相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压性能研究

李成玉[1,2],陈鼎盛[1],吴东平[1,2],陈焰周[3*]
(1.武汉科技大学 城市建设学院,武汉 430065; 2.武汉科技大学 城市更新湖北省工程研究中心,武汉 430065; 3.中南建筑设计院股份有限公司,武汉 430071)

摘 要: 结构用冷弯型钢柱常因建筑需求而在柱身位置开洞,但开洞会削弱截面,导致构件承载力下降。为减小开洞带来的不利影响,本文提出了一种采用内套相贯钢管的补强方法,对开圆洞冷弯矩形截面钢管柱进行补强。采用ABAQUS有限元软件分别建立了4种不同截面开洞冷弯矩形截面钢管短柱以及相应补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱有限元模型,以开洞尺寸比和板件宽厚比为参数,分析了构件破坏模态、荷载-位移曲线和轴压承载力。研究表明,经相贯钢管补强后,开洞短柱的破坏模态和应力分布得到有效改善,承载力得到明显提高;承载力提高幅度随开洞尺寸比的增大而增大、随板件宽厚比的增大先增大后减小;将分析结果与采用北美冷弯型钢结构设计规范AISI S100-2016中直接强度法公式计算的结果进行比较,提出了修正的直接强度法计算公式。

关键词: 冷弯型钢; 钢管补强; 矩形截面钢管短柱; 轴压承载力; 直接强度法; 修正计算公式
中图分类号: TU392.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)08-0074-12
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20250102001

Research on Axial Compressive Behavior of Perforated Cold-Formed Rectangular Steel Tubular Stub Columns with Intersecting Tube Reinforcement

LI Chengyu[1,2], *CHEN Dingsheng*[1], *WU Dongping*[1,2], *CHEN Yanzhou*[3*]
(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)
*Corresponding author: chenyanzhou1983@qq.com

Abstract: Cold-formed steel columns used in structures often have openings in the column body due to construction requirements, but openings in the tube will weaken the cross-section, resulting in a decrease in the bearing capacity of the members. In order to reduce the influence of openings, a reinforcement method using inner-sleeved intersecting steel tubes is proposed for perforated cold-formed rectangular steel tubular columns with circular openings. By using the finite element software ABAQUS, finite element models of perforated cold-formed rectangular steel tubular stub columns and the corresponding reinforced perforated cold-formed rectangular steel tubular stub columns with four different cross-sections were established. The failure mode, load-displacement curve, and axial compressive bearing capacity were analyzed by taking the opening size ratio and the width-to-thickness ratio of the plate as parameters. The

收稿日期:2025-01-02
基金项目:国家自然科学基金(51878522),湖北省住建厅科技计划项目([2023]1656号-004)
作者简介:
李成玉(1971—),男,博士,教授,主要从事钢结构抗震损伤控制方面的研究。E-mail:lee_chengyu@163.com。
通信作者:
陈焰周(1983—),男,博士,正高级工程师,主要从事钢结构设计方面的研究。E-mail:chenyanzhou1983@qq.com。

results show that after the reinforcement of the intersecting steel tubes, the failure mode and stress distribution of the perforated tubular stub columns are effectively improved, and the bearing capacity is obviously improved., The increase in bearing capacity increases with the increase of the opening size ratio , and increases first and then decreases with the increase of the width-to-thickness ratio. Based on the comparison between the analysis results and the calculation results of the direct strength method in the North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI S100-2016), a modified direct strength method was proposed.

Keywords: cold-formed steel; intersecting tube reinforcement; rectangular steel tubular stub column; axial bearing capacity; direct strength method; modified calculation formula

冷弯型钢通常由钢板和钢带经轧制或弯折等工艺冷加工成型，具有自重轻、强度高、抗震性能优越、绿色环保等优点。冷弯型钢可分为开口截面和闭口截面，相较于开口截面，闭口截面不仅外形美观，且抗压、抗弯、抗扭强度更高，广泛应用于工业、商业及民用建筑。实际工程中，为满足构件连接、管线隐蔽布设、检修维护等需求[1]，常需在梁柱腹板开设孔洞。然而，孔洞会引发应力重分布、改变荷载传递路径，导致孔边应力集中而发生局部破坏，最终造成构件的承载力降低[2-4]。

国内外学者对开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压性能开展了大量研究。聂少锋等[5]对双肢开洞冷弯薄壁型钢拼合箱形截面柱轴压性能进行了研究，研究表明试件腹板位置处开洞会显著降低试件的极限承载力，且破坏位置集中于开洞削弱区域。SINGH等[6-7]对开洞方形截面短柱屈曲性能进行了研究，研究表明开洞偏心距及开洞高度对开洞短柱的临界屈曲承载力影响较小，但试件开洞直径越大，构件的极限承载力下降越快。

结构构件开洞后承载力会有削弱，需采取一定的补强措施以保证使用需求。CHEN等[8]对带边缘加劲环的腹板开洞槽钢柱轴压性能进行了研究，研究表明槽钢柱开洞后轴压承载力明显下降，经边缘加劲环补强后能提高开洞槽钢柱的轴压承载力。罗烈等[9]采用加强圈补强方法对开洞单管通信塔补强效果进行了研究，研究表明加强圈补强方法对小开洞的补强效果很好，开洞率越大，补强效果越差，加强圈相对厚度越大，补强效果越差，加强圈相对厚度不宜超过1.5。孟宪德等[10]对内套管补强的侧壁开洞圆钢管轴压承载力进行了研究，研究表明当开洞直径不大于0.5倍钢管直径、内套管厚度等于构件厚度时补强效果最好。JIAO等[11]对设置环形加劲肋的开洞圆柱壳轴压屈曲性能进行了研究，研究表明环形加劲肋可以提高开洞壳体的整体屈曲荷载和轴向刚度，能抵抗开洞周围的径向变形，且开洞尺寸越大，改善越明显。

有效宽度法和直接强度法(direct strength method, DSM)常被应用于冷弯型钢构件设计。有效宽度法在确定有效截面和计算几何特性时都十分复杂，尤其是开设孔洞后该过程更加烦琐，而直接强度法仅需将构件弹性临界屈曲应力代入直接强度法计算公式即可得到构件的极限荷载，计算简便。赵金友等[12]对两端铰接腹板开洞冷弯槽钢轴压构件试验进行了模拟，将模拟结果与采用北美冷弯型钢结构设计规范AISI S100-2016[13]中DSM承载力公式计算结果进行对比，结果表明北美规范公式计算的承载力偏于不安全。SINGH等[14]对开洞矩形截面钢柱轴压试验进行了模拟，将模拟结果与多种设计公式计算结果进行比较，结果表明大多数开洞短柱设计公式计算结果过于保守，尤其是AISI S100-2016[13]中DSM计算结果过度保守且离散度较高，并根据试验结果提出了修正的DSM计算公式。

上述研究表明国内外学者对开洞冷弯矩形截面钢管短柱进行了大量研究，但对其补强措施的研究较少。本文提出了一种内套相贯圆形钢管的补强方法对开洞的冷弯矩形截面钢管短柱进行补强(图1)，采用ABAQUS有限元软件对其屈曲性能和承载力开展研究。该方法采用内套贯通柱身的圆钢管对开洞处进行补强，能较大地提高短柱的轴压承载力，增大截面惯性矩，减少洞边应力集中现象，使短柱应力分布及变形更加均匀，且能在短柱内部形成封闭空间，很好地避免钢管在短柱内部腐蚀；施工时补强钢管仅需与钢柱进行焊接，焊接工艺简易，布置补强钢管时仅需与洞口大小相适配，内套相贯圆形钢管的补强方法相较于外包环板等其他补强方法用钢量少，能有效节省钢材，更好地适用于实际工程。

