

钢梁线形误差在组合梁斜拉桥中的传递研究

傅亚军¹, 刘浩², 陈常松¹, 王晶³

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430000;

3. 华设设计集团, 江苏 南京 210000)

摘要:为了研究钢梁的制造安装误差对钢—混组合梁斜拉桥施工过程中及成桥后线形的影响,基于无应力状态控制法的基本原理,推导了主梁无应力线形在整体和局部坐标系下的误差影响矩阵;对钢主梁在工厂制造的无应力长度误差和现场安装导致的无应力曲率误差进行了分析,对其在施工中引起的线形误差传递规律进行了研究。结果表明:钢梁的制造长度误差对后续梁段线形的影响会随着施工过程的进行而积累,具有非收敛性;梁段间安装夹角误差对标高误差的影响随着施工阶段的进行逐渐变小至趋于平稳,具有自收敛性;同时验证了钢梁长度误差在组合梁斜拉桥中对斜拉索索力及钢梁内力影响较小,对桥面板的内力基本没有影响。

关键词:组合梁斜拉桥;钢主梁;制造安装误差;传递

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

钢混组合梁斜拉桥近年来在理论研究及工程实践方面均取得了迅猛发展。它是通过抗剪连接键将钢主梁和混凝土桥面板连成整体共同抵抗压弯的一种构件^[1]。组合梁斜拉桥上部结构施工工艺由工厂全断面预制组合梁节段或者在施工现场先安装钢梁后安装预制桥面板^[2],这两种方式均通过湿接缝的滞后浇筑使钢—混组合结构形成整体受力。因为其优异的受力性能和较为合理的经济性使得组合梁的应用越发广泛。而桥梁领域对于大跨度钢桁架拱桥拼装误差及钢箱梁制造尺寸计算已有了较多研究^[3-4],在组合梁斜拉桥这方面的探索却较少。因此研究组合梁斜拉桥钢主梁的制造和安装误差对施工过程中及成桥线形的影响并及时进行误差识别与修正具有重要意义。

1 概述

1.1 工程简介

赤壁长江公路大桥为主跨720 m的双塔对称式钢混组合梁斜拉桥,通航孔主桥桥跨布置为(90+240+720+240+90) m。全桥组合梁中的钢主梁均为双边箱截面形式,桥型立面布置如图1所示。全桥采用主梁顺桥向共121个梁段,梁段长有8、8.9、12及16 m共4类^[5]。主梁梁段间上翼缘采用熔透焊,腹板、下翼缘板及加劲肋采用高强螺栓连接。主梁纵向

竖曲线通过梁段拼接缝上、下缝之间的间隙差来实现,主梁标准横断面如图2所示。

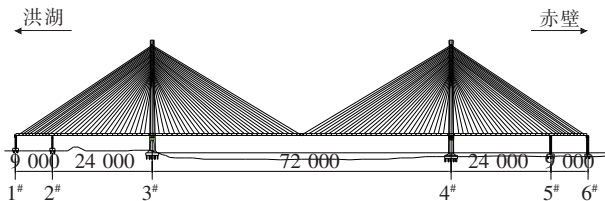


图1 桥型立面布置图(单位:cm)

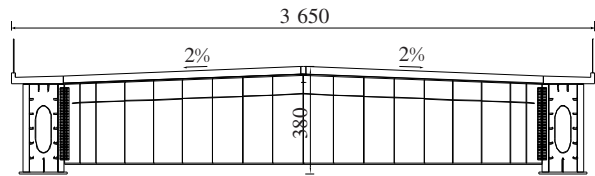


图2 标准主梁横断面图(单位:cm)

1.2 制造安装误差的来源及控制

主梁制造误差的产生原因主要包括制造加工方法、测量仪器精度、测量方法及温度环境等。梁段间夹角理论上由拼接板孔群间隙决定,拼接板孔群间隙制造误差即为夹角误差,但在实际拼装过程中新旧梁段的夹角可能存在较大的安装误差(制造夹角误差相对数值较小可以忽略不计)。故需在制造安装过程中进行几何控制并根据监测数据误差及时做出调整,在后续批次的箱梁制造或者安装过程中采取进一步的改进

收稿日期:2021-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678070)

