

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.007

冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱 轴压性能有限元分析

邓庆龙, 雷劲松, 黄文, 张烈瑞

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了探讨冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱在轴压作用下的承载性能, 利用有限元软件 ABAQUS 建立了 15 个奥氏体 QN1803 型不锈钢轴心受压短柱进行模拟分析, 并根据试验结果对模型的准确性进行验证。结果表明: 构件的破坏模式及荷载-位移曲线显示, 随着腹板开孔率的增加, 构件承载能力下降程度逐渐提高, 当开孔率大于 0.5 时尤为明显; 随着腹板高厚比的增加, 试件承载能力逐渐降低, 在后极限阶段表现更好; 随着试件板厚的增加, 构件初始刚度逐渐提高, 极限承载力得到明显提升。该模型在破坏形态、破坏模式及承载特性方面与试验吻合良好, 能够较好的反映实际情况。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 短柱; 拼合截面; 轴压性能; 有限元分析

中图分类号: TU392.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0049-07

Finite Element Analysis of Axial Compression Performance of Cold-formed Thin-walled Stainless Steel Split Box Section Short Columns

DENG Qinglong, LEI Jinsong, HUANG Wen, ZHANG Lierui

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: In order to investigate the bearing capacity of cold-formed thin-walled stainless steel split box section short columns under axial compression, 15 austenitic QN1803 stainless steel short columns under axial compression were established by finite element software ABAQUS for simulation analysis, and the failure mode and load displacement curve of the members were obtained, the accuracy of the model was also verified according to the test results. The results are as follows. With the increase of the web opening rate, the degree of decline in the bearing capacity of members gradually increases, especially when the opening rate is greater than 0.5. With the increase of the ratio of web height to thickness, the bearing capacity of the specimen gradually decreases, and it performs better in the post limit stage. With the increase of specimen thickness, the initial stiffness of the member gradually increases, and the ultimate bearing capacity is significantly improved. The model is in good agreement with the test in terms of failure mode, failure mode and bearing characteristics, and can better reflect the actual situation.

Keywords: cold formed thin-walled steel; short column; split section; axial compression performance; finite element analysis

冷弯薄壁型钢作为一种绿色低碳的建筑结构, 符合节能减排的需求, 具有重量轻、强度高、施工便捷以及成本低等优点, 在国内外得到广泛应用^[1]。

由于冷弯薄壁型钢构件多为薄壁开口截面, 其材料属性和截面特性导致受压状态下易发生屈曲失稳, 影响结构稳定性^[2]。为了改善构件的屈曲行为并

收稿日期: 2025-07-20

修稿日期: 2025-09-01

基金项目: 四川省科技教育联合基金项目 (2024NSFSC2030)

作者简介: 邓庆龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土木工程钢结构。E-mail: 1014504593@qq.com

通讯作者: 雷劲松 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事土木工程方面的教学与研究工作。E-mail: 173266820@qq.com

提升承载力,将两个或多个冷弯薄壁型钢开口构件通过自攻螺钉或拉铆钉等拼合形成的组合截面,具有明显的拼合效应,能够有效提升构件的承载力并改善屈曲行为^[3-4]。随着我国建筑行业的发展与国际影响力的提升,建筑结构需要面对越来越复杂的环境挑战,长期处于潮湿、高氯离子中的结构,其耐久性受到巨大威胁^[5]。从材料的角度出发,相比于传统低碳钢,不锈钢材料具有优秀的耐腐蚀性、耐久性以及良好的力学特性,以高强不锈钢组成的拼合截面构件能够在复杂环境的作用下发挥更好的效果。

相关研究如周天华等^[6]对拼合箱形截面短柱进行了试验和有限元分析,发现螺钉间距对承载力影响较小,腹板高厚比是影响承载力的重要因素。张兴春^[7]对拼合工形截面短柱进行了试验和数值模拟,发现高厚比、宽高比、螺钉间距均能影响试件承载能力,总结了拼合工形截面短柱承载力单元叠加法。聂少峰等^[8]对三肢拼合双腔箱形柱进行了轴压、偏压试验和数值模拟,研究发现轴压试件极限承载力与长细比、截面腹板高厚比呈负相关;偏压试件极限承载力随偏心距增大而降低。杨森等^[9]根据现有试验数据,对双相型不锈钢轴心受压短柱和长柱进行数值模拟,结果表明,双相型不锈钢材料力学性能参数对构件强度系数影响不大,截面柔度系数对构件强度系数影响明显。李艳春等^[10]对拼合箱形截面柱的畸变屈曲性能展开研究,研究发现,试件的畸变屈曲半波数量和半波长与螺钉间距和数量有关。勒春驰等^[11]对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱受力性能开展试验研究,结果发现,试件具有明显的拼合效应,且腹板开孔率小于 0.5 时对试件极限承载力影响不大。Li 等^[12]对不锈钢拼合箱形截面短柱轴压性能开展研究,结果表明,截面组合形式、腹板高厚比和开孔率均会影响轴压性能。

