

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.01.001

非对称悬臂施工曲线连续刚构桥 不同施工阶段应力变化规律研究

杨果林¹, 黎勇¹, 谭文杰², 周伏良²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中建五局 土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 结合工程实例——湖南省长沙市大王山旅游度假区桐溪路景观桥, 采用有限元软件 Midas/civil, 对非对称曲线连续刚构桥在不同施工阶段的应力进行计算与分析, 得出非对称曲线连续刚构桥在不同施工阶段的应力变化规律。结果表明, 在对称施工阶段中, 各截面箱梁顶板和底板的压应力呈现出总体上升的变化趋势; 在非对称施工阶段中, 各截面箱梁顶板的压应力总体下降, 箱梁顶板应力随悬臂长度的增加而减小, 而箱梁底板应力随悬臂长度的增加而增大; 合拢段在预应力钢束张拉完成后, 截面应力增加了2~4倍; 前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面顶板压应力相对增加值随梁段数的增加而在一定应力值范围内震荡; 前一梁段张拉后至下一梁段浇筑后张拉前的截面顶板应力相对减小值随梁段数的增加在一定应力值范围震荡呈上行变化, 而截面底板应力呈下行变化。

关键词: 曲线连续刚构桥; 不对称; 应力变化; 有限元分析

中图分类号: U448.23

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)01-0001-08

引文格式: 杨果林, 黎勇, 谭文杰, 等. 非对称悬臂施工曲线连续刚构桥不同施工阶段应力变化规律研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 1-8.

Study on Stress Variation Law of Curved Continuous Rigid Frame Bridge with Asymmetric Cantilever Construction at Different Construction Stages

YANG Guolin¹, LI Yong¹, TAN Wenjie², ZHOU Fuliang²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. CCFED, Civil Engineering Co., LTD, Changsha 410004, China)

Abstract: Based on a case study of the engineering example Tongxi Road Landscape Bridge of Dawangshan tourist resort in Changsha, Hunan Province, a calculation and analysis have been made of the stress of asymmetric curve continuous rigid frame bridge at different construction stages by using the finite element software Midas/civil, thus obtaining the stress variation law of asymmetric curve continuous rigid frame bridge at different construction stages. The results show that at the symmetrical construction stage, the compressive stress of the top and bottom plates of box girder in each section shows an overall upward trend; at the asymmetric construction stage, the compressive stress of the top plate of the box girder decreases as the cantilever length increases, while the stress of the bottom plate of the box girder increases with the increase of the cantilever length, with the section stress of the closure section increasing by 2 ~ 4 times after the completion of the prestressing tendon tensioning. The relative increase value of the compressive

收稿日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778641), 中南大学中央高校自主创新基金资助项目 (2016zzt063), 中建五局科研基金资助项目 (020116D0003009)

作者简介: 杨果林 (1963-), 男, 湖南桃江人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程, 道路与铁道工程方面的教学与研究, E-mail: yangguolin6301@163.com

stress in the top plate of the section from the pouring of the previous beam segment to the pouring and tensioning of the next beam segment vibrates within a certain stress range with the increase of the number of beam segments; the relative decrease of the section roof stress from the previous beam section after the tensioning to the next beam segment before the tensioning changes in a certain stress range with the increase of the number of beam segments, while the cross-section floor stress changes show a downward trend.

Keywords: curved continuous rigid frame bridge; asymmetry; stress change; finite element analysis

0 引言

随着我国经济社会的飞速发展，以及西部大开发、一带一路战略的提出，基础设施建设不可避免地会向高原和山地等地方延伸。但是在高原或山地进行桥梁建设时，因路、桥交叉的原因，需要实现三维跨界工程，而采用曲线连续刚构桥是实现三维跨界工程的主要桥型之一。

在桥梁工程中，曲线连续刚构桥有着可以避免占用土地和节约建筑费用的优点^[1-2]。但是曲线连续刚构桥的受力要比直线型桥的受力复杂得多，因其存在“弯扭耦合”作用，主梁截面拉应力会比直线型桥大得多，同时会受扭矩的作用而产生扭转变形。非对称曲线连续刚构桥属于曲线连续刚构桥的一种，因结构的非对称性，会使其主梁的受力更为复杂，因此分析曲线梁的空间受力对于非对称曲线连续刚构桥在施工过程中的应力控制非常重要。

目前，对于曲线连续刚构桥的受力特性，许多学者进行了研究^[3-12]。如田雪峰^[3]对曲线连续刚构桥在恒载作用下的受力进行了分析，得出了主梁上侧处于受拉状态，下侧处于受压状态的结论；黄斌等^[5]

对曲线连续刚构桥施工阶段的结构受力进行了分析，得出了主梁全截面均受压的结论。但目前对非对称曲线连续刚构桥的受力研究相对较少，因此本文以湖南省长沙市桐溪路景观桥为依托工程，研究非对称曲线连续刚构桥在不同施工阶段的应力变化规律，以期为非对称曲线连续刚构桥梁的施工控制提供理论依据。