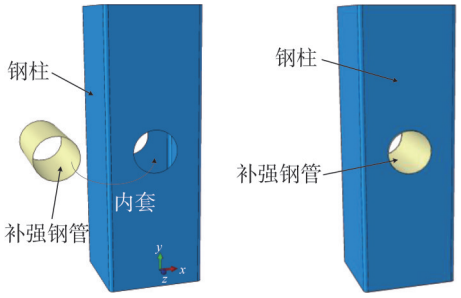


图1　开洞冷弯矩形截面钢管短柱补强方法示意图

Fig. 1　Schematic diagram of reinforcement method for cold-formed rectangular steel tubular stub column

1 有限元模型

1.1 有限元模型建立

1.1.1 概述

本节基于文献[7]的部分开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压试验建立了有限元模型。该试验对5种截面开洞冷弯型钢短柱进行轴压试验，各构件在长边方向板件中间高度处开设两个相同大小的相对圆形孔洞，开洞直径与开洞板件平坦区宽度之比d/w在0.1～0.9的范围内，试验材料为塔塔公司制造的YSt-310冷弯型钢。本文有限元建模选取其中4种截面进行验证，后续参数分析也是对4种截面进行研究。本构模型选用弹塑性二折线模型，模型验证中选用文献[7]中拉伸试验得到的材料特性来定义有限元模型中的材料，补强钢管厚度与对应开洞短柱厚度取相同值，材料特性与短柱所取材料特性相同，如表1和表2所示，泊松比ν为0.3。

表1 平坦区板件拉伸试验结果[7]

Table 1 Tensile test results of flat area plate

横截面/mm	E/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa
50×50×2.9	190 024	370.00	446.48
60×60×2.6	204 082	431.00	483.24
66×33×2.6	190 653	428.00	483.30
80×40×2.6	200 000	520.00	562.89

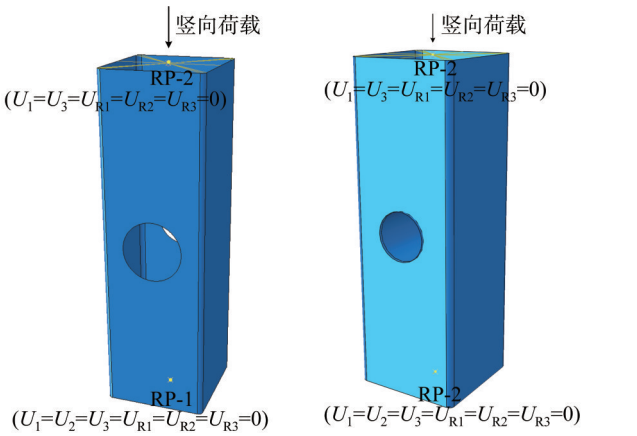
注：E为弹性模量；f_y为屈服强度；f_u为极限强度。

表2 转角区板件拉伸试验结果[7]

Table 2 Tensile test results of corner area plate

横截面/mm	E/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa
50×50×2.9	176 191	506.00	571.53
60×60×2.6	192 308	556.00	689.31
66×33×2.6	177 305	570.00	633.23
80×40×2.6	180 412	520.00	649.19

厚度方向尺寸远小于其他方向尺寸的构件，采用S4R壳单元（四节点四边形有限薄膜应变线性减缩积分壳单元）模拟；壳单元厚度方向设置5个积分点，采用Simpson积分，可精准模拟板件复杂屈曲行为。选取2 mm～50 mm共11种网格宽度进行分析计算，发现随着网格尺寸的减小，有限元模型的弹性临界屈曲应力变化幅度很小，最终确定参数分析采用10 mm宽度的网格进行建模计算，模型验证采用文献[7]中4 mm宽度的网格。将构件底部截面与顶部截面的所有节点分别耦合（coupling）于所属截面中心参考点RP-1、RP-2上，如图2所示。约束参考点RP-1三个方向的平动与转动自由度，约束参考点RP-2除竖向位移方向的自由度，U_1、U_2、U_3为沿坐标轴方向的位移，U_{R1}、U_{R2}、U_{R3}为沿坐标轴方向的转动角度。以位移加载的方式在参考点RP-2上施加方向向下的位移Δ，通过静力通用方法进行分析。



a) 开洞冷弯矩形截面钢柱 b) 相贯补强开洞矩形截面钢柱

图2 短柱模型边界条件和加载方式

Fig. 2 Boundary conditions and loading method of stub column models

各短柱模型进行统一命名，50×50×2.9－0.5表示短柱截面尺寸为50 mm×50 mm，短柱壁厚为2.9 mm，开洞尺寸比（开洞直径与开洞板件平坦区长度的比值）为0.5。

1.1.2 初始几何缺陷与残余应力

为了考虑局部初始几何缺陷的影响，首先在模型上施加竖向轴压力进行线性特征值屈曲计算，得到一定数目的屈曲模态，并从中选择相应的屈曲模态，使用*imperfection命令将所选屈曲模态作为初始几何缺陷分布模态。对模型进行验证及参数分析时选择沿柱长有奇数个屈曲波的第一屈曲模态[15]为开洞冷弯矩形截面钢管短柱模型典型屈曲模态，图3为我国常用冷弯薄壁型钢构件[16]屈曲模态的有限元分析结果，取初始缺陷的幅值为L/1 000。构件因冷弯效应提高的屈服强度能近似抵消薄膜残余应力对冷弯型钢构件力学性能的不利影响[17-18]，故在有限元模型的建立中，未考虑冷弯效应和残余应力对构件力学性能的影响。

1.2 有限元模型验证

采用上述建模方法对文献[7]中开洞冷弯矩形截面钢管短柱建立有限元模型。将有限元模型的破坏模态和荷载-位移曲线与试验结果进行比较，分别如图4和图5所示。可以发现，有限元模型的破坏模式与试验构件的破坏模式较为一致，有限元模型能较准确地模拟出开洞冷弯矩形截面钢管短柱的极限承载力和荷载-位移曲线，说明后续可用该建模方法进一步分析。

