

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.017

## 剪切变形对制造线形和安装线形的影响

王金,陈常松\*

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为了研究剪切变形对悬臂拼装钢箱梁桥主梁制造线形和安装线形的影响,更好地设计成桥状态。该文通过有限元方法计算钢箱梁截面的剪应力不均匀系数,并与钢箱梁板壳单元实体模型进行对比。结果表明:有限元软件计算的剪应力不均匀系数精确可靠,经过简单的模型计算,指出剪切变形使得主梁制造线形和主梁安装线形发生改变,忽视剪切变形会影响新旧梁段上、下翼板的拼装缝,最终影响成桥线形的平顺性;对比采用悬臂拼装的某大跨度斜拉桥考虑剪切变形前、后主梁制造线形和主梁安装线形的变化,指出剪切变形对制造线形和安装线形的重要性。

**关键词:**桥梁工程;钢箱梁;制造线形;安装线形;悬臂拼装;剪切变形

**中图分类号:**U445.4

**文献标志码:**A

### 0 引言

钢箱梁强度高、自重小、材料利用效率高,便于工厂预制现场安装,适用于快速施工,因此被广泛应用于大跨度桥梁的设计建造中<sup>[1-4]</sup>。斜拉桥常见钢箱梁节段预制、悬臂拼装施工监控涉及设计线形、制造线形和安装线形的确定。斜拉桥悬臂拼装施工监控任务中,实际成桥线形与设计线形相吻合非常重要,其最直接的影响因素是主梁制造线形与安装线形的计算<sup>[5-10]</sup>。

目前,已有许多学者对主梁制造线形与安装线形的计算进行了研究。李乔<sup>[11]</sup>以简单的三段悬臂拼装的悬臂梁模型介绍了使用切线初始位移法和零初始位移法确定制造线形和安装线形的方法;周潇<sup>[12]</sup>通过两端悬臂梁模型详细介绍了制造线形与安装线形的区别和联系;陈常松<sup>[13]</sup>综合考虑了拉索垂度效应、梁柱效应、大位移效应以及混凝土收缩徐变等非线性因素影响,建立了求解斜拉桥施工控制参数的非线性正装迭代法,并以苏通长江大桥为例计算了主梁的制造线形和安装线形;陈应高<sup>[14]</sup>也以苏通长江大桥为背景,采用不同方法计算对比了主梁的无

应力线形;李凯乐<sup>[15]</sup>采用类似的方法计算了荆岳长江大桥的无应力线形。在大跨度桥梁的科学研究中主要集中于参数敏感性分析、误差分析以及参数和误差的识别研究,主梁的刚度误差是影响主梁线形的重要因素<sup>[16]</sup>。叶再军<sup>[17]</sup>根据无应力状态法确定斜拉桥二次调索索力。由于扁平钢箱梁的翼板相对较宽,其剪切变形的影响不可忽略,考虑剪切变形的影响时对主梁的刚度有一定的削弱作用。因此,本文将重点研究剪切变形对主梁制造线形和安装线形的影响。

### 1 制造线形和安装线形

设计线形就是桥梁最终达到设计状态时的线形;制造线形是指主梁在制造阶段时无应力状态下的线形;安装线形是指桥梁按照预定的工况施工时每个新拼装梁段自由端连线形成的线形。

为方便计算分析,本文以简单的三节段悬臂梁为例(图1),在线弹性范围内,叠加原理适用。主梁截面参数按某斜拉桥钢箱梁截面取用,设计线形就是水平线(节点竖坐标为0),1<sup>#</sup>梁为吊车起吊定位,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>梁为桥面吊机起吊悬臂拼装,忽略吊机重量。

收稿日期:2022-10-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678070)

作者简介:王金,男,硕士研究生.E-mail:wangjin233666@163.com

\*通信作者:陈常松,男,博士,教授.E-mail:chenchangsong654@163.com

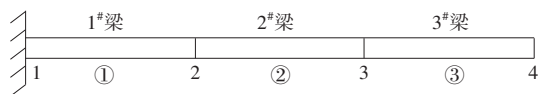


图1 悬臂梁计算模型

将悬臂梁分为8个工况施工,具体为:① 1#梁安装定位;② 1#梁计算自重;③ 桥面吊机起吊2#梁,2#梁梁重以集中力和力矩的形式作用于已安装梁段的悬臂端;④ 2#梁拼装定位;⑤ 2#梁计算自重;⑥ 桥面吊机起吊3#梁,3#梁梁重以集中力和力矩的形式作用于已安装梁段的悬臂端;⑦ 3#梁拼装定位;⑧ 3#梁计算自重,达到设计状态。