1 工程背景

湖南省长沙市桐溪路景观桥位于大王山旅游度假区中心桐溪路，为长沙市坪塘工矿棚户区改造暨旅游产业中心区项目基础设施重点工程，属于坪塘大道—潇湘大道东线道路工程中的一段，桥梁起点桩号为K0+413.793，终点桩号为K0+706.793。桐溪路景观桥为15.0 m+55.5 m+145.0 m+55.5 m+15.0 m的预应力混凝土连续刚结构，其主线宽22.6 m，景观平台宽5.3 m，属于新建桥梁。桐溪路景观桥的主桥布置见图1，图中桥结构数据单位为cm。因为该工程位于岩溶发育地区，所以在设计中采用曲线桥穿越矿坑，桥梁平面曲线半径为600 m，主桥平面图见图2，应力测试关键截面见图3，图中数据单位为cm。

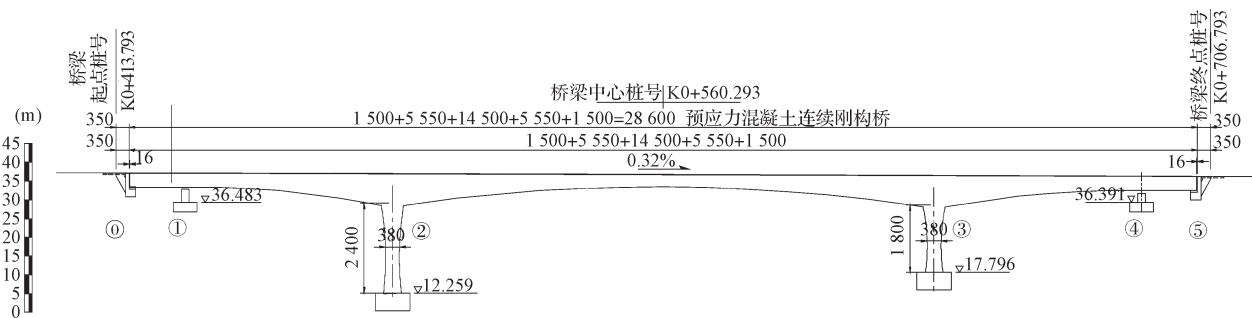


图1 主桥布置图

Fig. 1 Layout of the main bridge

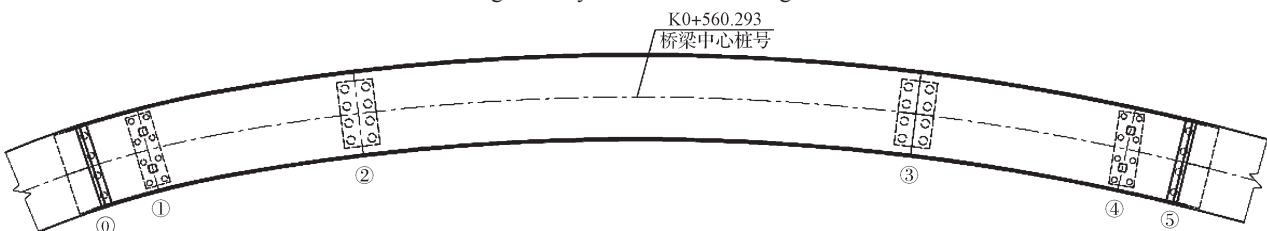


图2 主桥平面图

Fig. 2 Planar graph of the main bridge

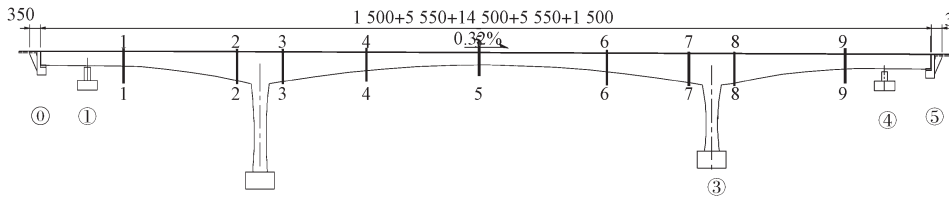


图 3 应力测试关键截面图

Fig. 3 Key sections of stress tests

桐溪路景观桥上部结构采用 145 m 连续刚构桥, 主梁为混凝土箱梁结构, 箱梁类型为单箱双室, 桥面设置为双向坡, 坡度为 1.5%。箱梁底板宽度为 14.6 m, 悬臂端宽度为 4.0 m, 顶板宽度为 22.6 m, 中跨跨中箱梁高度为 3.2 m, 边跨等截面箱梁高度为 3.75 m, 梁高均按 1.8 次抛物线变化。

