

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.03.001

非对称悬臂施工曲线连续刚构桥 不同施工阶段变形特性研究

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: 曲线连续刚构桥的施工难度较大, 施工过程中的受力和变形比直线桥更为复杂, 所以以桐溪路景观桥为依托工程, 利用有限元软件 Midas/civil 建立桥梁模型, 研究其不同施工阶段的变形差异情况, 并与实测数据进行对比分析, 以验证模型的正确性。结果表明, 在桥梁对称施工过程中, 箱梁竖向位移随悬臂长度的增加而增大, 且边跨和中跨箱梁竖向变形不相同, 边跨箱梁变形要大于中跨箱梁变形; 非对称施工过程中, 混凝土自重对桥梁结构变形的影响较大, 会引起边跨中部附近箱梁上挠, 最大上挠值达 10 mm; 成桥状态后, 混凝土收缩徐变对桥梁结构线形影响较大, 主要位于中跨跨中附近; 曲线半径对桥梁结构变形有一定的影响, 曲线连续刚构桥的竖向变形和横向变形随曲线半径的增大而减小。

关键词: 曲线连续刚构桥; 不对称; 变形; 有限元分析

中图分类号: TM769

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)03-0001-10

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变形特性研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 1-10.

Study on Deformation Characteristics 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: In view of the greater difficulty in the process of curved continuous rigid frame bridge construction, as well as the greater complexity of the stress and deformation in the construction process than that of the linear bridge, a bridge model has thus been established by using the finite element software Midas/civil based on a case study of the landscape bridge of Tongxi Road, followed by a study on the deformation difference at different construction stages, to be compared with the measured data to verify the validity of the model. The results show that the vertical displacement of the box girder increases with the increase of the cantilever length in the symmetrical construction process of the bridge, and the vertical deformation of the side span box girder is different from that of the middle span box girder, with the deformation of the side span box girder greater than that of the middle span box girder; while in the asymmetric

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51478484); 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

construction process, the self weight of the concrete has a greater impact on the deformation of the bridge structure, which will cause the box girder up deflection near the middle of the side span, with the maximum deflection reaching as high as 10 mm. After the completion of the bridge, the concrete shrinkage and creep have a great impact on the bridge structure alignment, mainly located near the middle of the mid span; meanwhile the curve radius has a certain influence on the deformation of the bridge structure, with the vertical deformation and transverse deformation of the curved continuous rigid frame bridge decreasing with the increase of the curve radius.

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

0 引言

随着我国交通事业以及城市建设的不断发展,国家对于桥梁施工的要求越来越高,对于桥梁的设计也越来越精细。同时,科学技术的不断创新和提高,使得我国的桥梁技术和施工水平取得了重大突破与发展^[1]。桥梁施工过程中,曲线连续刚构桥相比直线型连续刚构桥,在结构线形和内力变化中有许多的不同之处,如线形变换定理在曲线连续刚构桥中将会失去效果,导致曲线连续刚构桥的施工难度比直线型连续刚构桥要大很多^[2-7]。

目前,许多学者对曲线连续刚构桥的变形进行了研究,如汪永田^[8]对大跨径的高墩曲线桥在悬臂施工过程中的变形情况进行了研究,得知悬臂施工时,总和工况变形曲线的梁体竖向位移最大值发生在距悬臂端1/5悬臂长度处;吕海燕等^[9]对高墩大跨PC曲线连续刚构桥在施工过程中的受力和变形情况进

行了研究,得知高墩对曲线连续刚构桥的竖向位移、横向位移和扭转的影响都较大;王帆等^[10]对曲线连续刚构桥的变形和受力特性进行了分析,得出恒载作用下弯梁竖向变形与直梁相差不足3%,而活荷载作用下直梁竖向位移比弯梁竖向位移大的结论。

多数学者对曲线连续刚构桥的变形研究均是在对称悬臂施工过程中开展,而对非对称悬臂施工曲线连续刚构桥的变形研究相对较少,故本研究拟以桐溪路景观桥为研究对象,分析非对称悬臂施工曲线连续刚构桥在不同施工阶段中的变形情况,以期为实际工程应用提供借鉴。

1 工程背景

桐溪路景观桥位于湖南省长沙市大王山旅游度假区中心,属于坪塘大道至潇湘大道东线道路工程中的一段,为长沙市重点基础设施工程。桐溪路景观桥的主桥布置图见图1,主桥平面图见图2。