### 1.1 制造线形的计算

按照切线初始位移法,在悬臂施工过程中新梁段沿前一梁段自由端的切线方向安装。

$$H_m = H_c - H_1 \quad (1)$$

式中: $H_m$ 为制造线形; $H_c$ 为设计线形; $H_1$ 为按切线初始位移法计算的节点竖向累积位移。

使用桥梁结构分析有限元软件BDCMS计算,得到各节点的竖向累积位移如表1所示。

表1 按切线初始位移法计算的节点竖向累积位移

节点	竖向累积位移/mm	节点	竖向累积位移/mm
1	-0.0	3	-58.4
2	-18.5	4	-104.4

按式(1)将表1中节点累积竖向位移反号加在设计线形上,即可得到主梁的制造线形。

### 1.2 安装线形的计算

按照零初始位移法,在悬臂施工过程中新梁段自由端按设计位置安装。

$$H_i = H_c - H_0 \quad (2)$$

式中: $H_i$ 为安装线形; $H_0$ 为按零初始位移法计算的节点竖向累积位移。

使用桥梁结构分析软件BDCMS计算,得到各节点的竖向累积位移如表2所示。

表2 按零初始位移法计算的节点竖向累积位移

节点	竖向累积位移/mm	节点	竖向累积位移/mm
1	0.0	3	-39.1
2	-18.5	4	-1.3

按式(2)将表2中节点累积竖向位移反号加在设计线形上,即可得到主梁的安装线形。

## 2 剪切变形对制造线形和安装线形的影响

### 2.1 剪应力不均匀系数的确定

扁平钢箱梁由于其宽高比大的特点,其剪切变形的影响不可忽略。计算常见简单截面剪应力不均匀系数的方法有Cowper推导的公式<sup>[18]</sup>、施炳华推导的公式<sup>[19]</sup>等,这些方法大多基于能量原理推导得到,对于简单截面可以直接使用这些公式。但是对于实际工程中的钢箱梁截面,由于存在桥面横坡、截面形状不规则、板件存在各种形式的加劲构造等原因,截面剪应力分布非常复杂,不易精确计算剪应力不均匀系数。随着计算机技术的进步与发展,有限元软件可以通过离散化复杂的截面构造,计算截面特性,包括截面的剪应力不均匀系数。Ansys软件基于能量原理通过有限元计算可以得到任意截面的截面特性,本文采用Ansys软件,导入CAD中的已知截面,通过合理划分网格来计算钢箱梁截面的剪应力不均匀系数。

某斜拉桥主梁的钢箱梁截面构造如图2所示。

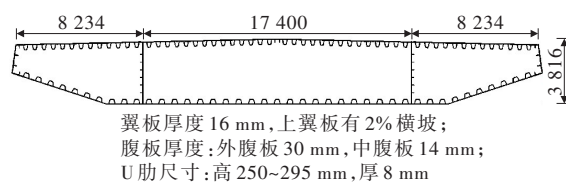


图2 某斜拉桥钢箱梁截面(单位:mm)

按此方法,通过Ansys软件计算得到该钢箱梁截面的剪应力不均匀系数为22.1。为了检验和确定计算结果的可靠性,使用Ansys软件建立悬臂钢箱梁的板壳单元实体模型,与桥梁结构分析软件BDCMS考虑剪切变形影响的经典梁单元模型对比验证。Ansys采用Shell63单元建模,该单元为可定义厚度的四节点壳单元,完全依据实际构造建立模型,单箱三室钢箱梁,为了结构的整体性,防止横截面产生过大的畸变,每隔3 m设置一道横隔板,上、下翼板、中腹板、外腹板以及横隔板都有相应的加劲构造。分别建立悬臂长度为15 m、30 m、45 m和60 m的实体悬臂梁模型,在距悬臂端最近的横隔板与腹板相接处施加总计4 000 kN的荷载。实体模型的竖向位移剖面图示例(30 m悬臂梁为例)如图3所示。

