

# 悬拼施工中斜拉桥分离式钢边箱主梁的 剪力滞效应分析

谢芬

(湖南中创工程检测有限公司, 湖南 长沙 410008)

**摘要:** 以荆岳长江公路大桥为工程实例, 采用 ANSYS 有限元软件建立不同悬拼长度时斜拉桥主梁分离式钢边箱的区段空间有限元模型, 对悬臂拼装施工推进过程中钢边箱梁截面的剪力滞效应进行计算, 分析悬臂拼装施工过程中斜拉桥主梁分离式钢边箱截面顶、底板的法向正应力和剪力滞效应的分布规律。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 悬臂拼装施工; 分离式钢边箱梁; 剪力滞效应

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0089-04

由于扁平薄壁钢箱加劲梁整体性强、抗风性能优越, 且有较小的截面高度和重量刚度比, 在较大跨度缆索体系桥梁结构中应用非常普遍。随着大跨度桥梁的日益增多, 以传统薄壁钢箱梁截面为基础, 创新出了多箱组合式扁平钢箱梁截面形式, 其中分离式钢边箱截面以其结构自重小、截面抗扭性能和抗弯性能好的优点而越来越多地被应用于特大跨度斜拉桥中。但在悬臂拼装施工过程中, 斜拉桥主梁梁端截面同时承受压力和弯曲, 钢边箱梁截面会出现剪力滞后现象。该文以荆岳长江公路大桥为例, 利用 ANSYS 软件建立斜拉桥钢边箱主梁在悬臂拼装不同长度时的空间有限元模型, 对各工况下不同位置处钢边箱梁截面剪力滞效应进行计算分析。

## 1 工程背景

荆岳长江公路大桥为平行双索面双塔不对称混合梁斜拉桥, 主梁与索塔为半漂浮连接结构, 跨度组合为  $(100+298) \text{ m}+816 \text{ m}+(80+2 \times 75) \text{ m}$ , 主桥主跨全长 816 m。主桥桥面宽 33.5 m, 斜拉索横向距离 35 m, 标准梁段斜拉索纵向距离 15 m, 钢边箱截面主要用于主桥的中跨和北边跨, 索塔横桥向为 H 形。

## 2 基本体系的选定及模型建立

### 2.1 基本体系的选定

荆岳大桥的主梁施工利用桥面吊机起吊钢主梁进行悬臂拼装。钢边箱主梁施工时, 先将塔端梁段临时固结, 每拼装完成一个梁端, 就在相应位置安装斜拉索并施加设计斜拉索索力, 该结构体系可等效

于一个伸臂梁结构, 且有着连续支承, 采用集中力模拟斜拉索的支撑条件, 处理后, 悬拼施工中的钢箱主梁可等效为一悬臂体系。因此, 采用悬臂体系作为分析的基本体系并建立三维空间计算模型。

选取钢边箱梁中的 A 类截面(见图 1)进行计算分析。一个 A 类钢边箱梁的标准梁段长为 15 m, 内轮廓高为 3.8 m, 全断面宽 38.5 m, 横隔板沿钢边箱主梁纵向间距为 3 m。分析模型分别选取北边跨跨中的 3 个梁段(NB10~NB12)、4 个梁段(NB10~NB13)、5 个(NB10~NB14)和 6 个梁段(NB10~NB15)作为典型施工工况, 其悬臂长度分别为 45、60、75 和 90 m。

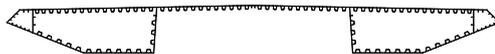


图 1 分离式双边箱梁截面构造图

### 2.2 空间有限元模型的建立

为使模型与施工过程中钢边箱主梁的实际受力情况尽可能吻合, 利用 ANSYS 建立钢边箱主梁空间有限元模型时, 分离式钢边箱的顶板、底板、腹板、横隔板等采用 Shell63 单元模拟(ANSYS 中的板壳单元), 钢主梁的风嘴、小纵梁、U 肋等小构造部位也全部按真实梁段建模。图 2 为 1/2 基本梁段, 图 3 为悬臂基本结构计算模型。

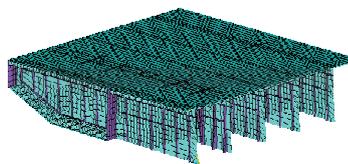


图 2 1/2 基本梁段

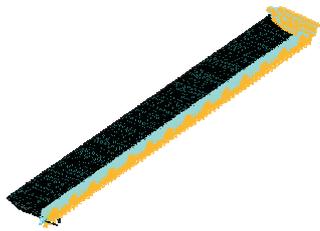


图3 悬臂基本结构计算模型

### 2.3 荷载分析

(1) 恒载。该桥的钢边箱主梁在悬臂拼装过程中承受的恒荷载主要有以下2种:1) 钢边箱主梁自重(以体积力的形式在建模时予以考虑);2) 已拼装梁段的斜拉索索力(索力值可取二张索力值,并以面荷载的形式加载于锚固斜拉索的外腹板处),其加载见图4。