作者简介:傅亚军,男,硕士研究生, E-mail: fuyajun00001@163.com

措施以减少这些误差对全桥目标线形的影响,使大桥的线形始终处于可控状态。该文仅考虑纵向钢梁长度制造及安装夹角误差传递对主梁线形的影响,且基于无应力状态控制法^[6]的基本原理,对制造安装误差在施工过程中及成桥后的变化规律进行探究。

1.3 计算模型

基于长沙理工大学研发的桥梁结构专用计算分析软件 BDCMS 建立杆系有限元模型对赤壁长江公路大桥的施工全过程进行正装模拟分析。该软件可以考虑结构的几何非线性特性和混凝土桥面板的收缩徐变^[7]。主塔墩、钢主梁及桥面板均采用梁单元模拟,斜拉索采用带刚臂的悬链线单元^[8]模拟索单元。钢梁单元和桥面板单元采用刚臂进行连接形成双层梁单元模拟组合梁刚度。

2 钢梁制造线形及误差传递

2.1 制造线形计算

制造线形可通过安装线形进行计算。主要思路是按设计相对位置确定钢梁的初次安装线形,一轮正装计算完成后将实际成桥与设计成桥的梁段节点坐标差反向修正安装线形,多次迭代后即可得到正确的安装线形,再根据安装线形推导制造线形。

梁段安装过程的线形变化如图 3 所示,当悬臂安装 $n-1$ 梁段时,新安装梁段与旧梁段的连接点为 $i-1$,节点坐标为 (x_{i-1}^0, y_{i-1}^0) ,此时悬臂端节点 i 的坐标为 (x_i^0, y_i^0) ,与水平方向的安装夹角为 α_{i-1} 。可得方程式:

$$\alpha_{i-1} = \arctg\left(\frac{y_i^0 - y_{i-1}^0}{x_i^0 - x_{i-1}^0}\right) \quad (1)$$

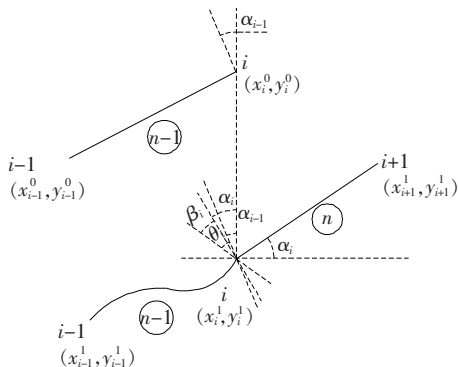


图 3 梁段安装线形示意图

在悬臂安装 n 梁段时,已安装梁段 $n-1$ 在各种外力作用下会发生一定变形, $n-1$ 梁段 i 端发生的转角位移为 θ_i ,此时 $i-1$ 节点的坐标值为 (x_{i-1}^1, y_{i-1}^1) , i

节点的坐标值为 (x_i^1, y_i^1) , n 梁段的安装标高控制点 $i+1$ 节点的坐标为 (x_{i+1}^1, y_{i+1}^1) ,且 n 梁段与水平方向的安装夹角为 α_i ,则有:

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{y_{i+1}^1 - y_i^1}{x_{i+1}^1 - x_i^1}\right) \quad (2)$$

即可得出在 n 梁段安装施工中,与已安装梁段的夹角 β_i 为:

$$\beta_i = \alpha_{i-1} + \theta_i - \alpha_i \quad (3)$$

当 $n-1$ 梁段精确安装到位后,安装 n 梁段时仅需保证与前一梁段的夹角为 β_i 即可精确满足结构无应力状态安装的要求,同时可以避免温度、日照和临时荷载等变化对标高的影响,从而实现相邻梁段之间的精确匹配。

安装线形迭代计算达到收敛精度值之后可以求得梁段 n 安装时的点 i 与点 $i+1$ 的坐标,安装过程梁段之间的夹角即为梁段制造夹角,如式(4)所示:

$$\beta_i = \alpha_{i-1} + \theta_i - \alpha_i = \arctg\left(\frac{y_i^0 - y_{i-1}^0}{x_i^0 - x_{i-1}^0}\right) + \theta_i - \arctg\left(\frac{y_{i+1}^1 - y_i^1}{x_{i+1}^1 - x_i^1}\right) \quad (4)$$