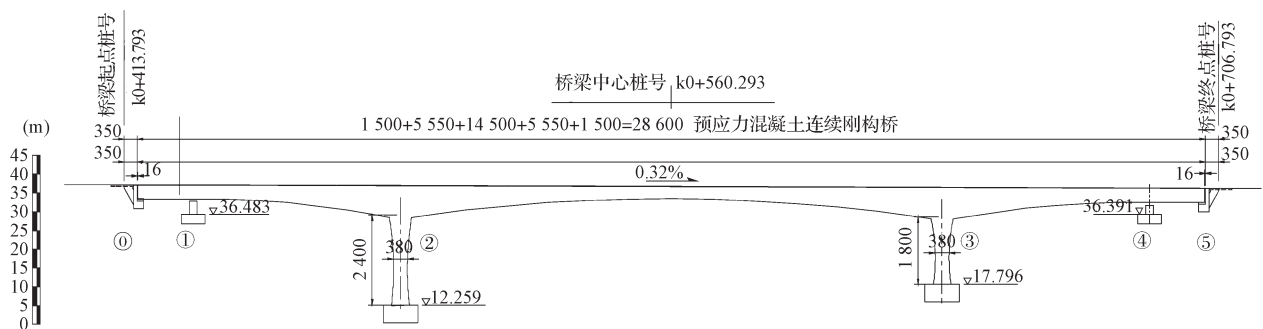


图1 主桥布置图

Fig. 1 Layout of the main bridge

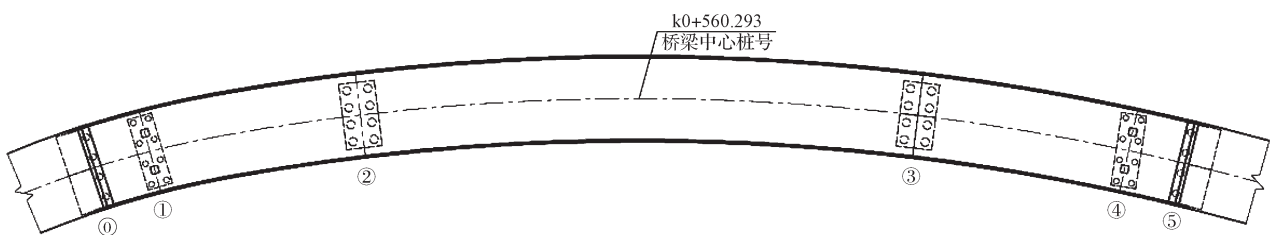


图2 主桥平面图

Fig. 2 Planar graph of the main bridge

桐溪路景观桥属于新建桥梁, 如图 1 所示, 其起点桩号和终点桩号分别为 k0+413.793 和 k0+706.793, 图 1 中数据单位为 cm, 后同。桐溪路景观桥全长约为 293 m, 桥梁跨径组成为 15.0 m+55.5 m+145.0 m+55.5 m+15.0 m, 主线宽度为 22.6 m, 景观平台宽 5.3 m。由于该工程位于岩溶发育地区陡峭岩壁边缘, 所以设计中采用曲线桥穿越矿坑, 平面线

型为圆曲线, 桥梁平面曲线半径为 600 m, 主桥平面图见图 2。

该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 3 所示, 边跨悬臂浇筑段的分块编号如图 4 所示。

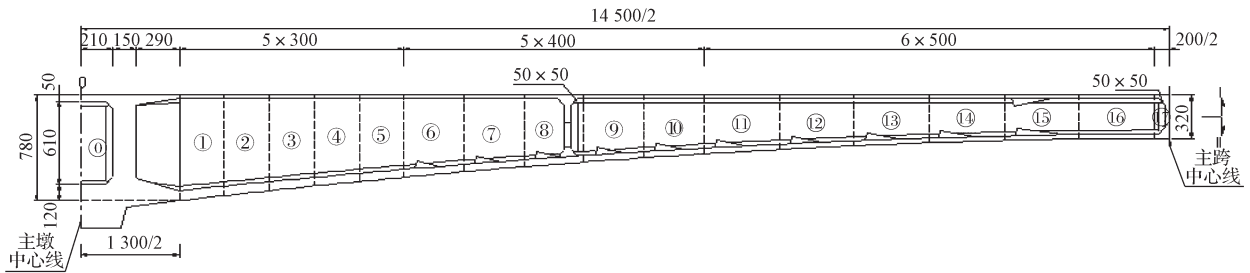


图 3 中跨梁段分块编号

Fig. 3 Block number of the mid-span beam segment

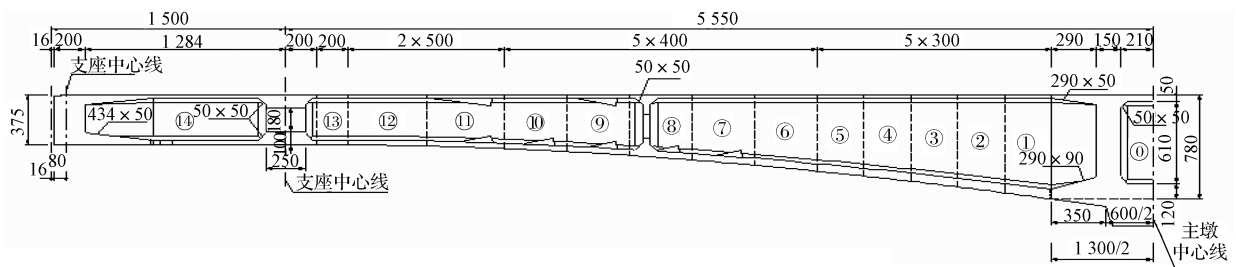


图 4 边跨梁段分块编号

Fig. 4 Block number of the side span beam segment

2 模型建立

本研究中, 采用有限元分析软件 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, 其具体分布如图 5 所示。桐溪路景观桥的整体坐标系以跨中梁段对称面为坐标系的 yoz 平面; 坐标原点取对称面与道路中心线的交点, 即对称面的

中点; x 轴取对称面法线方向, 从 2# 主墩指向 3# 主墩; y 轴指向背离曲线圆心方向; z 轴指向上方。为了更好地模拟桥梁在不同施工阶段的变形状态, 本研究中的桥模拟遵循现场施工阶段进行, 对各个阶段的变形进行计算与分析。具体的施工阶段划分情况如表 1 所示。

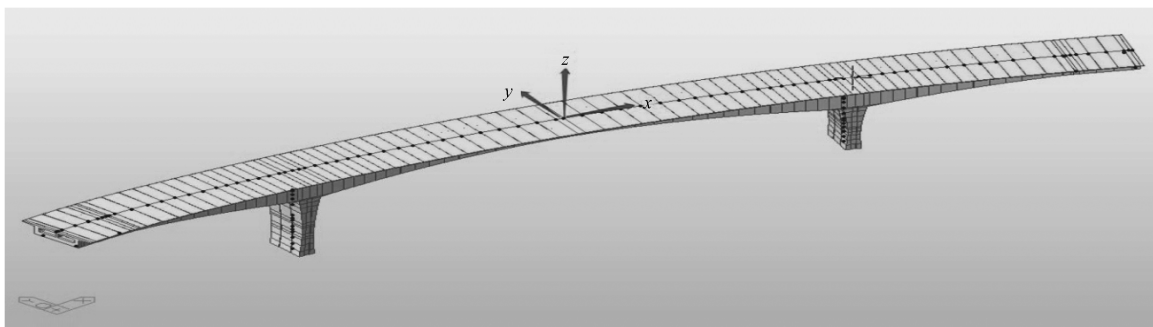


图 5 曲线连续刚构桥梁模型

Fig. 5 Curved continuous rigid frame bridge model

表1 施工阶段划分

Table 1 Division of construction stages

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

在所建立的桥梁模型中, 把实桥的各个梁段划分为单元号, 各个单元号都有相对应的梁段, 因为 0# 梁段的应力较为复杂, 故将其划分为 5 个单元, 单元号与梁段的对应情况见表 2。