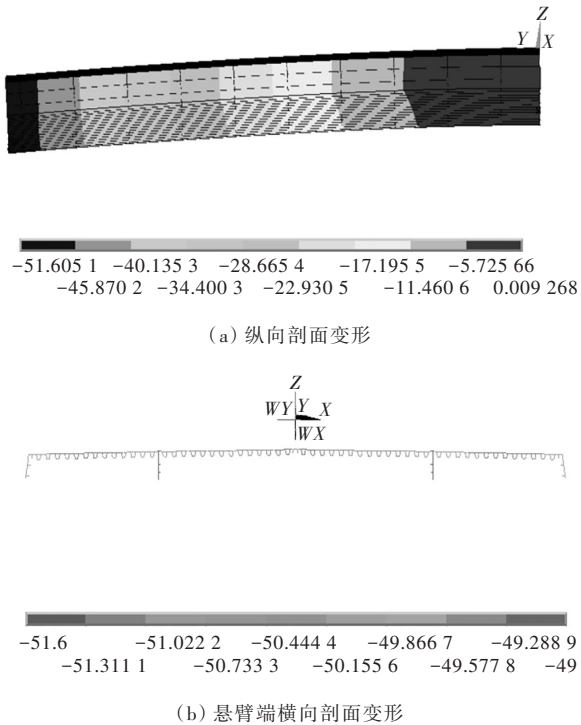


图3 实体悬臂梁竖向变形图(单位:mm)

从图3可以看出:竖向位移变化均匀,横截面无明显畸变,结构变形可以与经典梁单元对比验证。由于实体模型位移变化均匀,可取悬臂端截面节点竖向位移平均值与BDCMS软件考虑剪切变形影响的经典梁单元模型对比,结果如表3所示。

表3 悬臂梁实体模型与经典梁单元模型竖向位移对比

悬臂长度/ m	BDCMS经典梁单元/mm		Ansys板壳单元/ mm
	不考虑剪切	考虑剪切	
15	-4.2	-12.3	-11.7
30	-35.2	-51.8	-50.5
45	-120.5	-145.5	-141.6
60	-287.5	-321.1	-313.2

由表3可知:不考虑剪切变形影响时,经典梁单元模型节点竖向位移与实体模型相比误差较大,按剪应力不均匀系数为22.1修正剪切影响后,经典梁单元模型节点竖向位移与实体模型十分接近。因此可得到结论:①扁平钢箱梁的剪切变形影响不可忽略;②使用Ansys软件计算的截面剪应力不均匀系数精确可靠。

## 2.2 剪切变形对主梁制造线形和安装线形的影响

在得到可靠的剪应力不均匀系数后,按此系数修正前文三段悬臂梁模型的主梁制造线形与安装线形。设计线形和考虑剪切变形影响前、后的主梁制

造线形与主梁安装线形对比如表4所示。

表4 考虑剪切变形影响的各线形对比

悬臂长度/m	设计线形/mm	制造线形/mm	考虑剪切制造线形/mm	安装线形/mm	考虑剪切安装线形/mm
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0	18.5	34.4	18.5	34.4
30	0	58.4	84.0	39.1	55.1
45	0	104.4	133.1	1.3	4.5

根据表4的数据绘制线形图如图4所示。

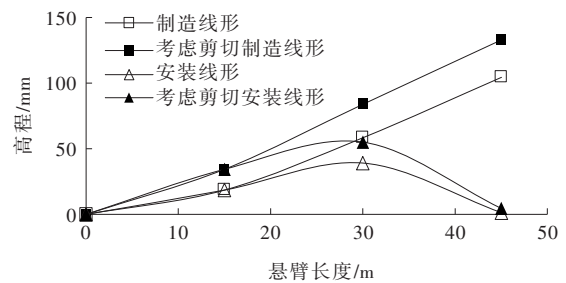


图4 考虑剪切变形影响的线形对比

由图4可知:无论是否考虑剪切变形的影响,主梁制造线形与主梁安装线形均是不同的线形概念,两种线形不可混淆。制造线形是在工厂预制时实际使用和存在的线形,而安装线形只是新梁段安装定位时悬臂自由端的连线,并不同时存在。在工厂预制胎架上按照正确的制造线形制造的主梁,在悬臂施工过程中新拼装梁段按预制胎架设置的上、下翼板拼装缝拼装时,新梁段自由端自然会达到安装线形中此节点的安装位置。剪切变形对主梁制造线形和主梁安装线形均有影响,由于剪切变形对主梁刚度有削弱作用,本例中的悬臂梁各节点累积位移均有增大,修正前、后的线形在各点均有变化,且变化大小不同。如果按未考虑剪切变形的影响计算主梁制造线形和安装线形,在主梁悬臂拼装过程中将出现一些问题:①新安装主梁节段自重后,悬臂自由端变形与计算不符,产生误差;②上述误差如果没有采取合适手段消除,新拼装梁段自由端无法达到指定的安装位置,只能依靠调整下一梁段或几个梁段上、下翼板预制的拼装缝宽度来实现,例如本例1<sup>#</sup>梁与2<sup>#</sup>梁顶、底板焊缝宽度需调整3mm,这一数值随梁段的高跨比增大而增大,调整量过大时会造成焊缝质量降低、主梁存在附加纵坡使得设计纵坡和线形