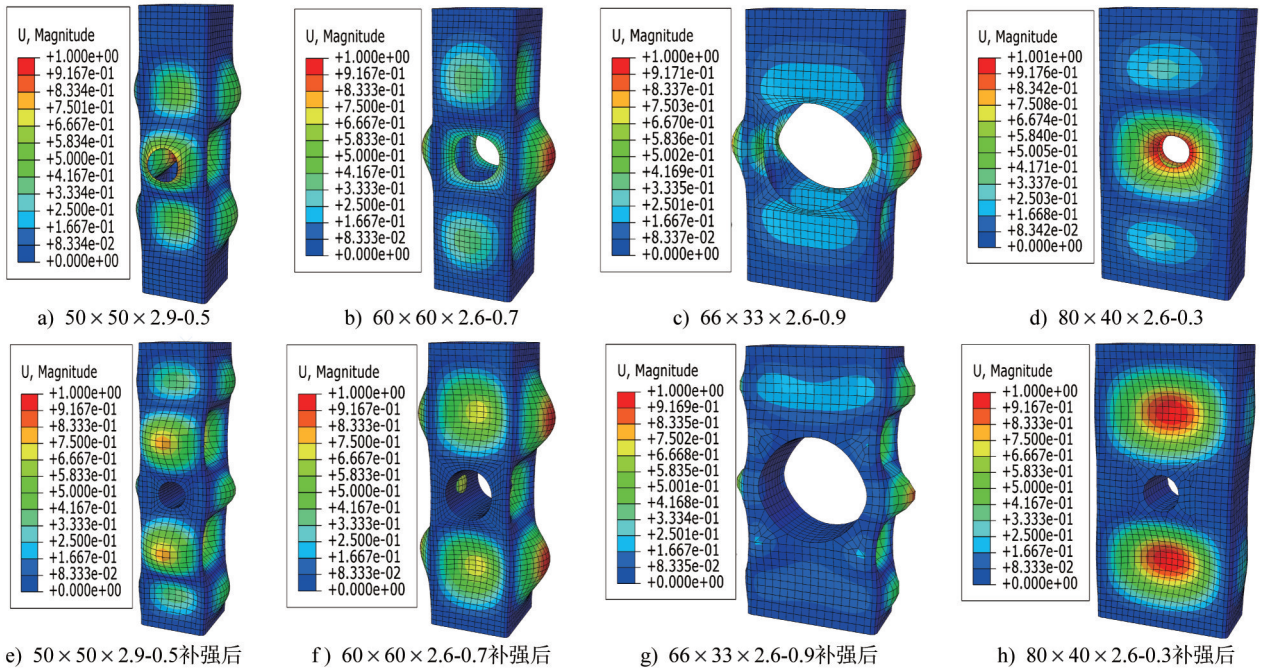


图3　模型的典型屈曲模态（单位：mm）

Fig. 3　Typical buckling modes of models (unit: mm)

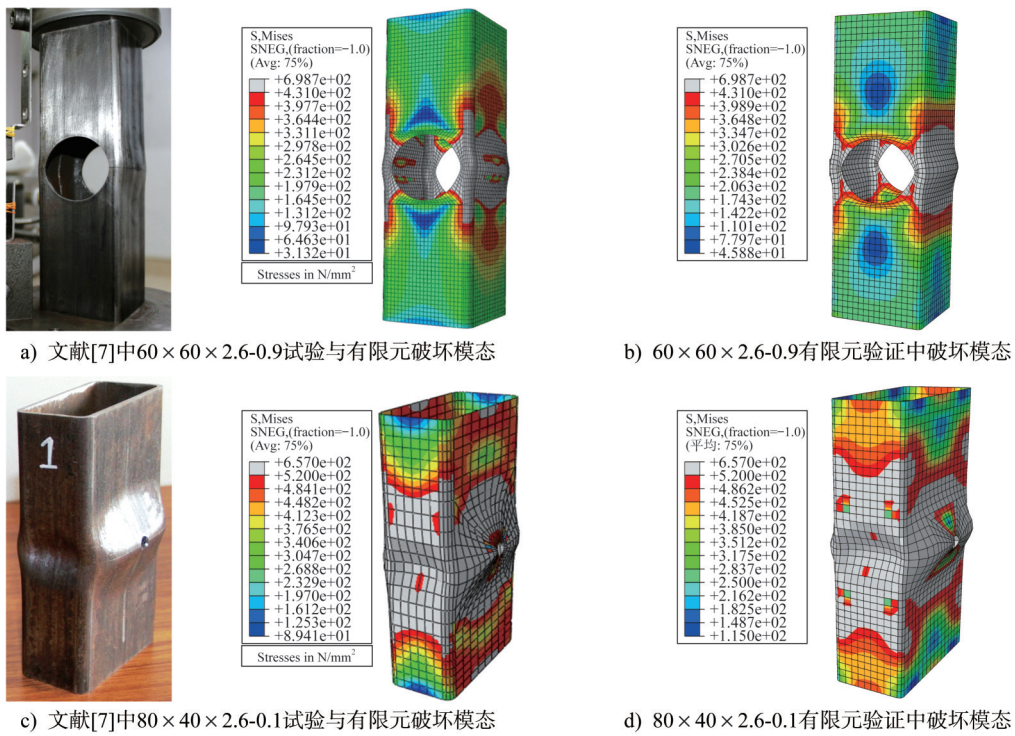


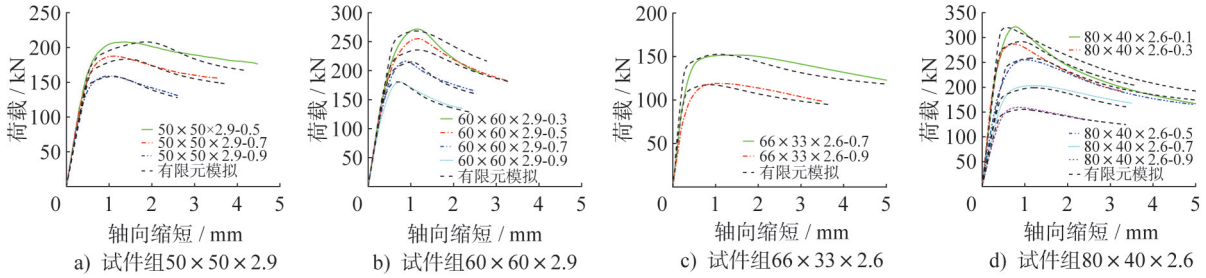
图4　试件破坏模态对比（单位：MPa）

Fig. 4　Comparison of failure modes of specimens (unit: MPa)

2　相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱补强效果分析

2.1　应力分布与变形对比

图6为轴向缩短$\delta=2.5\delta_u$（δ_u为极限荷载对应位移）时，开洞冷弯矩形截面钢管短柱模型和采用内套相贯圆形钢管补强方法的相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱模型的应力云图，应力值大于材料屈服应力（$f_y=370$ MPa）的区域呈灰色。由图可见，开洞冷弯矩形截面钢管短柱灰色区域围绕在孔洞周围，而其他区域应力较小；相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱灰色区域分布



a) 试件组50×50×2.9　b) 试件组60×60×2.9　c) 试件组66×33×2.6　d) 试件组80×40×2.6

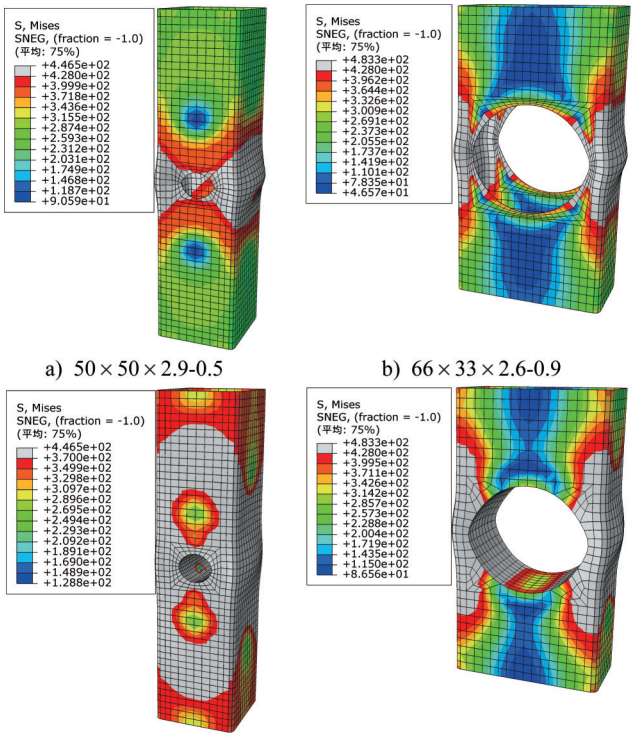
图5　试件荷载–位移曲线对比

Fig. 5　Comparison of load-displacement curves of specimens

范围更广，其余区域应力值也较大，补强钢管全部屈服，模型整体应力分布更加均匀。

从图6中可以发现模型在轴压作用下出现对称的屈曲变形。对于开洞冷弯矩形截面钢管短柱，开洞处板件发生内凹屈曲，而相邻板件发生向外的鼓曲变形；在开洞以外区域，板件并未发生明显的变形。开洞短柱经补强后，开洞区域板件未发生明显变形，仅在相邻板件处发生向外的鼓曲变形。

