

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.025

大跨叠合梁斜拉桥主梁施工控制误差传播分析

杨如刚¹,陈博^{2*},韩冰³

(1.蜀道投资集团有限责任公司,四川 成都 610041;2.四川公路桥梁建设集团有限公司,四川 成都 610041;
3.川南城际铁路有限责任公司,四川 自贡 643000)

摘要:基于目前对叠合梁施工误差敏感性和误差预测产生的原因、误差的变化以及如何传播等方面研究较少的情况,该文选用非对称钢-混凝土叠合梁斜拉桥——宜宾南溪长江大桥作为依托工程,采用有限元分析软件模拟该桥考虑几何非线性施工的整个过程,在无法确保施工过程中敏感性参数完全精确的前提下,分析主梁安装误差影响因素及形成机理,研究主梁线形及应力随施工阶段变化情况,揭示主梁安装误差传播规律,为容许误差的确定与误差的最优调整策略提供理论依据。

关键词:斜拉桥;叠合梁;误差传播;影响效应

中图分类号:U448.27 **文献标识码:**A

0 引言

大跨度斜拉桥叠合梁截面采用横梁、小纵梁与边主梁形成的框架体系,形成较大的抗弯刚度与横向抗扭刚度,在钢板梁顶板剪力钉位置采用现浇混凝土与混凝土预制板形成整体,作为受压区承受拉索施加的压力,最大程度地利用钢梁与混凝土的材料特性。由于截面杆件零碎,栓接过程复杂且不易控制、施工技术条件要求高等问题,大跨度斜拉桥叠合梁施工误差在所难免。在现实施工时,存在诸多因素致使桥梁结构无法达到设计预期的目标,例如:设计参数不够精确、构件制造误差、栓接误差、结构模型分析不准确、测试误差等^[1],桥梁结构的各工序施工会因为上述各种误差而发生目标偏离,从而使桥梁最终成桥指标不能满足要求。

近年来,对于叠合梁施工误差敏感性和误差预测在大跨度斜拉桥施工中的体现的理论分析中国已有一定的研究^[2-4],但是针对误差产生的原因、误差的变化以及如何传播等方面研究颇少。因此,本文根据施工过程中非对称叠合梁各种影响主梁安装误差

的因素,分析在施工过程中线形误差如何变化及传播;与此同时,研究在各类参数误差的影响下,叠合梁截面钢梁及桥面板的应力变化情况。通过研究结果,为上部结构拼装过程中线形的较好调节和斜拉索张拉过程中初拉力的精度控制提供可靠依据^[5-9]。

1 工程概况

宜宾南溪长江大桥主桥为双塔双索面半漂浮非对称结构体系,跨径组合:280 m+572 m+(72.5+63+53.5) m,中跨与北岸边跨的主梁为钢-混凝土叠合梁;为平衡北岸边跨重量,南岸边跨主梁采用双纵肋混凝土截面形式,且设置辅助墩2处,桥塔为花瓶形,共有斜拉索164根。其总体布置如图1所示。主桥施工方法见表1。主桥标准梁段的施工步骤图如图2所示。

2 分析参数和方法

2.1 研究参数

基于宜宾南溪长江大桥敏感性分析报告^[10]及现场实际施工情况,需明确钢梁与桥面板重量、拉索弹

收稿日期:2023-03-13

基金项目:四川省交通运输厅科技项目(编号:2016自1-9)

作者简介:杨如刚,男,硕士,教授级高级工程师.E-mail:278682337@qq.com

*通信作者:陈博,男,硕士,助理工程师.E-mail:1041145604@qq.com

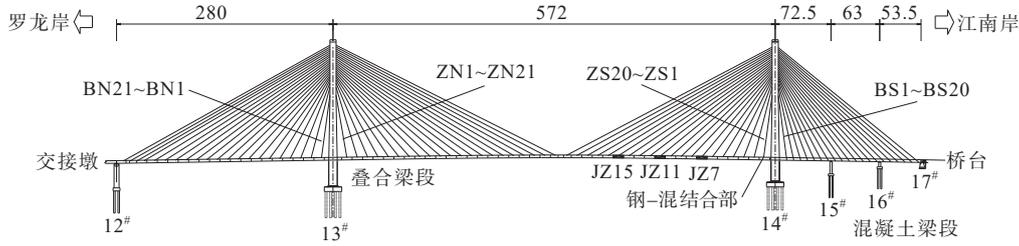


图1 宜宾南溪长江大桥桥型布置图(单位:m)

表1 主桥施工方法

名称	施工方法
南岸边跨	边跨混凝土采用支架现浇施工
南岸中跨	中跨采用单悬臂施工至20 [#] 段
北岸边跨及中跨	采用双悬臂对称拼装施工至19 [#] 段,北岸边跨配重锚固段采用支架施工,边跨合龙

