

引文格式: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.

ZHANG Junfeng, ZHANG Jiangchuan, HAN Dongguang, et al. Research progress on geometric imperfections of cold-formed steel members [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 1-15.

DOI:10.19815/j.jace.2023.09130

冷弯型钢构件几何缺陷研究进展

张俊峰¹,张江川²,韩东光³,任立群³

(1. 郑州大学 水利与交通学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001;
3. 中建一局集团第二建筑有限公司,北京 102600)

摘要:为完善冷弯型钢(CFS)构件设计体系中的几何缺陷部分,通过缺陷分类、测量技术、模拟理论等方法对各国的相关试验与理论成果进行分析。结果表明:目前中国规范缺乏畸变缺陷的相关规定,需要进一步完善;在测量技术方面,接触式测量法和非接触式测量法在成本、测量精度和数据后处理等多个方面存在不同的优势和缺点;在数值模拟方法中,有限条法在分解屈曲模态、求解半波长等方面具有独特优势;在目前的几何缺陷模拟理论中,一致缺陷模态法最为简便,但理论依据不足,预测结果不够准确;传统组合模态法对整体缺陷的模拟不够准确,对于中长柱和长柱的预测结果偏于安全;一维频谱模态法将几何缺陷由时域变换至频域,缺陷幅值表现出一定周期性,预测结果较为准确;二维频谱法理论复杂,对畸变缺陷和整体缺陷的模拟存在局限性;机器学习为随机概率法提供了一个新的研究方向,但需要大量的实测几何缺陷数据用以训练模型。

关键词:冷弯型钢;几何缺陷;数据分析;测量技术;模拟理论

中图分类号:TU392.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0001-15

Research progress on geometric imperfections of cold-formed steel members

ZHANG Junfeng¹, ZHANG Jiangchuan², HAN Dongguang³, REN Liqun³

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;
2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. The Second Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 102600, China)

Abstract: In order to improve the geometric imperfections in the design system of cold-formed steel (CFS) members, the relevant experimental and theoretical achievements in different countries were analyzed through the classification of imperfections, measurement techniques, simulation theories and other aspects. The results show that at present, there is a lack of relevant provisions on distortional imperfections in Chinese standards, which needs to be further improved. In terms of measurement techniques, contact measurement techniques and non-contact measurement techniques have their own advantages and disadvantages in aspects such as cost, measurement accuracy and data post-processing. Among the numerical modeling methods, the finite strip method has a unique advantage in the decomposition of buckling modes and the solution of half-wavelength. The theories of simulation on geometric imperfections are related to

buckling modes, among which the first buckling mode approach is the simplest, but its theoretical basis is insufficient and predicted results are not accurate. The traditional combined mode approach is not accurate enough to simulate the global imperfections, and the predicted results of middle long columns and long columns tend to be conservative. The one-dimensional modal spectral approach transforms geometric imperfections from time domain to frequency domain, and the magnitudes of imperfections show a certain periodicity, and the predicted results are more accurate. In addition, the two-dimensional spectral approach is complicated, and the simulation of distortional imperfections and global imperfections is limited. Machine learning provides a new research direction for stochastic probabilistic method, but it requires a lot of measured data about geometric imperfections to train the model.

Key words: cold-formed steel; geometric imperfection; data analysis; measurement technique; theory of simulation

Author resume: ZHANG Junfeng(1981-), male, PhD, assistant professor, E-mail: ytoy21cn@163.com.

0 引言

冷弯型钢(CFS)构件的生产工艺成熟,生产效率高,能够形成各类截面形状以满足不同的工程需要,具有轻质高强、安装便捷等优势,已经在低层建筑中得到了广泛应用,在多层建筑中也得到了不断拓展^[1]。为充分发挥钢材的优势,通常将 CFS 构件的宽厚比设计得较大,因此其稳定性受初始缺陷的影响很大^[2-4]。初始缺陷产生于 CFS 构件的制造、保存、运输和使用的整个过程,可分为力学缺陷和几何缺陷:力学缺陷表现为实际材料与理想材料在力学特性(主要是残余应力)上的差异^[5],即材料非线性;几何缺陷表现为构件实际形状和理想形状之间的差异^[6],即几何非线性。以往研究对 U 形和 C 形等构件的残余应力进行了测量,Schafer 等^[7]对此进行总结,发现残余应力的平均值为钢材屈服强度的 2%~5%,而钢材依靠冷弯工艺提高的屈服应力平均值为钢材屈服强度的 2%~7%。总体而言,在承载能力方面,残余应力对 CFS 构件的影响可与冷弯强化相抵消,因此残余应力在数值模拟中通常被忽略。

已有研究表明,几何缺陷对 CFS 构件的破坏模式、极限承载力和后屈曲等力学性能具有显著影响^[8-11]。几何缺陷的产生在本质上是随机的,这为相关研究带来了很大困难。为了能够准确提取几何缺陷特征,实测技术和模拟理论受到了研究者的关注,并伴随着测量设备与计算机技术的发展得到了发展。

为了在 CFS 构件的设计中更周全合理地考虑

几何缺陷的影响,本文总结了国内外有关 CFS 构件几何缺陷的研究内容,首先根据各国规范对几何缺陷进行分类,概括了两类几何缺陷实测技术,然后对有限元法和有限条法两种常用的几何缺陷数据模拟方法进行介绍,分析了不同的几何缺陷模拟理论,内容涉及屈曲模态、频域分析和机器学习,最后对相关研究存在的不足进行了总结,并提出未来的研究方向。

1 缺陷分类

在 CFS 构件中存在着复杂的几何缺陷,它们沿构件的横截面或整体分布,缺陷形状各自不同,对它们进行合理的分类是研究几何缺陷的前提。根据 Schafer 等^[12]的研究,可将 CFS 构件中的几何缺陷分为截面缺陷、整体缺陷和凹痕。

ASTM C955^[13]与 AISI 的相关规范^[14-15]基于实际构件的尺寸控制,规定了截面缺陷和整体缺陷的限值,但由于凹痕产生自异常损坏(通常是撞击),不能控制和量化^[16],因此规范并未涉及。图 1 为美国规范 CFS 构件几何缺陷分类,其中截面缺陷分为冠状(Crown)和外倾/内倾(Flare/Overbend)缺陷,体现为构件表面的凹凸不平;整体缺陷分为弓形(Bow)、弯曲(Camber)、扭转(Twist),体现为构件整体的变形。这 5 种缺陷都很便于测量:冠状缺陷代表沿垂直于原板件的方向,腹板和翼缘等板件偏离理想截面形状产生的偏差;外倾/内倾缺陷代表翼缘板件向外/内偏离理想截面形状产生的偏差;弓形缺陷代表构件整体绕弱轴产生的与理想构件形状之间的偏差;弯曲缺陷代表构件整体绕强轴产生的与

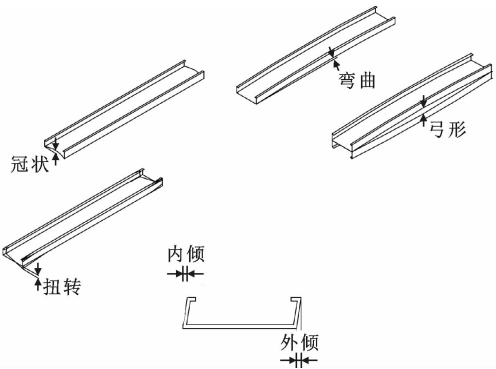


图 1 美国规范 CFS 构件几何缺陷分类

Fig. 1 Classification for geometric imperfections of CFS members in American standards

理想构件形状之间的偏差;扭转缺陷代表在腹板和翼缘相连的角部,构件整体绕纵轴旋转与理想构件形状之间的偏差。

中国规范^[17-19]同样对 CFS 构件中的几何缺陷进行了限制。《冷弯型钢结构技术标准》^[17]规定了构件截面的翼缘不平度 θ (通过计算可转化为外倾/内倾缺陷)和构件整体的弯曲度 c (等同于弯曲缺陷)的制造公差,如图 2(a)~(c)所示。《通用冷弯开口型钢》^[18]还规定了凹凸度和扭转度 V (等同于扭转缺陷)的制造公差,凹凸度指构件同一表面凹陷或凸起的高度,扭转度如图 2(d)所示。

