

# 青城大桥钢结构节段构件划分的施工技术研究 ——基于 Abaqus 的焊接热-力耦合模拟优化

陆文皓

上海基础工程集团有限公司 200002

**【摘要】**本文依托于青城大桥项目对项目钢结构的划分方案进行了研究,利用abaqus软件对钢结构划分方案进行了比较和研究,利用热力耦合模拟和现场安装焊接温度模拟提出划分建议,比对了三个不同钢梁划分方案的工程量、焊接难度、钢梁整体结构变形等方面的内容。得出了在环境因素和实际工程作业时间存在明显“窗口期”的条件下,方案二的划分规则能够在焊接难度、工作量和整体结构变形中的三角博弈中获得不错的平衡。为钢梁整体施工的精度控制和钢梁整体制作优化做了一定的数值计算,给后续的钢梁整体顶推提供了低误差调整的数值理论基础。

**【关键词】** Abaqus; 焊接变形控制及预测; 大型钢结构制作精度控制; 热力耦合模拟

Research on Construction Technology for Segmental Division of Steel Structures in Qingcheng Bridge: A Thermal-Force Coupling Simulation Study Based on Abaqus

Lu Wenhao

Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd. 200002

**【Abstract】** This study investigates the segmentation scheme of steel structures for the Qingcheng Bridge project. Using Abaqus software, we conducted comparative analyses of different segmentation approaches. Through thermal-force coupling simulations and on-site welding temperature modeling, we proposed optimized segmentation recommendations. The research systematically evaluated three steel beam segmentation schemes in terms of construction volume, welding complexity, and structural deformation. Findings indicate that under environmental constraints and practical construction time limitations, the second segmentation rule achieves a favorable balance among welding difficulty, workload, and structural deformation. Numerical simulations were performed to enhance precision control during steel beam assembly and optimize manufacturing processes, providing a theoretical foundation for subsequent precision adjustments in the integrated steel beam jacking operation.

**【Key words】** Abaqus; welding deformation control and prediction; precision control of large steel structure fabrication; thermal-coupled simulation

## 引言

随着近现代数值分析的蓬勃发展与兴起,计算机建模仿真模拟在各行各业中的运用越来越被人们所关注。焊接作为一门涉及多学科的复杂型交叉型学科全面了解是困难的。依托于数值分析和计算机的发展使得对于焊接变形的预测成为可能,也更有利于工程中涉及到焊接过程的控制。

Jin-Hyeong Park, Sung-Hwan Kim, Hyeong-Soon Moon 等人利用高速摄像机以 5000fps 的速度捕获了不同位置焊接对于焊接熔池以及熔池过渡的影响,在重力与前端焊接电弧力的冲击下,更多的金属聚集在了熔池的尾部,气体保护焊

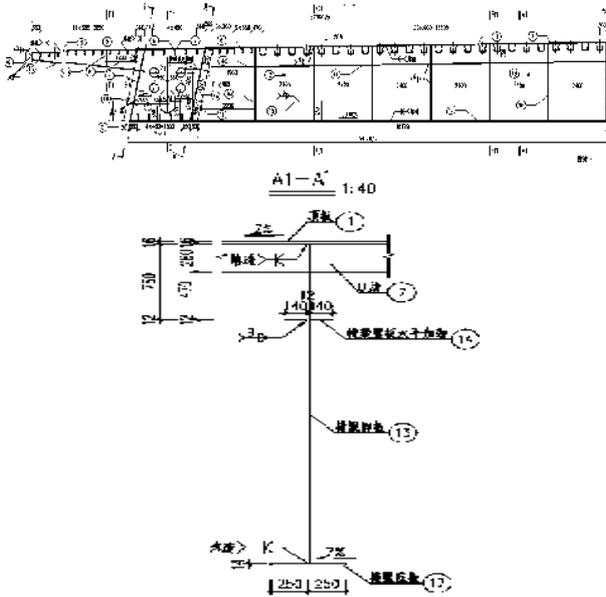
中熔池的受力主要为电弧力与气体保护焊时候熔池过渡的粗滴过渡的力这导致的大量金属液向熔池尾端聚集,导致了仰焊时会有驼峰头的出现。<sup>[1]</sup>戴玲、姜永正等人研究了焊接工艺参数对 Q345 厚板 L 形接头焊接温度场的影响<sup>[2]</sup>。孙志鹏、卢玉秀等人对 T 型接头的焊接过程进行了数值模拟<sup>[3]</sup>。梁艳对钢结构焊接梁柱节点在温度场的影响下的变化进行了有限元分析<sup>[4]</sup>。

