

甘溪特大桥空腹三角区施工阶段受力分析

孙克强¹, 李百富¹, 薛其林²

(1.中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710065; 2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北 武汉 430034)

摘要:甘溪特大桥是主跨300 m的空腹式连续刚构桥,空腹三角区上弦箱梁采用可伸缩部分立柱后支配挂篮悬浇,下弦箱梁采用全斜拉扣挂法配合挂篮悬浇。为分析采用该施工方法在三角区临时结构体系中的受力特性,总结三角区临时结构体系施工过程中受力变化规律,验证施工方法的有效性,并提出临时扣索和支撑立柱的最佳解除时机,采用有限元结构分析软件模拟全桥施工过程。结果表明:采用该工法施工,结构受力满足规范要求。三角区施工过程中,已施工的上、下弦箱梁以受压为主,受下一节段混凝土浇筑、立柱支顶、扣索张拉等工序影响,其间会出现短暂轻微受拉状态。三角区合龙完成时,箱梁截面以受压为主,局部存在轻微受拉。全桥合龙后三角区箱梁为全受压状态,较三角区合龙状态压应力增加明显。临时扣索、立柱拆除后,上、下弦箱梁出现了明显的应力重分布,但仍为全受压状态。临时扣索索力峰值均出现在三角区合龙完成前,三角区合龙后总体呈下降趋势,临近拆除前有所回升。后方临时立柱在施工过程中支撑力总体呈下降趋势,前方立柱呈上升趋势,临近拆除前立柱支撑力增幅均较大。经比选,推荐全桥合龙后先拆立柱、再拆扣索。

关键词:甘溪特大桥;空腹式连续刚构桥;三角区;临时扣索;支撑立柱;受力分析

中图分类号:U448.23

文献标志码:A

Force Analysis of Open Web Triangular Area of Ganxi Super Bridge during Construction

SUN Keqiang¹, LI Baifu¹, XUE Qilin²

(1.CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2.China Railway Bridge Research

Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: Ganxi Super Bridge is an open web continuous rigid frame bridge with a main span of 300 m, and the upper chord box girder in the open web triangular area adopts the post support of a few telescopic columns with the hanging basket for suspension casting. The lower chord box girder adopts the full cable-stayed buckle method with a hanging basket for suspension casting. To analyze the force characteristics of the temporary structural system in the triangular area during the construction process using this method, the force variation law during the construction process of the temporary structural system in the triangular area was summarized to verify the effectiveness of the construction method, and the optimal time to remove temporary buckle cables and support columns was proposed. The finite element structural analysis software was used to simulate the entire bridge construction process. The results show that the force of the structure meets the specification requirements by using this construction method. During the construction of the triangular area, the upper and lower chord box girders constructed are mainly compressed, and there will be a temporary and slight tension state during this period affected by the concrete pouring of the next section, column roof support, buckle cable tensioning, and other processes. When the closure of the triangular area is completed, the section of the box girders is mainly compressed, and there is slight tension in some parts. After the closure of the whole bridge, the box girders in the triangular area are in the full compression state, and the compressive stress increases significantly compared with the closure state in the triangular area. After the removal of temporary cables and

columns, the upper and lower chord box girders have obvious stress redistribution, but they are still in a full compression state. The peak value of temporary cable force appears before the closure of the triangular area. After the closure of the triangular area, it generally shows a downward trend and rises near the demolition. During the construction process, the support force of the rear temporary column generally shows a downward trend, and the front column shows an upward trend. The support force of the column near the demolition is greatly improved. After comparison, it is recommended to remove the column first and then the buckle cable after the closure of the whole bridge.

Keywords: Ganxi Super Bridge; open web continuous rigid frame bridge; triangular area; temporary buckle cable; support column; force analysis

0 引言

三角区箱梁施工是空腹式连续刚构桥结构施工中技术最复杂、施工难度最大的部分。在中国已经完工的空腹式连续刚构桥中,水盘高速北盘江大桥三角区上弦箱梁采用全支架逐段现浇,下弦箱梁采用全斜拉扣挂法配合挂篮悬浇^[1-5];重庆礼嘉嘉陵江大桥与湖北云南庄特大桥上弦箱梁采用部分斜拉扣挂、下弦箱梁采用全斜拉扣挂法悬浇^[6-7];甘溪特大桥上弦箱梁采用可伸缩部分立柱后支配挂篮悬浇,即部分无腹板下弯束的节段梁悬浇完成后借助后支顶的立柱支撑,然后浇筑下一节段,下弦箱梁采用全斜拉扣挂法配合挂篮悬浇,该组合工法在空腹式连续刚构桥实际工程中尚属首次应用,上弦设置可伸缩后支顶的立柱保证了上弦箱梁可以采用常规悬浇工艺进行施工,简化了施工工序,降低了施工风险^[8]。在已施工的几座同类型桥梁中,技术人员分别针对相应的施工方法进行了三角区受力分析^[6,9-12],但是对于其他施工方法的结构体系受力分析未见研究。本文以甘溪特大桥工程为依托,研究该工法施工过程中,空腹三角区箱梁及临时支撑结构的受力特性,总结施工过程中三角区箱梁应力和临时扣索、支撑立柱的受力变化规律,并提出临时扣索和支撑立柱的最佳解除时机,供类似工程参考借鉴。