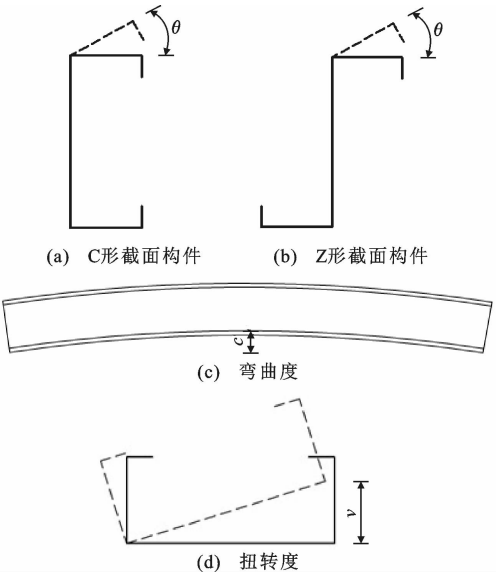


图 2 中国规范 CFS 构件几何缺陷分类

Fig. 2 Classification for geometric imperfections of CFS members in Chinese standards

各国规范基于实际制造与尺寸检测的可行性和便利性,对几何缺陷的要求都很直观地体现在对 CFS 构件制造精度的限制,表 1 给出了各国规范对不同几何缺陷的制造公差限值(图 1 和图 2 中的方

向为正值)。AISI 规范细分了非结构构件和结构构件,在此基础上再分别对 C 形和 Track 形两种型钢规定了制造公差 Δ_0 和 Δ_1 ;欧洲规范则根据设计要求将制造公差分成基本公差(满足结构抗力和稳定性的基本要求)和功能公差(满足外观或安装等功能要求),并将功能公差再一次分为第一类公差 Δ_1 和第二类公差 Δ_2 ,其中 Δ_2 要求更精密,优先用于需要精确装配的工程。

2 缺陷实测

基于实际构件测得的准确缺陷数据能够帮助研究者开发和校正缺陷模型,检验和完善提出的缺陷理论,是缺陷相关研究能够持续发展的基础。缺陷测量技术和对应的数据处理方法对于实测缺陷数据的丰富度和精确度有着很大的影响,需要耗费的资金成本和时间成本也有很大差别。按照所用设备的测量形式,几何缺陷实测方法目前可分为接触式测量法和非接触式测量法。

2.1 接触式测量法

过去使用接触式测量法时,通常会手动使用位移传感器或标尺等仪器,因此对测量设备的要求较低。为了减少人工操作带来的误差并提升效率,研究者将上述仪器与其他设备结合在一起,例如将尺和经纬仪^[21-22]、位移传感器和铣床^[12,23]等结合起来。此外也有使用全站仪^[24]测量整体缺陷的。

使用接触式测量法时,测量设备必须接触构件,并从构件表面选定的测点或规划的路径上获取缺陷数据。这样得到的缺陷数据在数量有限的同时也较为离散,不能较为全面地反映构件整体的几何特征,可用机械插值法等^[25]数据处理方法来估算测量处之外的缺陷数据。Singer 等^[26]发现,若探测设备的探头接触薄壁构件表面时作用力较大,可能会产生额外的几何缺陷,从而影响测量精度。此外,还存在截面角部在内的截面缺陷难以测量^[27],接触测量导致耗时长、精度低,测量路径可重复性差等问题。虽然这些问题难以回避,但接触式测量法因具有成本低廉、操作简单和数据后处理便利的优点,仍适用于对几何缺陷测量精度要求不高的结构。

2.2 非接触式测量法

Berry 等^[28]在改进设备时,开发出带有激光位移计的自动扫描技术。随着科技的不断发展,激光测量^[6,29-32]和摄像测量^[27,33-35]等非接触式光学测量法进入了人们的视野,利用先进设备可以对构件整体进行快速的自动化测量。

表 1 各国规范几何缺陷的制造公差

Table 1 Manufacturing tolerances of geometric imperfections in different national standards

规范	缺陷类型	制造公差
ASTM C955-15 ^[13] / AISI S240-20 ^[15] (结构构件)	冠状	$\Delta_c = \pm 1.59 \text{ mm}; \Delta_t = \pm 1.59 \text{ mm}$
	外倾/内倾	$\Delta_c = \pm 1.59 \text{ mm}; \Delta_t = 0 \text{ mm 或 } -2.38 \text{ mm}$
	弓形	$\Delta_c = 1.04 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/960);$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
	弯曲	$\Delta_c = 1.04 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/960);$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
	扭转	$\Delta_c = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm};$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
AISI S220-20 ^[14] (非结构构件)	冠状	$\Delta_c = \pm 3.18 \text{ mm}; \Delta_t = \pm 3.18 \text{ mm}$
	外倾/内倾	$\Delta_c = \pm 1.59 \text{ mm}; \Delta_t = 0 \text{ mm 或 } -4.76 \text{ mm}$
	弓形	$\Delta_c = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm};$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
	弯曲	$\Delta_c = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm};$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
	扭转	$\Delta_c = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm};$ $\Delta_t = 2.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} (L/384), \text{max}; 12.7 \text{ mm}$
《冷弯型钢结构技术标准》 ^[17]	翼缘不平度	$\pm 3^\circ$
	弯曲	$L/500$
《通用冷弯开口型钢》 ^[18]	凹凸度	$0.6\% D, \text{max}; 0.4 \text{ mm}$
	弯曲	$L/500$
	扭转	$2 + L/2\ 000$
EN 1090-4:2018 ^[20] (基本公差)	弯曲	$L/750$
EN 1090-4:2018 ^[20] (功能公差)	冠状	$\Delta_1 = \pm D/50; \Delta_2 = \pm D/100$
	翼缘不平度	$\Delta_1 = \pm 3^\circ; \Delta_2 = \pm 2^\circ$

注： L 为构件总长度； D 为板件宽度。

在激光测量方面,Zhao^[36]开发了一种三维激光缺陷测量平台,使用时要先将试件水平置于支撑梁固定,旋转工作台以及可直线运动的支撑框架使得激光扫描仪能够扫描构件整体,如图 3 所示。激光扫描仪从不同视角测量出的数据处于不同的局部坐标系中,需要在校准后一并转换到全局坐标系中,再对构件的三维模型进行重构。此装置的激光扫描设备固定于支撑框架之上,组合较为复杂,为减少这种限制,可使用手持式三维激光扫描仪^[37-38]代替。

摄像测量需要有计划地安排拍摄设备的位置,以便从构件四周多角度拍摄照片,再识别照片中的目标点构建三维模型。相较于激光扫描,拍摄这一过程速度很快,但对照片进行数据处理的过程则要更繁琐,拍摄的截面有限也会导致精度较差^[39]。在早期的研究中,Bernard 等^[27]根据测量误差的对比判断出摄像测量不适用于冷弯构件,但随着设备与图像处理技术的进步,摄像测量技术也在不断发展,

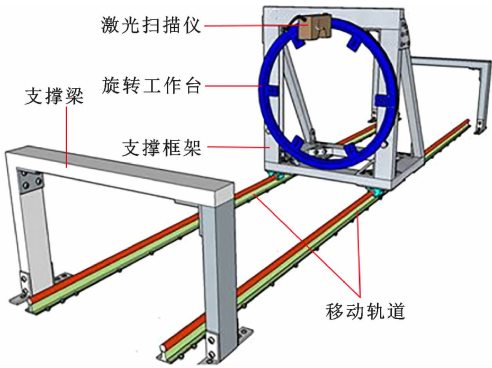


图 3 激光缺陷测量平台

Fig. 3 Laser-based imperfection measurement platform

Borkowski 等^[40]使用多个相机组成的数字图像关联系统,描绘出冷弯薄壁型钢柱的初始形状和几何缺陷。

相较于接触式测量法,非接触式测量法凭借精密设备的自动测量,在精度与测量效率等方面展现

出优势,但也存在一些问题。首先,非接触式测量法需要精密设备,成本很高。其次,由于非接触式测量法涉及光学设备,为保证测量信息的准确性,研究者对设备和环境提出了更多要求。例如,在使用三维激光缺陷测量装置时,应处于黑暗的环境中,且周围不能存在其他正在进行的结构试验以避免振动的影响。在数据后处理方面,由于收集的数据是庞杂的三维密集点云,不能使用常规的数据处理方法,需要针对不同的测量设备与需求去开发适合的算法,以识别构件表面并提取几何缺陷特征。邹奕翀等^[41]针对从激光测量中得到的不同几何缺陷设计了各自的算法,使得点云数据能直接用于模型的开发。