2.2 研究方法

(1) 采用有限元软件NLABS建立桥梁的基准状态模型,如图3所示,并引入几何非线性,利用结构有限元计算来获得结构应力和位移的基准值。

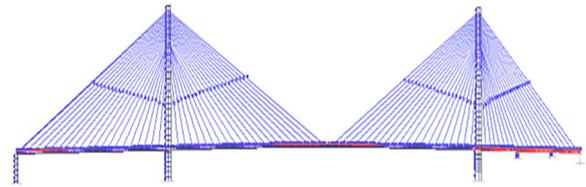


图3 NLABS有限元离散模型

(2) 依据上述基准状态模型,采用控制变量法,根据某一参数的改变来调整模型中相应的参数,实现整个施工过程包含参数误差的数值计算模拟,分析算得结构中各个参数误差相对应的响应误差。

(3) 分析在每个参数误差影响下,从开始安装到最大单悬臂这一过程,主梁线形误差是如何产生与变化的;同时分析叠合梁中钢梁及桥面板对应应力变化的分布情况。

(4) 明确在每个参数误差作用下,新梁段安装阶段误差传播规律,探索各误差对跨中合龙前最大单悬臂状态的影响程度及演变历程,为施工误差限值的有效控制提供理论依据。

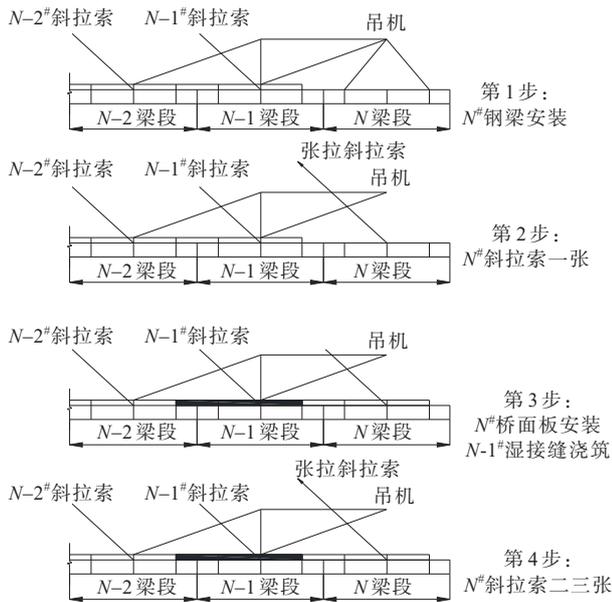


图2 标准梁段施工步骤图

性模量、初张力及栓接误差等参数及各自的变化范围,以探讨大桥敏感性参数对主梁线形、应力的影响程度与机理。大桥的敏感性参数如表2所示。

表2 敏感性参数

结构参数	基准状态	变化范围
钢梁自重	按设计取值	±5%
桥面板自重	按设计取值	±5%
拉索弹模	1.95×10^5 MPa	±8%
初张力	按设计取值	±10%
栓接误差	按指令取值	±5 mm

3 误差传播规律

3.1 理论分析

为了方便分析主梁线形误差的形成机理及变化传播过程,建立施工过程相对应的主梁线形误差如表3所示。表中: e 为线形误差, e 上标为线形评价施工阶段, $N,0$ 表示 N 号梁段的安装阶段, $N,1$ 表示 N 号索三张阶段, e 下标为线形评价所对应的位置, N 表示 N 号钢主梁远塔侧控制点。

表 3 施工过程中各梁段前端点线形误差

施工阶段	$N-2^{\#}$ 梁	$N-1^{\#}$ 梁	$N^{\#}$ 梁	$N+1^{\#}$ 梁
$N-1^{\#}$ 索三张	$e_{N-2}^{N-1,1}$	$e_{N-1}^{N-1,1}$	—	—
$N^{\#}$ 钢梁安装	$e_{N-2}^{N,0}$	$e_{N-1}^{N,0}$	$e_N^{N,0}$	—
$N^{\#}$ 索三张	$e_{N-2}^{N,1}$	$e_{N-1}^{N,1}$	$e_N^{N,1}$	—
$N+1^{\#}$ 钢梁安装	$e_{N-2}^{N+1,0}$	$e_{N-1}^{N+1,0}$	$e_N^{N+1,0}$	$e_{N+1}^{N+1,0}$

将标准梁段施工步骤简化为两阶段： $N-1^{\#}$ 索三张 $\rightarrow N$ 钢梁安装， N 钢梁安装 $\rightarrow N^{\#}$ 索三张，根据具体施工对各阶段内误差产生因素进行分析。

(1) $N-1^{\#}$ 索三张 $\rightarrow N$ 钢梁安装

对于刚安装完的钢梁，其 $e_N^{N,0}$ 值主要包含以下几方面：安装前，已安钢梁夹角及高程不够精确所形成的线形误差；安装中，利用冲钉进行相对位置的安装，待安装梁段与已安装梁段相互作用所形成的线形误差；待安梁段自重偏差所导致的线形误差。

对于已安梁段来说，钢梁的安装过程只是其自重荷载的施加，故已安装梁段的 $e_{N-1}^{N,0}$ 值为上一阶段的 $e_{N-1}^{N-1,1}$ 与待安装梁段自身误差使已安装梁段产生的误差之和，后者包括新安装梁段自重偏差及已成结构（不包括新安装钢梁）整体刚度偏差引起的线形误差。