1 工程概况

甘溪特大桥位于贵州省黔南布依族苗族自治州贵定县,横跨甘溪自然保护区独木河水库,是贵(阳)黄(平)高速控制性工程之一。

桥型布置:双幅 18×30 m(简支变连续T梁)+(155+300+155) m(空腹式连续刚构桥)+ 2×35 m(简支变连续T梁)。主桥为预应力混凝土空腹式连

续刚构桥,主跨300 m,单幅梁宽10.25 m。

主梁采用单箱单室预应力混凝土结构,混凝土强度等级C55。单悬臂共分为35个标准梁段,梁高4.5~15.1 m,梁宽10.25 m,节段长度3.0 m、3.5 m、4.0 m、4.5 m,采用三向预应力体系;三角区下弦采用矩形空心截面,宽6.25 m,正截面高7.50 m。主墩为矩形双肢柔性薄壁墩,19#主墩高85 m,20#主墩高128.75 m,基础为群桩基础。如图1所示。

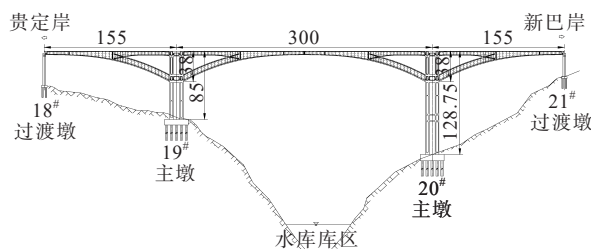


图1 甘溪特大桥主桥立面布置(单位:m)

Figure 1 Elevation layout of main bridge of Ganxi Super Bridge (unit:m)

空腹三角区总长120 m,其中0#块区域长18 m,单侧三角区上、下弦均分为12个4 m长节段(1#~12#节段)和1个3 m长节段(13#节段),上、下弦在13#节段交会。下弦根部底面距离桥面约38 m。由于上弦箱梁截面尺寸有限,空腹三角区上弦箱梁仅1#~4#节段设置了腹板悬浇下弯钢束,5#~13#节段均无悬浇下弯束,除11#梁段外,其余梁段设置了顶板纵向预应力钢束。下弦各节段均设置了竖向预应力钢绞线,1#梁段(X1/X1')设置了水平纵向预应力钢束,其余节段无纵向预应力。三角区箱梁布置如图2所示。

2 上部结构施工方法

(1) 上弦1#~3#节段按常规挂篮悬浇方法施工,4#~11#节段在节段梁悬浇完成且挂篮前移后,在该

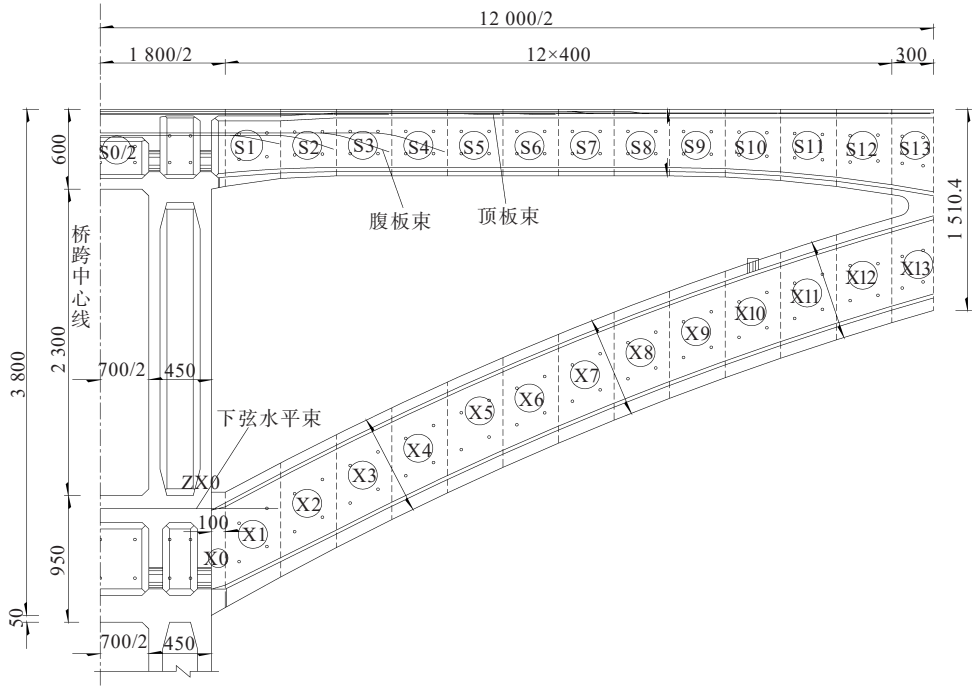


图2 三角区结构布置图(单位:cm)

Figure 2 Triangular structure layout (unit:cm)

