

文章编号:1673-2049(2016)05-0120-07

负载下焊接加固钢结构压弯构件 受力性能的影响因素分析

蒋立¹,王元清^{2,3},戴国欣⁴,张天申^{2,3},石永久^{2,3}

(1. 重庆市设计院,重庆 400015; 2. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084;
3. 清华大学 土木工程系,北京 100084; 4. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400044)

摘要:为研究负载下焊接加固钢结构压弯构件的受力性能,采用考虑焊接热影响的有限元分析方法,对不同初始负载、偏心距、长细比及焊接热输入等级等影响因素进行分析。完成了包括未加固压弯钢柱及加固压弯钢柱共72个构件的受力全过程模拟分析,获得了各因素影响规律,并验证了考虑二阶效应的新的名义应力比计算公式。结果表明:未加固构件的初始负载水平可通过二阶式反映;初始几何缺陷模式及大小影响失稳破坏方向及焊接残余变形大小;影响加固构件极限承载力的主要因素依次为偏心距、长细比、焊接热输入、初始应力比;影响焊接残余变形的主要因素依次为焊接热输入、初始应力比、长细比;为新编《钢结构加固设计规范》关于负载下焊接加固压弯构件设计计算方法提供了参考和依据。

关键词:钢结构;加固;负载焊接;压弯构件;受力性能;影响因素

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Influence Factor Analysis of Mechanical Behavior of Compression-bending Member of Steel Structure Strengthened by Welding Under Load

JIANG Li¹, WANG Yuan-qing^{2,3}, DAI Guo-xin⁴, ZHANG Tian-shen^{2,3}, SHI Yong-jiu^{2,3}

(1. Chongqing Architectural Design Institute of China, Chongqing 400015, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical behavior of compression-bending member of steel structure strengthened by welding under load, the finite element analysis method considering welding heat effect was used to analyze the influence factors, such as initial load, eccentric distance, slenderness ratio, class of weld heat input. The whole loading process simulation analyses of 72 members of unstrengthened and strengthened bending steel columns were carried out, and the influence rules of the factors were acquired. The new second-order design formula of nominal stress was verified as well. The results show that initial load level can be evaluated by the second-order formula. The mode and amount of initial geometrical imperfections effect the direction of buckling and magnitude of residual deformation. Besides, the factor order of influencing on the ultimate capacity of strengthened specimen is eccentricity, slenderness ratio,

收稿日期:2016-01-11

基金项目:《钢结构加固设计规范》国家标准管理组科研专项课题(2013-01)

作者简介:蒋立(1989-),男,重庆大足人,工学硕士,E-mail:johnlee@cqu.edu.cn.

welding heat input and initial stress. While concerning the welding residual deformation, the factor order turn out to be welding heat input, initial stress and slenderness ratio. The conclusion can provide reference and basis to establish the design calculation method of compression-bending member strengthened by welding under load in *Code for Design of Strengthening Steel Structure*.

Key words: steel structure; strengthening; welding under load; compression-bending member; mechanical behavior; influence factor

0 引 言

随着中国进行产业结构调整以适应未来二次现代化的内在要求,淘汰落后产能、推进技术改造已成为工业界目前发展生产力的重点,因而对已有钢结构在加固技术方面提出了更高要求。作为钢结构加固方法中最传统和最重要的手段,负载下焊接加固技术以其良好的经济性、可行性和耐久性已在各类结构加固工程中得到广泛应用。然而,负载下焊接加固技术的初始条件和过程控制的影响综合复杂,尚未得到系统的研究和结论,且此前相关研究几乎全部集中于受弯构件^[1-2]和轴压构件^[3-6],尚缺乏对压弯构件的相关讨论。

研究表明^[7],加固方式、屈曲方向、长细比、初始几何缺陷、初始负载(初始应力比)、加固构件尺寸和强度等都可能影响钢结构负载下焊接加固轴压构件和受弯构件加固过程的受力性能及加固后的承载力,而负载下焊接加固压弯构件受力性能的影响因素可能更多且更复杂^[8]。

基于所完成的负载下焊接加固压弯构件试验^[9]及其数值模型验证,采用考虑焊接热影响的无摩擦有限元分析方法具备一定可行性和总体安全性,本文考虑扩大规模进行影响因素分析,为规范修订提供参考和依据。