梁段 n 的制造无应力梁长为:

$$L_i^0 = \sqrt{(x_{i+1}^0 - x_i^0)^2 + (y_{i+1}^0 - y_i^0)^2} \quad (5)$$

根据这种方法可以求出所有梁段的无应力梁长和梁段间的制造夹角,从而求得全桥钢梁无应力线形。如 3[#] 墩中跨钢梁制造线形如图 4 所示。

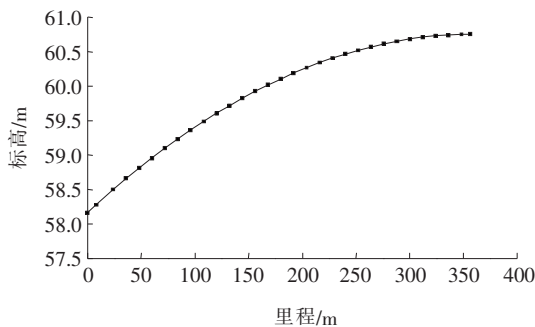


图 4 3[#] 墩中跨钢梁制造线形

2.2 梁长制造误差

赤壁长江公路大桥钢主梁各零部件刚度较小,极易产生变形,但是焊接为整体形成钢主梁后,整体刚度又极大,使得下料偏差及零部件变形导致的制造误差极难修正。为验证赤壁长江公路大桥制造工艺的合理性和工艺装备的可靠性,考查杆件的制作精度等,对主桥钢主梁杆件选取代表性的局部在厂内进行试装。

经过统计分析得出部分预拼梁段制造梁长误差分布如图 5 所示,可以看出正负误差分布较为均匀,基本

在 ± 2 mm 以内。

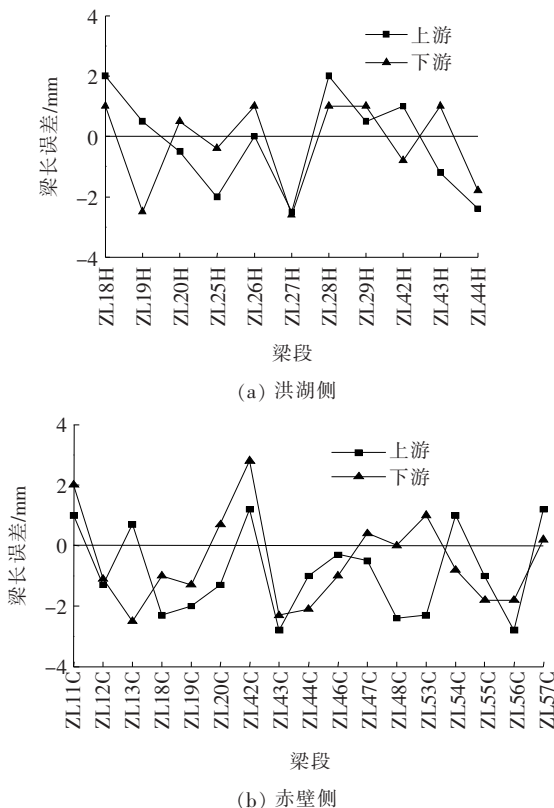


图 5 主梁制造长度误差分布情况

2.3 梁段安装夹角误差

赤壁长江公路大桥钢主梁桥位安装时连接采用栓焊连接,即新架梁段 $n+1$ 在腹板、底板和加劲板处通过高强螺栓与已安装梁段 n 相连,待高栓终拧完成后再进行顶板的焊接。

在实际现场拼装时为保证钢梁定位放样时具备一定的局部线形调整能力,采用小直径冲钉利用其与螺栓孔洞之间的间隙调整梁段无应力线形夹角(小冲钉外径大于高栓直径)。如图 6 所示。

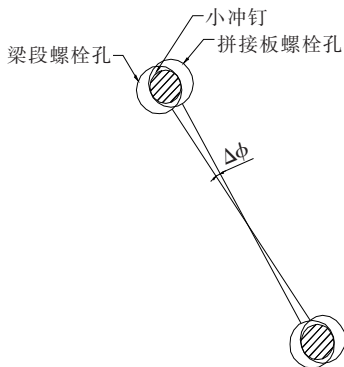


图 6 转动中心示意图

设 Δd 为小冲钉与螺栓孔直径差; l 为螺栓孔群对角线长度。得到梁段安装时梁段与拼接板间夹角的最大误差:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta d}{l/2} = \frac{2\Delta d}{l} \quad (6)$$