(2) N 钢梁安装 $\rightarrow N^{\#}$ 索三张

新安装梁段线形误差由 $e_N^{N,0}$ 变化至 $e_N^{N,1}$ ，其中主要因素可以归纳为4个方面： $N^{\#}$ 斜拉索初张阶段索力误差； $N^{\#}$ 预制板安装、 $N-1^{\#}$ 湿接缝浇筑阶段的预制板及湿接缝重量误差； $N^{\#}$ 斜拉索二、三张索力误差以及包括新安装钢梁及拉索的已成结构整体刚度引起的误差等。

该施工过程中，已成梁段线形误差 $e_{N-1}^{N,0}$ 主要由以下几部分组成：上一阶段线形误差 $e_{N-1}^{N-1,1}$ ； $N^{\#}$ 斜拉索初张阶段索力误差； $N^{\#}$ 预制板安装、 $N-1^{\#}$ 湿接缝重量误差； $N^{\#}$ 斜拉索二张及三张索力误差；已成梁段结构整体刚度引起的误差。

综上所述，可以得到影响误差的因素较多，且各因素之间存在耦合作用，以下结合工程实例从误差的形成、变化及传播3个方面进行分析。

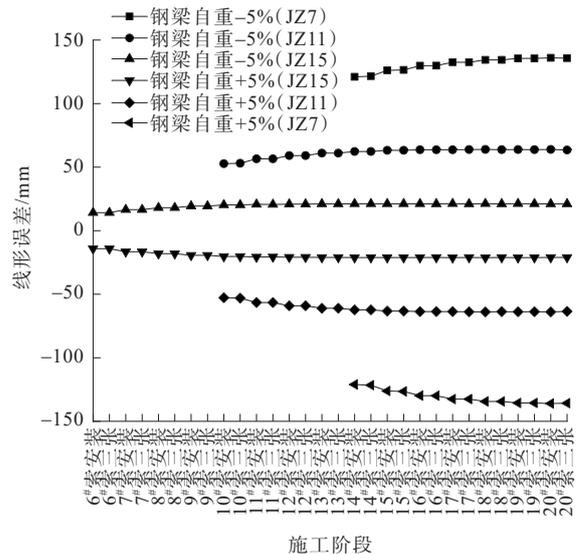
3.2 误差变化及效应分析

本节主要讨论钢梁与桥面板自重、斜拉索弹性模量、初张力、栓接定位发生偏差对桥梁施工过程中

误差变化的影响。

(1) 钢梁自重

以南溪桥为计算实例，考虑钢梁的自重荷载均存在 $\pm 5\%$ 偏差这一情况，建立从安装阶段到其最大单悬臂状态下的JZ15(6 $^{\#}$ 段)、JZ11(10 $^{\#}$ 段)、JZ7(14 $^{\#}$ 段)梁段前端控制点线形的误差变化如图4所示，以图中“钢梁自重+5%(JZ7)”标识为例，表示在所有梁段自重均增加5%的情况下，随着施工进展，南岸14 $^{\#}$ 塔江侧JZ7号主梁前端点线形误差的变化情况。

图 4 钢梁自重 $\pm 5\%$ 时主梁线形误差

由图4可知：钢梁自重存在 $\pm 5\%$ 偏差时，对主梁线形误差影响较大，其中JZ7梁的线形误差达到了14 cm；随着施工阶段的进行，JZ15、JZ11、JZ7梁段的线形误差均逐步增长，误差变化线斜率逐渐减小，趋向于零，原因在于后续梁段的超重对前面施工梁段的影响会随着悬臂段的伸长逐渐减弱。JZ15、JZ11、JZ7梁分别在6、5、4个标准段施工后线形误差稳定在一定值，原因在于随着分析梁段远离索塔，结构体系柔度越大，结构自重位移较刚体转动位移占总位移的比例逐渐减小，自重影响能力逐步减弱。

基于钢梁自重荷载均发生+5%偏差的情况，在施工过程中JZ15、JZ11、JZ7梁拉索锚点处的钢梁与桥面板应力误差分别如图5、6所示。

由图5可知：JZ15、JZ11、JZ7梁拉索锚点处的钢梁下缘应力误差随着施工阶段不断增大，其增长率随着距离桥塔越近而呈减小趋势，下缘最大应力误差小于5 MPa；上缘最大应力误差为-1.5 MPa。