1 有限元参数化和模型建立

1.1 参数化目标

为研究不同因素对负载下焊接加固压弯构件的焊接残余变形和极限承载力的影响,本文采用如图 1 所示的工字形截面翼缘外对称贴焊钢板加固钢柱,钢柱置于柱底固接、柱顶面内自由且面外无平动的约束条件下,选取不同初始最大应力比、偏心距、长细比及焊接热输入等级(表 1)等目标参数分别进行计算,其中,绕强轴方向为面内,绕弱轴方向为面外。

不同偏心距和长细比的试件其相同初始应力比

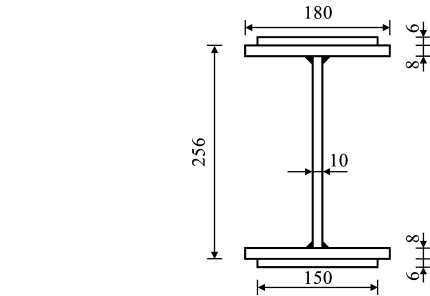


图 1 加固压弯钢柱截面(单位:mm)

Fig. 1 Section of Strengthened Compression-bending Steel Column (Unit:mm)

表 1 目标参数取值

Tab. 1 Values of Object Parameters

目标参数		目标参数值
初始最大应力比		0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
偏心距/mm		50, 100, 150
长细比 (加固后面外)		40, 60, 80, 100
焊接热输入 等级	O 级	无焊接热输入
	A 级	电 流 25 A, 电 压 110 V, 焊 接 速 度 7 mm · s ⁻¹ , 焊接间隙 2 min
	B 级	电 流 25 A, 电 压 220 V, 焊 接 速 度 3.5 mm · s ⁻¹ , 焊接间隙 2 min

对应的初始负载 P_0 不同;面内、面外长细比通过有限元分析的相应特征值屈曲荷载由欧拉公式(1)反算的面内、面外计算长度系数进一步计算;A 级与 B 级焊接热输入等级分别取相关文献有关加固焊接的规定和试验^[9-11]中的较小值与较大值。焊接的模拟采用简化的串热源模型,控制生热速率和焊接时间输入,焊接顺序为先焊接受压远侧,再焊接受压近侧,由固定端向另一端分区段进行,焊接完受压远侧后冷却 1 h 再焊接受压近侧,全部焊接完后再冷却 1 h。

$$\mu=\sqrt{\frac{\pi EI}{P_{cr}l^2}} \tag{1}$$

式中: μ 为构件计算长度系数; E 为构件弹性模量; I 为截面惯性矩; l 为构件长度; P_{cr} 为有限元分析得到的特征值屈曲荷载。

1.2 钢材材性和初始缺陷

进行有限元计算的钢材材性参数取值参照《钢结构设计规范》中 Q345 钢的材性参数,屈服强度 $f_y=345\text{ MPa}$,极限强度 $f_u=470\text{ MPa}$ 。不同温度下的材性按欧洲规范^[12]确定,其中不同温度下的屈服应变 ϵ_{yT} 、对应屈服强度的最大应变 ϵ_{sT} 和极限应变 ϵ_{uT} 分别取 0.02,0.15 和 0.20。

本文对工字形截面和加固板的初始残余应力分别采用文献[13]及 ECCS《钢结构稳定手册》中的模型进行分析,得到的初始残余应力分布分别如图 2(a)和图 3(a)所示,有限元方法考虑网格划分后所采用的焊接残余应力分布简化模型如图 2(b)和图 3(b)所示,通过 inistate 命令在 ANSYS 模型中施加。整体分析前先进行数值迭代,求解得到平衡的残余应力分布如图 4 所示,沿构件全长各截面数值基本相同且与简化输入存在较小误差(约 10 MPa)。

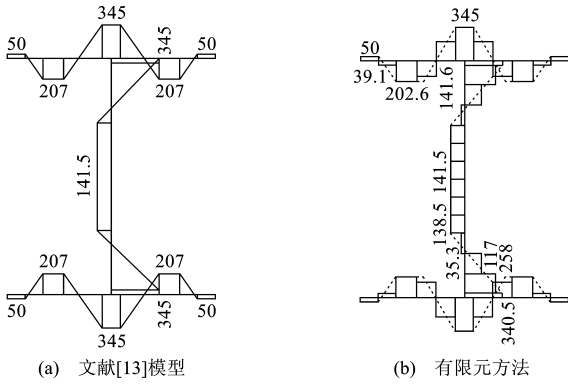


图 2 焊接工字形截面的初始残余应力分布(单位:MPa)
Fig. 2 Initial Residual Stress Distribution of Welded I-section (Unit:MPa)