赤壁长江公路大桥采用的小冲钉外径为 30.2 mm,高强螺栓直径为 30 mm,螺栓孔直径为 33 mm,代入式(6)可得钢梁安装过程中新旧梁段与拼接板的理论最大夹角误差均为 $0.111\ 64^\circ$,即新旧梁段之间最大安装夹角误差为 $0.223\ 28^\circ$ 。

2.4 整体及局部坐标系下的坐标变换

钢梁实际无应力线形偏离理论无应力线形后如果不采取合理控制措施会导致成桥后无法满足预期合理成桥状态要求,在施工过程中需对实际线形进行及时监测与识别,防止全桥线形出现过大的折线而影响后期通车运营。

如图 7 所示, ij 为某钢主梁节段示意图,节点 i 、 j 在全局坐标系下的理论坐标分别为 (u_i, v_i) 和 (u_j, v_j) ,

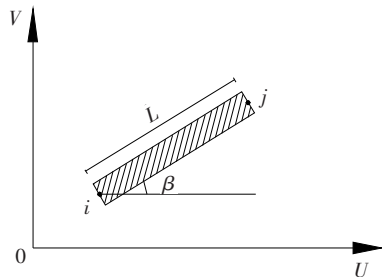


图 7 钢主梁坐标示意图

在局部坐标系下的无应力长度 L 和无应力曲率 β ,由几何关系可知全局坐标系与局部坐标系有如下转换关系:

$$\begin{cases} L \cdot \cos \beta = (u_j - u_i) \\ L \cdot \sin \beta = (v_j - v_i) \end{cases} \quad (7)$$

当 ij 前一段梁产生制造梁长误差时, i 节点的整体坐标变化为 $(\Delta u_i, \Delta v_i)$, ij 梁段安装时产生的夹角误差为 $\Delta\beta_i$,此时主桥无应力线形的坐标变化类似于刚体位移。通过分析可得 j 节点坐标变化有如下等式:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_j \\ \Delta v_j \\ \Delta\beta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (v_j - v_i) \\ 0 & 1 & (u_j - u_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \\ \Delta\beta_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{即 } \Delta j = A_{ij} \Delta i$$

修正后的 j 节点实际无应力坐标为:

$$\left. \begin{aligned} u'_j &= u_j + \Delta u_j \\ v'_j &= v_j + \Delta v_j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

上式仅为单个梁段梁长及其无应力夹角产生误差时的无应力线形误差传递矩阵。但是在实际情况中较多情况下以多段梁的制造安装误差即多节点误差耦合为主,当多段钢主梁的制造安装误差引起的节点*i*、*j*及多点坐标误差传递到远端梁段节点*k*,坐标变换如下式:

$$\Delta k = A_{ik} \Delta i + A_{jk} \Delta j + \cdots \quad (10)$$

通过以上矩阵方程可知:梁长误差不改变梁段局部坐标系(无应力长度和无应力曲率),而梁段间无应力曲率误差会叠加到后续梁段的无应力曲率。

3 计算结果分析

3.1 钢梁制造长度误差变化规律

因施工过程中各结构参数误差的不确定性会导致结构的真实状态较难把握,可通过单参数敏感性分析来量化参数变化与桥梁结构之间的相应关系。根据2.2节的实测钢梁制造误差数据分析可假定单根钢主梁的无应力制造长度误差为±2 mm,通过2.4节的节点坐标变化将修正后的主梁无应力线形代入BDCMS软件建立的全桥有限元模型,选取部分具有代表性梁段的前端点标高误差作为参考数据,通过其标高误差变化情况来反映钢梁制造长度误差传播的普遍规律。经计算分析可得ZL40H、ZL45H、ZL50H梁段前端点标高误差随工况变化情况如图8、9所示。

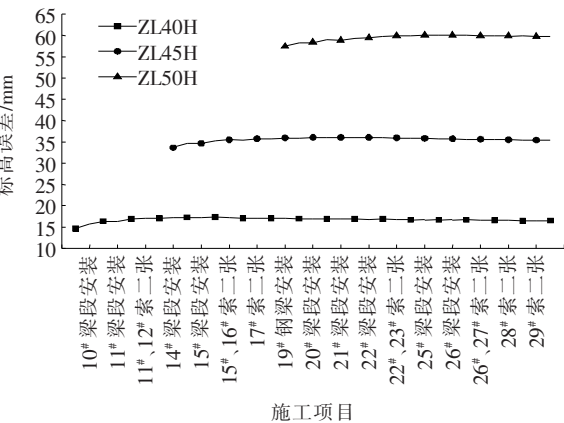


图8 钢梁制造长度+2 mm时标高误差变化情况

从图8、9可以得到:在模拟赤壁长江公路大桥施工全过程中制造梁长误差对梁段线形误差变化有如下影响规律:

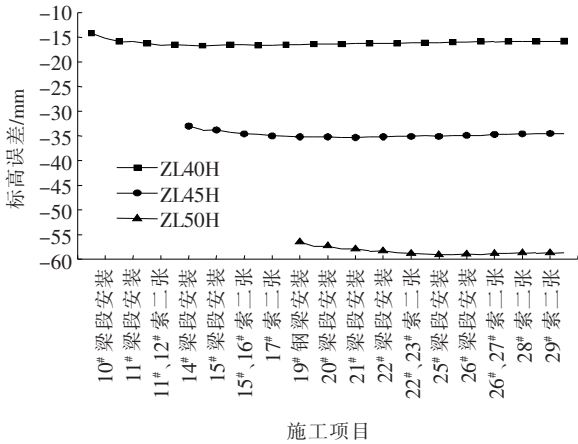


图9 钢梁制造长度-2 mm时标高误差变化情况

(1) +2 mm的钢梁制造长度误差会导致在施工过程中梁段的实际标高高于理论标高,-2 mm时梁段的实际标高低于理论标高。由无应力控制法的原理可知:斜拉索按照无应力长度进行张拉时具备自适应调节能力,当梁长变短时实际索力偏小,梁长变长时实际索力偏大。

(2) 梁长的制造误差及施工阶段的进行对已安装梁段的标高误差基本没有影响,标高误差的叠加效应会导致后续梁段的标高误差越来越大。

3.2 钢梁安装夹角误差变化规律

通过2.3节内容可知钢梁在安装过程中新旧梁段理论最大夹角误差为±0.223 28°(远端下倾为负),修正主梁无应力线形后可得因钢梁安装夹角误差导致的部分梁段前端点标高误差变化如图10、11所示。

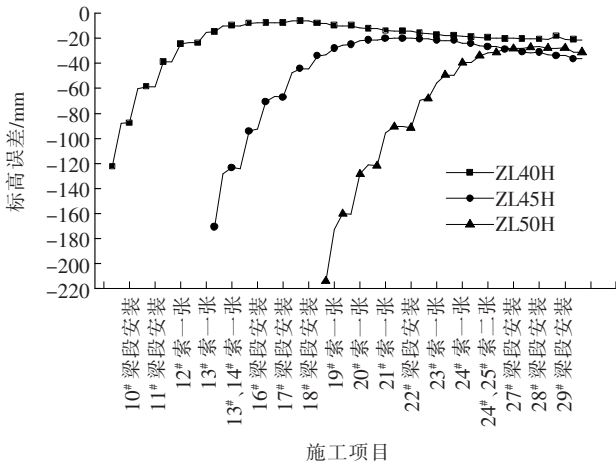


图10 梁段夹角-0.223 28°标高误差变化情况

从图10、11可以看出:梁段标高误差随着施工阶段的进行逐渐递减至趋于平缓。且误差曲线皆成明显的阶梯状,即架梁对已安装梁段的标高误差基本无影响,而斜拉索的张拉使标高误差显著减小。

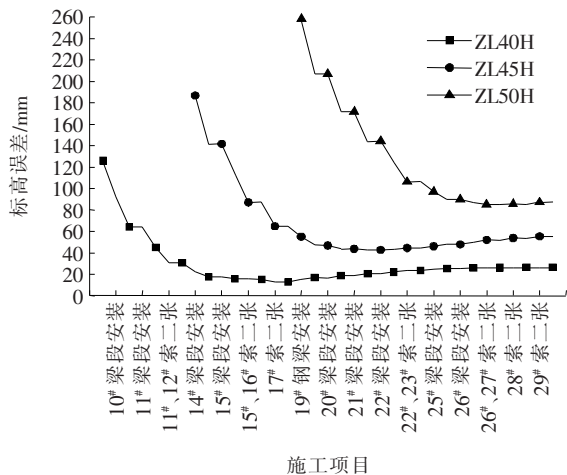


图 11 梁段夹角+0.223 28°标高误差变化情况

在实际工程中出现连续同一方向的夹角误差概率较小,且在施工中必会采取相应的控制措施,否则会造成线形的过大误差。在实际控制中,当某段梁标高误差较大时,应连续调节相近的若干根斜拉索索力,使线形误差控制在允许范围内。

