

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.022

基于固有应变的旧钢桥加固焊接应力和变形分析

杜洋华, 罗宇, 赵晟, 大沢直樹

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:文章针对某大型桥梁实际加固修复焊接,利用独自开发的焊接变形分析系统软件,预测不同工艺和工况条件下大桥的应力和变形,获得不同条件下桥梁变形和应力的分布规律,确认该大型桥梁加固焊接施工方案的安全性。同时,该文为实际焊接工艺的优化提供了技术解决方案。

关键词:桥梁焊接加固;焊接应力变形;固有应变;数值模拟;焊接工艺

中图分类号:U448.36;U445.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)07-1003-06

Analysis of welding stress and deformation of old steel bridge reinforcement based on inherent strain

DU Yanghua, LUO Yu, ZHAO Sheng, OHSAWA Naoki

(School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:In this paper, for the actual reinforcement and repair of a large-scale bridge, the self-developed welding deformation analysis system software was used to analyze the welding stress and deformation of the bridge under different processes and working conditions. The distribution rule of the deformation and stress of the bridge under different conditions is obtained, and the safety of the large-scale bridge reinforcement welding construction plan is confirmed. At the same time, this paper also provides technical solutions for the optimization of the actual welding process.

Key words:bridge welding reinforcement; welding stress and deformation; inherent strain; numerical simulation; welding process

老旧桥梁经常通过加固修复焊接来恢复桥梁强度,延长使用寿命。焊接过程是集中热源不断移动、对连接部位进行加热的过程,焊接热源具有高温、集中瞬态加热和移动等特点^[1]。由于不均匀分布的温度场,伴随着材料相变、结构位移约束等因素,钢构件在焊接加热和冷却后会产生不同程度的焊接残余应力和变形^[2]。在实际加固修复焊接过程中,非常关注焊接应力和变形是否导致老旧桥梁崩溃^[3-4]。由于焊接过程的复杂性,桥梁的加固修复焊接引起的应力及变形规律难以掌握,仅依靠经验难以保证工程的安全性^[5]。

本文的研究对象是一座国外使用中的大型平

旋开启式钢桁梁铁路桥,桥长 640 m、宽 10.2 m,最高处高 60 m。大桥东西两端边跨长 150 m,河中主跨两活动部分钢桁梁各长 170 m,钢桁梁总质量为 1.32×10^4 t。当地政府拟对旧桥进行维修、改造并升级为双线铁路,工程建成后将极大地促进两地经济发展。大桥修复工程主要包括旧桥焊缝的补强和桁梁结构的加固,施工中需要在旧桥上加焊数千吨的加固钢材,焊接工作量巨大。

大桥修复焊接产生的应力和变形会在桁梁和各节点中产生附加应力,这些变形、残余应力和附加应力对施工乃至大桥服役期间的安全性和质量产生重大影响^[6]。如此大规模的旧桥修复工程在

收稿日期:2020-07-04;修回日期:2020-09-29

基金项目:上海交通大学和大阪大学合作种子基金资助项目(2019-07)

作者简介:杜洋华(1993—),男,浙江台州人,上海交通大学硕士生;

罗宇(1961—),男,重庆市人,博士,上海交通大学教授,博士生导师。

世界上十分罕见,很少有可借鉴的经验,因此通过有限元数值模拟研究旧桥修复过程中的焊接应力变形非常必要^[7-8]。

对于如此庞大的复杂结构,用热弹塑性方法进行分析难以想象。因此,本文采用基于固有应变理论的弹性板单元预测方法,用独自开发的焊接变形分析系统软件对桥梁结构进行有限元数值模拟,预测不同施工条件下桥梁结构修复焊接引起的应力和变形,对钢桥整体及焊接单元进行焊接应力水平综合分析和评估,为制定更科学、更安全的施工方案提供理论依据,具有一定的工程应用价值。

1 研究方法

根据大量的热弹塑性有限元分析和实验观察,研究者总结得出焊接残余应力和焊接变形都是由固有应变产生的。固有应变大小及分布主要由接头的形状、材料属性、板厚以及热输入等焊接接头参数决定^[9]。