## 1、工程概况

青城大桥工程项目位于都江堰市主城区西侧主桥长约

310m。本工程新建桥梁采用下承式拱桥一跨过河，双向四车道加非机动车及人行道，桥面宽为 40~47m，跨径约 336m。

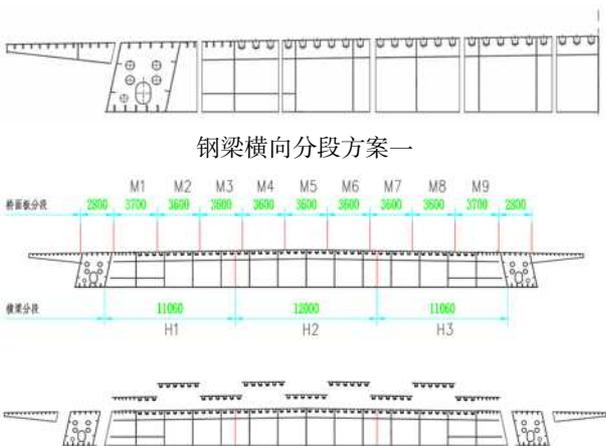
钢梁由双边箱与中间正交异性桥面板及横梁、挑臂组成采用全焊接结构总长度 346.9m，道路中心线处梁高 3.2m 双边箱截面尺寸为 2.5m~3.42m\*2.93m。钢梁截面图形式如下图图一所示。



图一 钢梁横截面结构图

## 2、对比方案概况

现阶段对桥梁钢结构的划分主要分为两种：一种方案采用的是将隔板与顶板在工厂内预先焊接完成并在现场进行整体拼装的工艺。第二种为现场进行顶板与隔板仰焊，隔板按运输要求分为三段。



图二 钢梁横截面结构图

## 3、现场焊接工程量比对

以下对分段划分的方案的工程量对比。计算单个节段钢梁上下隔板对接熔透焊的焊接长度，钢梁一节段为 12 米，单个节段内上下隔板对接焊缝有四处，隔板对接一处焊缝长度为  $13800+470+2 \times 350+3 \times 300+262=16132\text{mm}$ ，所以单个节段隔板上下对接焊缝长度为  $16.132 \times 4=64.528$  米。全幅数量为  $64.528 \times 2=129.056$  米。

u 肋部分熔透焊长度为  $300 \times 23-5 \times 12=6840\text{mm}$ 。由加劲板细部图显示计算，过焊孔与加劲板板厚共计  $35+30+16=81\text{mm}$ ，共 6 块加劲板总计  $81 \times 6=486\text{mm}$ 。顶板加劲板范围长度为  $16132-13800=2332\text{mm}$ 。 $2332-486-12=1834\text{mm}$ 。

所以方案二一处接缝处熔透焊长度为  $(1834+6840) \times 2/1000=17.348\text{m}$ ，单个节段半幅总计隔板与顶板熔透焊长度为  $17.348 \times 4 = 69.392\text{m}$ 。可以清晰的看到方案一在焊接长度方面增加的工作量比方案二来的多， $129.056/69.392=1.859$  可见增加的现场焊接工程量接近 2 倍。

## 4、整体钢梁模型参数化建立

接下来用 abaqus 软件对焊接残余应力进行热-力耦合计算焊接后的残余应力与焊接变形，对上文两种方案进行整体变形的模拟，对整体箱梁构件变形进行整体和评估。

模拟分析分析步总共分为四个分析步来进行，分析步一、二执行整体隔板的第一、二道焊缝加热，第三、四步执行顶板 4 道交错焊缝的加热。

整体的焊道设计与加热顺序符合从下至上，采用对称施焊将主要变形差异集中于隔板焊道划分形式对顶板的变形影响。隔板两边和隔板底部的边界条件设置为三个方向的位移与转角都为 0，即模型整体隔板三边固结。绝对零度设施为 0 开尔文，预定义温度场设置为 293.15K，网格采用 C3D8RT 属性缩减积分控制网格质量，网格密度采用 1cm 一个网格密度划分。