表2 单元号与梁段对应表

Table 2 Unit numbers with the corresponding table of beam segment

单元号	对应梁段
10~21	2 号墩边跨 12#~1# 梁段
22~27	2 号墩处 0# 梁段
28~43	2 号墩中跨 1#~16# 梁段
9	2 号墩边跨合拢段
44	中跨合拢段
45~60	3 号墩中跨 16#~1# 梁段
61~66	3 号墩处 0# 梁段
67~78	3 号墩边跨 1#~12# 梁段
79	3 号墩边跨合拢段

3 不同施工阶段下的变形分析

曲线连续刚构桥在空间上的受力是复杂多变的, 这使得其桥梁结构的竖向位移变化不同于直线型连续刚构桥的, 这也是一个值得深入研究的问题。在 Midas/civil 计算模型中, 可以根据施工顺序来定义施工阶段, 从而可以分析不同施工阶段的桥梁结构线形的变化趋势。然后根据得出的线形变化趋势, 可以在悬臂施工过程中提供准确的预拱度理论值, 以保证成桥状态符合预期目标。本研究的 Midas/civil 曲线连续刚构桥模型中, 考虑了结构的自重、挂篮前移以及预应力钢束张拉等工况, 分析各工况下该桥梁在悬臂

施工阶段的竖向位移情况。

3.1 对称施工阶段主梁变形分析

通过 Midas/civil 计算模型得到的对称施工阶段各梁段的竖向位移, 如图 6 所示。

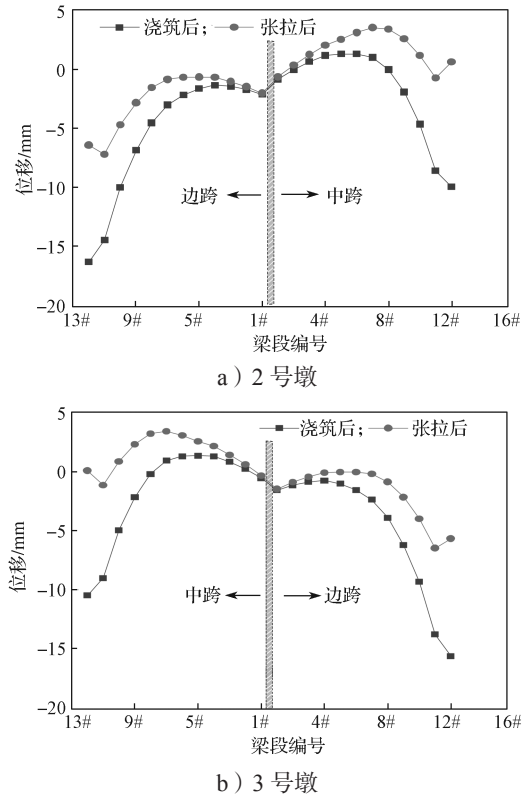


图6 对称施工阶段各梁段的竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement of each beam segment in a symmetrical construction

由图 6 可以看出, 在对称施工阶段, 桥梁的竖向位移变化整体呈现出随着悬臂长度的增加而增大的变化趋势。其中, 最大位移处于 2 号墩或者 3 号墩边跨的 12# 梁段。2 号墩边跨 12# 梁段浇筑后的最大竖向位移达 16.3 mm, 张拉后的最大竖向位移为 6.4 mm; 3 号墩边跨 12# 梁段浇筑后的最大竖向位移为 15.6 mm, 张拉后的最大竖向位移达到了 5.6 mm。在 2 号墩边跨 3# 梁至 5# 梁段中间, 箱梁的竖向位移出现了一小段上挠, 这是由于在施工过程中不断调整预拱度所引起的, 故在桥梁施工过程中, 一定要给出精确的预拱度, 以保证桥梁线形符合设计要求。

从图 6 中还可以看出, 在对称施工阶段中, 2 号墩和 3 号墩上边跨梁段竖向位移与中跨梁段竖向位移并不一致, 边跨梁段的竖向变形量要比中跨梁段的变形大, 这可能是由于临时施工荷载的不确定性或者是桥梁桥墩沉降均匀性所导致的, 故在曲线连续刚构桥施工过程中, 对于桥梁进行线形监控时, 不仅需要考虑其临时荷载对桥梁的影响, 而且要密切关注桥梁下

部结构的变形情况。

3.2 非对称施工阶段主梁变形分析

通过 Midas/civil 计算模型得到的非对称施工阶段各梁段的竖向位移, 如图 7 所示。

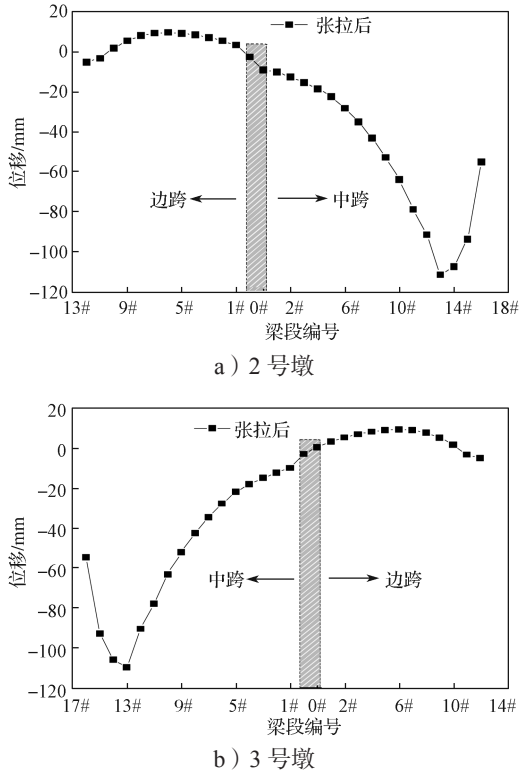


图 7 非对称施工阶段各梁段的竖向位移曲线
Fig. 7 Vertical displacement of each beam segment in an asymmetric construction