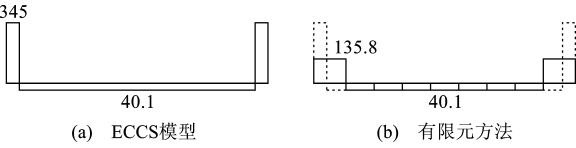


图 3 加固板截面的初始残余应力分布(单位:MPa)
Fig. 3 Initial Residual Stress Distribution of Strengthening Plate Section (Unit:MPa)

初始几何缺陷大小同《钢结构设计规范》水平按 1/1 000 杆长施加,同时由于结构屈曲时的位移倾向于特征值屈曲分析的最低阶模态,按照一致缺陷模态法,对不同长细比构件和不同偏心距情况分别提取一阶模态分布模式,施加到非线性屈曲分析作为初始缺陷分布,本文主要有如图 5 所示的 2 种分布模式。

考虑原构件实际存在一定初始缺陷,而负载下

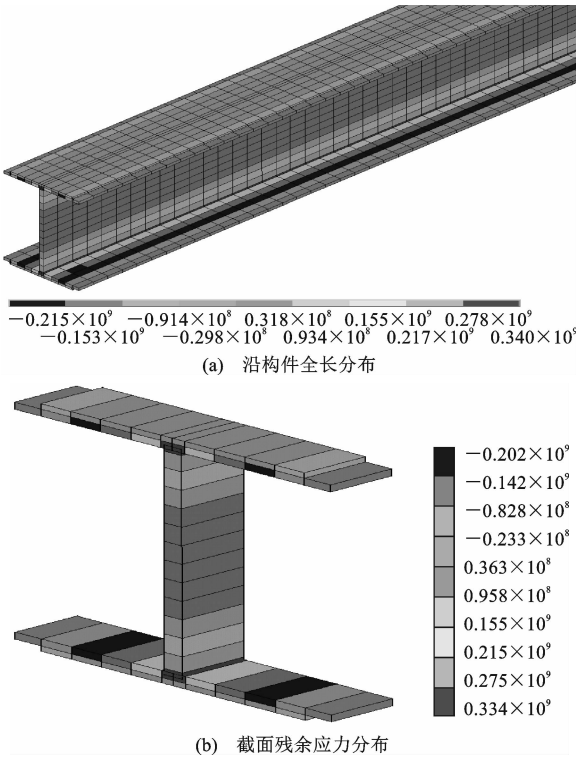


图 4 有限元模型中的残余应力分布(单位:Pa)
Fig. 4 Residual Stress Distribution in Finite Element Model (Unit:Pa)

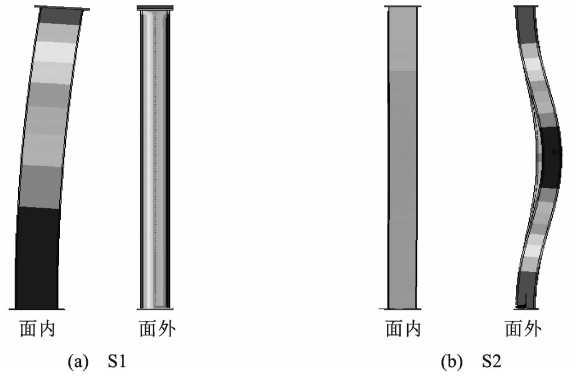


图 5 初始几何缺陷分布模式
Fig. 5 Initial Geometrical Imperfections Distribution Modes

加固焊接过程又进一步引起缺陷,因而本文分析时区分初始缺陷和过程缺陷。先进行特征值屈曲分析,提取一阶模态,再重新进入求解层施加初始几何缺陷和初始残余应力得到初始缺陷构件,然后在此基础上进行加固焊接过程模拟的热-结构耦合分析,进而得到加固焊接残余变形和加固焊接残余应力。

完成了 12 个未加固压弯钢柱、6 个无负载未焊接加固压弯钢柱、12 个无负载焊接加固压弯钢柱和 42 个负载下焊接加固压弯钢柱的受力全过程模拟分析,获得各因素影响规律。