开洞冷弯矩形截面钢管短柱经相贯钢管补强后，应力分布得更加均匀，开洞处板件的变形大幅减小。可见内套相贯圆形钢管的补强方法对开洞冷弯矩形截面钢管短柱具有良好的补强效果。



a) 50×50×2.9-0.5　b) 66×33×2.6-0.9

c) 50×50×2.9-0.5补强后　d) 66×33×2.6-0.9补强后

图6　典型构件在轴向缩短 $\delta=2.5\delta_u$ 时应力云图（单位：MPa）

Fig. 6　Stress coutour of typical members when axial shortening $\delta=2.5\delta_u$ (unit: MPa)

2.2　承载力对比

表3给出了开洞冷弯矩形截面钢管短柱峰值承载力（F_{KD}）及补强后的相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱峰值承载力（F_{BQ}）。从表中可以看出，开洞冷弯矩形截面钢管短柱采用内套相贯圆形钢管补强方法后，其轴压承载力得到明显提高。对于4种不同截面短柱，开洞尺寸越大，承载力提高幅度越大，最大提高幅度可达23.42%。可见采用内套钢管的补强方法能减小开洞导致的承载力损失，具有良好的补强效果。

表3　短柱补强前后承载力对比

Table 3　Comparison of bearing capacity before and after steel tubular stub column reinforcement

构件编号	F_{KD}/kN	F_{BQ}/kN	$\frac{F_{BQ}-F_{KD}}{F_{KD}}$/%
50×50×2.9－0.5	208.22	221.46	6.36
50×50×2.9－0.7	183.79	202.50	10.18
50×50×2.9－0.9	148.38	181.42	22.27
60×60×2.6－0.3	268.19	278.80	3.96
60×60×2.6－0.5	242.05	253.15	4.59
60×60×2.6－0.7	215.53	238.83	10.82
60×60×2.6－0.9	178.42	207.17	16.11
66×33×2.6－0.7	145.91	161.90	10.96
66×33×2.6－0.9	114.57	141.41	23.42
80×40×2.6－0.1	320.13	321.77	0.51
80×40×2.6－0.3	291.98	314.66	7.77
80×40×2.6－0.5	258.43	285.60	10.51
80×40×2.6－0.7	213.60	248.97	16.56
80×40×2.6－0.9	164.44	197.89	20.34

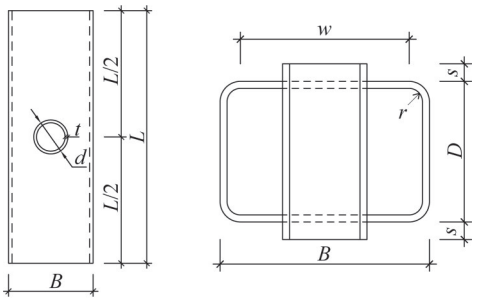
3　参数分析

3.1　模型参数

依据我国《结构用冷弯空心型钢》（GB/T 6728—2017），选取 400 mm×400 mm、500 mm×500 mm、

600 mm × 300 mm、600 mm × 400 mm 共 4 种截面冷弯空心型钢，建立开洞冷弯矩形截面钢管短柱与相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱有限元分析模型。钢材采用 Q235B 钢，屈服强度 f_y 为 235 MPa，极限强度 f_u 为 435 MPa，弹性模量 E 取 2.06×10^5 MPa，泊松比 ν 为 0.3。各模型高度 L 取外截面最大尺寸的三倍[19]，构件厚度取 8、10、12、14、16、18、20 mm，以覆盖较大的宽厚比范围，补强钢管外伸长度 s 为 10 mm；孔洞开设于短柱长边方向板件，开洞高度为 1/2 柱高，开洞尺寸比 d/w 取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9（w 为开洞板件平坦区长度），补强钢管与钢柱厚度取相同值。

构件尺寸和符号表示如图 7 所示，其中 B、D、t、d、w、r 分别为短柱的截面长度、截面宽度、厚度、开洞直径、柱身平坦部分长度和倒角内径。对构件统一进行命名，以 400 × 400 × 10 − 0.5G 为例，截面尺寸为 400 mm × 400 mm，厚度为 10 mm，开洞尺寸比为 0.5，G 表示采用内套钢管补强。



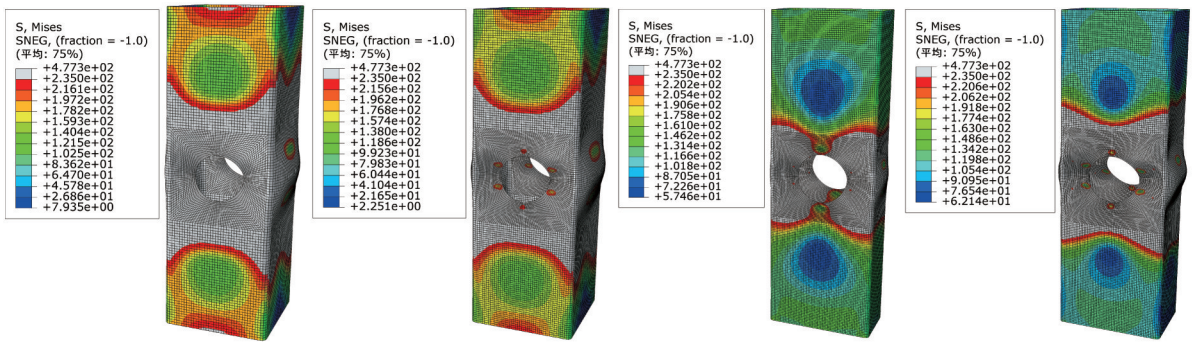
a) 立面图　　b) 剖面图

图 7　截面尺寸定义

Fig. 7　Definition of section size

3.2　应力分布与变形

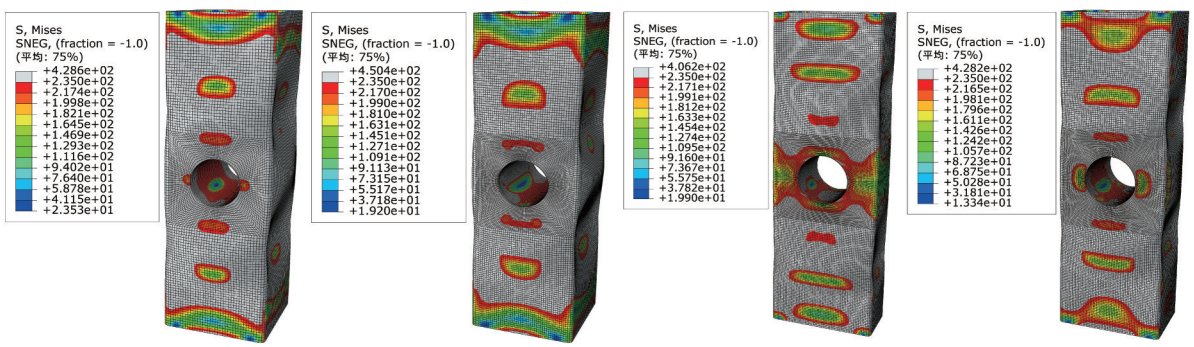
根据有限元结果分析可以发现，在整个加载过程中，开洞矩形截面钢柱应力始终集中于开洞区域，这是由于孔洞的存在，开洞处截面遭受大幅削弱。对于相贯补强开洞矩形截面钢柱，在加载初期，应力首先集中于开洞区域，随着轴压力的增大，应力逐渐向偏离开洞区域扩散，最后集中于距柱端约 1/5～1/3 柱高处截面。图 8 和图 9 分别为轴向缩短 $\delta = 2.5\delta_u$（δ_u 为极限荷载对应位移）时，腹板开洞冷弯型钢柱和相贯补强开洞矩形截面钢柱的应力云图，应力值大于材料屈服应力（$f_y = 235$ MPa）的区域呈灰色。由图可见开洞矩形截面钢柱灰色区域围绕在孔洞周围，而其他区域应力较小；相贯补强开洞矩形截面钢柱灰色区域均匀分布于柱身，应力分布更加均匀，补强钢管应力集中于与钢柱接触区域，而钢管中段应力较小。



a) 400 × 400 × 10-0.5　　b) 500 × 500 × 10-0.5　　c) 600 × 300 × 10-0.5　　d) 600 × 400 × 10-0.5