3 数值模拟方法

试验在 CFS 构件的几何缺陷研究中不可或缺,但需要繁杂的前期准备,经济与时间成本大,因此可以通过一定的数据模拟方法建立缺陷模拟模型,以方便进一步研究。现阶段 CFS 构件的缺陷数据模拟方法主要有:有限元法^[42]、有线法^[43]、广义梁理论^[44]和线有限元法^[45]。其中使用最多的方法为有限元法和有限条法,这两种方法在原理上是一致的,仅在构件的离散化上不一致,如图 4 所示^[46]。有限元法可对各单元的 6 个自由度进行调整,能在构件的任意位置直接模拟几何缺陷,但求解速度较慢;有限条法划分的单元沿长度方向性质均匀,需要求解的平衡方程大幅减少,求解速度较快,但模拟几何缺陷的方式较为间接,可为缺陷模拟理论提供不同屈曲模态的形状、耦合程度以及半波长等信息。

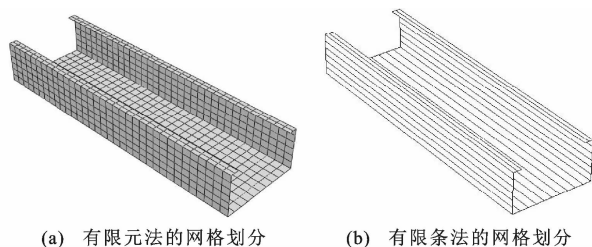


图 4 有限元法和有限条法的离散分析对比

Fig. 4 Comparison of discrete analysis between finite element method and finite strip method

有限元法可用于各种复杂条件下 CFS 构件的弹性屈曲和非线性屈曲分析,通过细化各类参数得到更为准确的解^[47],但也存在建模复杂、计算工作量大的缺点。通用有限元软件都可以通过修改有限元模型的节点坐标来模拟几何缺陷,这些节点坐标应与基本屈曲模态的形状一致。此后在有限元模型上施加位移荷载或力荷载,就可分析和预测几何缺

陷对构件承载力的影响。

有限条法通常用于弹性屈曲分析,可对各种屈曲模态互相耦合后的结果进行分解,然而分解后的屈曲模态并不完全独立,最终结果可能是畸变-整体屈曲或局部-畸变屈曲的相互作用,而约束有线条法在此方面进行了改进,能提供被完全分解的独立屈曲模态。有限条法的另一扩展即复合条带法^[48]也极大地增强了有限条法的通用性,但它们都不能对复杂截面构件和组合截面构件进行精确模拟。有限条法的相关软件 CUFSM 能分解弹性屈曲分析中各屈曲模态的形状,提供对应的半波长和临界屈曲荷载,并能分析任意长度构件的各个独立屈曲模态的耦合占比^[49-52],如图 5 所示。图 5(a)纵轴的加载系数为承载力与屈服荷载 P_y 的比值,曲线上两个极小值点的横轴位置分别代表局部屈曲半波长 λ_L 和畸变屈曲半波长 λ_D ,根据对应的纵轴位置可得出局部屈曲临界荷载和畸变屈曲临界荷载,根据曲线上横轴位置为构件全长的点可得到整体屈曲临界荷载。图 5(b)展示了不同长度的 CFS 构件各屈曲模态的耦合作用。

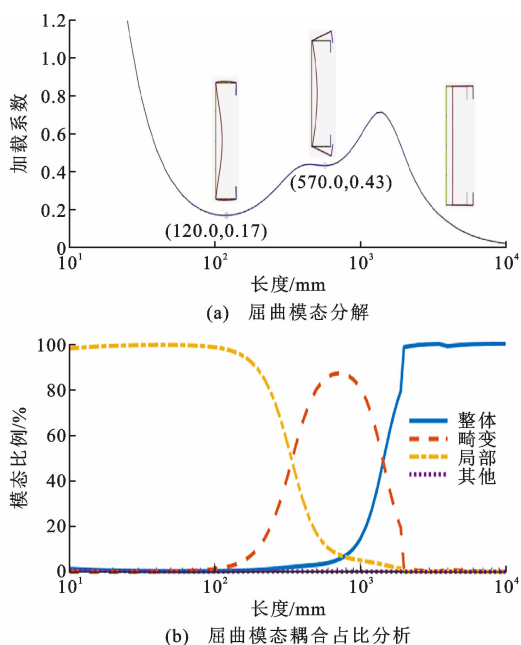


图 5 CUFSM 分析后处理

Fig. 5 Analysis and post-processing of CUFSM

需要指出的是,几何缺陷对具有不同边界条件的 CFS 构件的影响是不同的,例如:相较于边界条件为固支的柱,几何缺陷对简支柱的影响要大得多^[53]。因此,针对不同的模拟方法进行边界条件的设定,关系到能否获取符合实际的模拟结果。早些年,Denis 等^[54]提供了对应于自由端、简支端、固支

端等有限元边界条件的设置方法。Abbasi 等^[55]分析了简支和固支边界条件在有限元软件中的设置方法,发现使用传统边界条件得到的有限元解和有限条解之间存在明显差异^[56],并指出这一现象的产生原因:施加的约束改变了端部的应力分布,导致应力集中,这点在跨度较短的构件中表现更为显著,且主要影响局部屈曲。减少有限元解和有限条解之间差异的改进方法是:解除边界横截面的位移约束,允许横截面自由膨胀。

4 缺陷模拟理论

针对 CFS 构件中几何缺陷的分布模式和形状幅值等重要特征,研究者以各国规范和大量的试验数据为基础,结合先进的测量设备和计算软件,对各类缺陷信息进行识别与搜集。在此之后,通过调整各类缺陷的权重比例,或使用数学方法变换分析形式,以寻找规律来还原构件真实的受力情况,在这些过程中形成了建立几何缺陷模型的不同理论。目前主流的初始缺陷模拟理论大致有 3 类:第一类是涉及屈曲模态形状的屈曲模态方法;第二类是二维频谱法;第三类是随机概率法。

4.1 屈曲模态方法

当前涉及屈曲模态形状的模拟方法也可分成 3 种:第一种是一致缺陷模态法,它仅考虑弹性屈曲分析中的最低阶屈曲模态;第二种是传统组合模态法,它考虑多种屈曲模态对应的缺陷组合形成的相互作用;第三种是结合了传统组合模态法和二维频谱法的一维频谱模态法。总的来说,它们的缺陷模型可用 Rasmussen 等^[57]提出的公式来概括,即

$$G_{(x,y,z)} = \sum_{i=1}^n \phi_i \alpha_i c_i \quad (1)$$

式中: $G_{(x,y,z)}$ 为模拟的缺陷场; i 为对应于不同屈曲模态形状的缺陷编号; ϕ_i 为缺陷形状; α_i 为缺陷幅值; c_i 为组合系数。

4.1.1 组成要素

(1) 缺陷形状

Zeinoddini 等^[58-59]研究发现,当缺陷形状与构件的屈曲模态相似时,缺陷对 CFS 构件的影响最大。因此,缺陷形状 ϕ_i 与屈曲模态密切相关,在模拟中通常是屈曲模态的近似或简化。例如,被广泛使用的传统模态模拟法考虑了局部、畸变、绕弱轴受弯、绕强轴受弯和绕纵轴扭转 5 种各自独立的基本屈曲模态对应的缺陷形状(缩写分别为 L、D、 G_1 、 G_2 和 G_3),将它们叠加以模拟缺陷,如图 6 所示^[60]。