边跨合拢后, 桥梁由对称施工阶段转换为非对称施工阶段, 由图 7 可以看出, 此时桥梁的竖向变形规律呈现出不同的变化趋势, 箱梁的最大位移并不是处于最大悬臂长度 16# 梁段上, 而是位于 2 号墩或 3 号墩上的 13# 梁段, 2 号墩 13# 梁段的最大竖向位移为 112.1 mm, 而最大悬臂长度 16# 梁段的竖向位移仅为 55.1 mm。对比图 6 和图 7 可以得知, 在进入非对称阶段施工后, 2 号墩或者 3 号墩的边跨 7# 梁段附近的竖向位移有明显的上挠情况, 而中跨箱梁位移有明显的下挠情况, 这是由于非对称阶段的增加, 导致中跨自重要大于边跨自重所引起的, 故在非对称施工过程中, 需要注意边跨箱梁上挠及中跨箱梁下挠的情况, 以避免产生位移过大而导致箱梁出现开裂的现象。本桥采用的是悬臂浇筑进行施工, 但是桥梁结构并不完全是对称结构, 待桥梁对称阶段施工完成并且进行边跨合拢后, 就需要对非对称阶段 (13#~16#) 进行施工, 因此, 需要分析在非对称阶段施工过程中其对已经完成的对称阶段箱梁的影响。上述论述中提到了在非对称施工阶段中, 施工对边跨 7# 梁段的竖向

位移影响最大, 故取边跨 6# 梁段和 7# 梁段的竖向位移进行分析, 得到的非对称阶段施工对边跨箱梁竖向位移的影响曲线如图 8 所示。

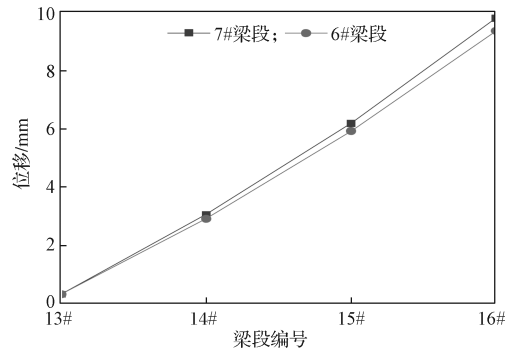


图 8 非对称阶段施工对边跨箱梁竖向位移的影响曲线

Fig. 8 Influence of asymmetric construction on vertical displacement of the side span box girder

由图 8 可以得知, 边跨 6# 和 7# 梁段的位移上挠值随着非对称阶段梁段数的增加呈现出线性增长的变化趋势, 其中 7# 梁段上挠程度要略大于 6# 梁段的。在中跨 13# 梁段施工完成后, 6# 梁段的竖向位移为 0.331 mm, 7# 梁段的竖向位移为 0.327 mm, 在中跨 16# 梁段施工完成后, 6# 梁段的竖向位移为 9.4 mm, 7# 梁段的竖向位移为 9.8 mm, 6# 梁段、7# 梁段的竖向变形受非对称施工的影响, 总上挠值约为 9 mm。由此可以得知, 非对称阶段施工对边跨中部的影响非常大, 故在非对称施工阶段中, 要密切注意边跨中部箱梁的变形情况。

3.3 合拢段施工完成后主梁变形分析

桥梁中跨合拢是桥梁施工的一个重点与难点, 为了确保桥梁顺利合拢, 需要严格控制梁体的变形情况。中跨合拢后, 梁体的变形也会发生改变, 为此, 选取中跨合拢施工完成后的桥梁变形情况进行分析, 得到的变形分析结果如图 9 所示。

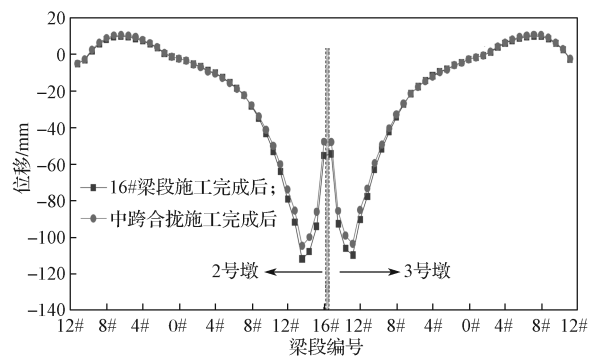


图 9 中跨合拢后各梁段竖向位移曲线

Fig. 9 Vertical displacement of each beam segment after the middle span closure

由图 9 所示中跨合拢后各梁段竖向位移曲线可以看出, 中跨合拢段施工完成后, 2 号墩和 3 号墩中跨部分梁体的竖向变形整体出现上挠情况, 合拢段施工完成后梁体的最大竖向位移均位于中跨合拢段附近。在中跨合拢段施工之前, 中跨最长悬臂端的竖向位移为 58 mm, 中跨箱梁最大竖向位移为 112 mm; 在中跨合拢段施工完成后, 中跨最长悬臂端箱梁的竖向位移为 48 mm, 中跨箱梁最大竖向位移为 104 mm, 这一结果表明, 中跨合拢使得中跨箱梁竖向变形上挠了约 10 mm。

3.4 不同施工阶段曲线连续刚构桥变形对比分析

图 10~13 所示为对称施工阶段 2 号墩和 3 号墩处的实测高程与理论高程差值图, 图中纵坐标所示误差值为桥梁施工现场实测值减去 Midas/civil 模型计算理论值的差值, 下图类同。