目前,对传统低碳钢拼合截面柱轴压力学性能的研究已经较为普遍,但对于不锈钢拼合截面柱的试验及数值模拟研究相对较少。由于不锈钢的力学特性相较于碳钢存在显著差异,本文在文献[12]试验基础上,通过 ABAQUS 有限元分析软件对型号为 QN1803 的冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱进行数值模拟分析,并将模拟结果与试验结果进行对比,考察在不同参数影响下试件的轴压性能,以期在实际工程提供参考。

1 试件参数设计

对文献[12]中涉及的试件编号为 HA-UU-S1、

HA-UU-S2、HA-UUS3、HA-UU-S4、HA-UU-S2-0.33、HA-UU-S2-0.50、HA-UU-S2-0.67、HA-UU-S2-0.83 共八个双肢 U 形拼合箱形截面短柱进行有限元模型建立,具体参数设置保持与试验一致,包括试件尺寸、材料属性、边界条件以及加载方式。在完成并验证上述有限元模型具有合理性和正确性后,在其基础上开展参数分析,共设计 15 个试件,涉及参数包括腹板开孔率(D/H_w)、腹板高厚比(H_w/t)以及板厚(t)。其中腹板开孔率包括 0.33、0.42、0.50、0.58、0.67、0.83;腹板高厚比分别为板厚 1.5mm 组的 53、67、80、93 以及板厚 2 mm 组的 40、50、60、70;板厚包括 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm。试件参数设计详见表 1。

表 1 试件参数

试件编号	腹板高 H_w /mm	腹板厚 t /mm	腹板高 厚比 (H_w/t)	开孔率 (D/H_w)	来源
KUU120-2-0.33	120	2.0	60	0.33	HA-UU-S2-0.33
KUU120-2-0.42	120	2.0	60	0.42	—
KUU120-2-0.50	120	2.0	60	0.50	HA-UU-S2-0.50
KUU120-2-0.58	120	2.0	60	0.58	—
KUU120-2-0.67	120	2.0	60	0.67	HA-UU-S2-0.67
KUU120-2-0.83	120	2.0	60	0.83	HA-UU-S2-0.83
UU80-1.5	80	1.5	53	—	—
UU100-1.5	100	1.5	67	—	HA-UU-S3
UU120-1.5	120	1.5	80	—	HA-UU-S4
UU140-1.5	140	1.5	93	—	—
UU80-2	80	2.0	40	—	—
UU100-2	100	2.0	50	—	HA-UU-S1
UU120-2	120	2.0	60	—	HA-UU-S2
UU140-2	140	2.0	70	—	—
UU120-2.5	120	2.5	48	—	—

注:以“KUU120-2-0.33”为例解释命名规则:K 代表开孔试件;UU 代表箱形截面由两个 U 形截面基本构件拼合而成;120 代表腹板高度;2 代表板厚;0.33 代表开孔率。

基于上述步骤进行有限元分析来探究腹板开孔率、腹板高厚比以及板厚,对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱轴压承载力的影响,其中试件尺寸布置图详见图 1。

2 有限元模型

2.1 不锈钢的本构关系

不锈钢的应力-应变行为与普通低碳钢存在显著差异。不锈钢材料缺乏明显的屈服平台,拥有更为突出的应变硬化能力和优异的延展性,在应力-应变行为上通常表现出弹性、塑性、硬化和断裂等不

同阶段的非线性特征。基于此特性,设计上通常采用塑性应变为0.2%时对应的应力作为其名义屈服强度。本文采用 Rasmussen^[13]提出的两段式分析模型来模拟不锈钢材料的应力-应变关系,该模型能够较好地拟合出不锈钢材料在拉伸和压缩状态下的应力-应变曲线,其模型如图2所示。