对于大型复杂结构而言,结构的焊接变形是现场工程师关注的重点。固有应变法的基本原理是将焊接过程中产生的固有应变或固有变形作为初始条件代入有限元模型当中,通过一次弹性分析即可获取结构的变形场与应力场^[10]。

通过固有变形计算结构的焊接变形需要考虑纵向固有变形、横向固有变形和角变形。但大型复杂结构的角变形并不是固有的,产生的原因比较复杂,而且可以在实际施工中通过机械加工消除。本文仅考虑纵向固有变形和横向固有变形影

响,表达形式为:

$$\delta_L^* = \frac{1}{h} \iint \epsilon_L^* dydz,$$

$$\delta_T^* = \frac{1}{h} \iint \epsilon_T^* dydz.$$

其中: δ_L^* 为纵向固有变形; δ_T^* 为横向固有变形; ϵ_L^* 、 ϵ_T^* 分别为纵向和横向固有应变; h 为接头厚度; y 、 z 分别为横向、厚度焊接方向。

因此,要获取大型结构的焊接变形与应力,只需将焊缝处的纵向固有变形(应变)和横向固有变形(应变)作为初始条件输入即可。但是,实际工程中影响固有变形的不确定因素较多,确定固有变形的具体数值比较困难,需要理论计算和现场经验积累的数据库支撑。

课题组经过多年的现场工作经验积累和研究,构建了较为完善的典型焊接接头固有变形数据库。本文采用课题组独自开发的焊接变形分析系统软件和固有变形数据库,根据实际焊接工艺,从数据库中提取固有变形并添加到各焊缝处,对大桥结构进行有限元数值模拟。

2 研究模型

2.1 模型概述

由于大桥东西(桥长方向)对称,以旧桥西侧部分为研究对象,总体结构如图 1 所示。

旧桥主要包括上节点、下节点、上弦梁、下弦梁、斜杆、立柱和塔座 7 个部分,考虑到桥梁结构的对称性,后续分析计算选取 1/2 的旧桥结构作为研究对象,即 100#~210# 区域。

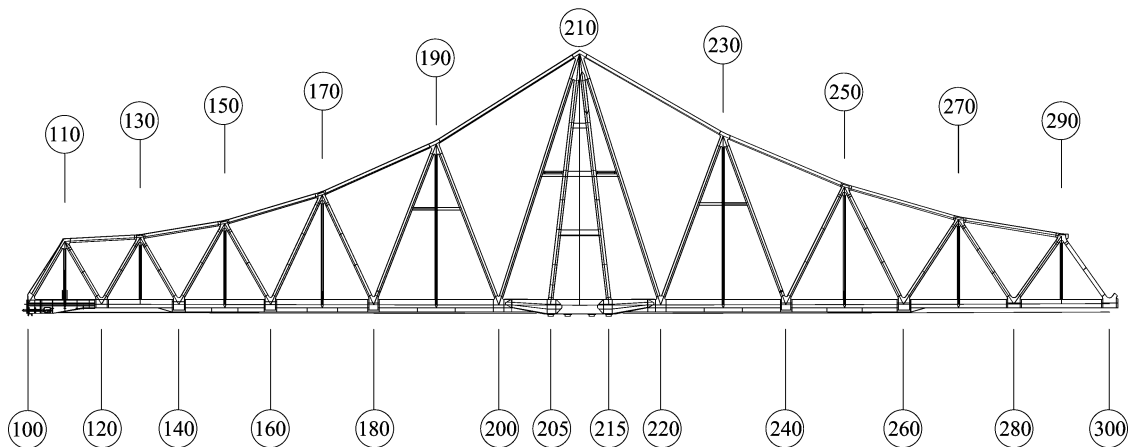


图 1 旧桥西侧总体结构

2.2 有限元模型建立

采用通用有限元建模软件 Hypermesh 建立

局部旧桥有限元模型。由于桥梁结构装配零件众多且尺寸相差较大,为了不影响有限元网格质量,

需要对模型进行简化处理。按照静力有限元分析的标准,忽略一些非承载构件,如桥身下的旋转装置,面外局部非承载不规则钢板;同时,一些直径较小的安装孔和工艺孔对模型的变形和应力分布影响极小,但会增加建模复杂度,也予以忽略。简化后整体有限元模型不会产生较大误差。网格类型均为板单元,以四边形网格为主,不规则区域存在少数三角形网格。有限元模型中钢材的密度为 $7\ 820\ \text{kg/m}^3$,弹性模量为 $2.1 \times 10^5\ \text{MPa}$,泊松比为 0.3,共计 39 393 个单元,节点 38 100 个。由于所关注的焊缝均分布在钢桁梁架面内,焊接产生的变形和应力也都发生在钢桁梁架面内,面外方向的变形几乎可以忽略,因此暂不考虑面外约束影响。