2 有限元结果及影响因素分析

2.1 原柱极限承载力与最大名义应力比

最大名义应力采用下式计算

$$\sigma_{\text{omax}} = \frac{N_o}{A_{\text{on}}} + \frac{M_{\text{ox}} + N_o \omega_{\text{ox}}}{\alpha_{N_x} W_{\text{onx}}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{omax}} = \frac{N_o}{A_{\text{on}}} \pm \frac{M_{\text{ox}}}{W_{\text{onx}}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{omax}} = \frac{N_o}{A_{\text{on}}} \pm \frac{M_{\text{ox}}}{\alpha_{N_x} W_{\text{onx}}} \quad (4)$$

式中: σ_{omax} 为最大名义应力; N_o , M_{ox} 分别为未加固构件初始轴力及对 x 轴的弯矩; ω_{ox} 为未加固构件绕 x 轴的初始挠度; A_{on} , W_{onx} 分别为未加固构件净截面面积及净截面惯性矩; α_{N_x} 为增大系数; A , λ_x 分别为原构件毛截面面积及对 x 轴的长细比。

《钢结构加固技术规范》(CECS 77:96)给出了一般情况下焊接加固结构受轴心压(拉)力和弯矩作用时原构件在轴力和弯矩作用下的最大名义应力计算公式(2)。除了此公式之外,确定名义应力的方法还有材料力学的截面公式(3),以及进一步通过放大系数考虑二阶效应的公式(4)。本文按照公式(4)求得最大名义应力与钢材屈服强度 f_y 的比值 α_2 ,将最大名义应力比 α_2 与参数化构件的目标应力比相对应,据目标应力比反推有限元分析中需施加的初始负载 P_0 ,同时用 P_0 分别按公式(2)和公式(3)计算得到相应最大应力比 α_0 和 α_1 。有限元分析得到原柱的极限承载力 P_u ,将 P_0/P_u 与 α_0 , α_1 , α_2 在同一图中进行对比,如图6所示。

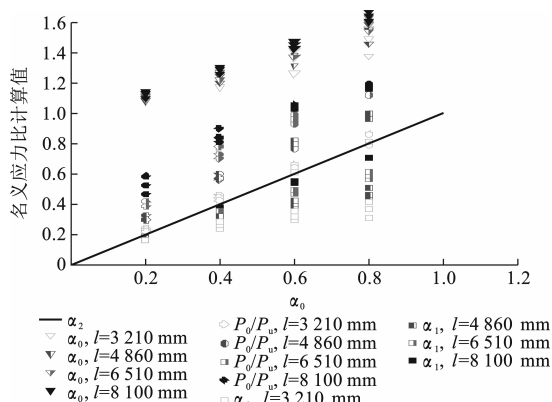


图6 名义应力比与 P_0/P_u 对比

Fig. 6 Comparison of Nominal Stress Ratio and P_0/P_u

发现公式(2)计算的名义应力比 α 总是大于1.0,因此如果按照公式(2)来考察是否能进行加固,将使得荷载下焊接加固方法完全不可用。将考虑二阶效应的公式(4)计算得到的应力比 α_2 与未加固构

件的 P_0/P_u 相比,两者在绕强轴方向的长细比 λ_{0x} 不超过62.5($l=3\ 210\text{ mm}$)时吻合较好, λ_{0x} 小于94.2($l=4\ 860\text{ mm}$)时比较接近,而随着长细比增大, α_2 比 P_0/P_u 偏小越多,主要是由于长细比越大的构件越易于失稳,极限承载力越低。此外,按材料力学截面公式(3)计算的名义应力比 α_1 整体比考虑二阶效应的计算结果偏小。

综上所述,在常见长细比小于100的范围内使用考虑二阶效应的公式(4)计算最大名义应力比是合理的,可以在一定程度上反映未加固构件的初始负载水平。因此,在新颁布《钢结构加固设计规范》中使用了该公式。

2.2 荷载-位移曲线

有限元结果发现,参数化模拟的所有构件最终均发生空间弯扭破坏模式,如图7所示。有限元典型柱顶面内荷载-水平位移曲线及柱三分点荷载-面内、面外位移曲线如图8,9所示,其中, e 为柱顶的面内偏心距, σ_0 为按公式(4)计算的构件初始最大应力比。由图8,9可知:所有构件在达到极限承载力前,随着荷载 P 增加,构件面内位移发生从线性到非线性的增加,而面外位移变化极小;达到极限承载力后,构件面外位移迅速发展,乃至超过面内位移,这种面内、面外变形发展特征与构件弯扭破坏的形态是相适应的。