桐溪路景观桥采用挂篮悬臂现浇法进行对称及非对称施工, 0# 梁段采用托架现浇完成, 其余各梁段采用挂篮悬臂浇筑, 主梁合拢顺序为先边跨后中跨合拢。中跨悬臂浇筑的分块编号如图 4 所示, 图中数据单位为 cm; 边跨悬臂浇筑段的分块编号如图 5 所示, 图中数据单位为 cm。

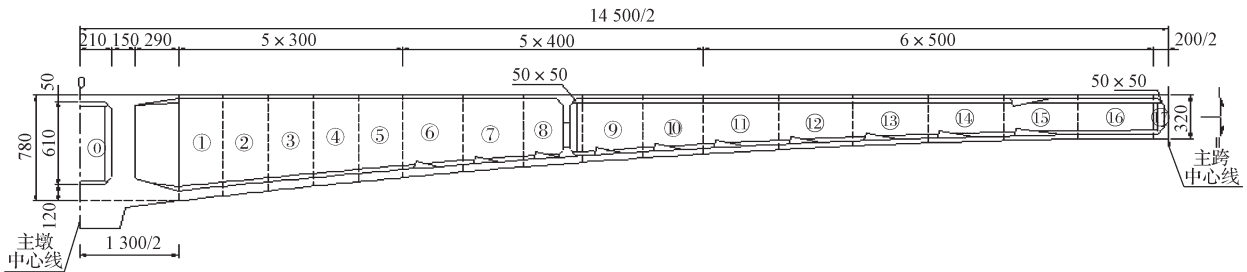


图 4 中跨梁段分块编号

Fig. 4 Mid span beam segment block numbers

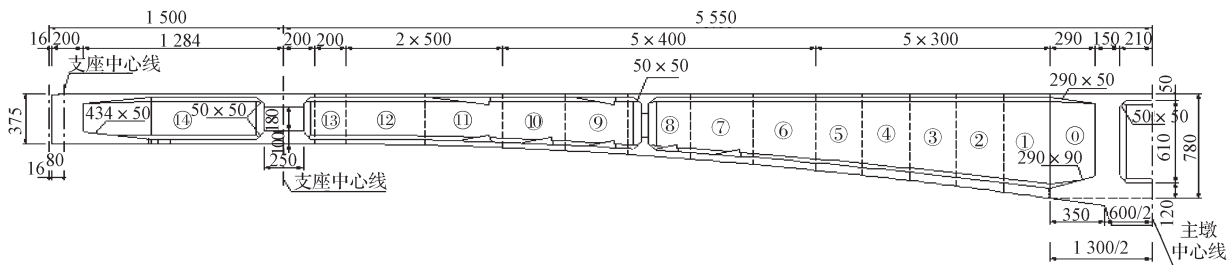


图 5 边跨梁段分块编号

Fig. 5 Block number of side span beam section

2 非对称曲线连续刚构桥有限元模型

2.1 有限元模型的建立

采用有限元软件 Midas/civil 建立曲线连续刚构桥模型, 全桥共有 110 个单元和 122 个节点, 具体如

图 6 所示。该桥的整体坐标系以跨中梁段对称面为坐标系的 yo z 平面; 原点取对称面与道路中心线的交点, 即对称面的中点; x 轴取对称面的法线方向, 从 2# 主墩指向 3# 主墩; y 轴指向背离曲线圆心的方向; z 轴指向上方。

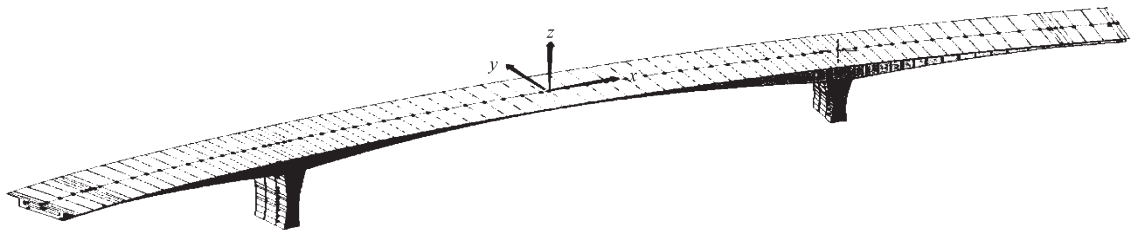


图 6 曲线连续刚构桥桥梁模型

Fig. 6 Curved continuous rigid frame bridge model

建模时, 2#、3#主墩底部采用固结约束, 边跨桥头端部0#、1#、4#、5#桥墩处设置横向双支座, 除水平轴向位移和竖向角位移外, 对其他所有自由度进行约束。为了更好地模拟不同施工阶段的变形状态, 本桥模拟遵循现场施工阶段进行, 对各个阶段的应力进行计算及分析。施工阶段划分见表1。