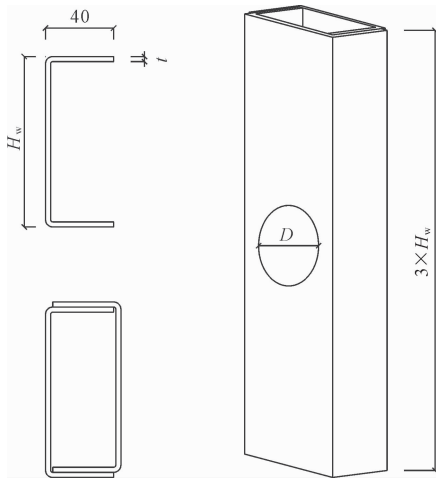


图1 试件尺寸布置图

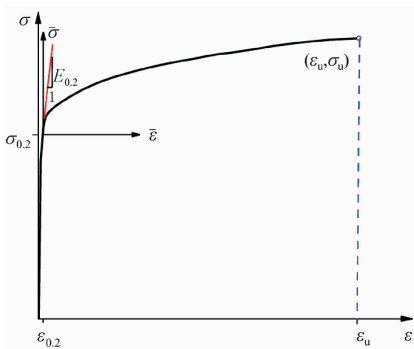


图2 Rasmussen 提出的应力-应变关系曲线

上述不锈钢模型应力-应变表达如式(1)所示:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} & \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002nE_0/\sigma_{0.2}} \quad (2)$$

$$n = \frac{\ln 20}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}} \right)} \quad (3)$$

$$m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad (4)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} \quad (6)$$

式中: E_0 为不锈钢初始弹性模量; $E_{0.2}$ 为应力-应变曲线中对应0.2%塑性应变处的切线模量; $\sigma_{0.2}$ 表示0.2%塑性应变对应的应力值,即名义屈服强度; σ_u 和 ε_u 分别代表不锈钢的极限强度和试件的极限塑性应变; $\sigma_{0.01}$ 为0.01%塑性应变对应的应力值; n 为不锈钢的应变强化指数。

此外,在 ABAQUS 有限元软件中,材料本构模型须输入真实应力-应变关系。因此,通过式(7)对材料的名义应力-名义应变关系进行转换。

$$\begin{cases} \sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{norm}} (1 + \varepsilon_{\text{norm}}) \\ \varepsilon_{\text{pl}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{norm}}) - \sigma_{\text{true}}/E_0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 单元选择与网格划分

对于薄壁型钢试件,S4R壳单元具有更好的适用性,该单元为4节点减缩积分曲面壳单元,每个节点拥有6个自由度,支持材料非线性和几何非线性分析,可用于非线性问题的计算以及构件整体屈曲和局部屈曲的分析。因此,本模型采用S4R壳单元。

在有限元仿真模型中,网格尺寸的选择直接影响分析精度和计算效率,合理选取网格尺寸是兼顾计算效率与结果可靠性的关键。为了保证有限元模型的计算精度及计算效率,使模拟结果与试验结果更为贴合,本模型预先划分了部件的几何区域,采用四边形单元形状的自由网格划分方法,对部件进行网格划分,使网格更加合理和规整,减小因网格形状导致的计算不收敛以及应力发展不均匀的影响。试件弯角处和开孔试件孔洞处的应力发展较为复杂,因此对弯角处和孔洞处进行网格加密处理,以获取更为可靠的模拟数据。兼顾计算精度及计算效率,本模型选用尺寸为5 mm的网格尺寸,弯角与孔洞处则为3 mm。网格划分见图3。

2.3 引入初始缺陷

冷弯薄壁型钢的初始缺陷源于制造、储存、运输等,分为力学缺陷与几何缺陷两类,前者体现为材料非线性,既实际与理想材料力学特性的差异,主要为残余应力;后者体现几何非线性,即构件实际形态偏离理想几何构型^[14]。