节段梁腹板下方的前端再支顶临时钢管立柱,施加顶升力,然后再浇筑下一节段梁。12[#]梁段待箱梁浇筑完成并将上弦挂篮底篮拆除后再安装并支顶。

(2) 下弦 1[#]、2[#]梁段利用上弦挂篮浇筑,3[#]~12[#]节段利用下弦斜爬式挂篮配合扣索浇筑。

(3) 下弦施工需要领先上弦 2~3 个节段。

(4) 下弦 12[#]梁段浇筑完成后,拆除下弦挂篮主桁及行走系统,保留模板系统。

(5) 上弦 12[#]梁段浇筑完成后,拆除挂篮底篮,将主桁与下弦底篮和模板系统重新组拼为 1 套挂篮,浇

筑后续节段箱梁。

(6) 13[#]梁段为三角区交会段,分两次浇筑,下弦浇筑完成后,张拉扣索,再浇筑上弦箱梁。

(7) 标准节段梁浇筑完成后,先合龙边跨,再合龙中跨。

(8) 中跨合龙完成后,由远墩侧梁段向近墩侧梁段方向逐对称解除临时立柱与扣索。

三角区施工阶段临时支撑体系总体布置如图 3 所示,施工示意如图 4 所示。

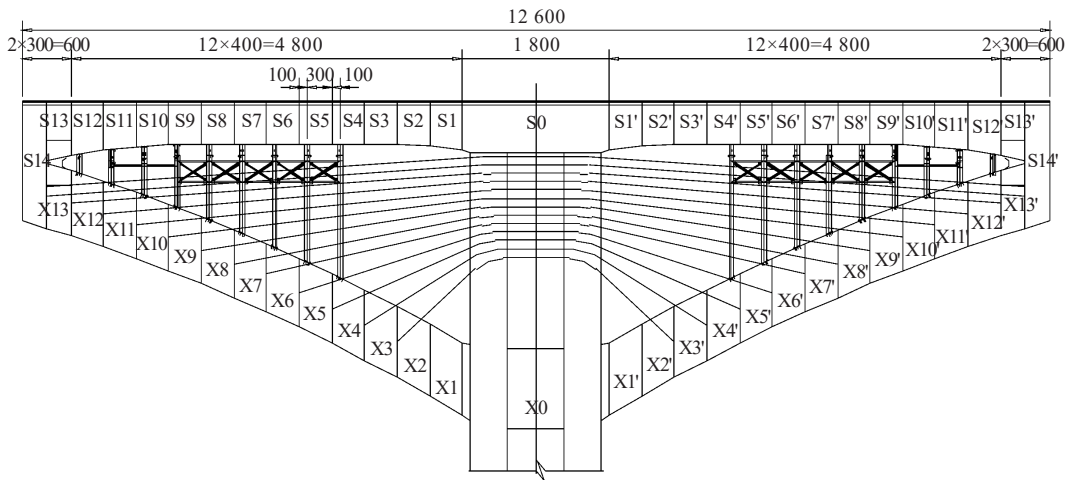


图3 三角区施工阶段临时支撑体系总体立面布置图(单位:cm)

Figure 3 General elevation layout of temporary support system in triangular area during construction (unit:cm)

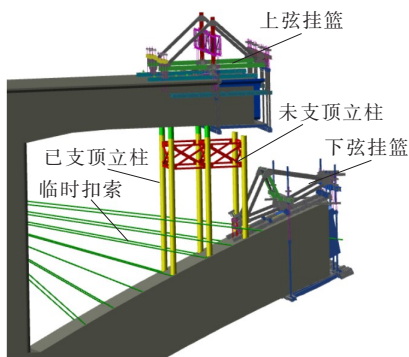


图4 三角区施工方法示意图

Figure 4 Construction method in triangular area

临时扣索采用低松弛预应力钢绞线,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$;支撑立柱采用 $\phi 630\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管桩,材质Q235B,立柱端部密贴支撑于主梁腹板下方,立柱初顶力大小采用试算法确定,最终确定的初顶力应不使梁段截面下缘产生过大拉应力,并保持上缘具备足够的压应力储备,且在全桥合龙后,立柱不发生脱空。

3 三角区临时支撑体系受力分析

3.1 结构有限元模型

利用Midas Civil结构有限元分析软件建立全桥施工全过程的有限元模型,其中混凝土梁、墩柱、支撑钢管立柱采用梁单元模拟,支撑立柱在与主梁连接前施加初顶力,临时扣索采用只受拉单元模拟并施加初拉力,扣索、立柱与主梁之间边界条件采用弹性连接模拟^[13-15]。模型模拟从上弦0°块开始至全桥合龙并拆除立柱、扣索的施工全过程,进行结构受力分析。本分析假定临时扣索和立柱在全桥合龙完成后拆除,且先拆除立柱,再拆除扣索。有限元模型如图5所示。

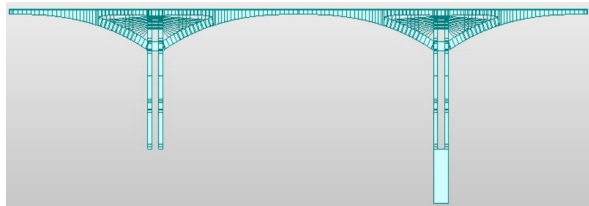


图5 施工过程有限元模型

Figure 5 Finite element model of construction process

3.2 总体分析结果

主梁及三角区临时支撑立柱、扣索在成桥施工

过程中应力结果如图6~9所示。

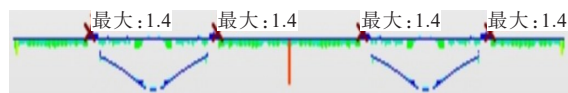


图6 主梁最大拉应力结果(单位:MPa)

Figure 6 Results of maximum tensile stress of main beam (unit:MPa)