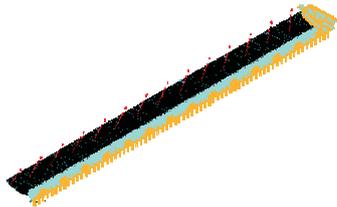


图4 斜拉索索力的加载

(2) 临时荷载。桥面吊机是钢主梁在悬臂拼装施工中的主要临时荷载,建模时应考虑最不利的桥面吊机荷载(桥面吊机本身重量和施工起吊段钢箱梁的重量之和),并将该最不利临时荷载以面荷载的方式施加在桥面吊机位于钢箱梁顶板的前、后锚固点处(见图5)。

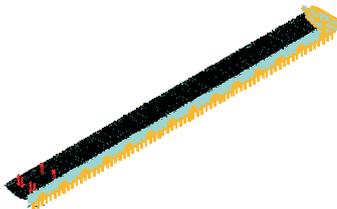


图5 桥面吊机荷载的加载

## 3 计算结果分析

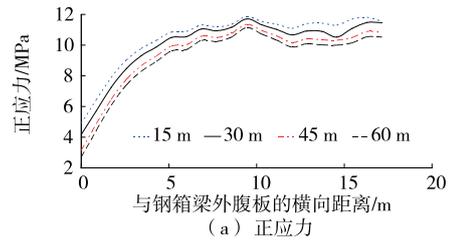
按拼装施工过程中不同的施工工况,选取施工梁段长分别为15、30、45、60 m的4个典型工况进行计算分析。为避免简化后的边界条件对分析结果产生影响,根据圣维南原理,取距边界15 m以后的梁段进行计算分析。

分离式钢边箱梁为对称截面,为减少计算量,仅提取1/2截面顶、底板进行分析,定义钢箱梁的外腹

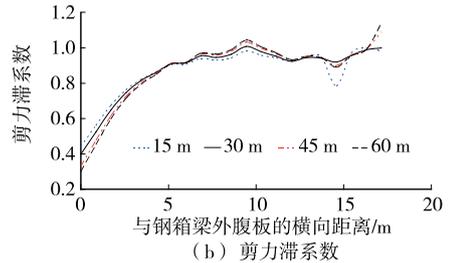
板线(底板为外斜腹板与底板交点的正交线)为Y轴,与Y轴正交且远离钢箱梁外腹板的横向为X轴。应力为负表示压应力。

### 3.1 各工况时桥面吊机作用下梁段跨中截面的剪力滞效应

不同施工悬臂长度时桥面吊机荷载作用下梁段跨中( $Z = -10.95$  m)钢边箱梁截面顶、底板的正应力和剪力滞系数分布分别见图6、图7。

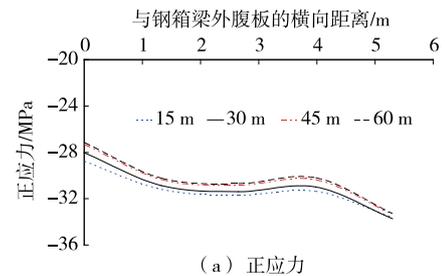


(a) 正应力

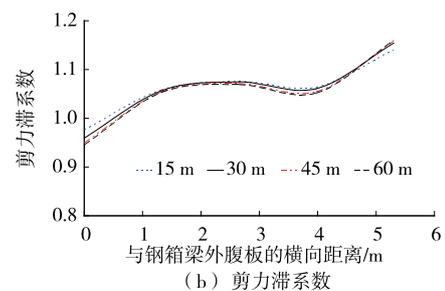


(b) 剪力滞系数

图6 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下跨中截面顶板的正应力和剪力滞系数



(a) 正应力



(b) 剪力滞系数

图7 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下跨中截面底板的正应力和剪力滞系数

由图6可知:1) 在桥面吊机作用下,跨中截面15 m位置处钢边箱梁顶板正应力值最大,随着悬臂拼装梁段不断增长,钢边箱梁顶板的正应力逐渐减小。2) 所有工况下钢边箱梁顶板的外腹板处均出