表1 施工阶段划分

Table 1 Construction stage division

编号	施工内容	持续时间
1	建立主墩	149 d
2	安装挂篮, 形成0#块, 张拉钢束, 浇筑1#块	60 d
3	依次形成单元、张拉钢束、移动挂篮、浇筑2#~12#块	9 d/块
4	安装边跨满堂支架, 浇筑并张拉边跨现浇段, 施加不对称段配重	12 d
5	拆除支架, 中跨挂篮前移, 边跨挂篮配重	8 d
6	边跨合拢, 张拉边跨后期束, 继续浇筑中跨	3 d
7	依次形成单元、张拉钢束、1移动挂篮、浇筑13#~16#块	9 d/块
8	中跨合拢前顶推、压重、浇筑、形成合拢段、张拉中跨后期束	9 d
9	拆除用于配重的边跨挂篮12和用于施工的中跨挂篮16	1 d
10	施加二期横载	30 d
11	运营10 a	3 650 d

2.2 关于“非对称”含义的说明

本研究中桥梁以主墩为界, 则边跨侧的桥梁长度为 $0.5 \times 1300 \text{ cm} + 5 \times 300 \text{ cm} + 5 \times 400 \text{ cm} + 2 \times 500 \text{ cm} + 200 \text{ cm} + 1684 \text{ cm} = 7034 \text{ cm}$, 而中跨侧的桥梁长度为 $0.5 \times 1300 \text{ cm} + 5 \times 300 \text{ cm} + 5 \times 400 \text{ cm} + 6 \times 500 \text{ cm} + 0.5 \times 200 \text{ cm} = 7250 \text{ cm}$, 两者相差216 cm, 因此中跨16#梁段和中跨合拢段在边跨侧没有对应梁段, 称为非对称梁段。

实际施工过程中, 中跨和边跨各自0#~11#梁段的长度、截面、张拉纵向预应力束相同, 但是边跨侧12#梁段混凝土用量为 98.6 m^3 , 而中跨侧12#梁段仅用 73.3 m^3 , 这导致两个梁段质量存在差异。边跨13#合拢时, 中跨对应部分还未开始施工, 边跨现浇部分和挂篮施工部分通过边跨后期束连为一体, 共同受到边跨支座的约束。

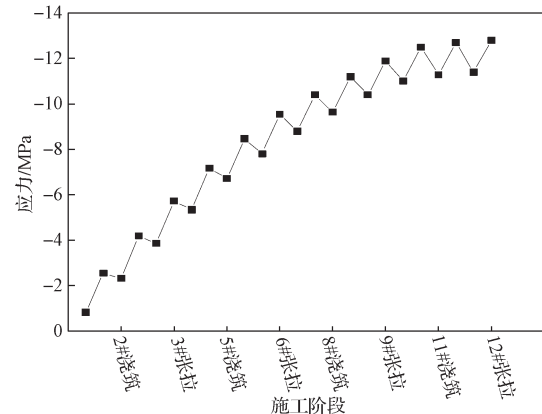
边跨支座设置后, 中跨13#梁段继续使用挂篮施工, 此时主墩两侧桥长度不同, 所受约束条件不同, 梁段之中施加的纵向预应力钢束也不同, 因此此阶段在约束条件上也是不对称的。

此外, 2#主墩和3#主墩的墩高分别为24 m和18 m, 墩高不同可能会造成桥梁对称位置的计算结果出现差异。

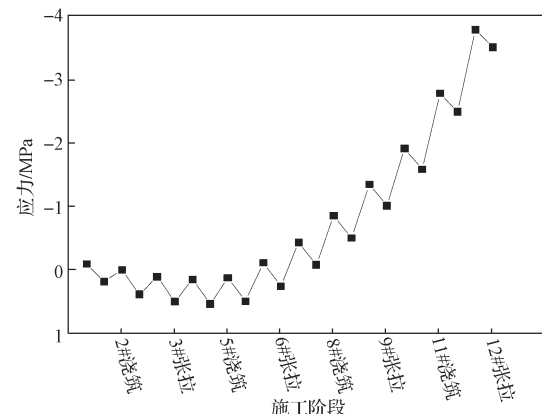
3 模型计算结果与分析

2号墩2号截面、3号截面和4号截面为桐溪路景观桥的关键截面, 故选取2号墩2号截面、3号截面和4号截面在施工过程中的应力进行分析, 所得结果如图7~9所示。图中负数表示压应力, 正数表示拉应力。