图 8　开洞矩形截面钢柱在轴向缩短 $\delta = 2.5\delta_u$ 时应力云图（单位：MPa）

Fig. 8　Stress contour of perforated rectangular section steel columns when axial shortening $\delta = 2.5\delta_u$ (unit: MPa)



a) 400 × 400 × 10-0.5G　　b) 500 × 500 × 10-0.5G　　c) 600 × 300 × 10-0.5G　　d) 600 × 400 × 10-0.5G

图 9　相贯补强开洞矩形截面钢柱在轴向缩短 $\delta = 2.5\delta_u$ 时应力云图（单位：MPa）

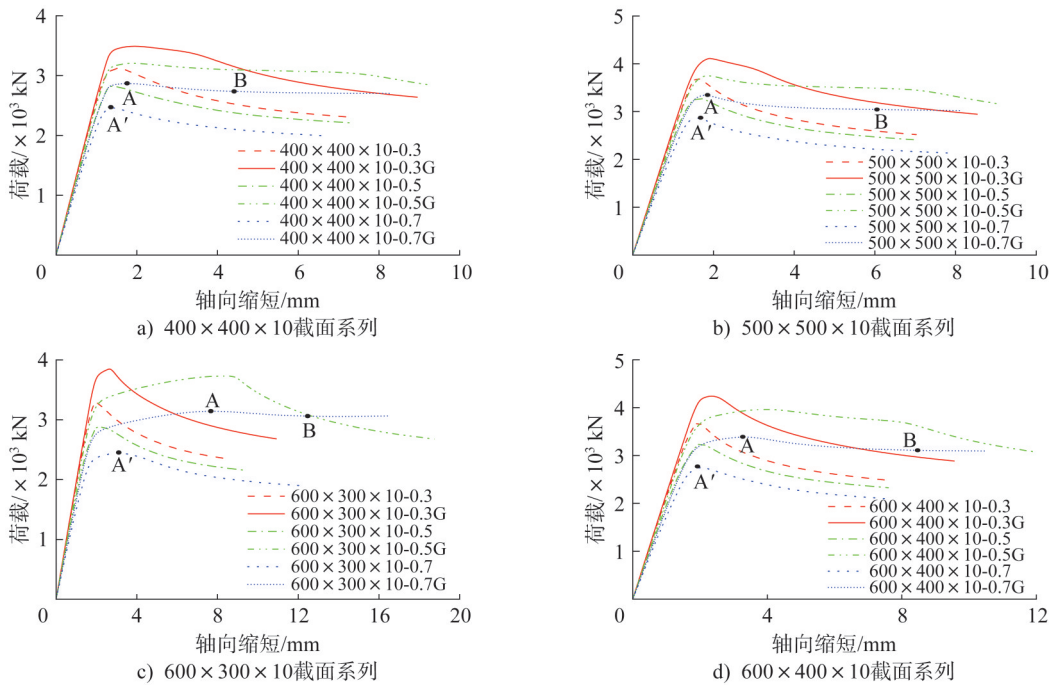
Fig. 9　Stress contour of intersecting reinforced rectangular section steel columns when axial shortening $\delta = 2.5\delta_u$ (unit: MPa)

从图中可以发现构件在轴压作用下出现对称的鼓曲变形。对于开洞矩形截面钢柱，在开洞处截面发生较大的鼓曲变形，开洞处板件向内鼓曲，而相邻板件向外鼓曲；在开洞以外区域，板件并未发生明显的变形；由于洞口处发生较大局部屈曲变形，并逐渐发展成较大塑性变形，洞口变形处纵向应力持续下降，短柱不再能承受荷载，且洞口尺寸越大，洞口区域板件越容易发生屈曲，短柱承载力越小。对于相贯补强开洞矩形截面钢柱，在距柱端约1/5～1/3柱高处截面出现对称的鼓曲变形，相对板件鼓曲方向相同，相邻板件鼓曲方向相反；在开洞区域板件未发生明显的变形；转角区域板件因受到相邻板件的支撑作用仍保持原状；短柱洞口区域局部屈曲得到抑制，此时板件保持原状，仍可继续承受荷载，随着轴向位移的增大，短柱未开洞区域发生多处局部屈曲，并逐渐发展成较大塑性变形，短柱不再能承受更多荷载。

相比于开洞矩形截面钢柱，相贯补强开洞矩形截面钢柱应力不再集中于开洞区域，应力分布得更加均匀，钢柱变形较大的区域转移到开洞区域以外，而开洞处板件变形明显减小，可见开洞钢柱补强效果良好。

3.3 荷载–位移曲线

图10为部分构件（开洞尺寸比d/w=0.3、0.5、0.7）荷载-位移曲线（位移为构件轴向缩短）。从图中可以发现，对于开洞冷弯矩形截面钢管短柱，构件的荷载-位移曲线大致可分为上升段和下降段两个阶段。以开洞尺寸比d/w=0.7的模型为例，在上升段（A′点前），短柱先后进入弹性阶段和弹塑性阶段，曲线斜率逐渐减小，达到峰值荷载时曲线斜率为0；在下降段（A′点之后），随着轴向位移的增大，荷载急剧下降，荷载减小速度最初较大，随着轴向位移的进一步增大，荷载减小速度逐渐变缓。对于采取补强措施后的相贯补强开洞矩形截面钢柱，构件的荷载-位移曲线可分为上升段、下降段和强化段。由图可见，在上升段（A点前），构件先后经历弹性阶段和弹塑性阶段，并达到峰值荷载。在下降段（AB段），在达到峰值荷载后荷载开始下降，开洞尺寸比越小，下降段曲线越短。荷载下降到一定程度后曲线进入强化段（B点后），对开洞尺寸比较大的构件（d/w=0.5、0.7），由于补强钢管的支撑作用，构件承受的荷载保持稳定或者缓慢上升。对开洞尺寸比较小的构件（d/w=0.3），下降段与强化段没有明显界限，这是由于开洞尺寸比较小的构件，钢管的补强作用较弱，构件承受的荷载仍以一定的速率减小。随着轴向位移的进一步增大，补强钢管的支撑作用开始失效，荷载再次下降。



a) 400×400×10截面系列　b) 500×500×10截面系列
c) 600×300×10截面系列　d) 600×400×10截面系列

图10 各短柱构件荷载–位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of stub column members