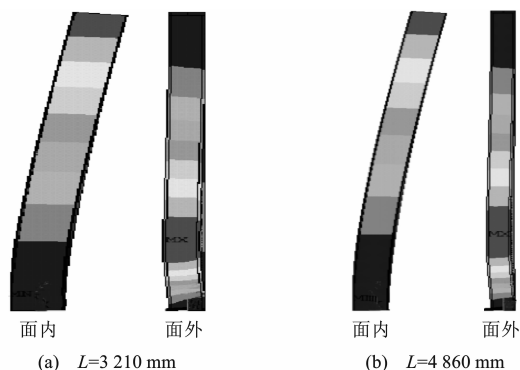


图7 弯扭破坏模式

Fig. 7 Flexural-torsional Buckling Mode

由图8,9还可知,随着柱长度(长细比)和偏心距增大,失稳时面外位移变化趋势越来越明显,达到极限承载力后下降段的面外位移下降速率越来越快,甚至快过面内位移。

此外,柱长度(长细比)和偏心距越大,极限承载力越低。焊接热输入和初始负载越大,焊接后面内的荷载-位移曲线平台段长度及残余变形越大,极限承载力也越低。影响极限承载力的主要因素依次为偏心距、柱长度(长细比)、焊接热输入、初始负载。

对于初始几何缺陷模式为S1(主要为面内缺

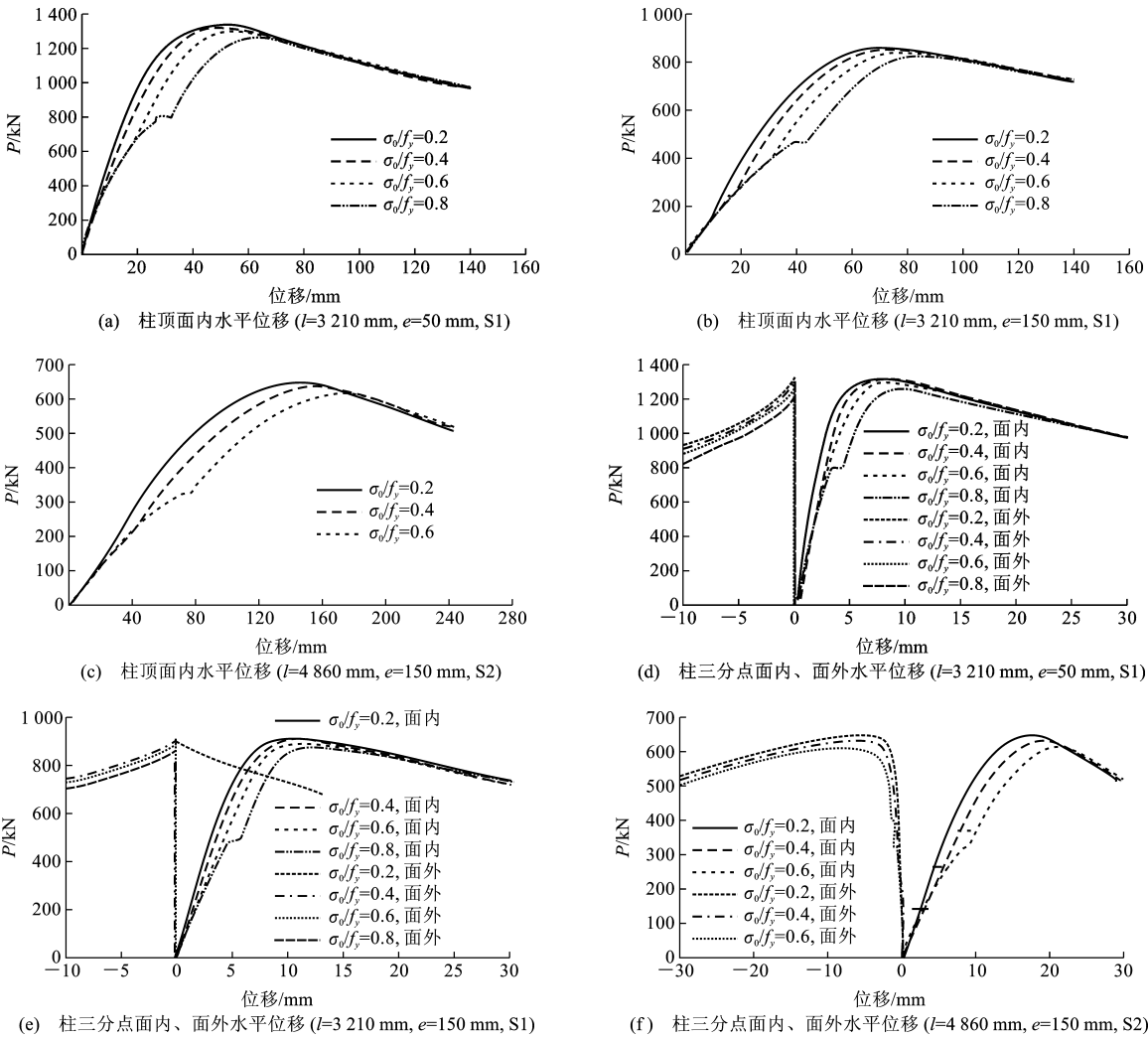


图 8 不同初始负载下荷载-位移曲线(A 级焊接热输入)

Fig. 8 Load-displacement Curves Under Different Initial Loads (A-class Weld Heat Input)