根据郑宝锋等^[15]对冷成型不锈钢截面轴压试件的研究表明,冷加工效应中的残余应力对受压或受弯构件承载力影响微弱,在薄壁不锈钢构件力学

性能评估中可予忽略。基于此结论,本文中的有限元模型仅计入初始几何缺陷,未引入残余应力参数。

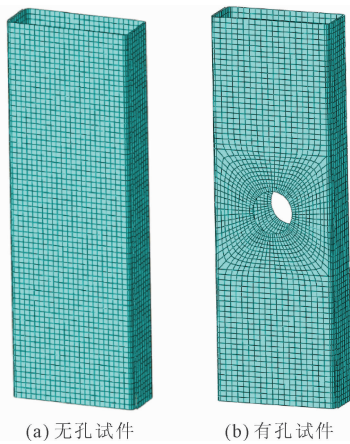


图 3 网格划分

本文采用一致缺陷模态法引入初始几何缺陷:首先,对试件进行线弹性屈曲分析,获得前十阶屈曲模态,提取其对应的模型节点坐标,并将其乘以文献[12]中实测的缺陷幅值,构建局部初始几何缺陷分布模型;其次,在承载力模型中,通过关键字提取已经获得的屈曲模态,并设置整体变形幅值,完成初始几何缺陷的引入。本文引入的屈曲模态如图 4 所示。

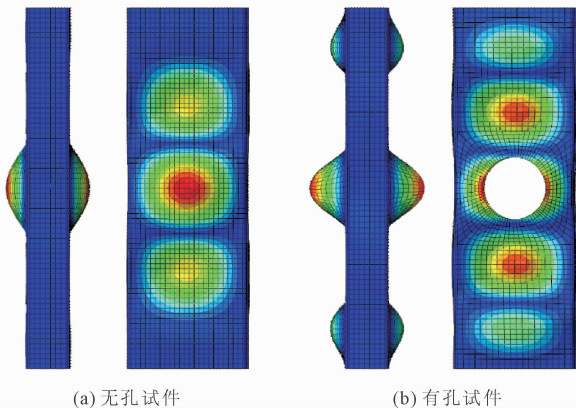


图 4 试件屈曲模态

2.4 接触关系设置

按照试验研究中基本构件与基本构件之间、基本构件与连接件之间的接触关系,在 ABAQUS 中进行相关接触设置。根据文献[12]中的试验结果,发现所有自插铆钉连接件均保持完好连接性能,且未发生变形或破坏,因此未对自插铆钉进行几何建模,而是采用节点绑定的方式,将两个 U 形基本构件对应位置进行连接。对于两个 U 形基本构件之间的接触区域建立“表面与表面接触”,其接触行为分为

法向和切向两个部分,法向采用“硬接触”描述内外壁之间的相互作用:接触压力在受压时传递,压力消失则表明接触面分离。切向行为采用“罚”函数模拟摩擦力作用传递,由于试件表面处理存在差异,经过多次模拟优化,最终确定摩擦系数为 0.25。

2.5 荷载与边界条件

按照试验研究中试件的真实受力状态,在 ABAQUS 中设置荷载与边界条件。为了准确模拟试件在轴向荷载作用下的受力状态,分别在构件两端的截面中心处建立两个参考点,并分别将两个参考点与两端截面进行耦合约束,通过在参考点上施加位移荷载来模拟试件所受轴向荷载。模型底部采用完全固结约束($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$),顶部则施加位移转角约束,固定除轴向位移 U_3 外的所有自由度,加载时通过控制 U_3 方向的位移增量实现准静态加载。

3 结果及分析

为验证有限元模型的精确性和可靠性,对文献[12]中编号 HA-UU-S1、HA-UU-S2、HA-UUS3、HA-UU-S4、HA-UU-S2-0.33、HA-UU-S2-0.50、HA-UU-S2-0.67、HA-UU-S2-0.83 共八个试件进行了模拟分析。有限元分析结果和文献[12]中试验发生的破坏模式基本一致,所有试件均在中部呈现出腹板外凸,翼缘内凹的局部屈曲破坏,如图 5 所示。

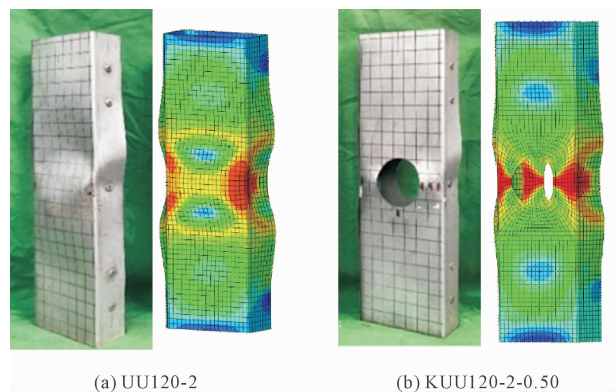


图 5 试验与有限元模拟破坏形态对比

将有限元模拟所得荷载-位移曲线数据与文献中试验观测值进行对比,如图 6 所示。两者的荷载-位移关系曲线的增长趋势高度吻合,试验结果与有限元模拟结果的极限承载力比值在 0.99 到 1.04 之间,表明本文所建有限元模型能够反映实际试验情况,具有一定的可靠性,验算结果详见表 2。