塔架对称面(210#)施加对称约束条件,下梁两端施加简支边界约束,有限元网格模型、边界条件及焊缝如图 2 所示。

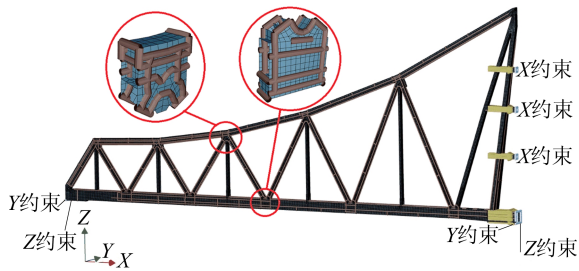


图 2 有限元网格模型、边界条件及焊缝

2.3 焊缝信息

根据施工图纸,焊缝主要分为旧焊缝补强焊缝和构件加固焊缝,共计 835 条,焊缝数量统计见表 1、表 2 所列。

表 1 旧焊缝补强焊缝数量

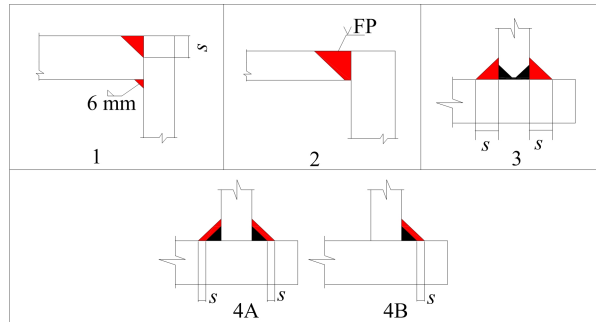
旧焊缝补强方式	1	2	3	4A	4B	总计
旧焊缝补强焊缝数	20	80	2	2	25	129

表 2 构件加固焊缝数量

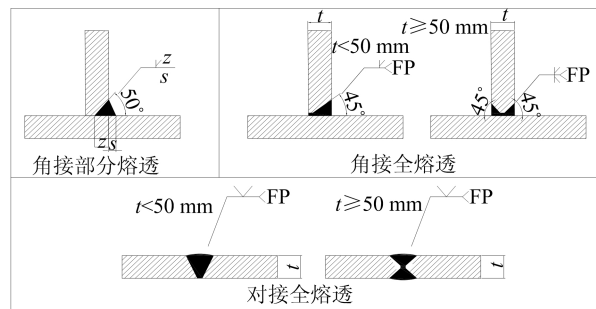
构件	角接部分熔透	角接全熔透	对接全熔透	总计
上节点	84	51		135
下节点	100	40		140
上弦梁	50		40	90
下弦梁	46		34	80
斜杆	108		35	143
塔座	16		22	38
横梁		80		80
总计	404	171	131	706

旧焊缝补强方式有 5 种,如图 3a 所示,其中:红色表示补强焊缝;黑色表示旧焊缝,构件加固焊接的方式有 3 种,分别为角接部分熔透、角接全熔透和对接全熔透,如图 3b 所示。

本次焊接采取电弧焊方式,单道焊接的焊接线能量为 $1\ 000\ \text{J/mm}$ 左右。本文根据实际的焊接工艺参数以及板厚,在固有变形数据库中查找对应的数据,为了安全起见,所取固有变形相对偏大,计算结果偏保守。