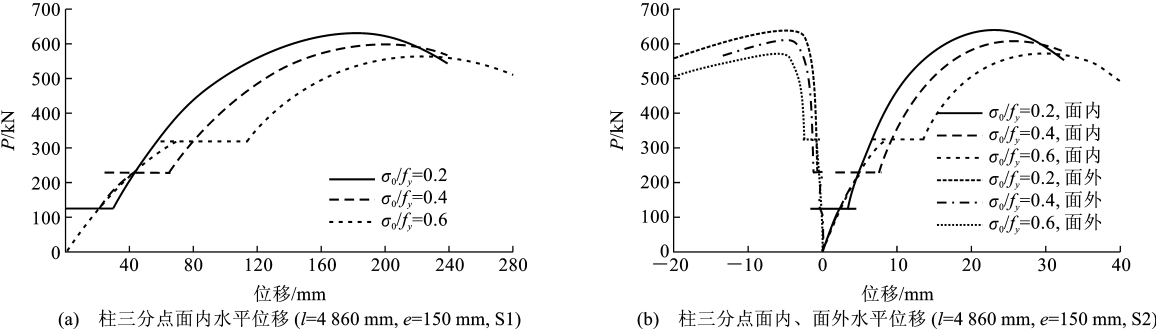


图 9 不同初始负载下荷载-位移曲线(B 级焊接热输入)

Fig. 9 Load-displacement Curves Under Different Initial Loads (B-class Weld Heat Input)

陷)的情况,其面外失稳时的偏向是不确定的和随机的,面外荷载-位移曲线体现为分叉失稳特征。对于初始缺陷为 S2(包括面内和面外缺陷)的情况[图 8(f)和图 9(b)],其面外位移方向与初始几何缺陷一致,面外位移影响规律也与面内位移一致,即焊接热输入和初始负载越大,焊接后荷载-位移曲线的

平台段长度及残余变形越大。
2.3 焊接残余变形
图 10 为不同影响因素下柱顶面内水平焊接残余变形。由图 10 可知:其他条件不变的情况下,焊接热输入越大,焊接残余变形 ω_w 越大;初始应力比越大,焊接残余变形越大;柱长度(长细比)越大,焊