现非常明显的负剪力滞效应,最大剪力滞系数达到0.30,出现在60 m钢箱梁顶板外腹板处。但在内腹板处,随着悬拼长度的增加,该处负剪力滞效应逐渐过渡到正剪力滞效应。悬拼长度大于30 m的梁段,随着远离内腹板,剪力滞系数分布趋于平稳,为1.01~1.04。

由图7可知:1)钢箱梁底板的法向应力为压应力,且随着悬臂拼装梁段数量的增多,钢箱梁底板正应力变小较快,施工至45 m时钢箱梁底板的正应

力随着梁段增长趋于平稳。2)钢边箱底板在与外斜腹板相接处出现负剪力滞效应,最大剪力滞系数为0.97。随着远离外斜腹板,逐渐出现正剪力滞效应,在内腹板处正剪力滞效应最严重,剪力滞系数为1.17。

不同悬臂拼装长度下,桥面吊机作用下跨中梁段钢箱梁截面顶、底板的剪力滞效应沿截面横向均呈现从负剪力滞效应逐渐过渡到正剪力滞效应的现象,各工况下对应截面的剪力滞系数见表1。

表1 各工况下对应截面的剪力滞系数

施工长度/m	顶板的剪力滞系数			底板的剪力滞系数		
	外腹板处	内腹板处	顶板中心处	外斜腹板处	底板中点处	内腹板处
15	0.45	0.98	0.99	0.97	1.08	1.14
30	0.40	1.01	1.01	0.96	1.08	1.16
45	0.34	1.03	1.09	0.95	1.07	1.17
60	0.30	1.04	1.11	0.94	1.07	1.17

### 3.2 各工况时桥面吊机作用下后锚点前端截面的剪力滞效应

不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点前端( $Z = -17.7$  m)钢边箱截面顶、底板的正应力和剪力滞系数分别见图8、图9。

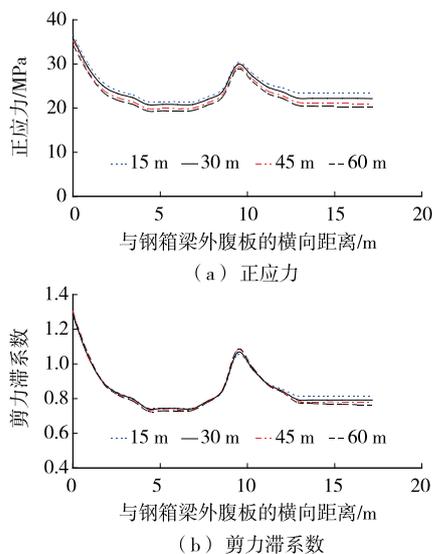


图8 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点前端钢边箱截面顶板的正应力和剪力滞系数

由图8可知:1)桥面吊机作用下,后锚点前端截面15 m位置处钢箱梁顶板的正应力值最大,随着拼装梁段的生长,钢边箱截面顶板的正应力逐步减小。2)在桥面吊机作用下,后锚点前端钢边箱截面顶板在外腹板和内腹板处均呈现明显的正剪力滞效应,剪力滞系数在外腹板处达到最大值1.3,且4

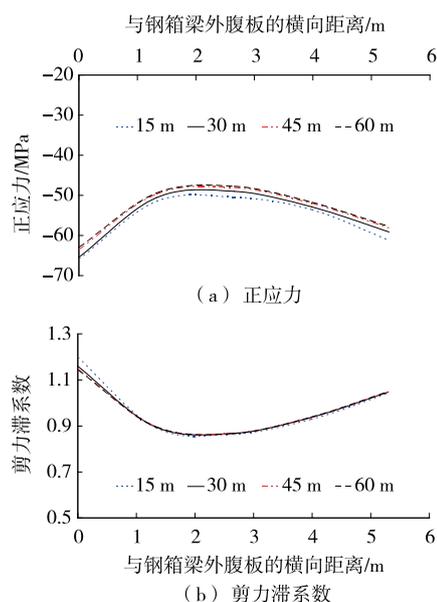


图9 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点前端钢边箱截面底板的正应力和剪力滞系数

种不同施工长度下顶板处的剪力滞系数相差较小,非锚固区的剪力滞系数为0.78~1.09。

由图9可知:1)桥面吊机作用下,后锚点前端截面15 m位置处钢箱梁底板的正应力值最大,随着拼装梁段的生长,钢边箱截面底板的法向应力逐渐减小。悬拼梁段长度大于45 m时,梁段钢箱梁底板的正应力基本趋于稳定。2)在桥面吊机作用下,后锚点前端钢边箱截面底板的外斜腹板和内腹板处均呈现明显的正剪力滞效应,底板的剪力滞系数为0.87~1.2(见表2)。