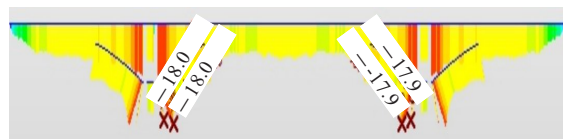


图7 主梁最大压应力结果(单位:MPa)

Figure 7 Results of maximum compressive stress of main beam (unit:MPa)

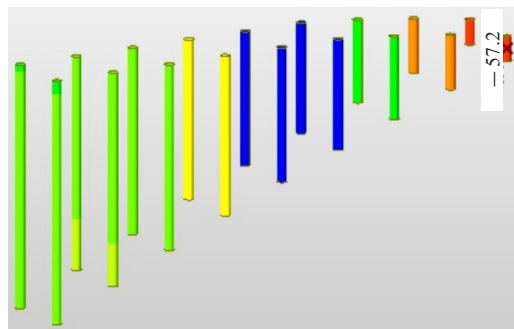


图8 支撑立柱最大压应力结果(单位:MPa)

Figure 8 Results of maximum compressive stress of support column (unit:MPa)

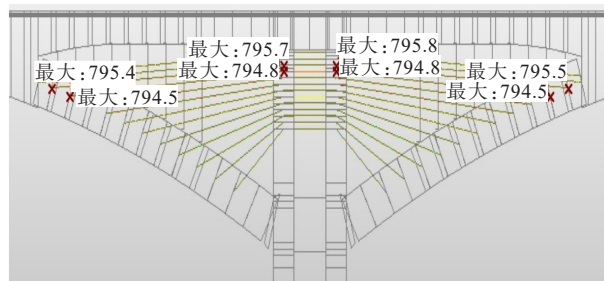


图9 临时扣索最大拉应力结果(单位:MPa)

Figure 9 Results of maximum tensile stress of temporary buckle cable (unit:MPa)

由计算结果可知,主梁最大拉应力值 $=1.4\text{ MPa}<0.7f'_{tk}=0.7\times 2.74=1.918\text{ MPa}$;主梁最大压应力值 $=18.10\text{ MPa}<0.7f'_{tk}=0.7\times 35.5=24.85\text{ MPa}$;支撑立柱最大压应力值 $=57.2\text{ MPa}<140.0\text{ MPa}$;临时扣索最大拉应力值 $=795.8\text{ MPa}<0.5f_{pk}=0.5\times 1\ 860=930.0\text{ MPa}$ 。均满足规范要求。

3.3 三角区施工过程中上、下弦箱梁应力变化分析

对三角区施工过程中(0[#]块开始~上弦13[#]块施工完成)上、下弦箱梁截面应力变化情况进行统计,分析在箱梁悬浇、预应力张拉、立柱支撑、扣索张拉等施工作用影响下,各梁段应力的变化规律。图10、11分别为上弦箱、下弦箱梁截面应力包络图(图中正值为拉应力,负值为压应力)。

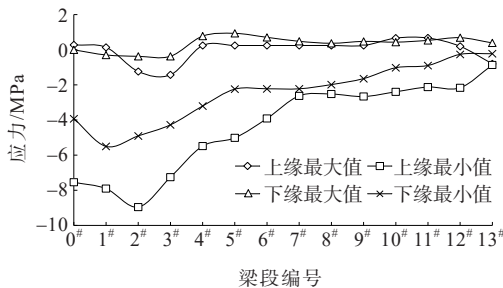


图10 上弦箱梁截面应力包络图

Figure 10 Stress envelope diagram of upper chord box girder section

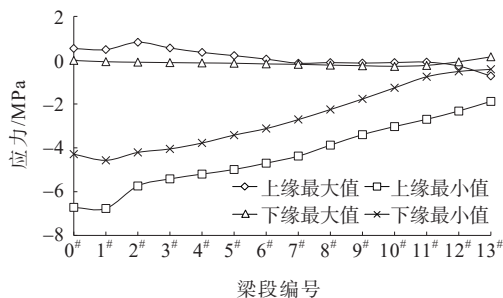


图11 下弦箱梁截面应力包络图

Figure 11 Stress envelope diagram of lower chord box girder section

由图10可知:三角区施工过程中,上弦箱梁截面上缘拉应力最大值为0.7 MPa,位于11[#]梁段,这是因为上弦11[#]梁段未设置纵向顶板束与腹板束,悬浇施工过程中梁顶出现了较大的拉应力;上缘压应力最大值为-9.0 MPa,位于2[#]梁段。查看模型得知,由于支撑立柱和顶板纵向预应力的组合作用,上弦箱梁顶在施工过程中主要处于受压状态,出现最大拉应力的工况为后续节段混凝土浇筑阶段,混凝土自重使梁顶产生了较小的负弯矩,梁顶面出现短时间的受拉,待新浇梁段施加顶板纵向预应力和支顶立柱后,拉应力随即消失,转变为受压状态。临时支撑立柱的设置弥补了5[#]~12[#]梁段无腹板下弯束的先天缺陷,使得已浇梁段可以承受施工阶段的挂篮与混凝土湿重荷载。