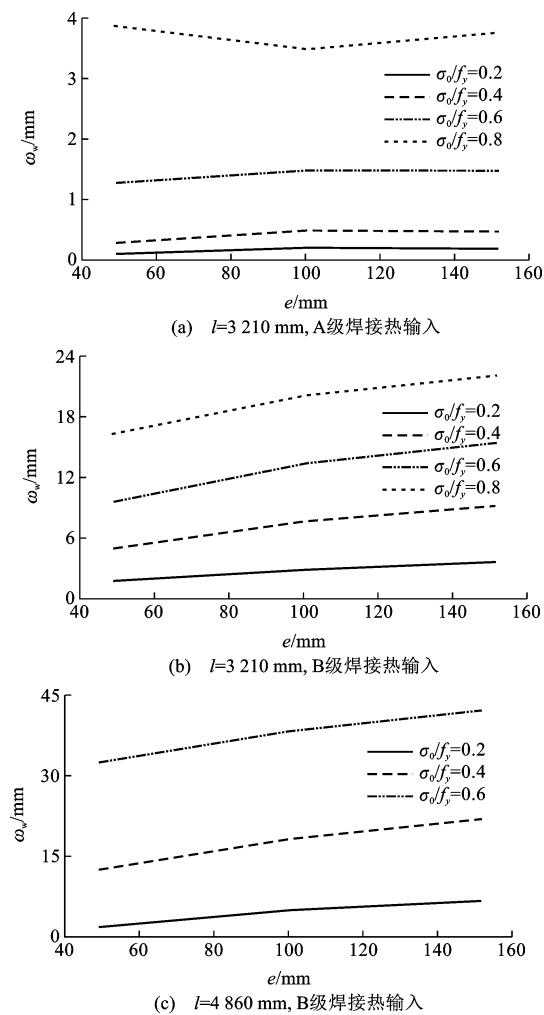


图 10 不同影响因素下柱顶面内水平焊接残余变形
Fig. 10 In-plane Horizontal Welding Residual Deformation at Top of Column Under Different Influence Factors

接残余变形越大。影响焊接残余变形的主要因素依次为焊接热输入、初始负载(初始应力比)、柱长度(长细比)。

由图 10 可以看出,偏心距对于对称焊接加固的焊接残余变形不敏感。图 11 为不同影响因素下非对称焊接加固的柱顶面内水平焊接残余变形。由图 11 可以看出,偏心距和初始应力比对于非对称焊接加固(仅焊接偏心受压远侧加固板)的焊接残余变形有抑制作用,偏心距或初始应力比越大,焊接残余变形越小,但考虑到偏心受压远侧焊接时残余变形方向与面内偏心相反,对承载力有利,故偏心距越大,这种有利作用越小。

负载下焊接加固变形的来源主要有 3 个方面:①高温区退出工作后的构件变形;②构件受焊缝收缩变形;③受压时构件附加弯曲变形。由于钢构件本身一般截面不大,热影响区在截面上的占比大小

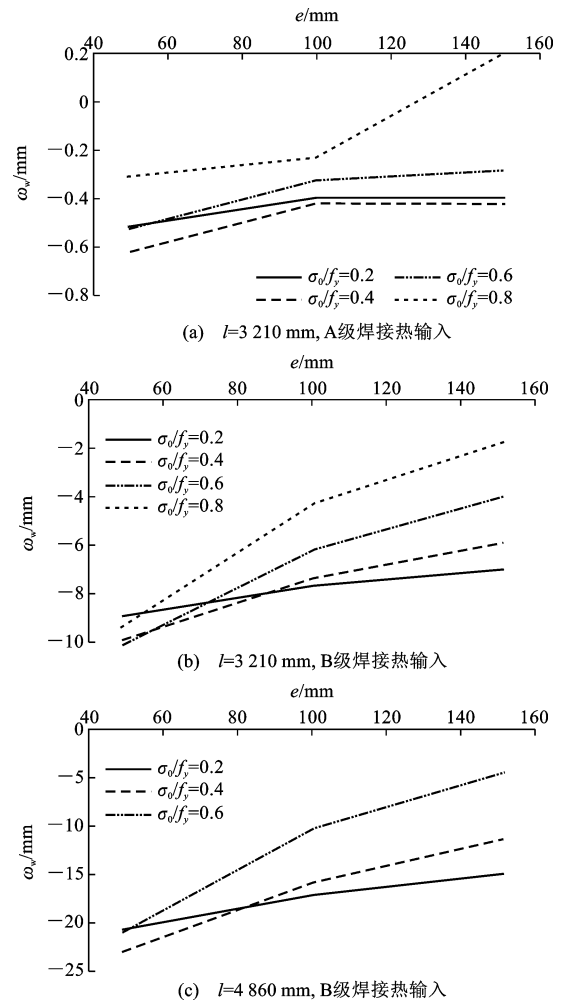


图 11 不同影响因素下非对称焊接加固的柱顶面内水平焊接残余变形
Fig. 11 In-plane Horizontal Welding Residual Deformation at Top of Column Under Different Influence Factors when Weld Reinforcement Is Asymmetric

对焊接热输入比较敏感,同时热影响区在负载下产生不可恢复的塑性变形构成最终残余变形的主要部分;初始负载要起作用则有赖于热影响区的发展,即导致非热影响区截面同时承担来自初始负载的压力和平衡热影响区拉应力合力产生的压力而部分进入塑性,因而焊接热输入的影响大于初始负载(应力比)的影响。构件长度的影响又有赖于初始负载,实际是对初始负载的一种几何放大效果(二阶效应),同时构件长度越长意味着焊接加固时间越长,先期加固完成的部分冷却后形成整体,增大了刚度,趋于抑制该放大效果。