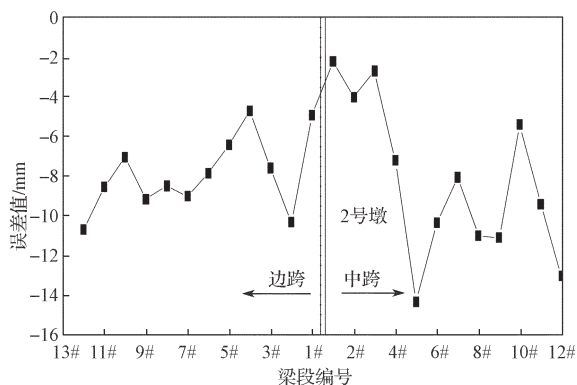


图 10 对称施工阶段 2 号墩处不同梁段浇筑后的竖向位移实测值与理论值误差曲线

Fig. 10 Error curves of the measured value and theoretical value of vertical displacement after the pouring of different beam segments of No.2 pier under a symmetrical construction

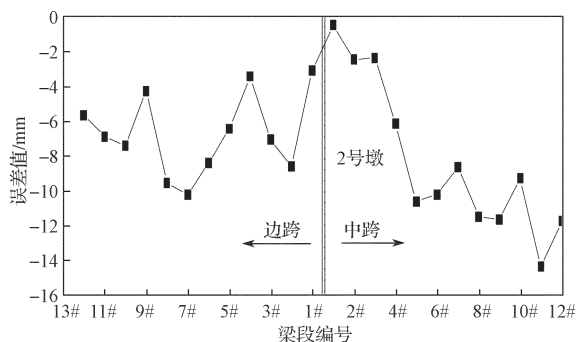


图 11 对称施工阶段 2 号墩处不同梁段张拉后的竖向位移实测值与理论值误差曲线

Fig. 11 Error curves of the measured value and the theoretical value of vertical displacement at different beam segments of No.2 pier under a symmetrical construction

由图 10 和图 11 可以得知, 在对称施工过程中,

2 号墩上各梁段浇筑后的竖向位移的误差最大值为 14.381 mm, 位于中跨 5# 梁段; 各梁段张拉后的竖向位移误差最大值为 14.351 mm, 位于中跨 11# 梁段。由此可以得知, 在对称施工过程中, 2 号墩各梁段在浇筑后和张拉后的实测高程值与理论值的误差均在 0~15 mm 范围之内。

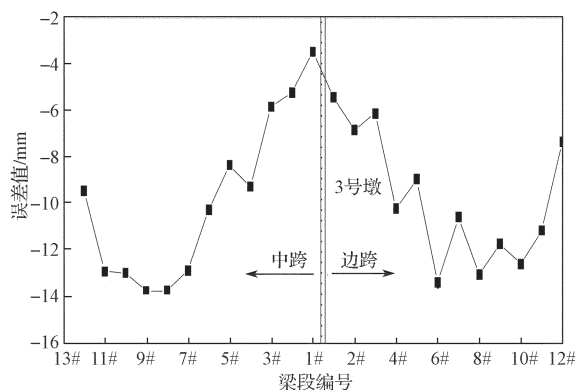


图 12 对称施工阶段 3 号墩处不同梁段浇筑后的竖向位移实测值与理论值误差曲线

Fig. 12 Error curves of the measured value and theoretical value of vertical displacement after the pouring at different beam segments of No.3 pier under a symmetrical construction

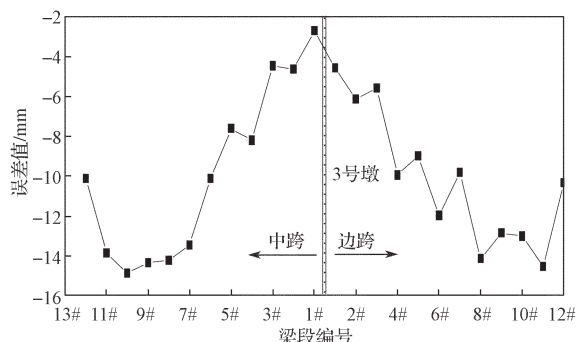


图 13 对称施工阶段 3 号墩处不同梁段张拉后的竖向位移实测值与理论值误差曲线

Fig. 13 Error curves of the measured value and the theoretical value of vertical displacement at different beam segments of No.3 pier under a symmetrical construction

由图 12 和图 13 可以得知, 在对称施工过程中, 3 号墩各梁段浇筑后的竖向位移误差最大值为 13.847 mm, 各梁段张拉后的竖向位移误差最大值为 14.873 mm, 由此可见, 浇筑后和张拉后 3 号墩各梁段的实测高程值与理论值之间的误差也均在 0~15 mm 范围之内。根据线形监控允许误差表得出, 本桥的允许误差值为 ± 29 mm (即 145 m/5 000), 故根据已有结果可以得知, 2 号墩和 3 号墩张拉后的误差值都在允许误差范围之内, 说明在对称施工阶段和张拉后的线形都符合设计要求。

由图 12 和图 13 还可以得知, 在混凝土浇筑后或者预应力张拉后, 高程误差值随着梁段数的增加而增大, 误差较大处位于非对称阶段, 0# 梁段附近的误差最小。由此可知, 在现场施工过程中, 对箱梁变形出现的误差的修正并不是很精确, 故在类似工程中, 对出现的误差值要及时修正并进行验算, 以提高线形控制精度。