3.4 轴压承载力

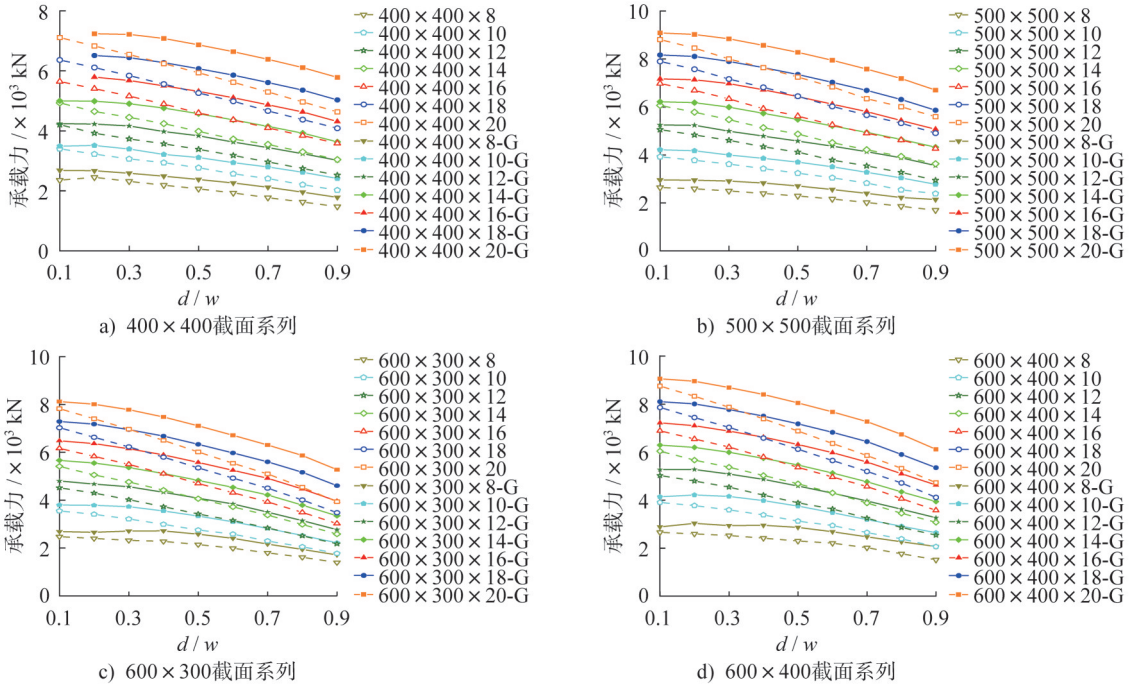
为研究开洞尺寸比和板件宽厚比（开洞方向板件）对开洞冷弯矩形截面钢管短柱及相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压承载力的影响，对不同开洞尺寸比（d/w取0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9）及不同宽厚比（t取8 mm、10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、

20 mm以包含不同宽厚比范围)的开洞冷弯矩形截面钢管短柱和相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱承载力进行分析。短柱承载力取荷载-位移曲线中屈服点对应的荷载(由几何作图法确定)。

3.4.1　开洞尺寸比

将开洞尺寸比设为分析参数,选取7种截面厚度的构件,分析开洞尺寸比与承载力之间的关系。图11为构件承载力和开洞尺寸比之间的关系曲线。

由图11可以看出,对于开洞冷弯矩形截面钢管短柱,构件承载力随着开洞尺寸比的增大而线性减小。对于采取补强措施后的相贯补强开洞矩形截面钢柱,构件的承载力随着开洞尺寸比的增大而先慢后快地减小。可见开洞钢柱补强前后承载力都随开洞尺寸比的增大而减小,但在开洞尺寸比不是很大($d/w \leqslant 0.5$)时,补强钢管对短柱具有较好的支撑作用,相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱的承载力减小速度明显小于开洞冷弯矩形截面钢管短柱的承载力减小速度。



a) 400×400截面系列　b) 500×500截面系列

c) 600×300截面系列　d) 600×400截面系列

图11　各短柱构件承载力和开洞尺寸比关系曲线

Fig. 11　Relationship curves between bearing capacity and opening size ratio of stub column members

开洞冷弯矩形截面钢管短柱在采用内套相贯圆形钢管补强方法后承载力得到明显提升。短柱经补强后,承载力提高幅度随着开洞尺寸比的增大而增大,如图12所示。当开洞尺寸比$d/w<0.3$时,承载力提高幅度绝大部分未超过10%;当开洞尺寸比$d/w \geqslant 0.3$时,方形截面短柱(400 mm × 400 mm、500 mm × 500 mm)承载力平均提高了约21.7%,矩形截面短柱(600 mm × 300 mm、600 mm × 400 mm)承载力平均提高了约31.9%。可见在开洞尺寸比相同时,开洞冷弯矩形截面钢管短柱经补强后,其承载力得到明显提高;开洞尺寸比不大于0.3时,承载力提高未达到10%,此时补强效果不明显,开洞尺寸比越大,承载力提高幅度越大,补强效果越好;矩形截面开洞短柱的承载力提高幅度远高于方形截面开洞短柱的承载力提高幅度。

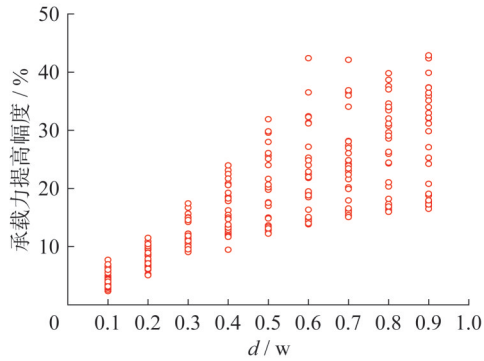


图12　承载力提高幅度与开洞尺寸比的关系

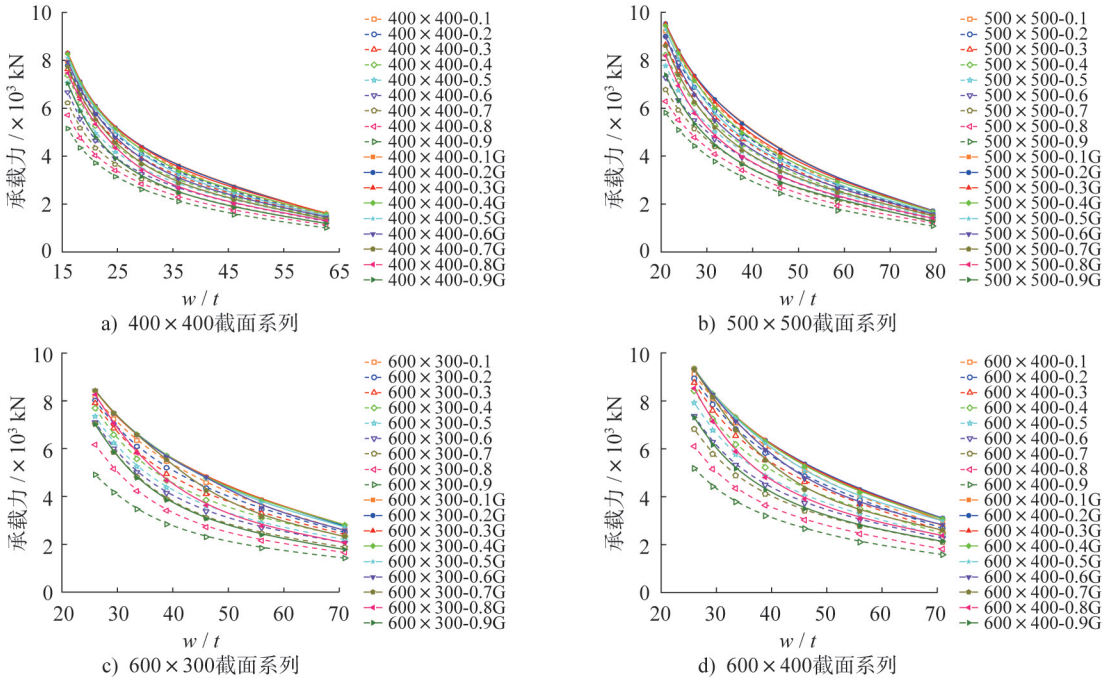
Fig. 12　The relationship between the increase degree of bearing capacity and opening size ratio