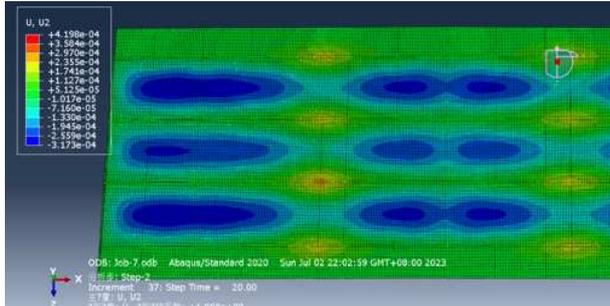
## 5、模型计算分析

采用分别计算横焊缝与竖焊缝的方式来评估结构分段，采用在焊缝位置直接加载一定温度的体热源来进行替代和等效加速计算。计算并未把高温的塑性变形、金属收缩量加

入计算,且焊缝处顶板做分离状态然后加载体热源,采用表面热交换条件来模拟热量扩散行为。

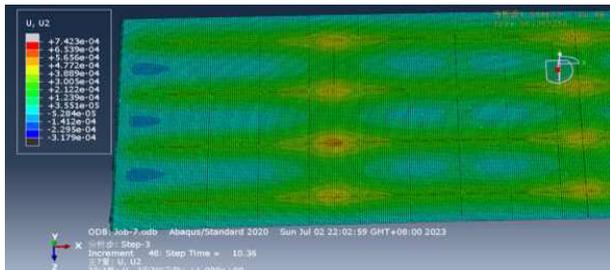
### 5.1、方案一的数值模拟

首先对方案一中的隔板分割方式进行模拟,模拟时焊道温度温度为 795 开。



图三 竖向焊缝位移云图顶板位移

在顶板面的位移云图可知,位移形变位置主要发生在加热焊缝的竖直方向上,在顶面面内呈现点状区域且位移最大为 0.29mm 其余地区较原位置下降最大下降 0.31mm,顶板最大变形量为 0.6mm。在加载环境温度为横向焊缝后,如图四所示顶板竖向焊缝处投影位置位移更大,最大处为 0.56mm,此时顶板最低处为 0.3mm,顶板可能出现 2mm 的高低差变形位移。由于顶板四周未添加约束条件,顶板内界面弯曲,应力在顶板面内进行力矩平衡。如云图所示边界可呈现一种波浪形式的状态且隔板处为波峰,隔板间位置变为波谷的状态。模拟结果较实际偏于乐观,实际情况可能顶板弯曲更为严重。

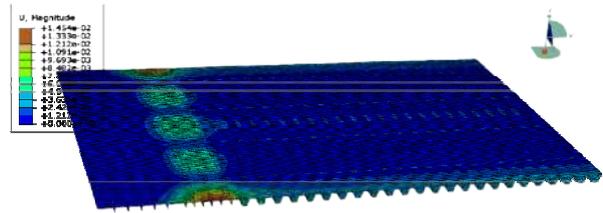


图四 加载横向焊缝温度数值后的顶板位移云图

### 参考文献

[1]Hyeong J P, Hwan S K, Won R K, et al.A Study on the Bead Shape and Changing Material Properties Depending on the Welding Position in P-GMAW[J].Journal of Welding and Joining, 2019, 37 ( 4 ): 333-338.  
 [2]戴玲,姜永正,杨国平,等.焊接工艺参数对 Q345 厚板 L 形接头焊接温度场的影响[J].电焊机, 2023, 53 ( 06 ): 62-69+110.  
 [3]孙志鹏,卢玉秀,翟永军,等.T 形接头焊接过程的数值模拟[J].金属加工 ( 热加工 ), 2024 ( 02 ): 38-41.  
 [4]梁艳.考虑温度场影响的钢结构焊接梁柱节点有限元分析[D].青岛理工大学, 2012.  
 [5]方洪渊,王文先.焊接结构学第 2 版[M].机械工业出版社, 2019.

### 5.2、方案二模拟



图五 方案二顶板位移云图

由上图可见,由于对顶板的加热区域呈现一种间断式的方式,顶板整体的变形平缓,仅在接近边箱区域因模型缺乏一定的约束产生了 1.45cm 左右的向下变形。

除去边箱区域的少约束区域的变形,顶板其他区域的变形情况最大为 1mm,对比图二十与图十可知方案二顶板与隔板接缝处的位移传递较小,且大部分位移为 0.2mm-0.3mm 且成分段式分部,并无区域集中现象,方案一的位移大部分为 0.4mm-0.6mm 且集中于顶板与隔板焊缝处可见在位移分布上方案二分布较均匀。

### 6、各方案对比

方案一:避免了现场仰焊,但整体增加现场的焊接工作量,且焊后还需做涂装覆盖,箱梁整体拼装时间延长,对于整体变形与顶板单元的整体平整度不友好。

方案二:增加了现场作业的难度但减少了现场焊接作业的数量,对于顶板的变形控制能够得到更好的控制,减少了现场钢梁拼装与后续工序的工作时间,对于箱梁整体一致度和位置控制来说应该是友好的。

而从工艺方面考虑,方案二中的现场仰焊虽然工艺难度比较大,但也存在一定的焊缝合格率。在方案二工程量为其余方案的一半的数量关系下,加强管理和监管在质量上能够获得一定的保证且在质量和时间的平衡上应该能够得到较好的结果。