2号截面位于2号墩边跨, 2号墩边跨属于对称施工阶段, 其应力分析结果见图7。



a) 顶板应力



b) 底板应力

图7 2号截面应力结果分析图

Fig. 7 Stress result analysis of section 2

如图7所示, 在对称施工阶段, 箱梁顶板的应力随着悬臂长度的增加而增大, 预应力钢筋张拉会引起箱梁顶板的应力增大, 箱梁顶板最大压应力为12.8 MPa; 箱梁底板应力在0#梁段至边跨8#梁段施工时, 箱梁底板承受的应力为拉应力, 且拉应力会随着悬臂长度的增加而增大。在9#梁段至12#梁段施工时, 箱梁底板的应力由拉应力转换为压应力, 且压应力随着悬臂长度的增加而增大; 预应力钢束张拉会引起箱梁底板应力的增大, 2号截面箱梁底板的最大拉应力为0.545 MPa, 最大压应力为3.52 MPa。

3号截面位于2号墩中跨, 2号墩中跨包含对称施工阶段及非对称施工阶段, 其应力分析结果见图8。

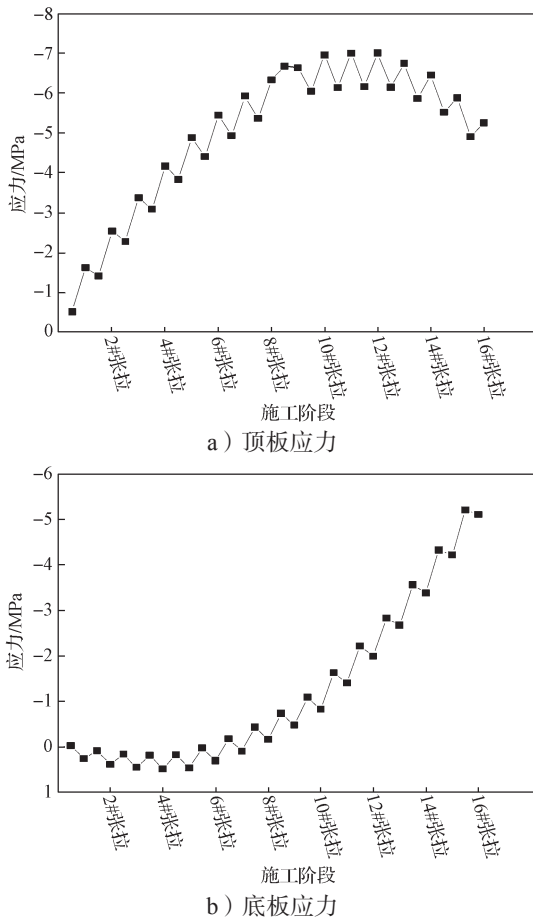


图 8 3 号截面应力结果分析图

Fig. 8 Stress result analysis of section 3

由图 8 可知, 3 号截面箱梁顶板承受的应力多为压应力, 在对称施工阶段中箱梁顶板应力会随着悬臂长度的增加而增大, 进入非对称施工阶段后, 箱梁顶板应力随着悬臂长度的增加而减小, 箱梁顶板最大压应力为 6.99 MPa; 对比图 7 和 8, 可知箱梁底板的应力变化规律与 2 号截面底板的应力变化规律基本一致, 箱梁底板的最大拉应力为 0.477 MPa, 最大压应力为 5.2 MPa。

4 号截面位于 2 号墩中跨 1/2 处, 包含对称施工阶段及非对称施工阶段, 其应力分析结果见图 9。

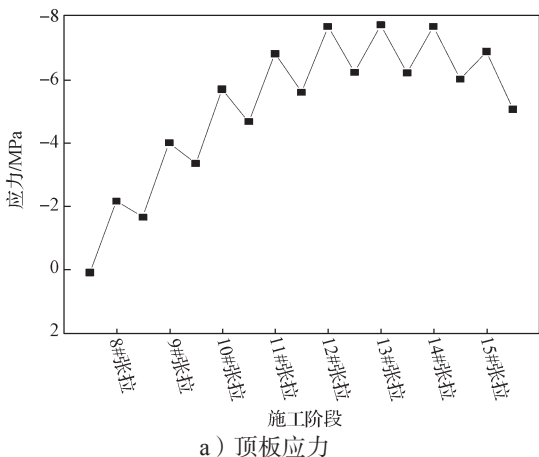


图 9 4 号截面应力结果分析图

Fig. 9 Stress result analysis of section 4

观察图 8 和图 9 可以发现, 4 号截面箱梁的顶板应力变化规律和 3 号截面箱梁的顶板应力变化规律基本相同。由图 9a 可以得知, 箱梁顶板应力在对称施工阶段中, 随着施工节段的增加而增大, 而进入非对称施工阶段后, 箱梁顶板应力开始减小, 最大压应力为 7.68 MPa。4 号截面位于中跨 1/2 处, 由图 9b 可知, 箱梁底板应力基本上都为压应力, 并且可得知最大的压应力为 9.18 MPa。