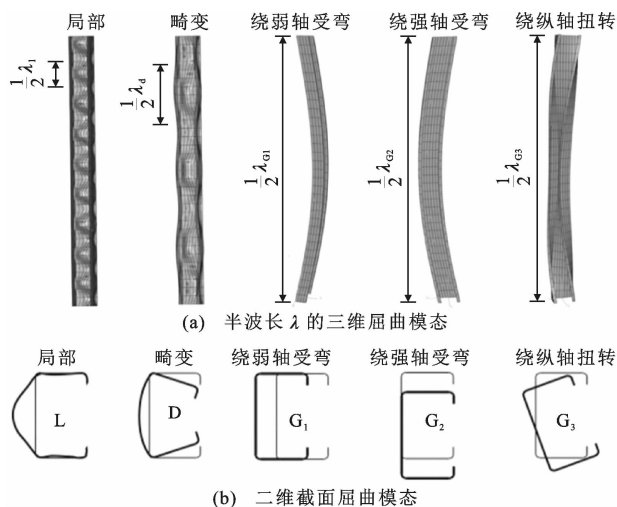


图 6 5 种基本的屈曲模态形状

Fig. 6 Five fundamental buckling mode shapes

前两种缺陷分别将局部屈曲和畸变屈曲的模态形状作为参考,分别被称为局部缺陷和畸变缺陷,其中局部缺陷使各板件相连处的棱线保持为直线,而畸变缺陷则会使那些棱线不再保持为直线;后三种缺陷与整体屈曲模态相关,截面形状并不会发生变化,在理论中通常用三角函数分量描绘它们的形状,与第 1 节规范缺陷中弓形、弯曲和扭转的 3 种整体缺陷可以一一对应起来^[36,59],因此通称为整体缺陷。

此外,还存在其他模态缺陷理论对缺陷形状进行分类。Schafer 等^[12]构建了一种同时具有局部屈曲和畸变屈曲特征的缺陷形状(图 7),并对缺陷进行了分类:将腹板处的缺陷归类为 d_1 类缺陷,是局部缺陷的近似;将翼缘与卷边连接的角部处产生的偏差归类为 d_2 类缺陷,是畸变缺陷的近似。这样的思路虽然在理论上考虑了局部缺陷与畸变缺陷的耦合作用,但缺陷形状与构件屈曲模态之间却没有充分联系起来。

需要注意的是,由于实际中还存在更多种类的缺陷形状(如凹痕),仅拟合上述的缺陷形状并不能与实测情况完全相符,只是一般可以忽略这些误差带来的影响^[36]。

(2) 缺陷幅值

针对特定的缺陷形状 ϕ_i ,缺陷幅值 α_i 能将模拟的缺陷场 $G_{(x,y,z)}$ 与实际缺陷联系起来。随着缺陷幅值的增大,CFS 构件的强度通常有下降的趋势^[61]。选取缺陷幅值的方法可分为数值方法和试验方法。对于数值方法,可在规范中选取最大值作为幅值,例如对于整体缺陷的幅值,按中国规范^[62]取值为构件长度的 $1/1\,000$,按美国规范^[63]取

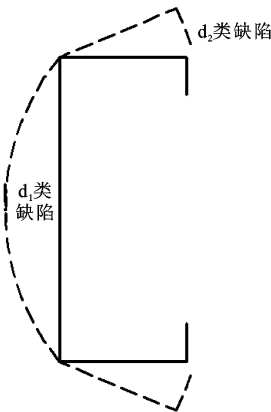


图 7 同时具有局部屈曲和畸变屈曲特征的缺陷形状

Fig. 7 Imperfection shapes with local buckling and distortional buckling characteristics

表 2 几何缺陷实测统计

Table 2 Measured statistics of geometric imperfections

概率 $P(\Delta < d)$	局部	畸变	弓形	弯曲	扭转角/ $[(^{\circ}) \cdot \text{m}^{-1}]$
0.25	$0.17t$	$0.43t$	$L/4\ 755$	$L/6\ 295$	0.20
0.50	$0.31t$	$0.75t$	$L/2\ 909$	$L/4\ 010$	0.30
0.75	$0.54t$	$1.14t$	$L/1\ 659$	$L/2\ 887$	0.49
0.95	$1.02t$	$3.06t$	$L/845$	$L/1\ 472$	0.85
0.99	$3.87t$	$4.46t$	$L/753$	$L/1\ 215$	0.95
平均值	$0.47t$	$1.03t$	$L/2\ 242$	$L/3\ 477$	0.36
标准差	$0.62t$	$0.97t$	$L/3\ 054$	$L/5\ 643$	0.23

注: t 为构件厚度。

对以往研究中实测的几何缺陷数据进行系统汇总,可初步形成数据库^[12,58,68],尽管截面类型简单,缺陷信息不够丰富,但对于缺陷幅值的确定仍有很大帮助,值得进一步补充与完善。总的来说,整体缺陷的幅值通常与构件长度相关联,局部缺陷和畸变缺陷的幅值通常与构件厚度相关联。表 3 对可用于 CFS 构件的缺陷幅值进行了汇总,其中一部分从规范和相关研究中选取,另一部分是研究者自行选取、经过验证能得到符合实际的数据。值得注意的是,缺陷幅值针对特定的测量设备而被记录下来,因此其定义在不同的测量方法中也可能不同^[65]。

(3)组合系数

不同的缺陷形状与对应的缺陷幅值形成乘积后,组合系数 c_i 起着为它们赋予权重,以找到构件理论上最低或最接近于实际的承载能力。

组合系数 c_i 的选取方法比较自由,这里介绍两种,分别为 Dinis 等^[54,79]开发的单位圆平方根法以及 Zeinoddini 等^[64]开发的正方形最大值法。它们都通过使用局部屈曲的组合系数 c_L 和畸变屈曲的组合系数 c_D ,考虑二者间的耦合作用,避免了必须通过有限元法或有限条法获得半波长的过程。采用

值为构件长度的 $1/960$;也可以从经验关系或实测数据中获得,例如 Schafer 等^[12]取 d_2 缺陷的幅值为板件厚度。对于试验方法,要对实测的缺陷数据进行处理后选取数值。Zeinoddini 等^[64]将缺陷最大值视为随机变量,考虑截面缺陷的概率分布情况,并推荐使用不同百分数对应的缺陷值作为幅值进行多次分析,结果见表 2。此外,将数值方法和试验方法结合起来也是一种常用的手段,Farzanian 等^[65]通过构造不同缺陷形状对应的 KDF(Knock Down Factor)曲线,将缺陷幅值与理想构件的承载能力联系起来,并规定缺陷幅值相当于理想构件承载能力的 80%,但 KDF 曲线在此前常用于分析复合材料构件的几何缺陷^[66-67],在 CFS 构件中的使用较少。

两种方法模拟耦合作用时需要选取的关键组合系数点如图 8 所示,其中坐标轴上的点对应于纯粹的局部缺陷或畸变缺陷。单位圆平方根法通过式(2)的方式组合,而正方形最大值法中屈曲模态的组合系数按 $c_i \in \{-1,0,1\}$ 来取值。

$$\sqrt{c_L^2 + c_D^2} = 1$$

(2)

单位圆平方根法中的两种组合系数呈现一种此消彼长的趋势,得到的结果偏于不安全。正方形最大值法可以确保组合后的缺陷幅值绝不小于测量值,因此得到的结果偏于安全^[16];此外,在同时考虑多种缺陷形状对承载力的耦合作用时,采用正方形最大值法便于划分组合系数并对各项模拟结果进行对比^[65]。

基于这些理论,通常根据考虑的屈曲模态种类数量,按式(3)或式(4)取组合系数^[65]。

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2} = 1$$

(3)

$$\max(|c_i|) = 1$$

(4)

4.1.2 一致缺陷模态法

一致缺陷模态法比较简便,是在对构件进行弹性屈曲分析后,将得到的最低阶屈曲模态标准化,并

表 3 推荐的 CFS 构件的缺陷幅值汇总

Table 3 Summary of recommended imperfection magnitudes of CFS members

数据来源	受力性质	截面类型	缺陷类型	缺陷幅值
Pastor 等 ^[9]	受压	欧姆形截面	整体缺陷	$L/1\,000\sim L/500$
			畸变缺陷	$0.5t, 0.64t, b/50$
			局部缺陷	$w/200, 0.006w, 0.34t$
Schafer 等 ^[12]	受压和受弯	C 形截面	d_1 类缺陷	$0.006w, 6te^{-2t}$
			d_2 类缺陷	t
李焦丽 ^[43]	受压	C 形加劲截面	整体缺陷	$L/1\,000$
			畸变缺陷	$0.1t$
			局部缺陷	$0.1t$
AS/NZS 4600:2018 ^[69]	受压	不限	畸变缺陷、局部缺陷	$0.3t\sqrt{\frac{P_y}{P_{cr}}}$
Kaitila ^[70]	受压	C 形截面	整体缺陷	$L/500$
			局部缺陷	$w/200$
Gardner 等 ^[71]	受压和受弯	方形空心 and 圆形空心截面	整体缺陷	$L/2\,000$
			局部缺陷	$0.2t$
Ashraf 等 ^[72]	受压	L 形和 I 形截面	局部缺陷	$0.023t\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{cr}}$
Bonada 等 ^[73]	受压	欧姆形截面	整体缺陷	$L/1\,000$
			畸变缺陷	$b/50$
			局部缺陷	$w/200$
赵阳等 ^[74-75]	受压	闭口拼合截面	局部缺陷	$0.31t$
Walport 等 ^[76]	受压	C 形截面	弓形缺陷	$aL/150$
熊钰豪 ^[77]	压弯	方形空心截面	整体缺陷	$L/1\,000$
			局部缺陷	$c/200$
Xu 等 ^[78]	受压和受弯	圆形空心截面	局部缺陷	$\max(0.01D, 0.5\text{ mm})$