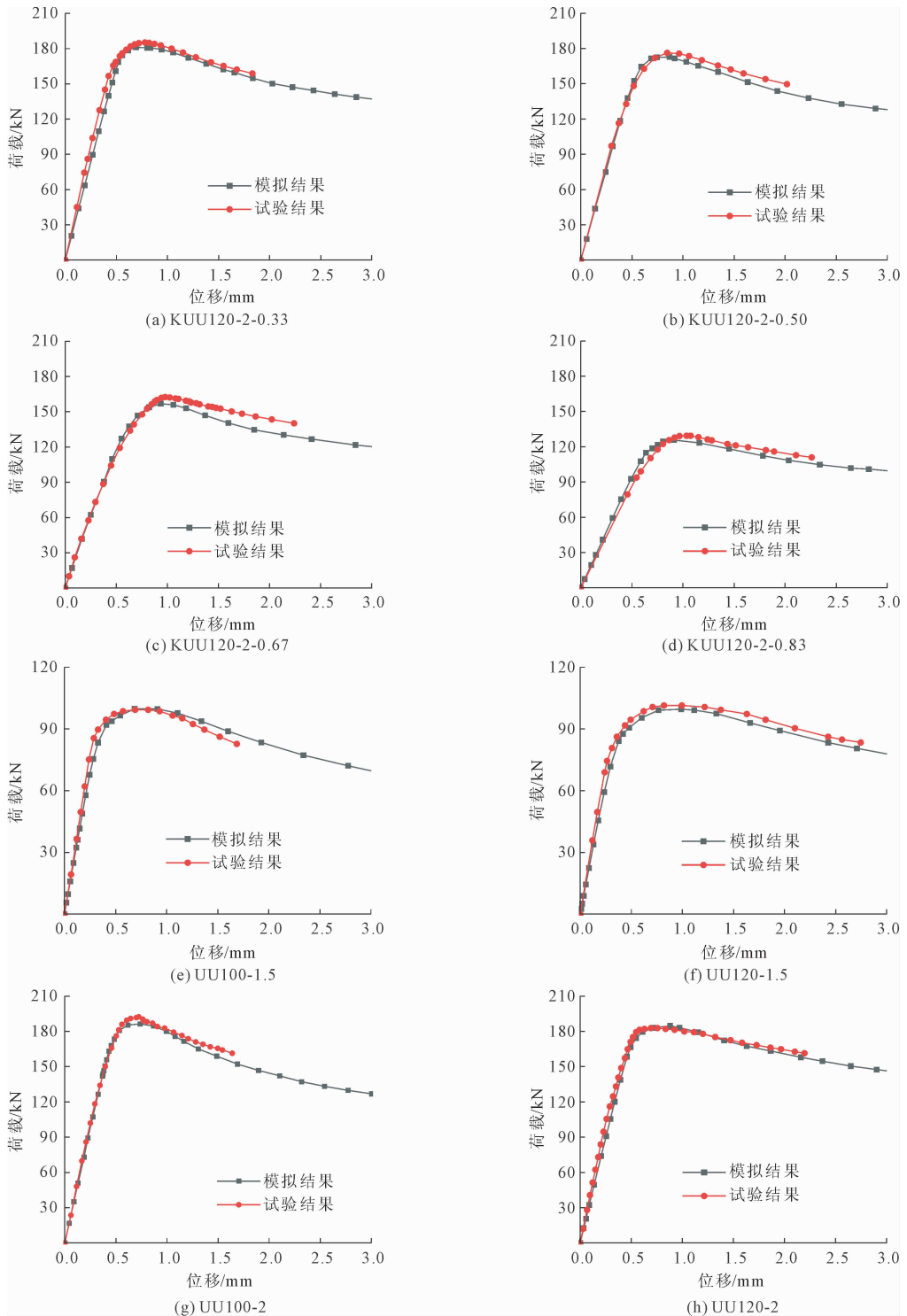


图6 荷载-位移曲线有限元计算值与试验值对比

3.1 不同开孔率的影响

图7所展示的是不同腹板开孔率试件的荷载-位移曲线图,图8则为不同腹板开孔率试件极限承载力随腹板开孔率变化趋势图。在考察的参数区间内,随着腹板开孔率的增加,试件荷载-位移曲线初始段的斜率逐渐减小,试件的初始刚度降低,当试件