图 14 所示为非对称施工阶段不同梁段的实测位移与理论位移误差曲线。

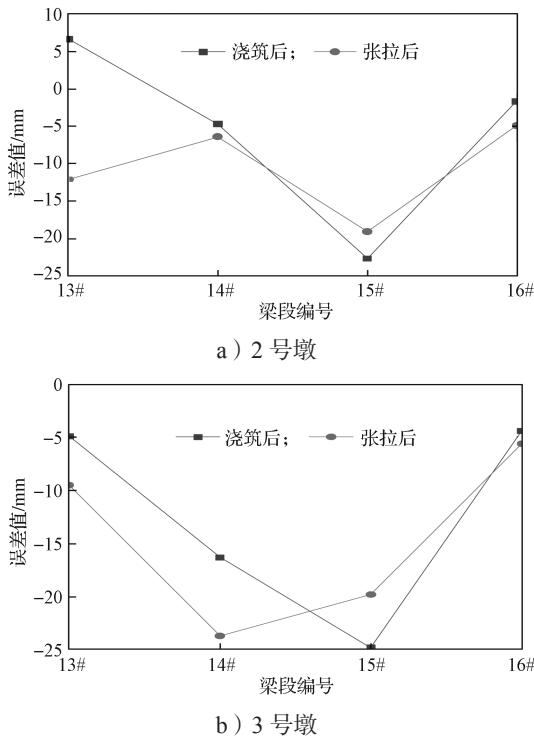


图 14 非对称施工阶段不同梁段的实测位移与理论位移误差曲线

Fig. 14 Error curves of the measured displacement and theoretical displacement at different beam segments under an asymmetric construction

由图 14a 可以得知, 非对称施工阶段中, 2 号墩各梁段浇筑后的实测竖向位移与理论竖向位移的误差值在 $-22\sim 7$ mm 范围内, 张拉后的实测竖向位移与理论竖向位移的误差值在 $-4.9\sim -19.1$ mm 范围内, 均小于 ± 29 mm。由图 14b 可以得知, 3 号墩各梁段浇筑后的实测竖向位移与理论竖向位移的误差值在 $-4.9\sim 24.8$ mm 范围内, 张拉后的实测竖向位移与理论竖向位移的误差值在 $-5.6\sim -23.7$ mm 范围内, 均小于 ± 29 mm, 说明在非对称悬臂施工过程中, 桥梁各梁段浇筑后和张拉后的变形量均符合设计要求。

本桥在施工过程中的允许误差值为 ± 29 mm, 但是在非对称悬臂施工过程中, 最大竖向位移误差值达到了 24.8 mm, 而在对称悬臂施工过程中, 最大竖

向位移误差值约为 14.9 mm, 故可以看出, 在非对称悬臂过程中产生的误差值要比在对称悬臂施工过程中产生的误差值约大 10 mm, 说明桥梁在非对称悬臂施工过程中, 桥梁结构线形控制的难度要大于对称悬臂施工阶段的。因此, 在非对称悬臂施工过程中, 需要加强对线形的监控, 保证误差值较小, 以达到线形控制效果良好。

4 设计参数对梁体竖向位移的影响

4.1 混凝土容重对梁体竖向位移的影响

结合现场施工时的实际情况, 分别取超过混凝土容重设计值幅度的 2%, 3%, 5%, 在 16# 梁段施工完成后, 对各梁段产生的竖向位移进行对比分析, 所得 2 号墩中跨各梁段的变形分析结果如图 15 和图 16 所示。

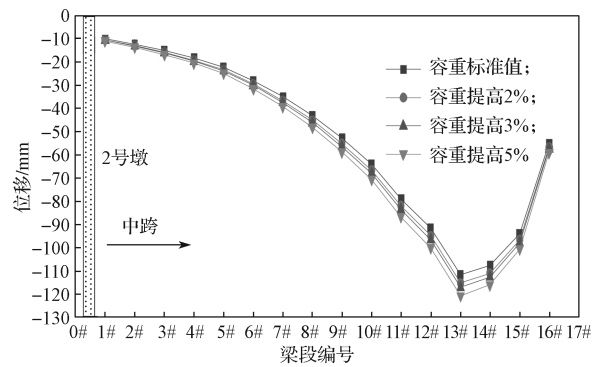


图 15 不同容重下 2 号墩中跨各梁段的竖向位移曲线

Fig. 15 Vertical displacement of each beam segment in the middle span of No.2 pier under different bulk densities

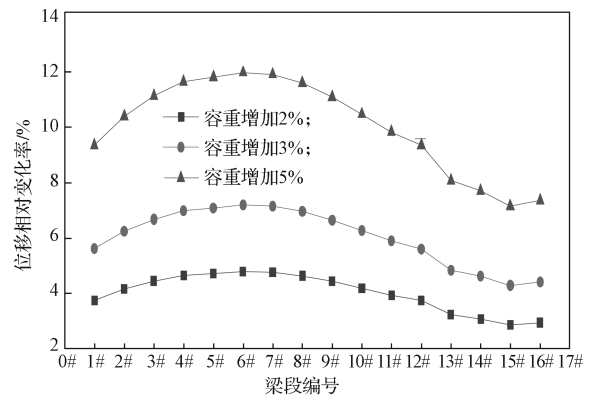


图 16 不同容重下 2 号墩中跨各梁段竖向位移的相对变化率曲线

Fig. 16 Relative change rate of vertical displacement of each beam segment of mid span at No.2 pier under different bulk densities

由图 15 所示不同容重下 2 号墩中跨各梁段的竖

向位移曲线可以得知,混凝土容重的变化会引起箱梁梁体的竖向位移发生变化。随着混凝土容重的增加,箱梁梁体的竖向位移增加,各梁体的竖向位移最大值位于非对称阶段第一块(中跨 13# 梁段)。当混凝土的容重提高 2% 时,箱梁的最大竖向位移为 115.3 mm;当混凝土的容重提高 3% 时,箱梁的最大竖向位移为 117.1 mm;当混凝土的容重提高 5% 时,箱梁的最大竖向位移为 120.7 mm。