注： w 为腹板宽度； P_y 为屈服荷载； P_{cr} 为临界屈曲荷载； $\sigma_{0.2}$ 为条件屈服应力； σ_{cr} 为临界屈曲应力； b 为翼缘宽度； a 为EN1993-1-1和EN1993-1-4规定的缺陷系数； c 为截面有效宽度和有效高度间的较大值； D 为圆形截面直径。

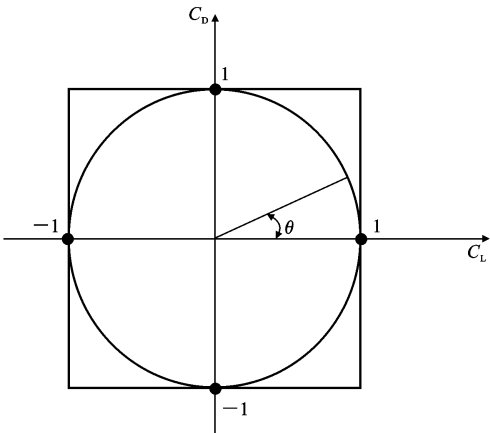


图 8 单位圆平方根法和正方形最大值法的组合系数

Fig. 8 Combination coefficients of circle-SRSS and square-max approaches

赋予其一定的幅值以模拟几何缺陷的最不利分布情况。与更高阶的屈曲模态相比，一阶屈曲模态体现了构件最敏感的缺陷分布模式以及发生屈曲破坏模态的倾向^[80]，且使用一阶屈曲模态得到的屈曲荷载

是最低的，因此这种方法对构件的承载力预测结果通常偏于安全。但顾明剑等^[81]认为这种方法的实际依据不足，无法确定各阶屈曲模态发生的概率，因此无法与结构的可靠度设计联系起来。总的来说，一致缺陷模态法存在的缺点是考虑过于简单，可能无法得到与实际相符的结果，但这种方法操作简便，可应用于研究重点不在几何缺陷方面的 CFS 构件。

4.1.3 传统组合模态法

传统组合模态法基于实测缺陷数据，考虑对应于不同屈曲模态形状的多种几何缺陷，调整它们的相互作用，通过式(5)对几何缺陷进行分析模拟。

$$G_{(x,y,z)} = \sum_{i=1}^5 \phi_{i,(x,y,z)} \alpha_i \tag{5}$$

式中： $\phi_{i,(x,y,z)}$ 为缺陷形状系数，取自于有限元法或有限条法得到的 5 种具有最低特征值的屈曲模态形状，分别对应于模态缺陷的三维变形场。

这种方法假设各类缺陷只与构件纵向的单个正弦分量相关，但在缺陷形状的选用上，研究者有过不

同的尝试:除了 3 种整体屈曲模态对应的缺陷形状, Zeinoddini 等^[64]在研究时还选用了局部缺陷和畸变缺陷,但 Zhao^[36]则用 d_1 类和 d_2 类缺陷作为代替。此外,按这种方法得到的整体屈曲模态形状可能是受弯和受扭两种基本屈曲模态形状的组合,对于整体缺陷的模拟有一定影响,而长细比较大的中长柱和长柱破坏时涉及整体屈曲,因此这种方法对于中柱和长柱的预测结果偏于安全^[82]。

4.1.4 一维频谱模态法

一维频谱模态法结合了传统组合模态法和二维频谱法(第 4.2 节)。不同于传统组合模态法,在预先计算屈曲模态形状后,它就能将几何缺陷分解为 5 种基本屈曲模态,具体可通过式(6)对几何缺陷进行分析模拟。

$$G_{(x,y,z)} = \sum_{i=1}^5 \phi_{i,(x,y)} \alpha_{i,(z)} \quad (6)$$

式中: $\phi_{i,(x,y)}$ 为缺陷形状,对应于图 6(b)中 5 种基本屈曲模态形状的截面变形场,可通过有限条法得到; $\alpha_{i,(z)}$ 为缺陷幅值函数,随构件长度方向的位置 z 而变化。

为了获取 5 种基本屈曲模态对应的缺陷幅值函数 $\alpha_{i,(z)}$,需要沿构件的长度方向离散截面,并测得在各个截面处(即位置 z 处)的缺陷形状 $\phi_{i,(x,y)}$ 和缺陷场 f_0 ,通过线性组合令 $[\sum \alpha'_{i,(z)} \phi_{i,(x,y)} - f_0]^2$ 最小化,计算出 5 种基本屈曲模态在各截面处的缺陷幅值 $\alpha'_{i,(z)}$ 。将沿构件长度分布的缺陷幅值 $\alpha'_{i,(z)}$ 视为时域信号,通过离散傅里叶变换将它们转换到频域内并以振幅频谱的形式表现出来,可得到对应于频率 ω_n 的振幅 A_n 。目前在缺陷幅值的频域分析中,频率 ω_n 有两种选定方法。第一种方法使周期长度保持不变,如式(7)所示^[64]。

$$\omega_n = \frac{2n\pi}{L} \quad (7)$$

第二种方法使频率 ω_n 等同于各阶屈曲模态半波长的倒数 $1/\lambda$ ^[82]:对于整体缺陷,半波长 λ 等于 L ;对于局部缺陷和畸变缺陷,半波长 λ 要通过有限元法或有限条法计算得到。此后设置在 $[0, 2\pi]$ 间分布的随机相位角 ϕ_n ,就能通过叠加多个正弦或余弦分量,由式(8)或式(9)计算得到 5 种基本屈曲模态的缺陷幅值函数 $\alpha_{i,(z)}$ 。

$$\alpha_{i,(z)} = \sum_{n=1}^N [A_n \sin(\omega_n z + \phi_n)] \quad (8)$$

$$\alpha_{i,(z)} = \sum_{n=1}^N [A_n \cos(\omega_n z + \phi_n)] \quad (9)$$

研究者们采用傅里叶变换的方式,分别对具有

C 形、Z 形、开口拼合形和欧姆形截面的冷弯型钢构件进行了缺陷幅值分析^[7,36,82-83],发现除开口拼合形构件外,其余截面形式构件存在共有规律。图 9 记录了 8 根长度为 600 mm 的 N90 冷弯欧姆柱的 G_1 缺陷幅值。在时域分析中,将时间轴替换为构件长度,几何缺陷通常不会表现出明显规律,如图 9(a)所示。在频域分析中,振幅频谱的频率按式(7)选定,振幅频谱中连续的波峰表明几何缺陷的分布存在一定的周期性,如图 9(b)所示。这种周期性的具体表现为:缺陷幅值的主要频率分量分布在低频段,随着频率的增大,总体呈现逐渐衰减的趋势;随着频率的增大,缺陷幅值的变化幅度逐渐下降,直到稳定在某一小范围内波动。