表2 各工况时桥面吊机作用下后锚点前端截面的剪力滞系数

施工长度/m	顶板的剪力滞系数			底板的剪力滞系数		
	外腹板处	内腹板处	顶板中心处	外斜腹板处	底板中点处	内腹板处
15	1.28	1.05	0.81	1.20	0.87	1.05
30	1.28	1.07	0.80	1.16	0.87	1.05
45	1.29	1.08	0.79	1.16	0.87	1.05
60	1.30	1.09	0.78	1.15	0.87	1.05

3.3 各工况时桥面吊机作用下后锚点后端截面的剪力滞效应

不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点后端(Z=-18.3 m)钢边箱截面顶、底板的正应力和剪力滞系数分别见图10、图11。

由图10可知:1)桥面吊机作用下,后锚点后端截面15 m位置处钢箱梁顶板的正应力值最大,随着拼装梁段的增加,钢边箱截面顶板的正应力逐步减小。2)在桥面吊机作用下,后锚点后端钢边箱截面顶板的外腹板和内腹板处均呈现明显的正剪力滞效应,且4种工况下顶板各处的剪力滞系数变化不大,截面顶板的最大剪力滞系数在外腹板处达到最大值1.97,随着逐渐离开外腹板,剪力滞系数趋于稳定,为

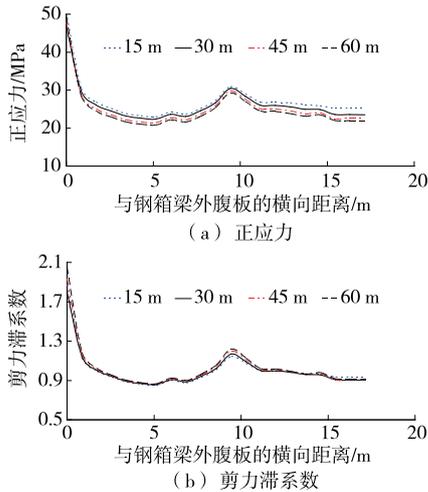


图10 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点后端钢边箱截面顶板的正应力和剪力滞系数

表3 各工况下桥面吊机作用下后锚点后端截面的剪力滞系数

施工长度/m	顶板的剪力滞系数			底板的剪力滞系数		
	外腹板处	内腹板处	顶板中心处	外斜腹板处	底板中点处	内腹板处
15	1.80	1.18	0.98	1.09	0.83	1.02
30	1.80	1.19	0.97	1.05	0.83	1.02
45	1.93	1.20	0.97	1.03	0.82	1.01
60	1.97	1.21	0.97	1.02	0.82	1.01

4 结论

(1) 在悬拼吊装施工中,悬臂段跨中区段的钢

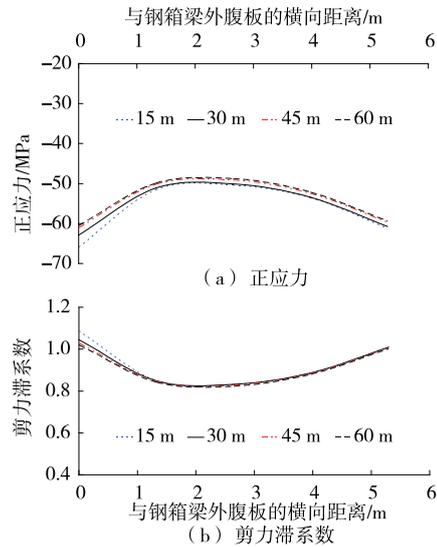


图11 不同施工悬臂长度时桥面吊机作用下后锚点后端钢边箱截面底板的正应力和剪力滞系数

0.97~1.2。

由图11可知:1)桥面吊机作用下,后锚点后端截面15 m位置处时钢箱梁底板的正应力值最大,由于拼装梁段不断增多,钢边箱截面底板的正应力逐渐减小。梁段长大于45 m时,钢箱梁底板的正应力变化趋于稳定。2)在桥面吊机作用下,后锚点后端钢边箱截面底板的外斜腹板和内腹板处均出现明显的正剪力滞效应,截面底板的剪力滞系数为0.82~1.09,且4种工况下各截面底板的剪力滞系数变化不大(见表3)。桥面吊机的后锚点附近,后端钢边箱截面顶板的剪力滞效应比前端截面更严重。

边箱截面顶板的外腹板和内腹板处均呈现明显的负剪力滞效应,截面顶板沿横向逐渐远离外腹板后,其

(下转第96页)