对比分析图 7~9 可以得知, 各截面箱梁顶板的压应力会随着下一梁段浇筑后减小, 而在预应力钢束张拉后增大。箱梁底板应力的变化趋势与顶板应力的变化趋势相反; 在对称施工阶段中, 各截面箱梁顶板和底板的压应力均呈现出总体上升的变化趋势, 在非对称施工阶段中, 各截面箱梁顶板的压应力呈现出总体下降的变化趋势; 本桥箱梁采用 C55 混凝土进行浇筑, 其混凝土抗压强度标准值和抗拉强度标准值分别为 35.5 MPa 和 1.96 MPa。在模型计算值中, 3 个截面中最大的压应力为 12.8 MPa, 最大的拉应力为 0.545 MPa, 均在安全值范围之内, 表明其有着良好的安全使用条件。

1 号截面 (2 号墩边跨合拢段)、9 号截面 (3 号墩边跨合拢段)、5 号截面 (中跨合拢段) 现场应力数据如表 2 所示。

表 2 合拢段截面应力数据分析表

Table 2 Stress data analysis of closure section MPa

施工时间	2 号墩边跨合拢	3 号墩边跨合拢	中跨合拢
施工阶段	理论值	理论值	理论值
浇筑后	-1.84	-1.84	-1.23
张拉后	-4.31	-4.32	-5.56

分析表 2 中的数据可以得知, 合拢段浇筑后, 截面应力较小, 这可能是由于合拢段截面较小, 桥身自身质量较小, 故浇筑后所产生的应力较小。合拢段截

面应力在预应力筋张拉后，合拢段截面应力增大很多，2号墩边跨合拢段截面应力在张拉后，应力增加了约134%，3号墩边跨合拢段截面的应力在张拉后，应力约增加了135%，中跨合拢段截面应力约增加了352%。虽然3个合拢段截面中的最大应力为5.56 MPa，但是张拉后截面应力增加了2~4倍，合拢段施工是桥梁施工中的关键工序，因此在进行合拢段张拉时，需要重点关注合拢段截面的应力变化，以避免不利情况的出现。

通过分析仿真模型计算值可以得知，箱梁顶板应力在不同施工阶段均处于受压状态，而箱梁底板随着施工的进行会出现不同的受力状态，即底板应力随着施工的进行会由拉应力转换为压应力。这一结论与黄斌等^[5]经过研究得出的“曲线连续刚构桥在施工过程全截面受压”的结论有些差异，该差异可能是因为桥型的不同，布置的预应力钢束不同所引起的；而此结论跟陈备备^[6]得出的研究结论基本一致，但是本研究中桥箱梁底板应力在施工过程中产生的拉应力有所偏大，这可能是在模型计算过程中由于预应力损失所导致的。

为了更好地了解混凝土浇筑、预应力张拉和箱梁应力的相关性，下面对混凝土浇筑后和预应力张拉后与应力随梁段增加的相关性进行分析，所得结果如图10~13所示。

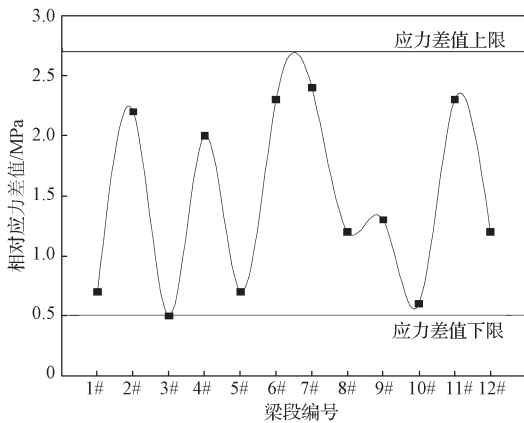


图 10 2号截面张拉后顶板相对应力值变化图

Fig. 10 Change diagram of the relative stress value of the roof after the tension of section 2

分析2号截面顶板应力变化情况可以得知，前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面顶板应力会相对增加。从图10可以看出，前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面顶板应力相对增加值随着梁段数的增加，即顺桥向梁段长度的增加，而呈现出在一定应力值范围的震荡变化规律，其震荡变化区间的上限值和下限值分别为2.60 MPa和0.50 MPa。本桥1#梁段至5#梁段的长度为3 m，6#梁段至10#

梁段的长度为4 m，从图中可以看出，混凝土浇筑后和预应力张拉后，其相对应力值与梁段长度呈现出一定的相关性。

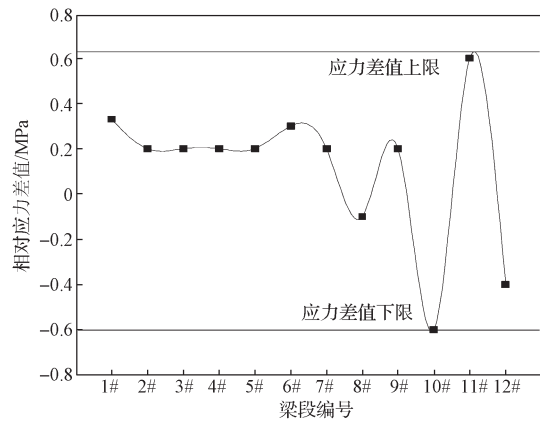


图 11 2号截面张拉后底板相对应力值变化图

Fig. 11 Change diagram of relative stress value of base plate after tension of section 2