由图 16 所示不同容重下 2 号墩中跨各梁段竖向位移的相对变化率曲线可以得知,混凝土容重的变化对箱梁梁体的竖向位移变化呈线性关系,当混凝土的容重提高 2% 时,相对于混凝土标准容重设计值下的梁体最大竖向位移值提高了 3.23%,最大相对变化率为 4.79%,位于中跨 6# 梁段;当混凝土的容重提高 3% 时,相对于混凝土标准容重设计值下的箱梁最大竖向位移值提高了 4.85%,最大相对变化率为 7.19%,位于中跨 6# 梁段;当混凝土的容重提高 5% 时,相对于混凝土标准容重设计值下的梁体最大竖向位移值提高了 8.08%,最大相对变化率为 11.98%,位于中跨 6# 梁段。由此可以得知,虽然混凝土容重的变化引起箱梁梁体竖向位移的最大变化处位于非对称阶段第一块,但混凝土容重的改变对箱梁梁体竖向位移的影响最大处位于中跨 6# 梁段,这两者的位置是不一致的。由此可知,混凝土容重的改变对对称阶段施工箱梁的竖向位移影响更大。

4.2 混凝土收缩徐变对梁体竖向位移的影响

混凝土收缩徐变对桥梁结构变形的影响是一个长期的过程,故对该工程桥梁成桥阶段和成桥 10 a 两个时间点的收缩徐变进行分析,并且将该竖向位移值与不考虑收缩徐变的成桥状态竖向位移结果进行对比,其分析及对比结果见图 17 和图 18。

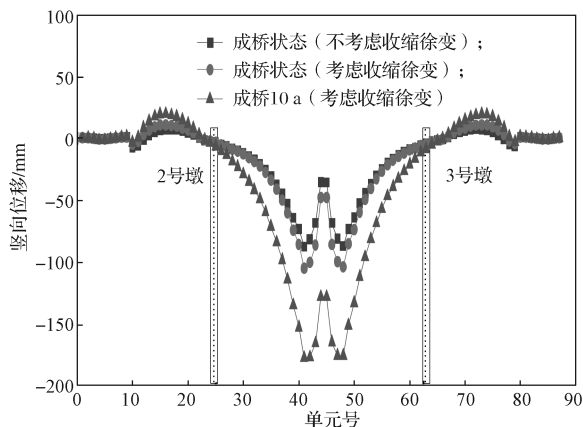


图 17 不同状态下各梁段的竖向位移曲线

Fig. 17 Vertical displacement of each beam segment at different states

由图 17 所示不同状态下各梁段的竖向位移曲线可以得知,在不考虑收缩徐变作用和考虑收缩徐变作用两种条件下,成桥状态考虑收缩徐变作用的桥梁结构的竖向位移要比不考虑收缩徐变作用的桥梁结构的竖向位移大。从图 17 中还可以看出,对于考虑收缩徐变作用时,成桥 10 a 的桥梁结构的竖向位移要增大许多。

图 18 所示为考虑收缩徐变与不考虑收缩徐变时各梁段的竖向位移差值曲线,图中的竖向位移差值为考虑收缩徐变不同状态下各梁段的竖向位移值减去不考虑收缩徐变成桥状态下各梁段的竖向位移值。由图 18 可以看出,在考虑收缩徐变作用和不考虑收缩徐变作用这两种状态下,箱梁梁体的竖向位移差值变化比较大。

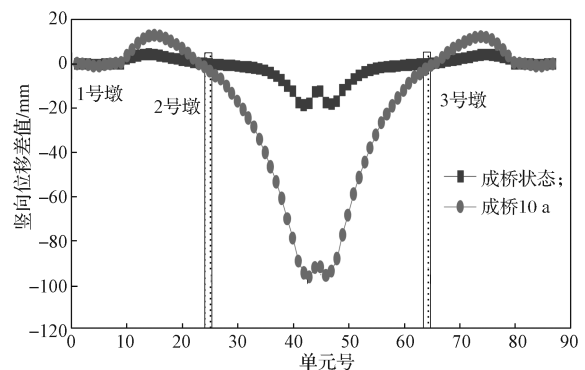


图 18 考虑收缩徐变与不考虑收缩徐变各梁段的竖向位移差值曲线

Fig. 18 Vertical displacement difference of each beam segment with or without a consideration of the shrinkage and creep

综合图 17 和图 18 可以得知,成桥状态中,在中跨合拢段附近的梁段的竖向位移差值相对较大,最大差值为 18.66 mm,不考虑收缩徐变作用成桥状态的最大竖向位移为 87.2 mm,考虑收缩徐变作用成桥状态的最大竖向位移为 104.5 mm。由此可以得知,在考虑收缩徐变影响的梁段最大竖向位移值比不考虑收缩徐变影响的最大竖向位移值提高了 19.8%;在成桥 10 a 状态中,箱梁梁体的竖向位移最大差值为 96.3 mm,箱梁梁体最大竖向位移值为 176.4 mm,相比不考虑收缩徐变影响的梁段最大竖向位移值增加了 89.2 mm。

从以上的分析结果可以得知,混凝土收缩徐变对桥梁结构的竖向变形有着较大的影响,尤其是在桥梁中跨跨中附近,混凝土收缩徐变对梁段的竖向变形影响明显。因此,在桥梁设计中,必须重视桥梁中跨跨中附近箱梁的竖向变形。

4.3 曲率半径对梁体竖向位移的影响

通过研究分析可知,曲线连续刚构桥在中跨合拢

后, 箱梁最大的竖向位移位于2#墩和3#墩的中跨梁段处, 故选取2#墩和3#墩中跨梁段的竖向位移进行分析, 其变形分析结果见图19。

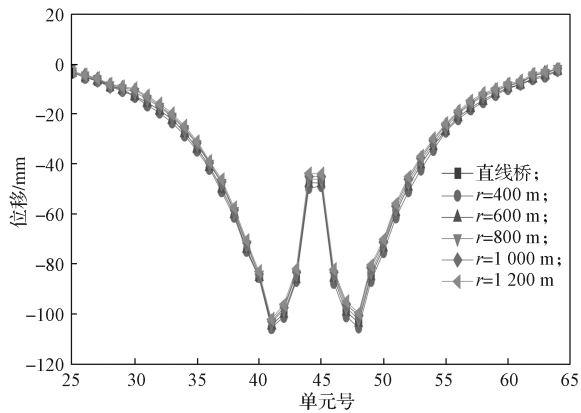


图19 中跨合拢后跨中不同梁段的竖向位移曲线

Fig. 19 Vertical displacement of different beam segments in the mid-span after the mid-span closure