3.3 斜拉索索力与主梁应力误差

根据 3.2 节分析可得安装夹角的连续同方向误差会造成标高误差过大,在施工过程中必须根据实际情况进行调整。当梁长偏短时,跨中标高偏低,导致合龙后跨中线形产生折角。当梁长误差+2 mm 时整体标高略大于绝对标高,且不存在过大折角,不采取任何调整控制措施计算得成桥后中跨斜拉索索力及钢梁应力与理论数据相比误差如图 12、13 所示。

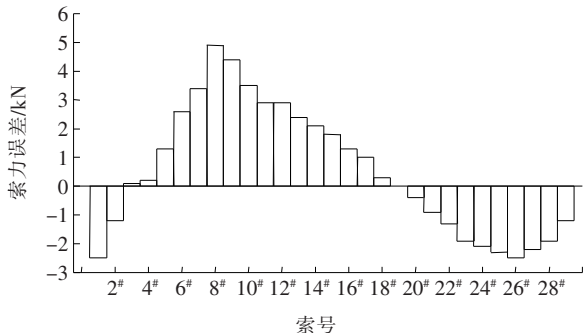


图 12 斜拉索索力误差

从图 12、13 可以看出:在梁长+2 mm 的误差情况下,斜拉索索力误差在-3~5 kN 范围内,钢梁上下缘应力在-0.5~1 MPa 以内。在组合梁中斜拉索索力采用多次主动张拉,且在钢梁拼装完成后进行初次张拉,因此梁长发生误差时桥面板所受应力与理论应力数据相比基本不变。

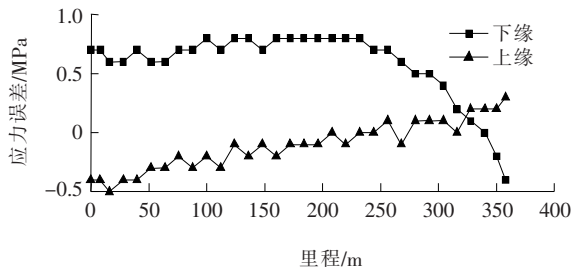


图 13 钢梁应力误差

4 结论

基于无应力状态控制法的组合梁斜拉桥,通过分析钢梁制造和安装误差的传递规律,得到以下结论:

(1) 制造梁长误差对组合梁线形的影响随着后续梁段的安装向前误差进行叠加传递,制造梁长偏大时实际线形高于理论线形,梁长偏小时则相反,且后续梁段的安装对已安装梁段的标高误差基本没有影响。

(2) 新旧梁段安装夹角误差对钢梁安装时的线形误差影响较大,该梁段的标高误差会随着后续施工工序的不断推进而逐渐缩小,最后趋于平稳,具有典型的收敛性。

(3) 在实际施工中需对安装夹角误差引起的线形误差通过调整多根斜拉索索力进行修正。钢梁制造长度误差较小时对斜拉索索力及钢梁应力影响较小,且基本不影响桥面板所受内力。

参考文献:

- [1] 聂建国,刘明,叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 杨岳华. 宽幅组合梁斜拉桥主梁节段预制与安装力学性能研究[D]. 西安: 长安大学,2017.
- [3] 蔡禄荣. 大跨度钢桁架拱桥预拱度设置及拼装误差理论研究[D]. 广州: 华南理工大学,2012.
- [4] 陈思铭,陈常松,颜东煌. 基于逐段安装线形的钢箱梁制造尺寸计算研究[J]. 中外公路,2020,40(2): 91-94.
- [5] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 赤壁长江公路大桥工程施工图[Z],2019.
- [6] 秦顺全. 桥梁施工控制: 无应力状态法理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社,2007.
- [7] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 长沙: 湖南大学,2001.
- [8] 陈常松,颜东煌,陈政清. 带刚臂的两节点精确悬链线索元的非线性分析[J]. 工程力学,2007(5): 29-34.