3.4.2　宽厚比

将开洞方向板件宽厚比设为分析参数,选取9种开

洞尺寸比构件，分析宽厚比与承载力之间的关系。图13为构件承载力和宽厚比之间的关系曲线。

由图13可以看出，4种截面承载力曲线变化趋势一致，随着板件厚度的减小、板件宽厚比的增大，相邻板件的支撑作用越弱，构件承载力随宽厚比增大而先快后慢地下降。相较于开洞冷弯矩形截面钢管短柱，宽厚比对相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱的影响更大。随宽厚比的增大，相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱的承载力下降速度明显大于开洞冷弯矩形截面钢管短柱的承载力下降速度。



a) 400×400截面系列　b) 500×500截面系列

c) 600×300截面系列　d) 600×400截面系列

图13　各短柱构件承载力和宽厚比关系曲线

Fig. 13　Relationship curves between bearing capacity and width-to-thickness ratio of stub column members

开洞冷弯矩形截面钢管短柱经补强后，承载力得到大幅提高。图14为开洞尺寸比d/w=0.9时，短柱承载力提高幅度与宽厚比的关系。如图所示，当开洞尺寸比一定时，随着宽厚比的增大，承载力提高幅度先增大后减小；对于开洞尺寸比d/w=0.9的短柱，方形截面短柱承载力提高幅度最大为35.9%，最小为16.5%；矩形截面短柱承载力提高幅度最大为42.8%，最小为25.3%。当开洞尺寸比一定时，补强后短柱承载力提高幅度虽有波动，但最小提高幅度仍不低于最大提高幅度的50%，可见对宽厚比不大于80的开洞短柱，补强钢管均能发挥较好的补强效果。

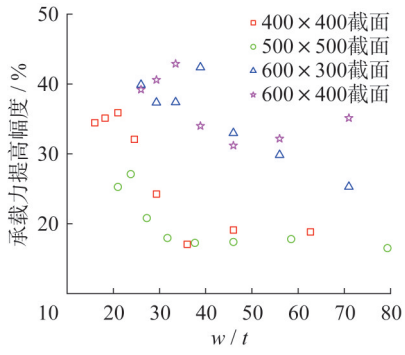


图14　承载力提高幅度与宽厚比的关系

Fig. 14　The relationship between the increase degree of bearing capacity and the width-to-thickness ratio

4　基于直接强度法的承载力计算方法

4.1　直接强度法计算方法

1998年Schafer等学者首次提出开洞冷弯薄壁轴压构件直接强度法计算公式，为满足开洞轴压钢柱承载力的计算，Moen等学者对无孔轴压构件DSM公式进行修正，提出了腹板开洞槽钢轴压构件DSM计算公式，该公式于2016年被写入AISI S100-2016[13]中。该方法不需要计算有效截面面积，仅对材料强度进行折减，且对冷弯型钢构件三种屈曲模式均建立了对应的设计方法。AISI S100-2016[13]中腹板开洞箱形截面钢柱屈曲承载力计算公式如下所述。

名义整体屈曲应力f_n计算公式为：

$$f_n=\begin{cases}\left(0.658^{\lambda_c^2}\right)f_y & \lambda_c\leqslant 1.5\\ \left(\dfrac{0.877}{\lambda_c^2}\right)f_y & \lambda_c>1.5\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\lambda_c=\sqrt{f_y/f_{cre}}$；$f_{cre}$为整体屈曲临界应力，

$f_{cre}=\dfrac{\pi^2 E}{4(L/r)^2}$，$r$为全截面回转半径；$f_y$为材料屈服强度。

局部与整体相关屈曲承载力P_{nl}计算公式为：

$$P_{nl}=\begin{cases}P_{ne} & \lambda_l\leqslant 0.776\\ P_{ne}\left[1-0.15\left(\dfrac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0.4}\right]\left(\dfrac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0.4} & \lambda_l>0.776\end{cases}\tag{2}$$

式中：λ_l为构件局部屈曲计算系数，$\lambda_l=\sqrt{P_{ne}/P_{crl}}$；$P_{ne}$为构件名义整体屈曲荷载，$P_{ne}=A_g f_n$；$P_{crl}$为局部屈曲临界荷载；$A_g$为构件毛截面面积。

构件承载力P_n为：

$$P_n=\min\left(P_{ne},P_{ynet}\right)\tag{3}$$

式中：$P_{ynet}=A_{net}f_y$；A_{net}为净截面面积。

$$P_{DSM,X}=\begin{cases}1.22P_{ne}\left(\dfrac{w}{t}\right)^{-0.045}\left(\dfrac{A_{net}}{A_g}\right)^{-0.94} & \lambda_l\leqslant 0.776\\ 0.005\,6P_{ne}\left(\dfrac{w}{t}\right)^{1.17}\left[1+0.42\left(\dfrac{A_{net}}{A_g}\right)^{0.85}\left(\dfrac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0.585}\right]\left(\dfrac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0.585} & \lambda_l>0.776\end{cases}\tag{4}$$

式中：w为开洞板件平坦部分长度。

采用修正公式计算的开洞冷弯矩形截面钢管短柱承载力为$P_{DSM,X}$，将其与有限元分析承载力P_{FE}进行比较，比较结果如图15所示，两者比值$P_{FE}/P_{DSM,X}$的平均值为1.001，变异系数为0.046。由此可知，采用修正直接强度法计算公式能够较好地预测开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压承载力。

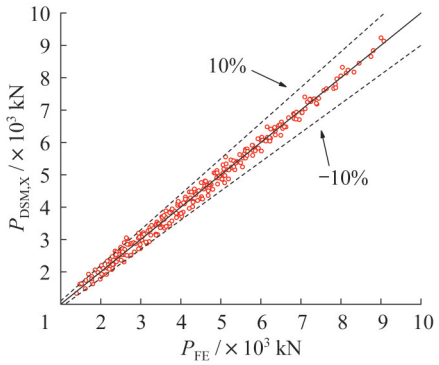


图15　开洞短柱修正的DSM计算结果与有限元结果对比

Fig. 15　Comparison between the modified DSM calculation results and the finite element results of perforated tubular stub column

4.2.2　相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱直接强度法计算方法

基于开洞冷弯矩形截面钢管短柱的直接强度法修正式，引入补强钢管的径厚比和钢柱截面长宽比等系数，对相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱承载力进行拟合修正，相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱直接强度法修正公式如下：

按照AISI S100-2016[13]中直接强度法公式计算的构件承载力为P_{AISI}，将其与有限元分析承载力P_{FE}进行比较，两者比值P_{FE}/P_{AISI}的平均值为1.074，变异系数为0.119。表明AISI S100-2016[13]中直接强度法计算的构件承载力偏小，且计算结果离散程度较大，为此需对直接强度法计算公式进行修正。

4.2　修正的直接强度法计算方法

4.2.1　开洞冷弯矩形截面钢管短柱直接强度法计算方法

基于有限元分析结果对AISI S100-2016[13]直接强度法计算公式进行修正，将板件宽厚比和有效截面系数引入公式进行拟合修正，开洞冷弯矩形截面钢管短柱直接强度法修正公式如下：

$$P_{DSM,BQ}=0.000\,45P_{DSM,X}\left(\frac{B}{D}+8\right)t^{-0.03}\left[345-108\left(\frac{d}{w}-0.93\right)^2\right]\tag{5}$$

式中：$\dfrac{d}{w}$为开洞尺寸比；$P_{DSM,X}$为按公式(4)计算的开洞冷弯矩形截面钢管短柱承载力。

采用修正公式计算的相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱承载力为$P_{DSM,BQ}$，将其与有限元分析承载力P_{FE}进行比较，比较结果如图16所示，两者比值$P_{FE}/P_{DSM,BQ}$的平均值为0.990，变异系数为0.036。由此可知，修正直接强度法计算公式对相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱轴压承载力有较好的预测能力。