不符等问题。

### 2.3 工程实例

将第一轮计算的节点累积位移反号叠加到设计线形上,可以得到解决线性问题的主梁制造线形和主梁安装线形,当需要考虑混凝土收缩徐变以及涉及非线性问题的求解时,一个轮次的计算无法闭合,解决此问题可以使用正装迭代的方法,进行多次迭代计算直至达到设置的收敛要求,得到计算闭合的主梁制造线形和主梁安装线形。

某主跨 920 m 的特大跨度双塔混合梁斜拉桥,索塔为混凝土结构,主桥北边跨总跨度 300 m,采用预应力混凝土箱梁,中跨和南边跨为钢箱梁。计算采用桥梁结构分析软件 BDCMS 进行建模:全桥共划分为 581 个节点,706 个单元。其中斜拉索的单元类型为两端带刚臂的悬链线索单元,主塔和主梁的单元类型为梁单元。分别采用切线初始位移法和零初始位移法以设计坐标作为第一轮初始构形正装迭代计算此斜拉桥的主梁制造线形和主梁安装线形,对比主梁计入剪切变形前、后各线形变化(图 5),由于桥梁跨度很大,桥面纵坡影响下计入剪切变形前、后线形差值相对高程变化很小,以差值的形式在图 6 中单独画出。

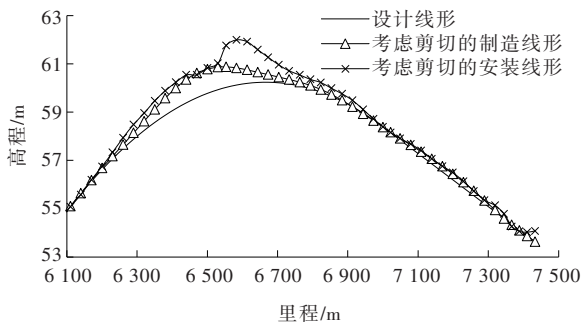


图 5 计入剪切变形影响的主梁制造线形与主梁安装线形

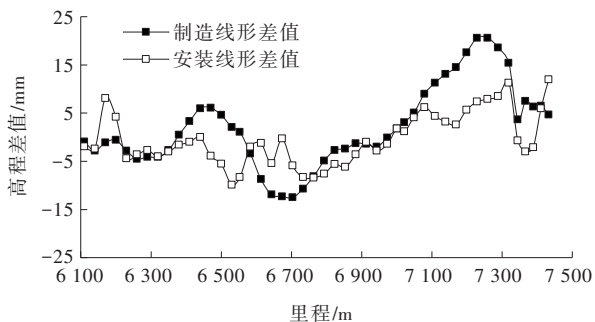


图 6 主梁制造线形与主梁安装线形在计入剪切变形前、后的差值

由图 5、6 可知:计算得到的主梁制造线形即为主梁无应力线形,是一条平滑的曲线;主梁安装线形与桥梁的施工工况紧密相关,线形不规则,为每个新梁段安装时新上梁段单元的节点连线,不是同时存在,而是一条虚拟的线形。剪切变形对主梁制造线形和主梁安装线形均有影响,但影响量不同,差值为  $-15 \sim 25$  mm,这也从另一个角度说明了主梁制造线形和主梁安装线形是不同的概念,这些线形的误差尤其是变化剧烈的位置将会一定程度地影响施工阶段悬臂拼装上、下翼板的缝宽以及成桥后的线形和受力。

若桥梁施工以索力控制为主时,不计剪切变形影响会造成主梁成桥线形与计算不一致,在施工过程中体现为梁端拼接不平顺;若桥梁施工以斜拉索无应力索长控制或主梁线形控制为主时,则会造成主梁成桥状态受力与计算不一致,在施工过程中体现为索力不均匀,图 7 为该斜拉桥主梁成桥状态弯矩在计入剪切变形前、后的差值曲线。