达到极限荷载时,腹板开孔率越大的试件对应的轴向位移越大,其在孔洞附近的局部屈曲更为明显。对于承载力而言,当腹板开孔率在0.5以内时,腹板开孔对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱的轴压承载力影响较小,KUU120-2-0.33试件的极限承载力降低2.2%,KUU120-2-0.42试件的极限承载力降低

表 2 试件极限承载力有限元计算值与试验值对比

试件编号	试验值 F_{test} /kN	有限元计算 值 F_{FEM} /kN	$\frac{F_{test}}{F_{FEM}}$	来源 ^[12]
KUU120-2-0.33	185.2	181.0	1.02	HA-UU-S2-0.33
KUU120-2-0.50	176.3	172.7	1.02	HA-UU-S2-0.50
KUU120-2-0.67	162.5	156.8	1.04	HA-UU-S2-0.67
KUU120-2-0.83	129.4	125.7	1.03	HA-UU-S2-0.83
UU100-1.5	99.3	99.8	0.99	HA-UU-S3
UU120-1.5	101.4	99.6	1.02	HA-UU-S4
UU100-2	192.4	186.4	1.03	HA-UU-S1
UU120-2	182.8	184.7	0.99	HA-UU-S2
KUU120-2-0.42	—	177.8	—	—
KUU120-2-0.58	—	164.6	—	—
UU80-1.5	—	101.1	—	—
UU140-1.5	—	95.6	—	—
UU80-2	—	188.8	—	—
UU140-2	—	181.9	—	—
UU120-2.5	—	269.7	—	—

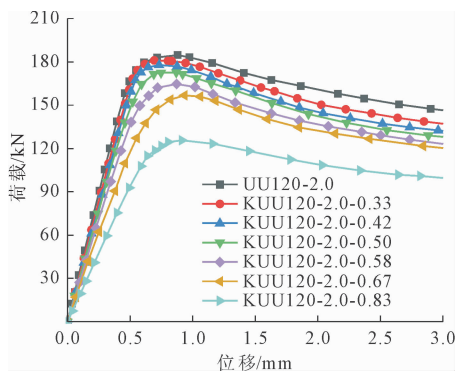


图 7 不同开孔率试件荷载-位移曲线

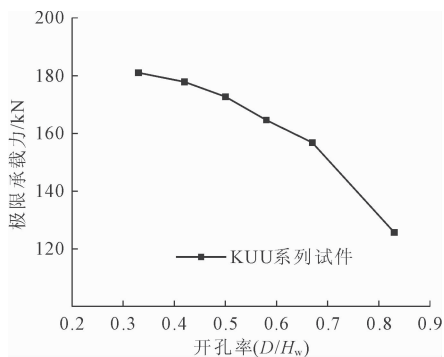


图 8 极限承载力-开孔率曲线

3.9%, KUU120-2-0.50 试件的极限承载力降低 6.7%; 当腹板开孔率超过 0.5 时, 腹板开孔对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱的轴压承载力影响较大, KUU120-2-0.58 试件极限承载力降低 11.0%, KUU120-2-0.67 试件极限承载力降低 15.2%,

KUU120-2-0.83 试件极限承载力降低 32.1%。基于上述结果, 当腹板开孔率超过 0.5 时, 试件的初始刚度和承载力退化变得尤为显著, 表明了腹板开孔率的增加对试件承载性能具有显著影响。

3.2 不同腹板高厚比的影响

考察的参数区间内, 随着腹板高厚比的增加, 试件荷载-位移曲线初始段的斜率逐渐减小, 试件的初始刚度降低, 当试件达到极限荷载时, 具有更大腹板高厚比的试件对应的轴向位移更大, 试件整体变形更为明显, 其荷载-位移曲线的后极限阶段下降减缓, 这是由于不锈钢材料具有较高的应变强化能力, 具有更大腹板高厚比的试件在后极限阶段拥有更好的表现。对于承载力而言, 板厚为 1.5 mm 的试件, 当腹板高厚比由 53 提升至 93 时, 试件的极限承载力下降了 6%; 板厚 2.0 mm 的试件, 当腹板高厚比由 40 提升至 70 时, 试件的极限承载力下降了 4%。由于腹板是拼合箱形截面的强轴方向, 腹板的局部屈曲控制了拼合短柱试件的强度, 增加腹板高厚比加剧了试件的局部屈曲行为, 进而使试件的初始刚度和极限承载力下降。