上弦箱梁截面下缘拉应力最大值为0.9 MPa,位

于5[#]梁段;压应力最大值为-5.5 MPa,位于1[#]梁段。查看模型得知,上弦梁底在施工过程中主要处于受压状态,出现拉应力的阶段为该梁段或者其后续邻近梁段立柱支顶的工况,由于顶升力的作用,使上弦箱梁产生了较小的正弯矩,箱梁截面下缘出现了拉应力,随着下一节段混凝土的浇筑,拉应力随即消失,转变为受压状态。

由图11可知:施工过程中,下弦箱梁截面上缘拉应力最大值为0.8 MPa,位于2[#]梁段,压应力最大值为-6.8 MPa,位于1[#]梁段。查看模型得知,下弦箱梁前期施工的几个节段,梁顶面应力正负变化较频繁,出现拉应力的工况为最前端梁段混凝土浇筑,现浇混凝土重量使得根部附近的几个节段处负弯矩增大,而已施工的扣索索力提供的正弯矩小于梁段自重产生的负弯矩,梁顶出现拉应力。当最前端扣索张拉完成后,拉应力消失,梁顶混凝土转变为受压状态。随着下弦箱梁悬臂长度的增加,扣索产生的弯矩和轴向力组合效应使根部梁段顶部压应力逐渐增大,不再出现受拉状态。后期施工的梁段处由于负弯矩值较小,梁顶未出现受拉状态,应力均在轻度受压的范围内变化。扣索提供的张拉力能够使梁顶保持较好的压应力水平。

下弦箱梁截面下缘拉应力最大值为0.2 MPa,位于13[#]梁段,其余梁段未出现拉应力,压应力最大值为-4.6 MPa,位于1[#]梁段。查看模型得知,下弦箱梁截面下缘压应力最小状态出现在扣索张拉工况,由于扣索索力的施加,抵消了箱梁自重产生的部分负弯矩,使得梁底压应力减小,随着后续梁段的施工,梁底压应力又逐步增大。悬臂根部附近的箱梁在施工后期,压应力逐步增大,悬臂前端的箱梁应力最大值与最小值较接近。

3.4 三角区箱梁在各关键施工阶段应力分布

三角区箱梁施工完成后,按照常规挂篮悬浇工艺施工至中跨合龙完成,然后进行三角区结构体系转换施工。本分析假定体系转换施工在合龙完成后进行。转换施工顺序为:先拆除支撑立柱,再拆除扣索。立柱、扣索的拆除顺序均按照由远墩侧梁段向近墩侧梁段逐对对称拆除。

选取三角区合龙完成、中跨合龙完成、三角区体系转换施工完成3个关键施工阶段,对比三角区箱梁在以上各施工阶段应力分布情况,分析箱梁在全桥施工过程中的应力变化规律。结果如图12、13所示。

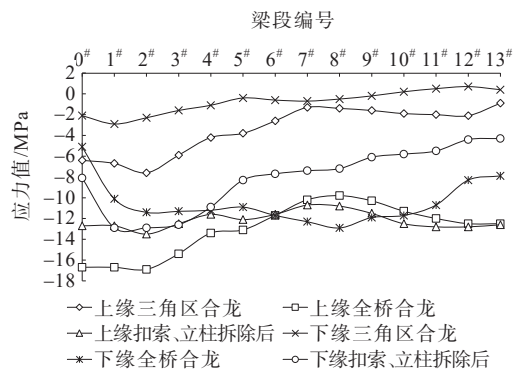


图12 三角区上弦箱梁各关键阶段应力分布

Figure 12 Stress distribution in key stages of upper chord box girder in triangular area

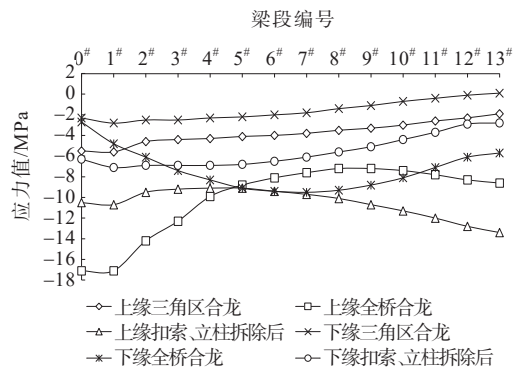


图13 三角区下弦箱梁各关键阶段应力分布

Figure 13 Stress distribution in key stages of lower chord box girder in triangular area

由图12、13可知:

(1) 全桥合龙完成时,三角区箱梁压应力增加显著,上、下弦箱梁由三角区合龙完成时的拉、压共存状态转变为全受压状态。上弦箱梁最大压应力值由7.6 MPa增加至16.9 MPa,最大值位于上弦2#块截面上缘;最小压应力值5.1 MPa,位于上弦0#块截面下缘。下弦箱梁最大压应力值由5.6 MPa增加为17.1 MPa,最大值位于下弦1#块截面上缘;最小压应力值2.7 MPa,位于下弦0#块截面下缘。

(2) 在三角区立柱、扣索拆除后,三角区箱梁应力重分布较为明显,但仍为全受压状态。三角区根部附近梁段截面上缘的压应力值均较全桥合龙完成时减小,截面下缘压应力值较全桥合龙完成时增加;三角区前端梁段截面上缘压应力值较全桥合龙完成时增加,截面下缘压应力值较全桥合龙完成时减小。

3.5 临时扣索索力变化

全桥施工过程中,临时扣索索力变化如表1所示。临时扣索初拉力在施工时一次张拉到位。

由表1可知:

(1) 三角区合龙完成时,下弦13#梁段两对扣索索力增大,最大增量较初张力增大1.5%,其余梁段扣索索力均减小,减小范围为-1.6%~-8.6%,变化幅度较小。

表1 临时扣索索力变化

Table 1 Change of temporary buckle cable force

扣索编号 (对应下弦 梁段号)	单根初拉力 (2根/节段)/ kN	三角区 合龙完 成/kN	全桥合龙 完成/kN	成桥过程中最大值/ kN	成桥过程 中最小 值/kN	拆除前/ kN	三角区合龙 完成后较初 拉力浮动/%	全桥合龙完 成后较初拉 力浮动/%	施工全过程 较初拉力 浮动/%
2#	975.2	942.2	843.2	1 003.5(下弦13#块浇筑)	822.8	930.5	-3.4	-13.5	-15.6~2.9
3#	961.2	908.3	758.8	997.7(下弦7#块浇筑)	738.2	866.7	-5.5	-21.1	-23.2~3.8
4#	1 141.9	1 073.6	895.3	1 181.7(下弦7#块浇筑)	876.2	1 072.7	-6.0	-21.6	-23.3~3.5
5#	1 140.0	1 056.7	865.0	1 176.9(下弦7#块浇筑)	846.6	972.7	-7.3	-24.1	-25.7~3.2
6#	1 893.6	1 731.2	1 355.9	1 977.3(下弦8#块浇筑)	1 322.5	1 540.3	-8.6	-28.4	-30.2~4.4
7#	2 872.8	2 684.2	2 312.5	2 912.2(下弦9#块浇筑)	2 281.9	2 461.4	-6.6	-19.5	-20.6~1.4
8#	2 826.1	2 706.3	2 344.0	2 918.2(下弦13#块浇筑)	2 316.2	2 461.0	-4.2	-17.1	-18.0~3.3
9#	3 059.6	2 970.8	2 620.1	3 173.8(下弦13#块浇筑)	2 595.5	2 707.4	-2.9	-14.4	-15.2~3.7
10#	3 057.2	2 996.1	2 657.5	3 203.4(下弦13#块浇筑)	2 636.1	2 720.0	-2.0	-13.1	-13.8~4.8
11#	3 068.5	3 016.3	2 689.0	3 227.1(下弦13#块浇筑)	2 670.8	2 731.3	-1.7	-12.4	-13.0~5.2
12#	3 066.9	3 017.4	2 699.7	3 230.9(下弦13#块浇筑)	2 684.9	2 726.1	-1.6	-12.0	-12.5~5.3
13#(1#)	2 939.8	2 981.5	2 668.8	2 981.5(上弦13#块浇筑)	2 656.5	2 672.3	1.4	-9.2	-9.6~1.4
13#(2#)	2 920.8	2 964.1	2 649.6	2 964.1(上弦13#块浇筑)	2 639.4	2 652.8	1.5	-9.3	-9.6~1.5

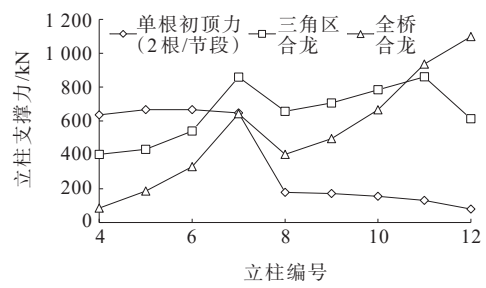


图 15 三角区支撑立柱各关键阶段压力变化

Figure 15 Pressure change in each key stage of support column in triangular area

度较大,但始终处于受压状态,不会发生脱空现象。

(4) 立柱在拆除前,所受压力值均大于或等于合龙完成时的压力值,部分立柱在拆除前达到压力峰值。

选取 4[#]、10[#]梁段支撑立柱绘制支撑力变化曲线

如图 16 所示。

由图 16 可知:4[#]梁段立柱支撑力峰值在三角区施工过程中出现,随后总体呈下降趋势,在临近拆除前又明显上升;10[#]梁段立柱自施加支顶力后,支撑力在后续梁段施工过程中迅速上升,随后保持较平稳的状态,在临近拆除前又迅速上升,并达到峰值。

3.7 特征梁段应力实测结果与计算结果对比

施工过程中,在上弦 1[#]、7[#]、14[#]梁段,下弦 1[#]、7[#]梁段处设置了应力监测点,提取三角区合龙(施工至 14[#]梁段)、全桥合龙、临时立柱扣索拆除后 3 个施工阶段应力的监测结果,并与计算结果对比,如表 3 所示,梁段在上述施工阶段完成后均无拉应力,压应力监测结果与计算值均较为接近。大部分箱梁节段实测压应力值稍大于计算值,表明计算分析留有一定安全储备。