(a) 旧焊缝补强方式



(b) 构件加固焊接方式

图 3 旧焊缝补强及构件加固焊接方式

3 计算结果及分析

3.1 整体应力变形分析

3.1.1 整体变形分析

为了快速得到模型整体的应力分布及变形情况,在模型中同时施加 835 条焊缝的固有变形进行有限元分析。

塔座对称面由于存在 X 向约束,变形量为 0,远离塔座对称面,结构的变形量逐渐增大,最大变形量为 $53.591\ \text{mm}$,出现在 100L 下节点处,模型沿 X 向整体收缩量为 $53.874\ \text{mm}$ 。Z 方向最大位移为 $1.255\ \text{mm}$,最小位移为 $-7.974\ \text{mm}$,出现在上弦梁,模型沿 Z 向整体收缩量为 $9.229\ \text{mm}$ 。其中 X 方向的变形云图如图 4 所示。

计算结果表明,Y 方向(面外方向)焊接变形最大位移为 $0.578\ \text{mm}$,最小位移为 $-0.553\ \text{mm}$,

均可以忽略不计,间接证明了忽略面外约束的可行性。

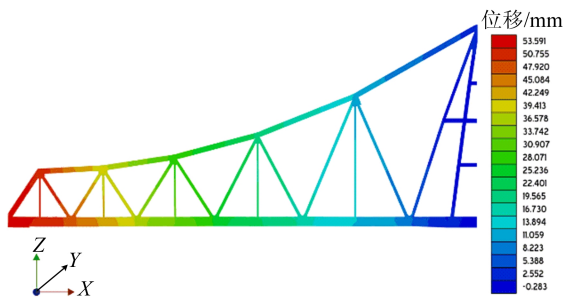


图 4 X 方向变形云图

3.1.2 整体应力分析

模型等效应力云图如图 5 所示。

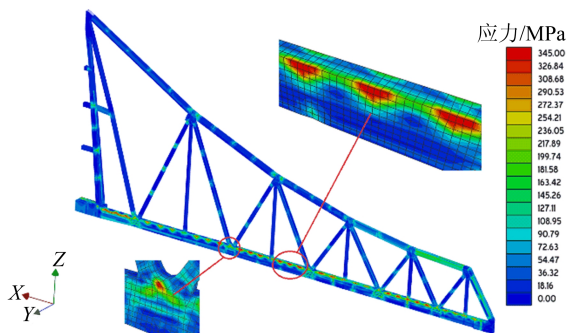


图 5 等效应力云图

整体平均焊接残余应力处于比较低的水平,但局部最大应力超过了屈服应力 345 MPa,出现

在下弦梁与横梁相交位置。该区域存在多道修复焊和新增的大热量输入短焊缝,导致局部焊接残余应力较大,焊接时应高度重视,避免焊接裂纹产生。另外,需要注意下节点由于存在与横梁相交的大热量输入短焊缝,有几处节点局部焊接残余应力较高。

3.2 节点的最大附加焊接应力分析

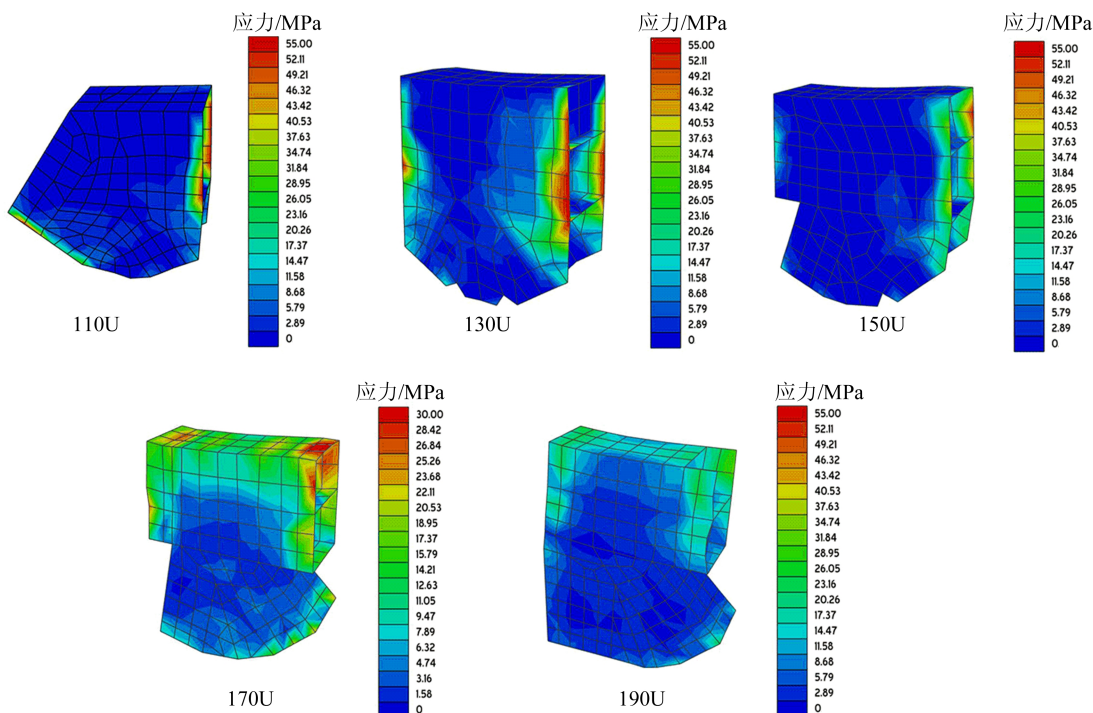
节点作为各桁梁的连接点,结构复杂,其焊缝类型多,焊缝数量大并且焊缝分布密集,是施工的难点,也是最容易产生应力集中的部位,应重点关注。因此,本节分析各节点焊接前的最大附加焊接应力。具体工况为:假设模型中除要研究的节点外,其他所有焊缝均已完成焊接,检查其他位置产生的焊接应力和变形对该节点应力水平的影响。