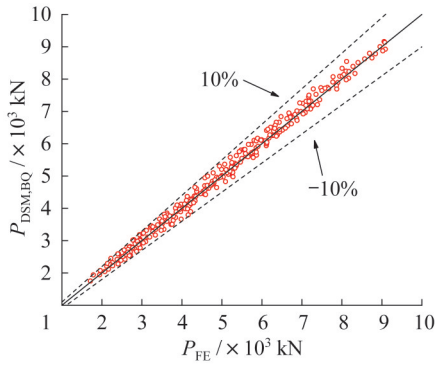


图16　相贯补强开洞短柱修正的DSM计算结果与有限元结果对比

Fig. 16　Comparison between the modified DSM calculation results and the finite element results of perforated tubular stub column with intersecting tube reinforcement

5 结论

本文采用有限元软件ABAQUS对开洞冷弯矩形截面钢管短柱和相贯补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱建立有限元模型，研究了不同开洞尺寸比和板件宽厚比对构件承载力的影响。基于数值模拟结果，对AISI S100-2016中DSM计算公式进行修正，主要结论如下：

(1) 开洞冷弯矩形截面钢管短柱采用内套相贯圆钢管的洞口补强方法可以改善其应力分布和变形模态，由于补强钢管的支撑作用，构件整体应力分布更加均匀，开洞处的鼓曲变形减小。

(2) 开洞冷弯矩形截面钢管短柱经补强后可以提高轴压承载力，且矩形截面开洞短柱承载力提高幅度明显高于方形截面开洞短柱承载力提高幅度。当开洞尺寸比$d/w<0.3$时，绝大部分构件承载力提高幅度未超过10%，补强效果并不明显；当开洞尺寸比$d/w\geqslant0.3$时，开洞尺寸比越大，构件承载力提高幅度越大，补强效果越明显，承载力最高可提高42.8%。对相同开洞尺寸比的短柱，随着宽厚比的增大，承载力提高幅度先增大后减小，但承载力提高幅度随宽厚比变化的波动幅度未超过50%。故在实际工程中建议对开洞尺寸比$d/w\geqslant0.3$的开洞短柱采用内套相贯圆钢管的洞口补强方法。

(3) 对我国结构用开洞冷弯空心型钢柱，在北美规范DSM计算公式基础上，对宽厚比不大于80的Q235开圆洞冷弯矩形截面钢管短柱提出了DSM承载力修正公式，以及相应补强开洞冷弯矩形截面钢管短柱的DSM承载力计算公式。结果表明提出的承载力计算公式有较高的精度和可靠度。

参考文献：

[1] YAO Z Y, RASMUSSEN K J R. Inelastic local buckling behaviour of perforated plates and sections under compression [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61: 49-70. DOI:10.1016/j.tws.2012.07.002.

[2] ANBARASU M, SUBALAKSHMI M, DAR M A, et al. Cold-formed ferritic stainless steel perforated tubular stub columns: Behaviour and design[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 170: 108654. DOI:10.1016/j.tws.2021.108654.

[3] 冯然，马义红，张长锐. 铝合金方管开孔柱轴压性能研究[J]. 工业建筑，2016，46(5)：144-150. DOI：10.13204/j.gyjz201605027.
FENG Ran, MA Yihong, ZHANG Changrui. Research on behavior of aluminium alloy shs columns with holes under axial compression[J]. Industrial Construction, 2016, 46(5): 144-150. DOI:10.13204/j.gyjz201605027.(in Chinese)

[4] 葛尧，余绍锋. 薄壁开孔矩形钢管轴压下局部稳定分析[J]. 工业建筑，2012，42(增刊1)：329-332. DOI：10.13204/j.gyjz2012.s1.076.
GE Yao, YU Shaofeng. Study on the local buckling of cold-formed rectangular tube with openings under axial compression[J]. Industrial Construction, 2012, 42(Suppl. 1): 329-332. DOI:10.13204/j.gyjz2012.s1.076.(in Chinese)

[5] 聂少锋，孙玉金，陶莹，等. 双肢开孔冷弯薄壁型钢拼合箱形截面立柱轴压性能有限元与理论分析[J]. 建筑结构，2018，48(11)：84-89. DOI：10.3969/j.issn.1674-4764.2012.04.008.
NIE Shaofeng, SUN Yujin, TAO Ying, et al. Numerical analysis and theoretical study on cold-formed thin-walled steel double limbs box section columns under axial compression [J]. Building Structure, 2018, 48(11): 84-89. DOI:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.04.008.(in Chinese)

[6] SINGH T G, CHAN T M. Effect of access openings on the buckling performance of square hollow section module stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106438. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106438.

[7] SINGH T G, SINGH K D. Experimental investigation on performance of perforated cold - formed steel tubular stub columns[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 107-121. DOI:10.1016/j.tws.2018.06.042.

[8] CHEN B S, ROY K, UZZAMAN A, et al. Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold-formed steel channel sections under compression [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106307. DOI: 10.1016/j. tws. 2019. 106307.

[9] 罗烈，李震，卢玲. 管壁开孔钢结构单管通信塔的补强分析[J]. 特种结构，2008，25(2)：20-24，26.
LUO Lie, LI Zhen, LU Ling. Reinforcement analysis of steel structure single-tube communication tower with pipe wall openings[J]. Special Structures, 2008, 25(2): 20-24, 26.(in Chinese)

[10] 孟宪德，顾励，赵俊钊. 圆钢管轴压构件开洞的补强措施研究[J]. 钢结构，2015，30(7)：56-58，75. DOI：10.13206/j.gjg201507012.
MENG Xiande, GU Li, ZHAO Junzhao. Research on reinforcing measures for CHS member with circular hole under axial compression [J]. Steel Construction, 2015, 30 (7): 56-58, 75. DOI: 10.13206/j. gjg201507012. (in Chinese)

[11] JIAO P, CHEN Z P, XU F, et al. Effects of ringed stiffener on the buckling behavior of cylindrical shells with cutout under axial compression: Experimental and numerical investigation[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123: 232-243. DOI:10.1016/j.tws.2017.11.013.

[12] 赵金友，李俊识. 腹板开孔冷弯槽钢轴压构件直接强度法研究[J]. 建筑结构，2023，53(21)：67-71，24. DOI：10.19701/j.jzjg.20211249.
ZHAO Jinyou, LI Junshi. Research on direct strength method for cold-form steel axial compression members with web openings[J]. Building Structure, 2023, 53(21): 67-71,

24. DOI:10.19701/j.jzjg.20211249.(in Chinese)

[13] AISI S100-2016 North american specification for the design of cold-formed steel structural members[S].

[14] SINGH T G, SINGH K D. Design of perforated cold-formed steel hollow stub columns using direct strength method[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 168: 108265. DOI:10.1016/j.tws.2021.108265.

[15] 沈祖炎,温东辉,李元齐,等.冷弯厚壁钢管截面不同部位材料特性分布模型[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(7):981-990. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2016.07.001.
SHEN Zuyan, WEN Donghui, LI Yuanqi, et al. Distribution patterns of material properties for cross-section of cold-formed thick-walled steel rectangular tubes[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(7): 981-990. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.07.001. (in Chinese)

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

[17] DUBINA D, UNGUREANU V. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members[J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(3): 239-262. DOI:10.1016/S0263-8231(1)00046-5.

[18] SCHAFER B W, PEKÖZ T. Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(3): 193-210. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00007-8.

[19] 贾良玖.热处理方钢管短柱超低周疲劳性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(8):97-104. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.0396.
JIA Liangjiu. Experimental study on ultra-low-cycle fatigue performance of heat-treated steel square hollow section stub columns[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 97-104. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.0396.(in Chinese)