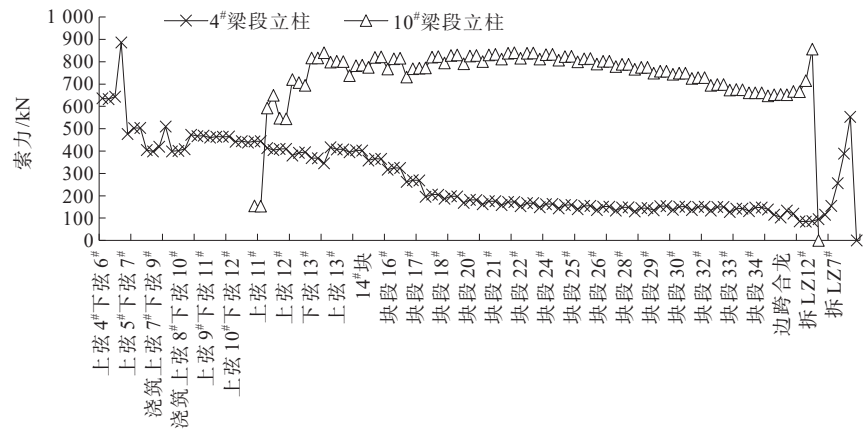


图 16 4[#]、10[#]梁段立柱支撑力变化曲线

Figure 16 Variation curve of column support force in 4[#] and 10[#] beam sections

表 3 特征梁段应力实测结果与计算结果对比

Table 3 Comparison between measured and calculated stress of characteristic beam sections										MPa
梁段号	上弦 1 [#] 节段		上弦 7 [#] 节段		上弦 14 [#] 节段		下弦 1 [#] 节段		下弦 7 [#] 节段	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
三角区合龙(14 [#] 节段)	-8.4	-7.2	-2.5	-1.7	-1.5	-1.1	-7.0	-5.9	-5.0	-4.0
全桥合龙	-19.2	-17.5	-14.0	-12.7	-14.0	-11.6	-17.9	-17.3	-10.2	-10.6
立柱扣索拆除	-14.6	-13.3	-12.8	-10.5	-13.9	-11.5	-12.1	-11.0	-10.8	-10.0

4 三角区临时扣索及支撑立柱拆除时机研究

三角区临时扣索和支撑立柱的主要作用是为了在施工过程中对梁体形成临时支撑,保证箱梁施工过程中应力、线形满足预期值,当梁体结构自身在施工过程中实现自稳后,理论上即可拆除临时扣索和

支撑立柱。

本文提出了以下 5 种扣索、立柱的拆除时机方案,通过有限元模型计算分析,得出各方案对梁体应力影响,比选后提出最佳拆除时机。

方案 1:三角区合龙后再施工 1 个梁段(至 14[#]梁段),然后先拆除立柱,最后拆除扣索。

方案 2:三角区合龙后拆除立柱,全桥合龙后拆

除扣索。

方案3:边跨合龙前拆除立柱,中跨合龙后拆除扣索。

方案4:中跨合龙后先拆除立柱,再拆除扣索。

方案5:中跨合龙后先拆除扣索,再拆除立柱。
计算结果如表4所示。

表4 各方案主梁最大应力值
Table 4 Maximum stress value of main beam in each scheme

方案	最大拉应力/MPa	拉应力控制值/MPa	是否满足	最大压应力/MPa	压应力控制值/MPa	是否满足	备注
1	6.4		否	7.8		是	施工阶段分析至14 [#] 梁段,拉应力最大值位于上弦10 [#] 、11 [#] 梁段
2	2.7	1.92	否	18.5	24.85	是	拉应力最大值位于下弦13 [#] 梁段
3	1.4		是	18.5		是	拉应力最大值位于17 [#] 梁段
4	1.4		是	18.0		是	拉应力最大值位于17 [#] 梁段
5	1.4		是	18.0		是	拉应力最大值位于17 [#] 梁段

由表4可知:方案1梁体拉应力值达到6.4 MPa,严重超标,这是因为三角区合龙后的状态,上弦箱梁纵向预应力施加仍较少,箱梁未形成足够的压应力储备,此时还需要借助临时扣索和立柱的支撑;方案2梁体拉应力2.7 MPa,仍然超标。以上2个方案均不可行。方案3~5梁体拉、压应力值均小于控制值,且应力值基本接近,理论上可行,但方案3在边跨合龙前拆除立柱,不利于箱梁主体结构施工工序的连续性,不推荐。方案4相比方案5先拆立柱后拆扣索对施工过程中保持结构安全性更有利,因此本文推荐方案4。

5 结论

(1) 通过对甘溪特大桥空腹式连续刚构桥施工过程计算分析,从施工过程结构受力可靠性的角度验证了空腹三角区上弦采用部分立柱后支悬浇施工、下弦采用临时扣索配合挂篮悬浇施工方法的可行性。

(2) 分析了三角区上、下弦箱梁在三角区施工过程中应力变化与各工序之间的内在关联,三角区施工过程中,已施工的上、下弦箱梁应力以受压为主,受下一节段混凝土浇筑、立柱支顶、扣索张拉等工序影响,其间会出现短暂轻微受拉状态。

(3) 对比三角区合龙完成、全桥合龙完成、临时扣索与立柱拆除完成3个关键施工状态下的三角区梁体应力分布情况:三角区合龙完成时箱梁截面以受压为主,局部存在轻微受拉;全桥合龙后三角区箱

梁为全受压状态,较三角区合龙状态压应力增加明显;临时扣索、立柱拆除后,上、下弦箱梁出现了明显的应力重分布,但仍为全受压状态。

(4) 临时扣索索力峰值均出现在三角区合龙完成前,三角区合龙后总体呈下降趋势,临近拆除前有所回升。后方临时立柱在施工过程中支撑力总体呈下降趋势,前方立柱呈上升趋势,临近拆除前立柱支撑力增幅均较大。