3.3 不同板厚的影响

考察的参数区间内, 随着施加的荷载逐渐增大, 板厚为 1.5 mm 的试件率先达到屈服, 拥有更大板厚的试件则展现出更大的初始刚度和更高的极限承载力。当试件达到极限荷载时, 板厚越大的试件对应的轴向位移越大, 其荷载-位移曲线的后极限阶段下降加快, 随着厚度的增加, 试件的局部屈曲行为得到改善。对于承载力而言, 当板厚由 1.5 mm 提升至 2.0 mm 时, 试件的极限承载力提升为 85%; 当板厚由 2.0 mm 提升至 2.5 mm 时, 试件的极限承载力提升为 46%。板厚为 1.5 mm 组对比板厚 2.0 mm 组, 其极限承载力平均提升为 84%。由此可见, 提升板厚能够有效改善试件的局部屈曲行为, 进而显著提升其极限承载力。

4 结 论

为探究腹板开孔率、腹板高厚比以及板厚对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱轴压承载力的影响, 通过 ABAQUS 有限元软件完成了 15 个冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱模型的建立与验证, 所有试件均在腹板中部发生翼缘内凹腹板外凸的局部屈曲破坏。主要得到了以下结论:

(1) 腹板开孔率对试件承载能力有明显影响。腹板开孔率与试件的初始刚度和极限承载力呈负相关关系;控制腹板开孔率在0.5以内对试件承载能力影响较小;当腹板开孔率大于0.5时,试件的初始刚度和极限承载力下降尤为明显。

(2) 在研究的参数范围内,随着腹板高厚比的提升,试件的初始刚度和极限承载力逐渐下降,局部屈曲现象加剧;具有较大腹板高厚比的试件,在后极限阶段表现更好,试件的荷载-位移曲线下降趋势减缓。

(3) 增加板厚对提升冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱承载力的效果非常显著。增加板厚能够改善局部屈曲行为,提升试件的初始刚度和极限承载力。

参考文献:

[1] 王奕钧,郝际平,刘 斌,等. 新型冷弯薄壁型钢墙体立柱轴压性能研究[J]. 山东建筑大学学报,2024,39(5):27-36.

[2] 董事尔,杨 博,张爱荣. 冷弯薄壁C型钢双肢闭合并合柱的极限承载力研究[J]. 工业建筑,2022,52(11):175-180,174.

[3] 谭卓琼,张佳慧,盛孝耀,等. 薄壁冷弯型钢组合截面试件的整体稳定性与承载力研究[J]. 建筑结构,2024,54(22):111-118.

[4] Schafer B W. Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019,140:533-541.

[5] 舒赣平,吴耀华,范圣刚,等. 不锈钢在建筑钢结构中的研究与应用[J]. 钢结构(中英文),2024,39(10):

105-110.

[6] 周天华,李艳春,吴函恒,等. 冷弯薄壁型钢拼合箱形截面短柱承载力叠加法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(11):46-55.

[7] 张兴春. 冷弯薄壁型钢拼合工形截面轴压短柱基于“承载力单元”的叠加法研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[8] 聂少锋,周天华,周绪红,等. 三肢冷弯薄壁型钢拼合双腔箱形柱受压性能试验研究与数值分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2019,49(1):25-33.

[9] 杨 森,张涌泉,王嘉昌,等. 冷成型双相型不锈钢轴心受压构件承载力分析[J]. 太原理工大学学报,2020,51(1):1-8.

[10] 李艳春,周天华,丁嘉豪,等. 冷弯薄壁型钢拼合箱形柱的畸变屈曲性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):91-100.

[11] 靳春驰,李海汀,段立平,等. 冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱轴压试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2025,27(4):14-23.

[12] Li Haiting, Jin Chunchi, Li Qiuyun, et al. Experimental investigation of cold-formed stainless steel built-up closed section stub columns [J]. *Engineering Structures*, 2024,306:117657.

[13] Rasmussen K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003,59(1):47-61.

[14] 张俊峰,张江川,韩东光,等. 冷弯型钢构件几何缺陷研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2025,42(2):1-15.

[15] 郑宝锋. 冷成型不锈钢结构受力性能的关键问题研究[D]. 南京:东南大学,2017.