Chinese)