各节点附加焊接应力最大值见表 3 所列。

表 3 各节点附加焊接应力最大值 单位:MPa

上节点编号	110U	130U	150U	170U	190U	
最大附加应力	68.25	100.43	60.24	30.07	30.55	
下节点编号	100L	120L	140L	160L	180L	200L
最大附加应力	73.03	105.71	76.46	83.62	48.59	168.09

上节点(110U、130U、150U、170U、190U)和下节点(100L、120L、140L、160L、180L、200L)对应的附加焊接应力云图如图 6 所示。



(a) 上节点

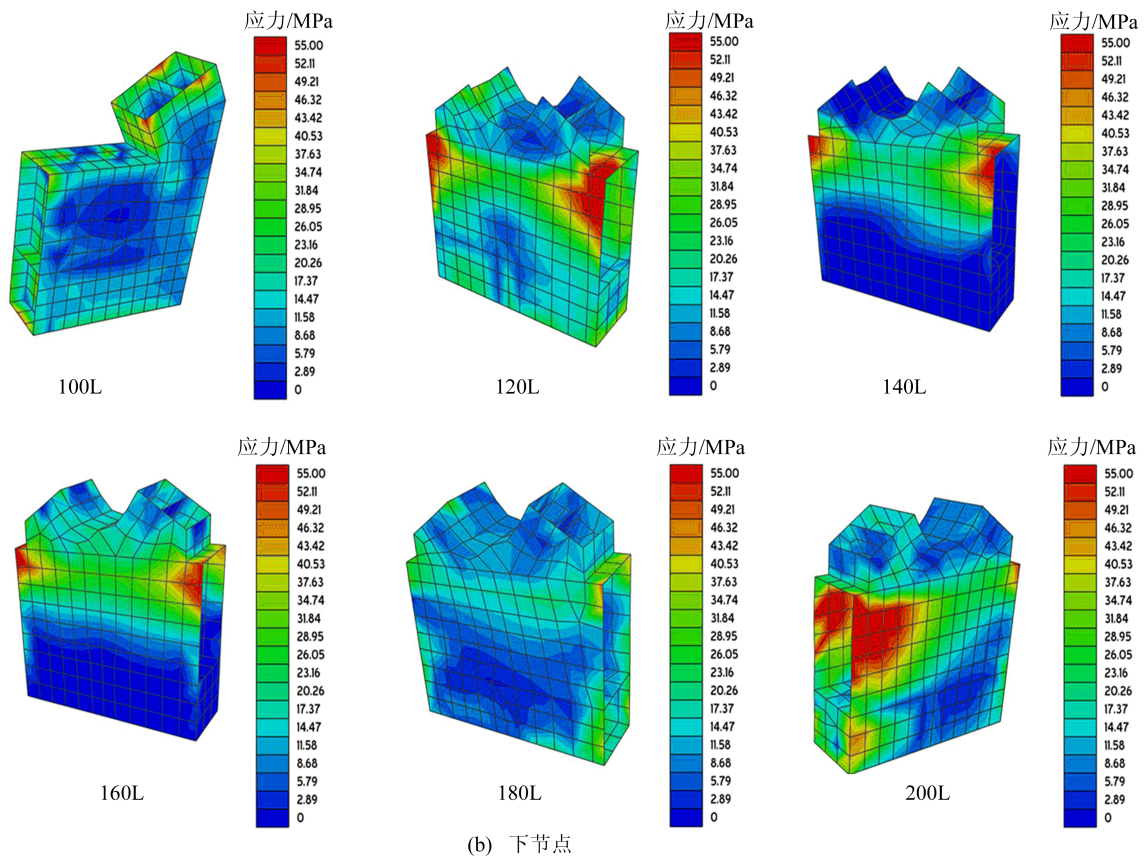


图 6 上、下节点附加焊接应力云图

上、下节点附加焊接应力最大值均出现在焊缝临界处,而且上节点的附加焊接应力水平普遍小于下节点。主要由于下节点是下弦梁的连接点,而下弦梁是大桥承载力的主要构件,需要重点加固,因此焊缝数量比较多,导致下节点的附加焊接应力水平相对较大。综合评估上、下节点由焊接引起的最大平均附加应力均不大于 55 MPa,处于比较安全的水平。

3.3 不同焊接顺序的应力分析