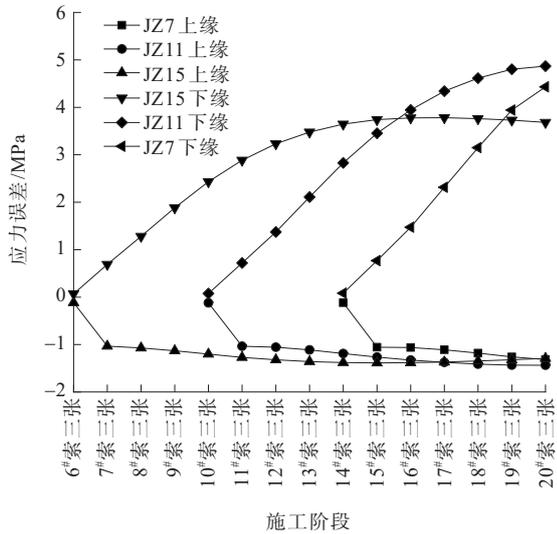


图5 钢梁自重+5%时钢梁应力误差

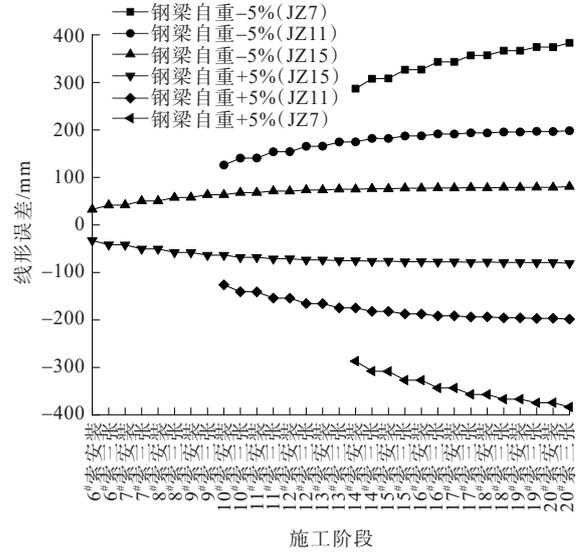


图7 桥面板自重±5%时主梁线形误差

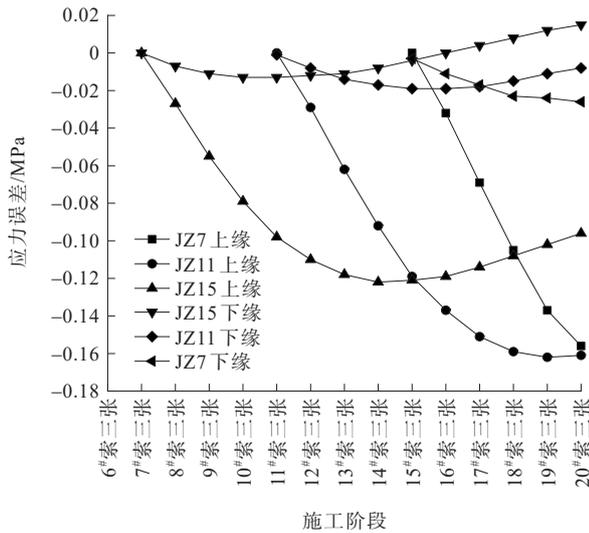


图6 钢梁自重+5%时桥面板应力误差

由图6可知:JZ15、JZ11、JZ7梁拉索锚点处桥面板的下缘应力误差呈先增后减趋势,最大应力误差为-0.03 MPa左右;上缘最大应力误差小于0.2 MPa。

(2) 桥面板自重

基于桥面板自重荷载均发生±5%偏差的情况,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁段线形的误差变化如图7所示。

由图7可知:当桥面板自重荷载发生±5%偏差时,JZ15、JZ11、JZ7梁分别存在80.5 mm、198.1 mm、382.6 mm的线形误差。桥面板的线形误差变化趋势与钢梁较为相似,但钢梁的线形误差要比桥面板的小,受影响程度更低,主要是由于钢梁的自重基数更小,自重作用下的变形量就相对更小。

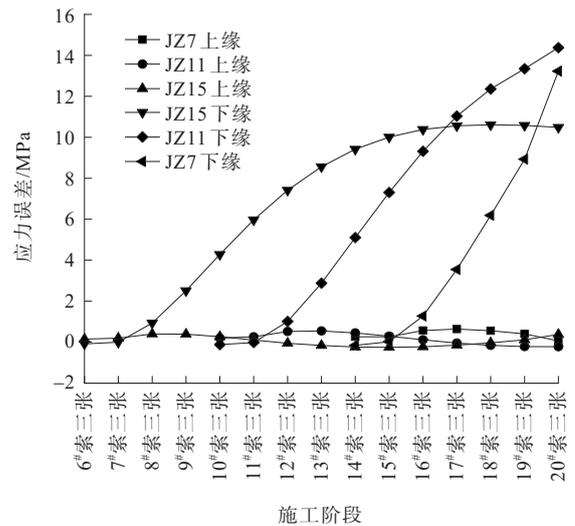


图8 桥面板自重+5%时钢梁应力误差

由图8可知:在桥面板自重增加5%后,钢梁上缘应力误差随施工阶段进行在±1 MPa内波动,下缘应力误差随施工阶段进行呈快速增大趋势。

由图9可知:桥面板上下缘应力误差均呈先减后增趋势,其中上缘应力误差变化明显,下缘应力误差变化相对较小。

(3) 拉索弹模

基于拉索弹模均发生±8%偏差的情况,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁前端的线形误差变化如图10所示。