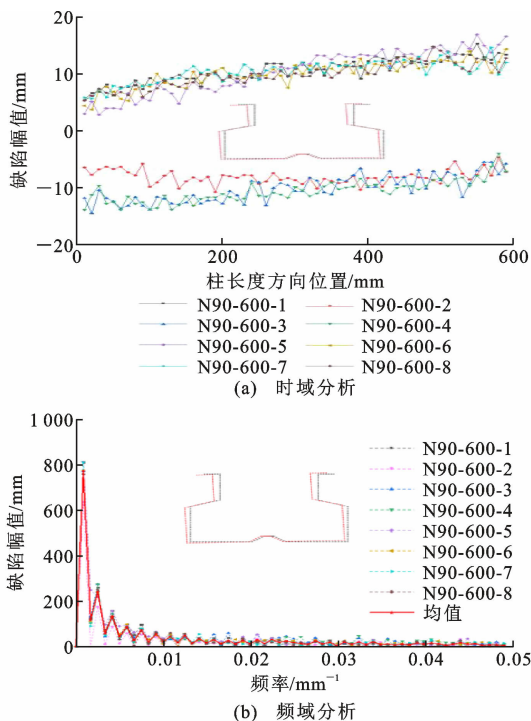


图 9 傅里叶变换前后的缺陷幅值表现形式

Fig. 9 Representation of imperfection magnitudes before and after Fourier transformations

总的来说,一维频谱模态法同时考虑了缺陷形状和缺陷幅值的随机性,能够较好地对构件的力学性能进行模拟与预测。

4.2 二维频谱法

二维频谱法将腹板、翼缘等板件在一个平面上“展开”,并在其上施加二维缺陷场,如图 10 所示^[64]。在形成二维频谱后,再将平面还原,将得到的二维场坐标分配给初始的三维场坐标,这是一种较为复杂的理论。

Zeinoddini 等^[64]分别使用一维频谱模态法和二

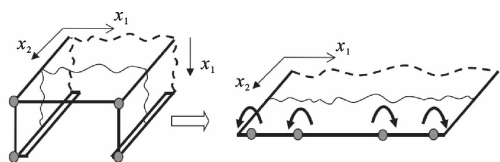


图 10 二维缺陷场转换

Fig. 10 Transformation of 2D imperfection field

维频谱法进行几何缺陷模拟,并与缺陷实测值进行对比,结果见图 11,其中纵轴为理论模拟的缺陷统计值 δ_{stat} 与缺陷实测值 δ_{meas} 的比值, \bar{M} 为比值的均值, $M_{\text{st, dev}}$ 为标准差。可以发现:一维频谱模态法的预测结果比较接近实际情况;二维频谱法由于在展开和还原的过程会产生误差,不能较为准确地模拟畸变缺陷和整体缺陷,存在一定的局限性。

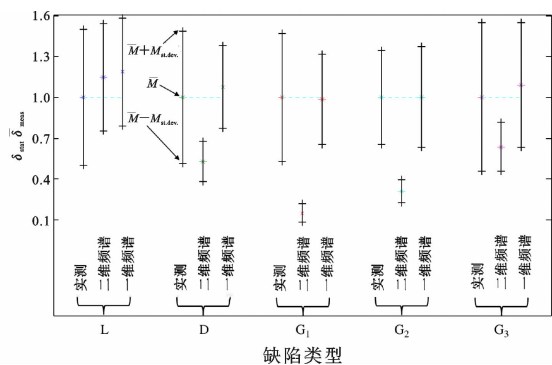


图 11 几何缺陷的模拟统计值与实测值对比

Fig. 11 Comparison between simulated statistical values and measured values of geometric imperfections

4.3 随机概率法

随机概率法通过随机模拟缺陷形状或缺陷幅值的方式表征未知的缺陷,近年来的创新方向为搭建机器学习框架,这需要大量的实测数据用以训练模型,才能得到接近实际的缺陷模拟结果。Farzanian 等^[25]研究发现,在使用常规的模拟理论对 CFS 构件进行非线性分析后,得到的构件极限强度或承载力的离散程度较高,因此基于实测几何缺陷数据进行机器学习训练,开发了一个能够生成随机场的几何缺陷概率模型。与许多建模方法不同的是,随机场内数据的概率分布并未被假定为任何特定形式,而是与实测数据相匹配,但部分模型的可靠性还有待验证。Zhao 等^[30]根据设计好的特征识别算法,对 112 个 C 形 CFS 构件的激光测量点云数据进行参数化处理,并使用多维高斯过程来表征沿纵向联合分布的局部几何参数和全局几何参数,将这些几何参数汇总成集,可作为基础数据,用来进行机器学

习中最大似然估计的训练,最终可重构包含几何缺陷信息的 CFS 构件模型。对 48 个样本的验证结果表明,这种靠机器学习建立的高斯模型适用于大多数 C 形构件的几何缺陷表征。

在缺乏足够的缺陷信息时,通常会简化或假定几何缺陷的随机可变性来模拟最不利情况,以获得偏于安全的缺陷模拟结果。Lauterbach 等^[84]通过谱分解法分析了非常有限的缺陷数据,假设几何缺陷的随机可变性满足高斯分布以进行简化处理,凭此构建出几何缺陷随机场。

此外,还有一些其他的几何缺陷模拟理论,例如将虚拟的名义荷载视为横向荷载的虚拟荷载法。Chou 等^[85]使用垂直于构件表面的横向载荷模拟局部几何缺陷,而 AISI 规范^[86]根据不同的设计方法规定了对应的虚拟荷载计算公式,并指出可利用虚拟荷载考虑初始缺陷。

5 结 语

(1)根据各国相关规范对于 CFS 构件制造尺寸的控制,将构件几何缺陷进行分类。从各国规范的对比中可以发现,美国规范的分类最为细致,而中国规范对整体缺陷的分类不够细致,同时缺乏畸变缺陷的相关规定,需要在未来进一步完善。

(2)几何缺陷可分为接触式测量法和非接触式测量法,两类缺陷测量方法在成本、操作难度、测量效率、数据后处理和测量精度方面都有各自的优缺点。接触式测量法对设备的要求低,操作和数据后处理简单,但在测量时效率较低,且数据精度不足。相较于接触式测量法,非接触式测量法具有精度和测量效率高的优势,得到了快速发展。然而由于对设备与环境的要求很高,非接触式测量法的运行成本很高,难以大范围推广。此外,点云数据过于庞杂,只有在处理冗余的异常数据后,才能定位构件表面的坐标,准确描绘构件轮廓,并与理想形状作对比。在未来,应简化非接触式测量法的设备布置以降低成本;为提高分析结果的精确度与效率,应针对不同的测量设备去开发合适的点云数据算法。

(3)各类数值模拟方法能以较小的资金成本和时间成本代替部分试验,其中有限元法和有限条法最为主流。有限元法精度高,但建模复杂、计算效率低;有限条法操作便捷、计算效率高,但无法准确模拟具有复杂截面的构件和包含螺钉等连接件的组合截面构件。为了更精确地预测构件的受力性能,应针对几何缺陷改进模拟方法并开发相关软件,它们

的可靠性需要经过实测数据的验证。已有研究统计了冷弯型钢构件各类几何缺陷的测量值,使研究者可针对特定构件查询相关的几何缺陷信息。为构建完整的几何缺陷数据库,在未来要对更多截面类型的构件进行实测,丰富包括半波长在内的各项几何缺陷信息。

(4)得益于计算机的发展,研究者在提出与验证各种缺陷模拟理论时,分解提取缺陷形状和变换频域等复杂要求已能够被满足。常规的缺陷模拟理论涉及屈曲模态,其中一致缺陷模态法最为简便,但理论依据不足且预测结果不准确,在研究重点不在几何缺陷方面的冷弯型钢构件中有大量应用;传统组合模态法考虑多种屈曲模态,但对整体缺陷的模拟不够准确,对于中长柱和长柱的预测结果趋于安全;一维频谱模态法将几何缺陷由时域变换至频域,缺陷幅值表现出一定的周期性,预测结果较为准确,应用前景广。而二维频谱法理论复杂,对畸变缺陷和整体缺陷的模拟不够准确,存在一定的局限性。此外,根据几何缺陷实测数据开发机器学习框架为相关模拟提供了一种新途径,通过大量实测数据的训练,能形成充分考虑几何缺陷随机性的模型。目前,在开发适用于C形构件的模型方面已取得一定进展;在未来,开发完成的机器学习框架应能针对CFS构件的不同类型,智能地调整分析历程,但要实现这样的前景,需要统计极大数量的缺陷数据并将它们用于模型的训练。

参考文献:

References:

- [1] 李海汀,战科江,王 森,等.冷弯型钢构件腹板压皱研究进展与趋势[J].建筑钢结构进展,2023,25(5): 1-12,52.
LI Haiting, ZHAN Kejiang, WANG Miao, et al. Research progress and trends of cold-formed steel structural members undergoing web crippling[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(5): 1-12, 52.
- [2] ZHAO X, TOOTKABONI M, SCHAFFER B W. Development of a laser-based geometric imperfection measurement platform with application to cold-formed steel construction [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(9): 1779-1790.
- [3] TORABIAN S, AMOUZEGAR H, TOOTKABONI M, et al. Finite element modeling protocols and parametric analyses for short cold-formed steel zee-section beam-columns[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2016. Orlando; SSRC, 2016: 305-316.
- [4] FARZANIAN S, LOUHGHALAM A, SCHAFFER B W, et al. Geometric imperfections in shell finite element models of CFS members-a review of current state of practice[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2018. Baltimore; SSRC, 2018: 1-8.
- [5] AMOUZEGAR H, SCHAFFER B W, TOOTKABONI M. An incremental numerical method for calculation of residual stresses and strains in cold-formed steel members[J]. Thin-walled Structures, 2016, 106: 61-74.
- [6] XIA Y, BLUM H. Geometric imperfection measurements of cold-formed steel members using a portable non-contact 3D laser scanner[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2020. Atlanta; SSRC, 2020: 255-269.
- [7] SCHAFFER B W, LI Z, MOEN C D. Computational modeling of cold-formed steel[J]. Thin-walled Structures, 2010, 48(10/11): 752-762.
- [8] MOEN C D, SCHAFFER B W. Experiments on cold-formed steel columns with holes [J]. Thin-walled Structures, 2008, 46(10): 1164-1182.
- [9] PASTOR M M, CASAFONT M, BONADA J, et al. Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights[J]. Thin-walled Structures, 2014, 76: 28-41.
- [10] LI Z J. Stochastically simulated mode interactions of thin-walled cold-formed steel members using modal identification [J]. Thin-walled Structures, 2018, 128: 171-183.
- [11] KUBIAK T, URBANIAK M, ZUCCO G, et al. Imperfection sensitivity analysis of the nonlinear stability of composite beams — numerical and experimental investigations [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94: 360-369.
- [12] SCHAFFER B W, PEKOZ T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(3): 193-210.
- [13] Standard specification for load-bearing (transverse and axial) steel studs, runners (tracks), and bracing or bridging for screw application of gypsum panel products and metal plaster bases; ASTM C955-15 [S]. West Conshohocken; ASTM, 2015.
- [14] North american standard for cold-formed steel non-structural framing; AISI S220-20 [S]. Washington

- DC: American Iron and Steel Institute, 2020.
- [15] North American standard for cold-formed steel structural framing: AISI S240-15[S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2020.
- [16] SELVARAJ S, MADHAVAN M. Geometric imperfection measurements and validations on cold-formed steel channels using 3D noncontact laser scanner[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(3): 04018010.
- [17] 冷弯型钢结构技术标准: GB/T 50018—2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- Standard for Techniques of Cold-formed Steel Structures: GB/T 50018—2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [18] 通用冷弯开口型钢: GB/T 6723—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Cold forming open section steel for general structure: GB/T 6723—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 建筑结构用冷弯薄壁型钢: JG/T 380—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Cold-formed thin-wall steel sections for building structures: JG/T 380—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [20] Execution of steel structures and aluminium structures. Part 4: technical requirements for cold-formed structural steel elements and cold-formed structures for roof, ceiling, floor and wall applications: BS EN 1090-4[S]. London: BSI, 2018.
- [21] ZHOU X H, XIANG Y, SHI Y, et al. Simplified design method of cold-formed steel columns with built-up box sections[J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111532.
- [22] YOUNG B, CHEN J. Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(5): 727-737.
- [23] MENG X, GARDNER L. Cross-sectional behaviour of cold-formed high strength steel circular hollow sections[J]. *Thin-walled Structures*, 2020, 156: 106822.
- [24] MA J L, CHAN T M, YOUNG B. Cold-formed high strength steel tubular beam-columns[J]. *Engineering Structures*, 2021, 230: 111618.
- [25] FARZANIAN S, LOUHGHALAM A, SCHAFFER B W, et al. Geometric imperfections in CFS structural members, part II: data-driven modeling and probabilistic validation[J]. *Thin-walled Structures*, 2023, 185: 110620.
- [26] SINGER J, ARBOCZ J, WELLER T. Buckling experiments: experimental methods in buckling of thin-walled structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [27] BERNARD E S, COLEMAN R, BRIDGE R Q. Measurement and assessment of geometric imperfections in thin-walled panels[J]. *Thin-walled Structures*, 1999, 33(2): 103-126.
- [28] BERRY P A, BRIDGE R Q, ROTTER J M. Imperfection measurement of cylinders using automated scanning with a laser displacement meter[J]. *Strain*, 1996, 32(1): 3-8.
- [29] ZHAO X, TOOTKABONI M, SCHAFFER B W. Laser-based cross-section measurement of cold-formed steel members: model reconstruction and application[J]. *Thin-walled Structures*, 2017, 120: 70-80.
- [30] ZHAO X, WANG G A, SUN X Y, et al. Modeling of uncertain geometry of cold formed steel members based on laser measurements and machine learning[J]. *Engineering Structures*, 2023, 279: 115578.
- [31] 肖川, 魏金满, 杨兴盛, 等. 三维激光测量技术在钢结构制作中的应用研究[J]. *钢结构*, 2017, 32(12): 86-88.
- XIAO Chuan, WEI Jinman, YANG Xingsheng, et al. Application of 3D laser scanner technology application in steel structure manufacturing[J]. *Steel Construction*, 2017, 32(12): 86-88.
- [32] FENG P, ZOU Y C, HU L L, et al. Use of 3D laser scanning on evaluating reduction of initial geometric imperfection of steel column with pre-stressed CFRP[J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109527.
- [33] SALOMON A L, FRATAMICO D, SCHAFFER B W, et al. Full field cold formed steel column buckling measurements with high resolution image-based reconstruction[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2016. Orlando: SSRC, 2016: 104-119.
- [34] MCANALLEN L, PADILLA-LLANO D, ZHAO X, et al. Initial geometric imperfection measurement and characterization of cold-formed steel C-section structural members with 3D non-contact measurement techniques[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2014. Toronto: SSRC, 2014: 566-590.
- [35] SALOMON A L, TAO F N, CAI J L, et al. Buckling mode identification for a cold-formed steel column experiment with 3D image-based reconstruction[C]//

- SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2015. Nashville: SSRC, 2015; 105-114.
- [36] ZHAO X. Measurement and application of geometric imperfections in cold-formed steel members[D]. Baltimore: Johns Hopkins University, 2016.
- [37] TRAN A T, VELJKOVIC M, REBELO C, et al. Resistance of cold-formed high strength steel circular and polygonal sections. Part 1: experimental investigations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 245-257.
- [38] XU D D, WANG Y Q, LIU X L, et al. A novel method and modelling technique for determining the initial geometric imperfection of steel members using 3D scanning[J]. Structures, 2023, 49: 855-874.
- [39] ZHANG Z Q, SHI G, HOU L T, et al. Geometric dimension and imperfection measurements of box-T section columns using 3D scanning[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 183: 106742.
- [40] BORKOWSKI L, GRUDZIECKI J, KOTELKO M, et al. Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part II: experimental study [J]. Thin-walled Structures, 2022, 171: 108802.
- [41] 邹奕翀,胡黎俐,冯 鹏,等.采用三维激光扫描精准获得钢构件初始几何缺陷的方法[J].工业建筑, 2021,51(5):22-29.
- ZOU Yichong, HU Lili, FENG Peng, et al. Precise measurement method of initial geometric imperfections of steel structural members using three-dimensional laser scanning [J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 22-29.
- [42] 姚永红,武振宇.畸变缺陷对冷弯薄壁型钢柱力学性能的影响[J].深圳大学学报(理工版),2012,29(5): 48-53.
- YAO Yonghong, WU Zhenyu. Effects of distortional imperfections on mechanical properties of cold-formed thin-walled steel columns[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, 29(5): 48-53.
- [43] 李焦丽.发生局部畸变耦合屈曲破坏的冷弯薄壁型钢柱的缺陷敏感性研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- LI Jiaoli. Study on defect sensitivity of cold-formed thin-walled steel columns with local-distortion coupled buckling failure[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [44] 李 东.冷弯薄壁U型钢轴压构件承载力设计的直接强度法研究[D].西安:长安大学,2019.
- LI Dong. Study on bearing capacity design of cold-formed thin-walled U-shaped steel members under axial compression by direct strength method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [45] LIU S W, GAO W L, ZIEMIAN R D. Improved line-element formulations for the stability analysis of arbitrarily-shaped open-section beam-columns [J]. Thin-walled Structures, 2019, 144: 106290.
- [46] LI Z J. Finite strip modeling of thin-walled members [D]. Baltimore: Johns Hopkins University, 2011.
- [47] 赵 曦,孙晓燕,李占杰,等.冷弯型钢受压构件几何缺陷研究综述[J].建筑钢结构进展,2023,25(4):1-17.
- ZHAO Xi, SUN Xiaoyan, LI Zhanjie, et al. A state of the art review on geometric imperfection research of cold-formed steel members under compression[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(4): 1-17.
- [48] PUCKETT J A, GUTKOWSKI R M. Compound strip method for analysis of plate systems[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(1): 121-138.
- [49] LI Z J, SCHAFER B. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM conventional and constrained finite strip methods[C]//Missouri University of Science and Technology. 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Rolla: Missouri University of Science and Technology, 2010: 16-31.
- [50] LI Z, JOO A L, ADANY S, et al. Approximate modal identification in nonlinear collapse analysis of thin-walled members[C]//SSRC. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2011. Chicago: SSRC, 2011: 168-179.
- [51] LI Z, ADANY S, SCHAFER B W. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis [J]. Thin-walled Structures, 2013, 67: 15-24.
- [52] JIN S, LI Z J, TANG Q, et al. A combined force/displacement-based constrained finite strip method for modal stability analysis of thin-walled members[J]. Thin-walled Structures, 2021, 159: 107322.
- [53] MESACASA E, DINIS P B, CAMOTIM D, et al. Mode interaction in thin-walled equal-leg angle columns[J]. Thin-walled Structures, 2014, 81: 138-149.
- [54] DINIS B P, CAMOTIM D, SILVESTRE N. FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode in-