本文利用焊接变形分析系统软件对焊缝进行分组,设置多步焊接流程,使模拟结果更贴近工程实际。因此可以根据大桥实际施工时的焊接顺序及焊接工艺对大桥模型进行分步焊接模拟,从而更加准确地预测大桥焊接过程中的整体应力与变形,并观察分析关键构件在每步焊接后的焊接应力值以及整个焊接过程中的焊接应力变化曲线。同时,也可以通过调整焊缝的焊接顺序,寻找焊接残余应力与附加焊接应力更小的焊接顺序,制定更优的焊接方案,指导实际施工。

本文以 17 步焊接为例,对模型进行模拟分析。焊缝以区域分类,按照从中间(塔座)往两侧、从下往上的顺序分 17 步进行焊接,共计 835 条焊

缝,焊缝施加顺序如图 7 所示。图 7 中,第 1 步表示旧焊缝及横梁焊缝。

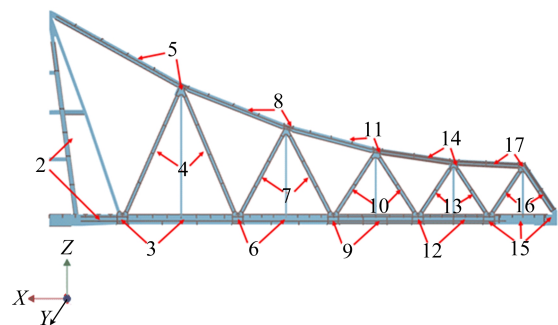


图 7 焊缝施加顺序

经过 17 步焊接模拟计算,找到各节点焊接后的最大应力位置,分析整个焊接过程中对应位置的焊接残余应力变化。上节点焊接后应力最大处的焊接残余应力变化曲线如图 8 所示。同时还可以分析指定构件焊接前的附加焊接应力变化。

本文分析上节点 U150-Node20872 位置在 17 步焊接过程中附加焊接应力的变化趋势,并与 1 步焊接得到的附加焊接应力进行对比,如图 9 所示。分步焊接模拟的好处是可以得到每一步焊接结束的附加焊接应力,并分析当前步以及下一