分析2号截面底板应力变化情况可以得知，在1#梁段至6#梁段施工阶段，2号截面底板承受的应力为拉应力，在6#梁段至12#梁段施工阶段，2号截面底板承受的应力为压应力，预应力张拉会引起箱梁底板拉应力增大。从图11可以看出，在1#梁段至6#梁段施工阶段，前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面底板应力相对增加值随着梁段数的增加，即顺桥向梁段长度，呈现出平行趋势，在6#梁段至12#梁段施工阶段，前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面底板应力相对增加值随着梁段数的增加，即顺桥向梁段长度，呈现出在一定应力值范围的震荡变化规律，其震荡变化区间的上限值和下限值分别为0.62 MPa和-0.60 MPa，由此可以得知，预应力张拉后对箱梁底板拉应力相对增加值随梁段数增加的相关性较小，箱梁的压应力相对增加值随梁段的增加相关性较大。

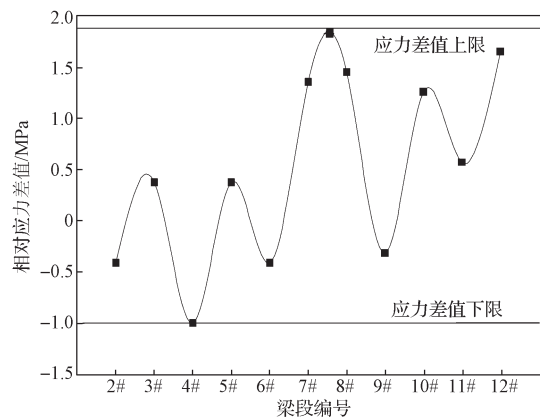


图 12 2号截面浇筑后顶板相对应力值变化图

Fig. 12 Change diagram of relative stress value of roof after pouring of section 2

分析2号截面的顶板应力可以得知,前一梁段张拉后至下一梁段浇筑张拉后的截面顶板应力会相对增加。从图12所示2号截面浇筑后顶板相对应力值变化图中可以看出,前一梁段张拉后至下一梁段浇筑后张拉前的截面顶板应力相对减小值随梁段数的增加,即顺桥向梁段长度的增加,而呈现出在一定应力值范围的震荡上行变化规律,其震荡变化区间的上限值和下限值分别为1.9 MPa和-1.0 MPa,且震荡上行幅度随梁段数的增加而增加。

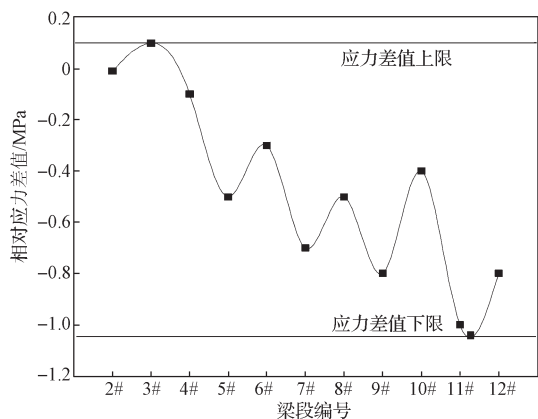


图13 2号截面浇筑后底板相对应力值变化图

Fig. 13 Change diagram of relative stress value of base plate after pouring of section 2

分析2号截面的底板应力变化可知,前一梁段张拉后至下一梁段浇筑后的截面底板应力会相对减小。从图13所示2号截面浇筑后的底板相对应力值变化图中可以看出,前一梁段张拉后至下一梁段浇筑后张拉前的截面底板应力相对减小值,随着梁段数的增加,即随着顺桥向梁段长度的增加,而呈现出在一定应力值范围的震荡下行变化规律,其震荡变化区间的上限值和下限值分别为0.10 MPa和-1.02 MPa,且震荡下行幅度随着梁段数的增加而增加;本桥1#梁段至5#梁段的长度为3 m,6#梁段至10#梁段的长度为4 m,相对应力值与梁段长度呈现出一定的相关性。由此可以得知,浇筑后引起的箱梁顶板相对应力值随梁段数增加的变化规律与箱梁底板相对应力值随梁段数增加的规律完全相反。同时,箱梁承受的压应力和拉应力,在张拉后,相对应力减小值随梁段数的增加都有着一定的相关性。

4 结论

本研究通过对湖南省长沙市桐溪路景观桥在不同施工阶段的应力变化规律进行分析,可以得出如下结论:

1) 在对称施工阶段中,箱梁顶板应力随着悬臂

长度的增加而增长,在预应力钢筋张拉后,会引起箱梁顶板应力增大;箱梁底板会出现拉应力和压应力,随着施工的进行,箱梁底板会由拉应力转换为压应力,拉应力与压应力都随着悬臂长度的增加而增大。当进入到非对称施工阶段中,箱梁顶板应力随着悬臂长度的增加而减小,而箱梁底板应力会随着悬臂长度的增加而增大。

2) 在对称施工阶段中,各截面箱梁顶板和底板的压应力呈现出总体上升的变化趋势,而在非对称施工阶段中,各截面箱梁顶板的压应力呈现出总体下降的变化趋势,箱梁底板应力变化规律与顶板应力变化规律相反。

3) 合拢段在预应力钢束张拉完成后,截面应力约增加了2~4倍,故在合拢段进行张拉时,应重点注意合拢段的截面应力变化情况,以避免不利情况的出现。

4) 分析混凝土浇筑、预应力张拉时,箱梁应力随梁段数增加的相关性可知,前一梁段浇筑后至下一梁段浇筑张拉后的截面顶板压应力相对增加值随梁段数的增加呈现出在一定应力值范围的震荡变化规律;前一梁段张拉后至下一梁段浇筑后张拉前的截面顶板应力相对减小值,随着梁段数的增加,呈现出在一定应力值范围的震荡上行变化规律,截面底板应力相对减小值随梁段的增加呈现出在一定应力值范围的震荡下行变化规律。

参考文献:

- [1] 李惠翔. 预应力混凝土曲线梁桥施工控制关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
LI Huixiang. Research on Key Construction Control Technology of Prestressed Concrete Curved Girder Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [2] 孙全利. 长联大跨曲线连续梁桥结构性能与施工控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
SUN Quanli. Research on Structural Performance and Construction Control Technology of Long-Span Curved Continuous Beam Bridge[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [3] 田雪峰. 连续曲线箱梁桥结构受力及稳定性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
TIAN Xuefeng. Study on Structural Stress and Stability of Continuous Curved Box Girder Bridge[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [4] 王帆, 祝兵, 窦胜谭, 等. 曲线连续刚构桥的变形和受力特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(增刊1): 864-868.

- WANG Fan, ZHU Bing, DOU Shengtian, et al. Deformation and Mechanical Characteristics of Curved Girder Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2013, 32(S1): 864–868.
- [5] 黄 斌, 隆佩钦, 王解军. 高墩大跨小半径曲线连续刚构桥施工阶段结构分析 [J]. 公路工程, 2014, 39(6): 216–218, 230.
- HUANG Bin, LONG Peiqin, WANG Jiejun. Structure Analysis of Construction Stage of Small Radius Curved Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers and Long-Span[J]. Central South Highway Engineering, 2014, 39(6): 216–218, 230.
- [6] 陈备备. 高铁小曲线大跨度跨线桥施工控制关键技术研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- CHEN Beibei. Research on Key Technology of Construction Control of High Speed Railway Small Curve and Large Span Overpass Bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [7] 陈 淮, 颜浩杰, 李 杰, 等. 曲率半径变化对高墩大跨连续刚构桥静力性能的影响 [J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(1): 6–10.
- CHEN Huai, YAN Haojie, LI Jie, et al. Analyzing Different Curvature Radius's Influence on Static Mechanical Performance of High Pier and Long Span Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(1): 6–10.
- [8] 李国生, 陈金涛, 乔新宇. 曲线连续刚构桥的结构分析 [J]. 交通标准化, 2013, 41(1): 115–118.
- LI Guosheng, CHEN Jintao, QIAO Xinyu. Structure Analysis of Curve Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Communications Standardization, 2013, 41(1): 115–118.
- [9] 何建栋. 大跨度小半径曲线连续梁桥地震响应分析 [J]. 铁道建筑, 2018, 58(7): 26–29.
- HE Jiandong. Analysis of Seismic Response of Long Span Continuous Girder Bridge with Small Radius Curve[J]. Railway Engineering, 2018, 58(7): 26–29.
- [10] 李明辉. 高墩曲线连续刚构桥施工阶段稳定性分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- LI Minghui. Stability Analysis of Curved Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers at Construction Stage[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [11] 何 标. 上岸大桥高墩曲线连续刚构内力分析与研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- HE Biao. Analysis and Research on Internal Force of Curved Continuous Rigid Frame with High Piers of Shangan Bridge[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [12] 王 涛, 文畅霆, 刘 明. 大跨曲线预应力刚构-连续体系箱梁桥施工阶段受力分析及施工控制 [J]. 科学技术创新, 2019(21): 90–91.
- WANG Tao, WEN Changting, LIU Ming. Stress Analysis and Construction Control of Long Span Curved Prestressed Rigid Frame Continuous System Box Girder Bridge in Construction Stage[J]. Science and Technology Innovation, 2019(21): 90–91.

(责任编辑: 廖友媛)