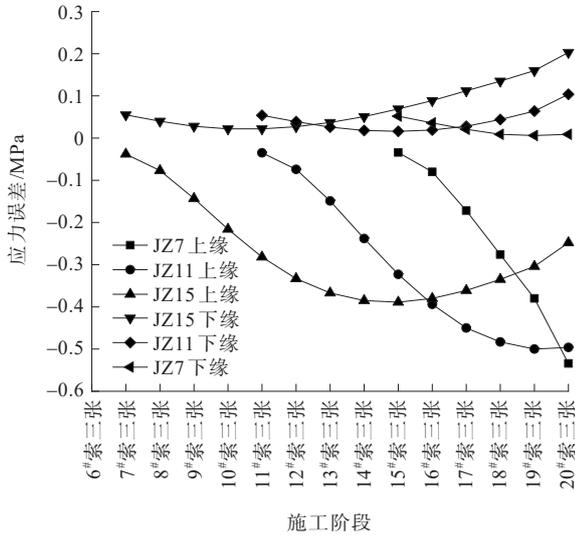


图9 桥面板自重+5%时桥面板应力误差

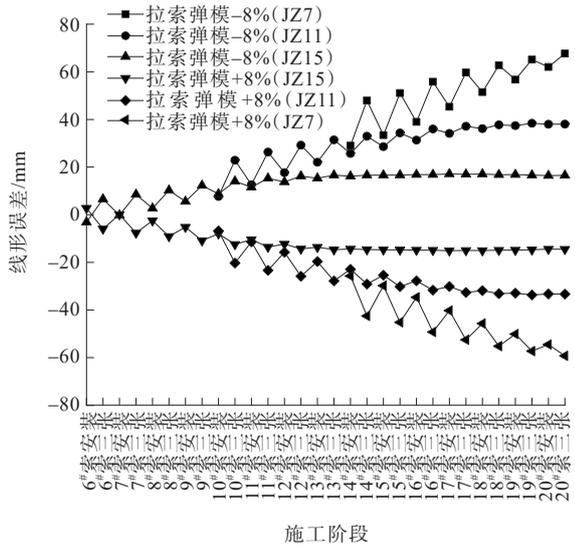


图10 拉索弹模±8%时主梁线形误差

由图10可知:在拉索弹模±8%偏差的情况下,主梁线形误差呈现波浪式上升或下降的趋势,对JZ7梁段的线形误差影响达到6 cm;随着施工阶段的进行,JZ15、JZ11、JZ7梁的线形误差呈增大趋势。对于三张阶段与安装阶段的线形误差呈反向变化的情况,其原因主要为三张阶段对于相同的索力,拉索弹性模量不同带来新拉索无应力长度的改变,对主梁线形会产生较大影响,同时已成拉索的误差也会影响结构变形,而在安装阶段是荷载的施加,只有已成拉索被动受力。对比各线形误差线可以看出,随着悬臂段的加长,线形误差趋于稳定所需要的标准施工阶段数逐渐增加,因为悬臂越长,结构刚度越小,拉索张力越大,拉索弹性模量对结构的影响作用就越大。

基于拉索弹性模量均增加8%偏差的情况,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁锚点处的钢梁与桥面板应力误差变化情况分别如图11、12所示。

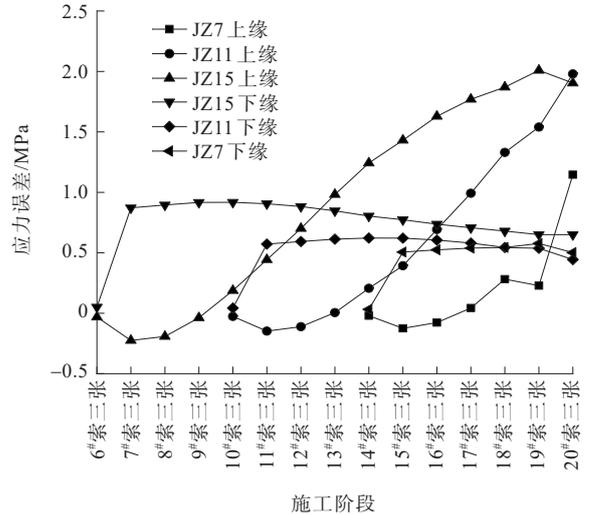


图11 拉索弹模+8%时钢梁应力误差

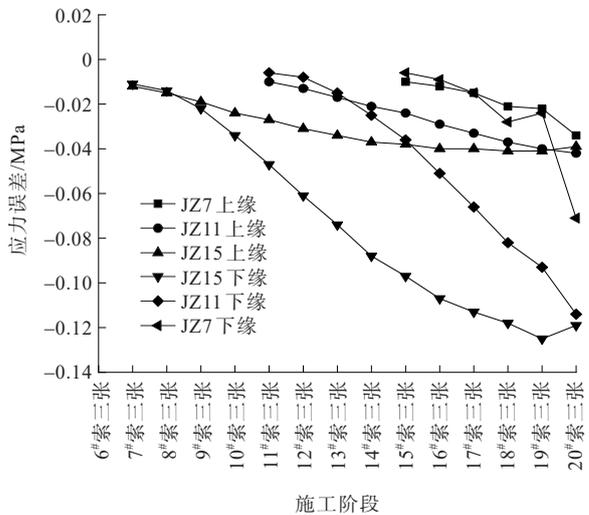


图12 拉索弹模+8%时桥面板应力误差

由图11可知:在安装后3个标准段施工中,JZ15、JZ11、JZ7钢梁的上缘应力误差呈先减后增的趋势,且增加段应力误差变化较快;下缘应力误差呈先增后减的趋势,在后一节段拉索三张后应力误差达到最大。