步焊接对指定构件附加焊接应力的影响。

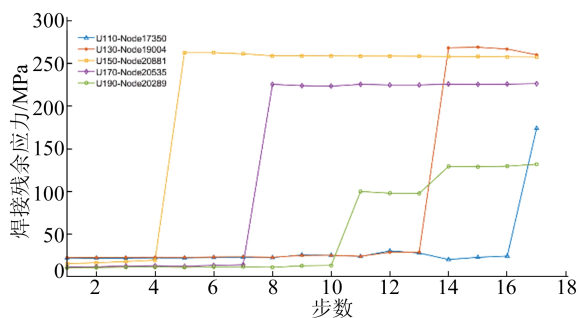


图 8 上节点应力曲线

从图 9 可以看出,附加焊接应力在完成第 3、6、9、12 步焊接后都有明显的增大趋势,而在完成第 5、8、11、14、17 步焊接后,附加焊接应力有减小的趋势。对照图 7,发现下弦梁的焊接会增加 U150 节点的附加焊接应力,而上弦梁的焊接会降低 U150 节点的附加焊接应力。因此可以推测,采取上、下弦梁交替焊接的顺序可以控制 U150 节点处的附加焊接应力。后续可以进行更加具体的研究,通过不断优化焊接顺序,控制并降低焊接过程中构件的附加焊接应力及焊接残余应力。

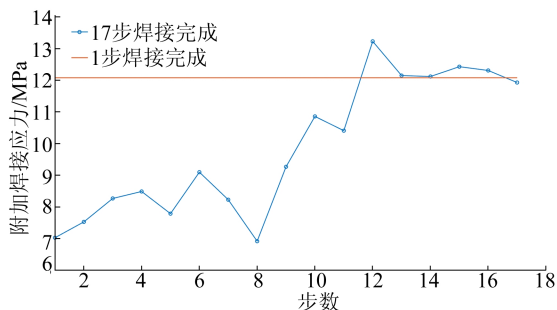


图 9 附加焊接应力曲线

4 结 论

本文基于固有应变理论,利用独自开发的焊接变形分析系统软件对国外某大桥(西侧)局部结构在不同工况(1步整体焊接模拟、各节点最大附加焊接应力模拟以及 17 步焊接模拟)下的焊接应力变形进行预测,得到如下结论。

1) 模型沿 X 向整体收缩量为 53.874 mm,

模型沿 Z 向整体收缩量为 9.229 mm。

2) 局部焊接残余应力达到屈服应力,要充分引起重视,尤其是对于大厚度、大拘束的焊缝,要采取预热、小线能量等必要措施来避免焊接裂纹产生。

3) 通过分析各节点在其他构件焊接全部完成后的应力水平,可以认为焊接引起的最大平均附加应力不大于 55 MPa。

4) 可以进行不同焊接顺序的模拟,通过优化焊接顺序控制附加焊接应力,制定更科学、更安全的施工方案。

5) 旧焊缝修复和加固焊接过程引起旧桥破坏的可能性很小。

[参 考 文 献]

- [1] DENG D, LUO Y, SERIZAWA H, et al. Numerical simulation of residual stress and deformation considering phase transformation effects(mechanics, strength & structural design)[J]. Trans JWRI, 2003, 2: 32.
- [2] 李滋亮, 刘剑桥, 任森栋, 等. 尺寸因素对 SUS304 不锈钢残余应力和焊接变形的影响 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 59-67.
- [3] 阿部英, 彦潘蜀, 健铁路. 钢桥的疲劳问题及其修补和加固 [J]. 国外桥梁, 1985(4): 37-44, 19.
- [4] 周友龙, 杨睿, 张聪聪, 等. 焊接技术在桥梁加固工程中的应用 [J]. 电焊机, 2009, 39(10): 36-40.
- [5] LUO Y, DENG D, JIANG X L. Prediction of welding distortion during assembly process of thin plate structures [J]. China Welding, 2005, 14(2): 153-157.
- [6] 余天庆, 党志杰, 陈勇, 等. 焊接残余应力对焊接构件疲劳性能的影响 [J]. 桥梁建设, 2000, 30(2): 4-6.
- [7] 卫军, 汪东明, 刘晓春, 等. 钢梁桥焊接残余应力的计算机模拟 [J]. 桥梁建设, 2015, 45(4): 94-99.
- [8] 宋满荣, 葛陈军, 冯然, 等. 基于 ANSYS 的桥梁转体施工转盘数值分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(10): 1392-1398.
- [9] 王阳. 大型复杂船体结构焊接变形分析方法的研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [10] 罗宇, 邓德安, 江晓玲, 等. 热变形的固有应变预测法及实例 [J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 17-20, 114.

(责任编辑 张 镛)