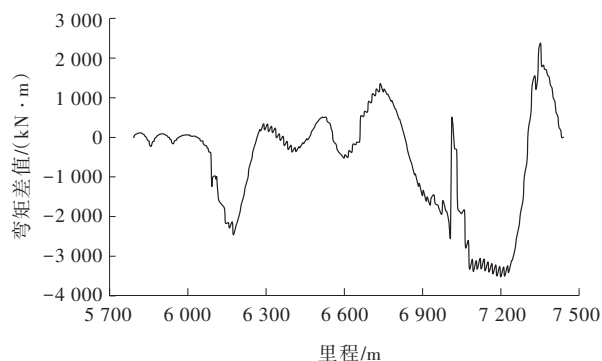


图 7 主梁成桥状态弯矩计入剪切变形前、后的差值

由图 7 可知:弯矩差值最大值约为  $4000$  kN·m,出现在主塔左、右侧及辅助墩左、右侧区域,以次跨区域变化最明显。

施工监控计算中很重要的一项是参数敏感性分析<sup>[20]</sup>和误差识别<sup>[21]</sup>,其中主梁刚度的误差与本文的研究内容有相交的地方,是悬臂拼装钢箱梁斜拉桥计算主梁制造线形和主梁安装线形不可忽略的重点。

## 3 结论

(1) 悬臂拼装桥梁的主梁制造线形和主梁安装



线形是不同的概念。主梁制造线形是梁段无应力状态的线形,设计状态确定的情况下是唯一的;主梁安装线形的节点不同时存在,线形与具体的施工工况对应。

(2) 通过与板壳单元实体模型对比,扁平钢箱梁的剪切变形不可忽略,使用有限元方法计算的截面剪应力不均匀系数精确可靠。

(3) 剪切变形对悬臂拼装钢箱梁桥的主梁制造线形和主梁安装线形有不可忽略的影响,考虑剪切变形影响后,节段拼装焊缝质量和成桥线形的平顺性得以改善。

#### 参考文献:

- [1] 王宇.城市大跨度连续钢箱梁跨地道施工技术研究[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2021年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册),《施工技术(中英文)》编辑部,2021.
- [2] 付思斌,张胜,周邦耀,等.城市高架大跨径钢箱梁高低吊施工技术[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2021年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册),《施工技术(中英文)》编辑部,2021.
- [3] 左雁,彭云涌,万小龙.场地受限条件简支钢箱梁不等跨顶推对策及受力分析[J].中外公路,2021,41(6):137-140.
- [4] 周文博,许凯峰,杨立群,等.大跨径自锚式悬索桥钢箱梁制造技术[J].公路交通科技,2021,38(S1):96-100.
- [5] 张志伟.斜拉桥悬臂施工结构分析及控制对策研究[D].济南:山东交通学院,2021.
- [6] 丛云跃,康厚军.斜拉桥悬臂施工阶段的动力学行为研究[C]//中国力学学会动力学与控制专业委员会,中国振动工程学会非线性振动专业委员会.第十八届全国非线性振动暨第十五届全国非线性动力学和运动稳定性学术会议(NVND2021)摘要集,2021.
- [7] 温东昌,高树威,杨焯,等.混合梁斜拉桥双悬臂施工塔梁临时固结有限元分析[J].公路与汽运,2021(1):104-108,150.
- [8] 戴颖.组合梁斜拉桥主梁悬臂施工过程的体系转换研究[D].长沙:长沙理工大学,2021.
- [9] 林超.大跨径斜拉桥悬臂施工线型控制技术探讨[J].珠江水运,2021(3):51-52.
- [10] 张亚海,朱斌,郭宝圣,等.大跨钢箱梁斜拉桥施工工期结构参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5):70-75.
- [11] 李乔.悬臂拼装桥梁制造与安装线形的确定[C]//第十六届全国桥梁学术会议论文集(上册),2004:304-309.
- [12] 周潇.悬臂拼装斜拉桥安装线形与制造线形的区别和联系[J].公路交通技术,2016,32(5):66-69.
- [13] 陈常松.超大跨度斜拉桥施工全过程几何非线性精细分析理论及应用研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [14] 陈应高.几何控制法在大跨度钢箱梁斜拉桥施工控制中的应用[D].成都:西南交通大学,2008.
- [15] 李凯乐.大跨钢斜拉桥主梁无应力构形法研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [16] 李玉耀.大跨度钢箱梁斜拉桥施工控制误差研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [17] 叶再军.无应力状态法在确定斜拉桥二次调索索力中的应用[J].中外公路,2016,36(6):167-170.
- [18] COWPER G R.The shear coefficient in Timoshenko's beam theory[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(2): 335-340.
- [19] 施炳华.常用截面剪应力分布不均匀系数的计算公式[J].建筑结构学报,1984(2):68-72.
- [20] 张亚海,朱斌,郭宝圣,等.大跨钢箱梁斜拉桥施工工期结构参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5):70-75.
- [21] 卜一之,陈应高,贾栋.悬臂拼装斜拉桥几何线形误差分析方法研究[J].中外公路,2008,28(6):92-94.