由图12可知:JZ15、JZ11、JZ7梁的桥面板截面应力误差均小于0,可知拉索弹模的增加可降低桥面板的应力水平。

综上,当拉索弹模增加8%时,钢梁应力误差最大为2 MPa,桥面板应力误差最大为-0.15 MPa,因此拉索弹模对二者的应力水平影响较低。

(4) 初张力

控制三张力不变,当拉索初张力均改变±10%时,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁前端点主梁线形误差变化情况如图13所示。

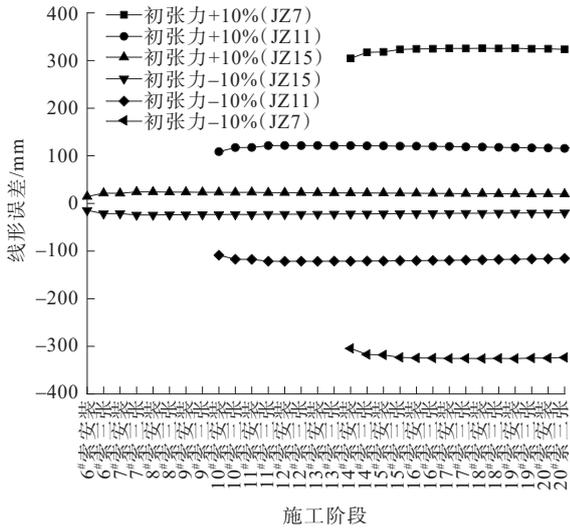


图13 初张力±10%时主梁线形误差

由图13可知:在初张力±10%偏差的情况下,JZ15、JZ11、JZ7梁的线形误差分别接近2cm、12cm、32cm,并且在对应拉索张拉阶段,线形误差均达到峰值,在后续施工阶段,线形误差均基本保持不变;对比分析6条误差线可知,随着悬臂的加长,误差值增加越快,这是因为悬臂越长,结构体系越柔,初张力的影响效应越强。

基于初张力增加10%的情况,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁拉索锚点处的钢梁与桥面板应力误差分别如图14、15所示。

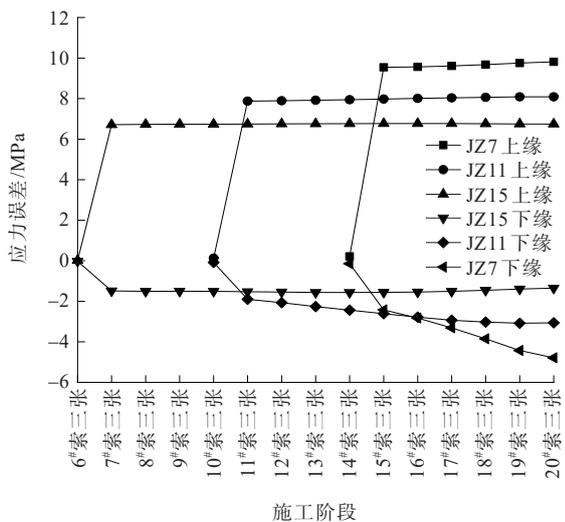


图14 初张力+10%时钢梁应力误差

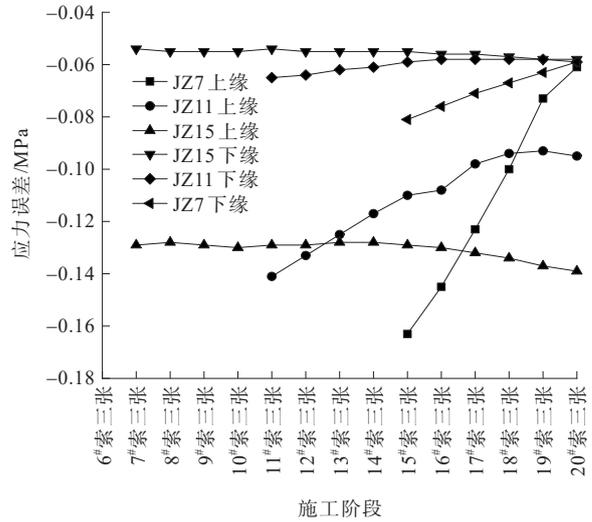


图15 初张力+10%时桥面板应力误差

由图14可知:JZ15、JZ11、JZ7钢梁上缘应力误差仅在对应拉索张拉阶段发生变化,上缘最大应力误差不大于10MPa;下缘应力误差在对应拉索张拉阶段变化较快,其余节段变化较缓慢,最大应力误差在5MPa以内。