3 结 语

(1)初始负载下最大名义应力比(初始应力比)的计算使用考虑二阶效应的公式可以在一定程度上

反映未加固构件的初始负载水平。

(2)所有构件最终均发生空间弯扭破坏模式,长细比和偏心距越大,失稳时面外位移变化趋势越明显;初始几何缺陷模式和大小影响失稳破坏方向及焊接残余变形大小。

(3)极限承载力的主要影响因素依次为偏心距、柱长度(长细比)、焊接热输入、初始负载(初始应力比)。

(4)焊接残余变形的主要影响因素依次为焊接热输入、初始负载(初始应力比)、柱长度(长细比),而焊接残余变形在对称加固时对偏心距不敏感。

参考文献:

References:

- [1] LIU Y, GANNON L. Finite Element Study of Steel Beams Reinforced While Under Load[J]. Engineering Structures, 2009, 31(11): 2630-2642.
- [2] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 负载下焊接加固受弯工形钢梁的受力特性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4): 112-120.
WANG Yuan-qing, ZHU Rui-xiang, DAI Guo-xin, et al. Analysis on Load-carrying Behavior of Flexural I-section Steel Beams Strengthened with Welding Under Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(4): 112-120.
- [3] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 工形钢柱负载下焊接加固的受力特性[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2014, 30(1): 25-33.
WANG Yuan-qing, ZHU Rui-xiang, DAI Guo-xin, et al. Analysis on Load-carrying Behavior of I Section Steel Columns Reinforced by Welding with Initial Compressive Load[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2014, 30(1): 25-33.
- [4] 龚顺风, 程江敏, 程 鹏. 加固钢柱的非线性屈曲性能研究[J]. 钢结构, 2011, 26(11): 15-19, 55.
GONG Shun-feng, CHENG Jiang-min, CHENG Peng. Nonlinear Buckling Behavior of Reinforced Steel Columns[J]. Steel Construction, 2011, 26(11): 15-19, 55.
- [5] UNTERWEGER H. Ultimate Load Capacity of Columns Strengthened Under Preload[J]. Advances in Steel Structures, 1999, 1: 117-124.
- [6] MARZOUK H, MOHAN S. Strengthening of Wide-flange Columns Under Load[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1990, 17(5): 835-843.
- [7] 蒋 立, 王元清, 戴国欣, 等. 焊接热作用对钢构件负载下加固的影响分析[J]. 工业建筑, 2014, 44(增):

755-763.

JIANG Li, WANG Yuan-qing, DAI Guo-xin, et al. Analysis of Welding Heat Effect on Steel Members Strengthened by Welding Under Load [J]. Industrial Construction, 2014, 44(S): 755-763.

- [8] 蒋 立, 王元清, 戴国欣, 等. 负载下工形截面压弯钢构件焊接加固的承载性能分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015, 48(增): 60-66.
JIANG Li, WANG Yuan-qing, DAI Guo-xin, et al. Analysis of Load-carrying Behavior of I Section Steel Beam-columns Strengthened by Welding Under Load [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2015, 48(S): 60-66.
- [9] 王元清, 蒋 立, 戴国欣, 等. 负载下钢结构工字形压弯构件焊接加固试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 30-37.
WANG Yuan-qing, JIANG Li, DAI Guo-xin, et al. Experimental Study on I Section Steel Beam-columns Strengthened by Welding While Under Load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 30-37.
- [10] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 工字形截面受弯钢梁负载下焊接加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 1-10.
WANG Yuan-qing, ZHU Rui-xiang, DAI Guo-xin, et al. Experimental Study on Bending Steel Beams with I Section Strengthened by Welding Under Initial Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 1-10.
- [11] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 初始负载下焊接加固工字形截面钢柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 78-86.
WANG Yuan-qing, ZHU Rui-xiang, DAI Guo-xin, et al. Experimental Study on Load-carrying Behavior of I Section Steel Columns Strengthened by Welding with Initial Load [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 78-86.
- [12] EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1-2: General Rules — Structural Fire Design[S].
- [13] 班慧勇, 施 刚, 石永久. 高强钢焊接构件工字形横截面残余应力试验及统一分布模型研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 83-91.
BAN Hui-yong, SHI Gang, SHI Yong-jiu. Experimental and Unified Model Investigations on Residual Stress Within High Strength Steel Welded I-sections [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 83-91.