长大隧道、桥梁、高边坡等结构变形监测中得到应用。随着解算技术的不断提高,北斗系统的静态监测精度已可满足施工精度毫米级的要求。该文采用北斗定位系统设计预制框架顶推施工监控系统,通过自主开发的智能云盒 DTU 数据实时传输,分析并给出安全预警信息,实现远程信息化安全监控。相较于传统人工采集,该系统效率更高、时间更短,通过数据的自动分析处理,反馈与分析速度得到大幅提升,可为施工过程决策提供及时可靠的依据。

**参考文献:**

[1] 李雷.GPS 桥梁监测系统的构建及其在某大桥中的应用研究[J].公路工程,2019,44(1):131-134.  
 [2] 刘艳杰,张红,刘旭东.基于精确大地测量技术对公路桥梁结构变形监测研究[J].公路工程,2016,41(5):176-179.  
 [3] 中交第一公路工程局有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T F50-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.  
 [4] 冯生华.城市地道桥顶入法施工[M].北京:中国建筑工业出版社,1982.  
 [5] 张云龙.北斗双天线高精度变形监测关键技术及其应用研究[D].北京:北京交通大学,2018.  
 [6] 陈力,刁心宏,杨守兴,等.框架桥下穿既有铁路路基沉降控制标准研究[J].现代隧道技术,2019(2):158-161.

[7] 杨加斌,崔高峰,赵海,等.基于北斗的铁路构筑物安全监测系统及应用[J].卫星应用,2019(7):134-136.  
 [8] 张兵强,罗生虎,曹海波,等.GPS 在山区高速公路边坡监测中应用[J].西安科技大学学报,2014,34(6):737-741.  
 [9] 毛坤海,龚宏华.框架桥顶进中 D24 m 施工便梁的改进应用[J].铁道建筑,2011(8):9-11.  
 [10] 朱健身,陈东杰.城市地道桥顶进施工技术及其工程实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.  
 [11] 刘鹏,周捷.某连续梁桥顶推法拆除施工过程仿真研究[J].公路与汽运,2020(3):124-128.  
 [12] 李传习,陈卓,董创文,等.变曲率竖曲线钢箱梁顶推过程受力分析[J].公路与汽运,2019(2):116-120+125.  
 [13] 肖光清.大跨度连续刚构桥施工监控线形分析[J].公路与汽运,2019(6):103-106.  
 [14] 王晓静.(72+128+72) m 预应力混凝土连续梁桥施工监控技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.  
 [15] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.  
 [16] 罗书舟,张谢东.窄幅大跨连续梁桥线形控制研究[J].公路与汽运,2019(3):128-131.

收稿日期:2020-01-13

\*\*\*\*\*

(上接第 92 页)

剪力滞效应迅速衰减;截面底板沿横向逐渐远离外斜腹板后逐渐过渡到内腹板处的正剪力滞效应。

(2) 在悬拼吊装施工中,随悬臂拼装长度的增加,分离式钢边箱截面的剪力滞效应沿主梁纵向的正 Z 轴方向出现由负剪力滞效应逐渐过渡到正剪力滞效应的现象。

(3) 在悬拼吊装施工中,后锚点前、后端截面的顶板和底板在内、外腹板位置均呈现明显的正剪力滞效应,但后端截面比前端截面大得多。

(4) 在悬拼吊装施工中,部分梁段的钢箱梁截面同时存在正剪力滞效应和负剪力滞效应。

(5) 在悬拼吊装施工中,钢边箱截面的外腹板处由于有斜拉索的锚固,钢箱梁顶板的剪力滞效应较严重,应引起注意,并采取必要的构造措施。

**参考文献:**

[1] 王雷,胡玉昆.扁平宽箱梁剪力滞计算分析[J].公路与

汽运,2005(3):95-97.

[2] 张士铎,邓小华.箱形薄壁梁剪力滞效应[M].北京:人民交通出版社,1998.  
 [3] 衣龙泉,刘凡.钢箱梁剪力滞效应的研究与有限元分析[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2008,21(3):10-13.  
 [4] 乔朋.斜拉桥扁平钢箱主梁剪力滞效应研究[D].西安:长安大学,2009.  
 [5] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.  
 [6] 张雪松.大跨径混凝土斜拉桥主梁剪力滞效应研究[D].上海:同济大学,2006.  
 [7] 蔡素军,张谢东,黄克超,等.混凝土箱梁施工阶段剪力滞效应分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(4):719-722.  
 [8] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

收稿日期:2020-05-07