由图15可知:JZ15、JZ11、JZ7梁的桥面板上下缘应力均变小,且应力误差最小在0.2MPa以内。

综上,桥面板的应力水平受初张力影响相对较小;钢梁的应力水平受初张力影响相对较大,且上缘应力受影响程度更显著。

(5) 栓接误差

基于新安装梁段采用相对位置安装且各梁段栓接误差均为±5mm的情况,在施工过程中,JZ15、JZ11、JZ7梁前端点主梁线形的误差变化如图16所示。

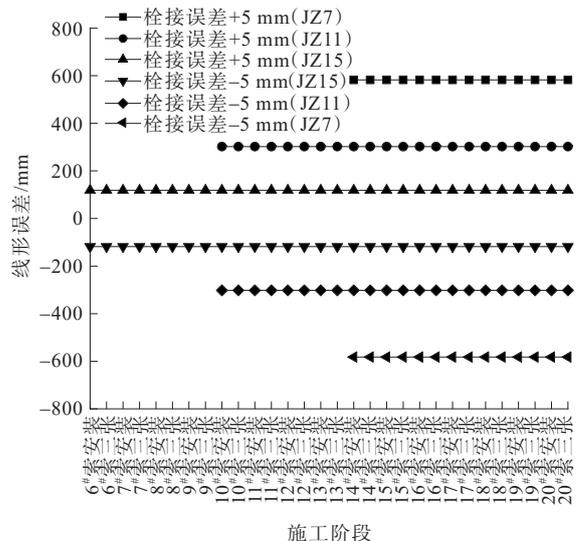


图16 栓接误差±5mm时主梁线形误差

由图 16 可知: 栓接误差均为 ±5 mm 时, 对主梁线形误差的影响仅仅产生在钢梁安装阶段, 后续施工阶段基本保持不变, 栓接误差对已成梁段的线形误差变化无影响。

栓接误差对 JZ15、JZ11、JZ7 梁锚点截面应力无影响。原因在于栓接过程未对结构刚度造成影响, 主梁结构仅仅发生刚性转动, 未对内力分布造成影响, 故结构应力状态也与基准模型一致。

3.3 误差传递规律分析

本节主要以钢梁与桥面板自重、斜拉索弹性模量、初张力、栓接定位发生变化引起桥梁施工过程中主梁的线形误差为对象, 研究误差的传递规律。为方便各敏感性参数的影响效应对比, 参数变化比例绝对值均为 5%, 施工过程中在钢梁自重 +5%、桥面板自重 +5%、拉索弹模 +5%、初张力 -5% 的工况下, 主梁线形误差包络图如图 17 所示, 将栓接定位误差 -5 mm 的误差传播亦列入其中。该图为南岸索塔江侧的主梁线形误差情况, 坐标 0 点为中跨合龙段的顺桥向中心点。

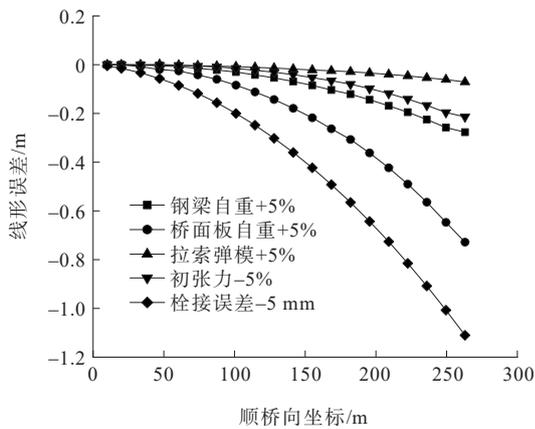


图 17 主梁安装线形误差传播

由图 17 可以看出: 在相同误差百分比条件下, 各敏感性参数对最大单悬臂状态的影响程度由大到小依次是: 桥面板自重 +5%、钢梁自重 +5%、初张力 -5%、拉索弹模 +5%。而栓接误差 -5 mm 的影响比以上所有敏感性参数的影响更大。

通过五次多项式数值拟合得到主梁各安装阶段的线形误差拟合函数: $y=B_0+B_1x+B_2x^2+B_310^{-4}x^3+B_410^{-7}x^4+B_510^{-11}x^5$ 。函数各参量取值如表 4 所示。其中 y 表示线形误差, 单位为 mm, x 为顺桥向坐标, 单位为 m, 以 14# 索塔中心为 x 原点坐标,

小里程方向为 x 轴正方向。

对上述拟合函数求一阶导数并统一单位后(表 5), 得到各敏感性参数发生变化所引起主梁线形误差的传递规律。

表 4 主梁安装阶段线形误差传递曲线拟合函数

误差参数	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
钢梁自重 +5%	-4.435	0.455	-0.013	0.946	-4.395	-7.010
桥面板自重 +5%	-0.759	0.131	-0.010	0.060	-0.452	0.108
拉索弹模 +5%	-1.219	0.132	-0.003	1.263	-0.254	-0.034
初张力 -5%	-3.483	0.315	-0.008	0.529	-3.081	5.015
栓接误差 -5 mm	2.560	-0.580	-0.014	0.053	-0.188	0.249