- teraction in cold-formed steel lipped channel columns [J]. *Computers & Structures*, 2007, 85 (19/20): 1461-1474.
- [55] ABBASI M, KHEZRI M, RASMUSSEN K J R, et al. Elastic buckling analysis of cold-formed steel built-up sections with discrete fasteners using the compound strip method[J]. *Thin-walled Structures*, 2018, 124: 58-71.
- [56] LI Z. Buckling analysis of the finite strip method and theoretical extension of the constrained finite strip method for general boundary conditions[D]. Baltimore: Johns Hopkins University, 2009.
- [57] RASMUSSEN K J R, HANCOCK G J. Geometric imperfections in plated structures subject to interaction between buckling modes[J]. *Thin-walled Structures*, 1988, 6(6): 433-452.
- [58] ZEINODDINI V. *Geometric Imperfections in Cold-formed Steel Members*[D]. Baltimore: Johns Hopkins University, 2011.
- [59] ZEINODDINI V, SCHAFER B W. Global imperfections and dimensional variations in cold-formed steel members[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, 11(5): 829-854.
- [60] AKTEPE R, GULDUR ERKAL B. State-of-the-art review on measurement techniques and numerical modeling of geometric imperfections in cold-formed steel members[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 207: 107942.
- [61] UNGUREANU V, DUBINA D. Erosion effect of geometrical and material imperfections on the buckling strength of thin-walled cold-formed steel members[C]//SHE Z Y, LI G Q, CHAN S L. *Advances in Steel Structures*. Amsterdam:Elsevier, 2005: 497-504.
- [62] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [63] Standard specification for general requirements for rolled structural steel bars, plates, shapes, and sheet piling: ASTM A6/A6M[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- [64] ZEINODDINI V M, SCHAFER B W. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach [J]. *Thin-walled Structures*, 2012, 60: 105-117.
- [65] FARZANIAN S, LOUHGHALAM A, SCHAFER B W, et al. Geometric imperfections in CFS structural members: part I : a review of the basics and some modeling strategies[J]. *Thin-walled Structures*, 2023, 186:110619.
- [66] CASTRO S G P, ZIMMERMANN R, ARBELO M A, et al. Exploring the constancy of the global buckling load after a critical geometric imperfection level in thin-walled cylindrical shells for less conservative knock-down factors [J]. *Thin-walled Structures*, 2013, 72: 76-87.
- [67] CASTRO S G P, ZIMMERMANN R, ARBELO M A, et al. Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells [J]. *Thin-walled Structures*, 2014, 74: 118-132.
- [68] PETERMAN K D, SCHAFER B W. Experiments on the stability of sheathed cold formed steel studs under axial load and bending[D]. Baltimore: Johns Hopkins University, 2012.
- [69] Cold-formed steel structures: AS/NZS 4600: 2018 [S]. Wellington: SNZ, 2018.
- [70] KAITILA O. Imperfection sensitivity analysis of lipped channel columns at high temperatures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(3): 333-351.
- [71] GARDNER L, NETHERCOT D A. Numerical modeling of stainless steel structural components-a consistent approach[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(10): 1586-1601.
- [72] ASHRAF M, GARDNER L, NETHERCOT D A. Finite element modelling of structural stainless steel cross-sections [J]. *Thin-walled Structures*, 2006, 44(10): 1048-1062.
- [73] BONADA J, CASAFONT M, ROURE F, et al. Selection of the initial geometrical imperfection in non-linear FE analysis of cold-formed steel rack columns [J]. *Thin-walled Structures*, 2012, 51: 99-111.
- [74] 赵 阳. 冷弯薄壁型钢双肢拼合箱形截面短柱局部屈曲性能研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- ZHAO Yang. Research on behavior of cold-formed steel built-up box section short columns failed in local buckling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [75] 丁嘉豪. 冷弯薄壁型钢双肢闭合箱形截面短柱基于“承载力单元”的叠加法研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- DING Jiahao. Research on “bearing capacity unit” superposition method of cold-formed double-limb

- closed-section built-up short columns [D]. Xi'an; Chang'an University, 2021.
- [76] WALPORT F, GARDNER L, NETHERCOT D A. Equivalent bow imperfections for use in design by second order inelastic analysis[J]. Structures, 2020, 26: 670-685.
- [77] 熊钰豪. 冷弯方、矩形钢管压弯构件设计方法的研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- XIONG Yuhao. Study on design method of cold-formed square and rectangular steel tube members [D]. Xi'an; Chang'an University, 2021.
- [78] XU Y, WU B C, ZHENG B F. Full-field geometric imperfection and effect on cross-section capacity of circular steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 201: 107749.
- [79] DINIS B P, CAMOTIM D. Local/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams [J]. Thin-walled Structures, 2010, 48(10/11): 771-785.
- [80] 陈美合. 多种屈曲模态下卷边 C 形截面不锈钢柱计算理论研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- CHEN Meihe. Theoretical study on calculation of rolled C-section stainless steel columns under various buckling modes[D]. Nanjing; Southeast University, 2021.
- [81] 顾明剑,张其林. 引入一阶屈曲模态作为初始缺陷的研究[C]//天津大学. 第五届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京:《工业建筑》杂志社,2005:1209-1213.
- GU Mingjian,ZHANG Qilin. Research on introducing first-order buckling mode as initial imperfection[C]// Tianjin University. Proceedings of the 5th National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing; Industrial Construction Magazine Agency, 2005: 1209-1213.
- [82] 孙晓燕. 冷弯 C 型钢构件的随机几何缺陷模拟方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023.
- SUN Xiaoyan. Study on simulation method of random geometric defects of cold-formed C-shaped steel members[D]. Beijing; Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [83] 于晓平. 基于 3D-DIC 的冷成型钢欧姆柱初始几何缺陷模型研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- YU Xiaoping. Study on initial geometric defect model of cold-formed steel ohm column based on 3D-DIC [D]. Nanjing; Southeast University,2021.
- [84] LAUTERBACH S, FINA M, WAGNER W. Influence of stochastic geometric imperfections on the load-carrying behaviour of thin-walled structures using constrained random fields [J]. Computational Mechanics, 2018, 62(5): 1107-1125.
- [85] CHOU S, CHAI G. Ultimate design load of thin-walled stub columns [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 1997, 10(1/2): 27-33.
- [86] North American specification for the design of cold-formed steel structural members; AISI S100-16 (2020) w/S2-20[S]. Washington DC; AISI, 2020.