(5) 对比5种扣索、立柱拆除时机方案,通过结构受力分析和施工安全性、连续性等方面比选,提出了全桥合龙后先拆除立柱、再拆除扣索的推荐方案。

参考文献:

References:

- [1] 韩洪举,黄坤全.290 m空腹式刚构桥三角区施工技术[J].桥梁建设,2011,41(3):81-84.
HAN Hongju, HUANG Kunquan. Construction techniques for triangle area of a 290 m span open-web continuous rigid-frame bridge[J]. Bridge Construction, 2011, 41(3): 81-84.
- [2] 由瑞凯,陈超华,杨金龙,等.峡谷大跨度空腹式刚构桥三角区施工技术[J].中外公路,2014,34(3):144-147.
YOU Ruikai, CHEN Chaohua, YANG Jinlong, et al. Construction technology of triangle area of long-span hollow rigid frame bridge in canyon[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(3): 144-147.
- [3] 彭元诚,周水兴,徐略勤.空腹式PC连续刚构桥结构设计参数经济性比较[J].中外公路,2017,37(6):151-155.

- PENG Yuancheng, ZHOU Shuixing, XU Lueqin. Economic comparison of structural design parameters of vierendeel PC continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(6): 151-155.
- [4] 徐略勤, 彭元诚, 周水兴. 空腹式连续刚构桥跨径与根部梁高的经济取值研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(3): 55-59.
- XU Lueqin, PENG Yuancheng, ZHOU Shuixing. Study of economic span length and pier-top girder depth for Open-web continuous rigid-frame bridge[J]. World Bridges, 2017, 45(3): 55-59.
- [5] 宗昕, 彭元诚, 吴游宇, 等. 北盘江特大桥结构设计[J]. 公路, 2010, 55(8): 22-26.
- ZONG Xin, PENG Yuancheng, WU Youyu, et al. Structural design of Beipanjiang Bridge[J]. Highway, 2010, 55(8): 22-26.
- [6] 冉旭, 杨婷婷. 空腹式连续钢构桥施工方法对比分析[J]. 四川建材, 2016, 42(4): 198-199, 201.
- RAN Xu, YANG Tingting. Comparative analysis of construction methods of vierendeel continuous steel bridge[J]. Sichuan Building Materials, 2016, 42(4): 198-199, 201.
- [7] 刘新华, 李秋, 彭元诚, 等. 湖北云南庄特大桥设计关键技术[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 112-116.
- LIU Xinhua, LI Qiu, PENG Yuancheng, et al. Key design techniques for Yunnanzhuang Bridge in Hubei[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 112-116.
- [8] 孙克强, 李松, 李百富, 等. 甘溪特大桥 300 m 跨空腹式刚构桥三角区施工技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 45-50.
- SUN Keqiang, LI Song, LI Baifu, et al. Study of construction schemes for triangular zone of 300 m span open-web rigid frame bridge of Ganxi River Bridge[J]. World Bridges, 2020, 48(2): 45-50.
- [9] 陶路. 290 m 空腹式连续刚构桥梁合龙技术[J]. 交通科技, 2015(2): 48-51.
- TAO Lu. Closure techniques for 290 m long open-web continuous rigid-frame bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2015(2): 48-51.
- [10] 秦林, 陈进芬, 胡海洋, 等. 北盘江大桥合龙顶推方案研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(3): 43-46.
- QIN Lin, CHEN Jinfen, HU Haiyang, et al. Study of incremental launching schemes for closure of Beipanjiang River Bridge[J]. World Bridges, 2013, 41(3): 43-46.
- [11] 黄坤全, 彭旭民. 空腹式连续刚构桥施工过程受力特性分析[J]. 桥梁建设, 2011, 41(3): 40-43.
- HUANG Kunquan, PENG Xumin. Analysis of mechanical behavior of a prestressed concrete open-web continuous rigid-frame bridge in construction process[J]. Bridge Construction, 2011, 41(3): 40-43.
- [12] 应松, 彭旭民, 黄盛. 高墩大跨度空腹式刚构桥空腹区施工方法研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(3): 101-106.
- YING Song, PENG Xumin, HUANG Sheng. Study of construction methods for open-web area of high-rise pier and long span open-web rigid-frame bridge[J]. Bridge Construction, 2012, 42(3): 101-106.
- [13] 解亚东, 王少辉, 吕志强, 等. 多跨连续刚构桥边中跨同时合龙关键技术[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 85-89.
- XIE Yadong, WANG Shaohui, LYU Zhiqiang, et al. Key technology for simultaneous closing of side-span and mid-span of multi-span continuous rigid frame bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 85-89.
- [14] 肖龙, 冯仲仁, 陈百奔, 等. 基于修正反应谱高墩连续刚构桥地震响应研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 115-122.
- XIAO Long, FENG Zhongren, CHEN Baiben, et al. Research on seismic response of high pier continuous rigid frame bridge based on modified response spectrum[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 115-122.
- [15] 杨战勇. 基于温度修正徐变模型的公路大跨连续刚构桥结构状态影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 151-156.
- YANG Zhanyong. Influence analysis of a highway long-span continuous rigid frame bridge based on temperature modified creep model[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 151-156.