表 5 误差传递曲线拟合函数一阶导数 10^{-3} rad

梁段前 端点	钢梁自重 +5%	桥面板自 重+5%	拉索弹模 +5%	初张力 -5%	栓接 -5 mm
JZ18	-0.17	-0.52	-0.03	-0.04	-1.53
JZ17	-0.31	-0.75	-0.07	-0.12	-1.90
JZ16	-0.41	-1.03	-0.11	-0.21	-2.27
JZ15	-0.51	-1.27	-0.14	-0.26	-2.65
JZ14	-0.62	-1.54	-0.16	-0.34	-3.02
JZ13	-0.70	-1.82	-0.21	-0.42	-3.41
JZ12	-0.82	-2.11	-0.21	-0.52	-3.76
JZ11	-0.95	-2.41	-0.23	-0.64	-4.13
JZ10	-1.11	-2.73	-0.25	-0.77	-4.50
JZ9	-1.25	-3.08	-0.27	-0.93	-4.87
JZ8	-1.43	-3.44	-0.30	-1.11	-5.24
JZ7	-1.60	-3.82	-0.31	-1.26	-5.61
JZ6	-1.76	-4.24	-0.37	-1.43	-5.98
JZ5	-1.91	-4.67	-0.42	-1.58	-6.35
JZ4	-2.02	-5.14	-0.51	-1.72	-6.72
JZ3	-2.07	-5.64	-0.56	-1.82	-7.09
JZ2	-2.06	-6.18	-0.65	-1.86	-7.46
JZ1	-1.92	-6.75	-0.76	-1.84	-7.82

由表 5 可以看出: 当各参数发生偏差时, 误差传递曲线拟合函数一阶导数绝对值均增大, 说明主梁线形误差传播曲线为超线性曲线, 是发散的, 这符合

实际的施工情况,新梁段在安装阶段的线形误差绝对值整体呈增大趋势。

对几组敏感性参数变化所引起的主梁线形误差分析:桥面板自重变化对主梁线形误差的传播影响最为显著,误差传播曲线斜率也是迅速增大;钢梁自重变化与初张力变化所对应的主梁线形误差传播拟合曲线函数的一阶导数大小较为接近,表明相同误差水平下,二者对线形误差传播的贡献作用接近,可以考虑在施工过程中通过调整初张力达到对主梁自重造成的线形偏差进行纠偏;而拉索弹模对误差传播影响较小,前期施工阶段作用较小,施工阶段误差传播作用明显。

栓接定位误差传播曲线拟合函数一阶导数随着悬臂的伸长增长迅速,且数量级较大,可以看出其影响的不仅仅是安装梁段的高程,还有安装梁段的绝对角度,对于栓接型主梁,已成梁段的角度偏差对后续梁段安装会造成巨大影响。与焊接型主梁不同,栓接型主梁拼接板制造完成后,其无应力角度基本就是固定的,角度调整范围较小。

4 结论

(1) 钢混叠合梁施工过程中,主梁的线形误差受钢梁及桥面板的自重、初张力改变的影响较为显著,悬臂越长,线形误差越大,线形误差的变化速率越来越大;主梁的线形误差受拉索弹性模量的影响相对较小,呈波浪式变化,且三张阶段与安装阶段的线形误差呈反向增加趋势,整体线形误差变大;栓接误差对主梁线形误差的影响仅发生在钢梁安装阶段,后续施工阶段的线形误差基本保持不变。

(2) 钢梁下缘应力受钢梁及桥面板的自重影响较为显著,钢梁上缘应力及桥面板应力受钢梁及桥面板自重影响相对较小;钢梁与桥面板应力受拉索弹性模量的影响均较小,且拉索弹性模量的增加对桥面板应力有降低作用;桥面板的应力误差受初张力影响相对较小,钢梁的应力误差受初张力影响相

对较大,且仅产生于拉索张拉阶段;主梁应力误差受栓接误差的影响几乎为0。

(3) 主梁安装的线形误差传播为超线性曲线,呈发散状。误差水平相同时,主梁线形误差的传播受桥面板自重的影响最为显著,受钢梁自重与初张力影响较为接近,受拉索弹性模量的影响最小。但栓接误差所引起的传播效应最大,且传播范围最广,因此在主梁安装过程中,应该尽量通过螺栓与孔的间隙对主梁线形进行调整至最理想状态。

(4) 在钢混叠合梁安装过程中,钢梁自重、桥面板自重、初张力、拉索弹性模量都是极为重要的参数识别对象,有必要对模型中的相应参数进行时刻修正,可以通过改变安装过程中初张力的对主梁线形误差进行调整,此时需密切关注钢梁下缘应力的变化情况。

参考文献:

- [1] 陈德伟,项海帆.斜拉桥的工程控制[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第九届年会论文集.杭州,1990.
- [2] 谭鑫波.组合梁斜拉桥参数敏感性分析与施工控制[D].成都:西南交通大学,2010.
- [3] 赵雷,孙才志,陈文元.大跨度结合梁斜拉桥的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2011,39(6):38-41.
- [4] 唐启.泉州湾跨海大桥钢混组合梁施工控制参数敏感性分析[J].世界桥梁,2016,44(5):57-61.
- [5] 张清华,黄灿,卜一之,等.大跨度钢斜拉桥制造误差的传播及其效应特性[J].西南交通大学学报,2015,50(5):830-837.
- [6] 刘增武,辛景舟,周水兴,等.异形索塔斜拉桥参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5):76-80.
- [7] 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.
- [8] 任雷,卢亮,董正良.深切峡谷叠合梁斜拉桥上构安装施工技术[J].中外公路,2023,43(1):135-138.
- [9] 张玉平,徐生鹏,李香梅,等.混合式组合梁斜拉桥参数分析与施工控制[J].中外公路,2022,42(3):85-92.
- [10] 西南交通大学桥梁工程系.宜宾南溪仙源长江大桥主桥成桥线形敏感性分析报告[R],2018.