由图19可以得出, 跨中处的箱梁竖向位移随着曲率半径的增大而减小, 减小幅度较大处位于非对称施工阶段以及中跨合拢段。曲线连续刚构桥跨中部分箱梁的竖向位移随着曲率半径的增大而减小, 但是这种减小趋势并不是很明显, 当曲率半径增大到1200 m时, 曲线连续刚构桥跨中处箱梁的竖向位移仅减小了12%。

上面仅分析了曲率半径对竖向位移的影响, 为了更好地分析曲率半径对梁体横向位移的影响, 选取2#墩和3#墩中跨梁段的横向位移进行分析, 所得变形分析结果如图20所示。

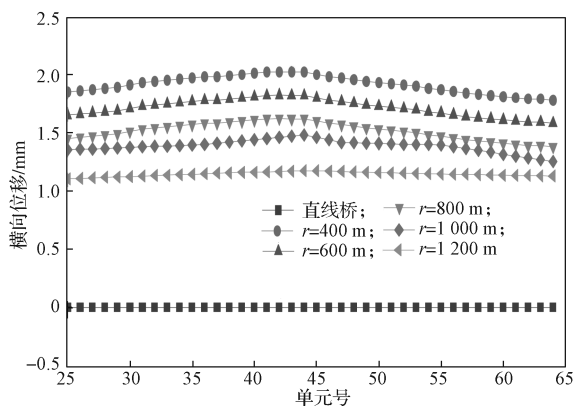


图20 中跨合拢后不同梁段的横向位移曲线

Fig. 20 Transverse displacement of different beam segments after the mid-span closure

由图20可以得知, 曲线连续刚构桥在中跨合拢后, 跨中箱梁的横向位移会随着曲率半径的增大而逐渐减小, 且其减小趋势随着曲率半径的增大而变得缓

慢, 当曲率半径趋向无穷大时, 即直线桥时, 跨中箱梁基本上不会产生横向位移。即曲线连续刚构桥跨中处箱梁的横向位移是随着曲率半径的增大而减小的, 并且其横向位移减小的幅度较大。当曲率半径达1200 m时, 2号墩的15#梁段的横向位移减小幅度高达87%。

5 结论

1) 在桥梁对称施工过程中, 箱梁竖向位移随着悬臂长度的增加而增大; 在桥梁对称施工阶段中, 2号墩和3号墩上边跨箱梁的竖向位移与中跨的竖向位移变化量并不一致, 边跨箱梁的位移要大于中跨箱梁的位移。

2) 非对称施工阶段时, 施工会对边跨中部附近的箱梁引起较大的上挠现象, 非对称阶段施工完成后, 箱梁的最大上挠位移值达10 mm, 因此, 在非对称阶段施工过程中, 需重点关注边跨中部附近箱梁的竖向变形情况。

3) 中跨合拢后, 箱梁的竖向变形呈现出整体的上挠现象, 上挠最明显的部位位于中跨合拢段附近。

4) 在非对称施工阶段中产生的变形误差值要大于对称施工阶段产生的变形误差值, 故在非对称阶段施工过程中, 需着重加强对桥梁线形的监控, 同时及时对产生的误差进行修正, 以提高施工精度。

5) 在非对称施工阶段中, 混凝土自重对桥梁结构竖向位移的影响最大, 因此在非对称施工过程中必须严格控制混凝土自重的偏差, 提高监控精度。混凝土收缩徐变对桥梁结构线形在成桥后有较大的影响, 且主要位于中跨跨中位置。因此, 在后期的桥梁维护中, 要重点观察桥梁跨中附近箱梁的竖向变形, 以保证桥梁结构的安全。

6) 在中跨合拢完成工况下, 曲线连续刚构桥随着曲率半径的增大, 其竖向变形和横向变形都会随之改变, 呈现出随曲率半径增大而逐渐变小的变化趋势, 这体现了曲线连续梁桥独有的“弯扭耦合”受力特性。在曲率半径由400 m增大至1200 m的变化过程中, 箱梁横向位移变化的趋势随着曲率半径的增大而越来越缓慢; 箱梁竖向位移随着曲率半径的增大而减小, 但减小幅度较小, 曲率半径对箱梁竖向变形的影响主要位于非对称施工阶段和中跨合拢段。

参考文献:

- [1] 王旭焱, 王银辉, 罗征, 等. 大跨不对称小半径曲线转体连续刚构受力和变形特征分析 [C]// 第28届全

- 国结构工程学术会议论文集(第II册).南昌:《工程力学》杂志社,2019:176-183.
- WANG Xuyi, WANG Yinhui, LUO Zheng, et al. Analysis of Mechanical and Deformation Characteristics of Large Span Asymmetric Small Radius Curve Swivel Continuous Rigid Frame[C]//Proceedings of the 28th National Conference on Structural Engineering (Volume II). Nanchang: Journal of Engineering Mechanics, 2019: 176-183.
- [2] 杨玉麟.大跨度预应力混凝土连续刚构桥挠度分析[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- YANG Yulin. Deflection Analysis of Long Span Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge[D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2017.
- [3] 江 南.大跨高墩曲线连续刚构桥的变形分析[D].成都:西南交通大学,2004.
- JIANG Nan. Deformation Analysis of Curved Continuous Rigid Frame Bridge with Long Span and High Piers[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [4] 罗 雷.矮墩连续刚构桥力学行为分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- LUO Lei. Study on Mechanical Behavior of Continuous Rigid Frame Bridge with Low Piers[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [5] 肖洪波,赵俊逸,杨果林,等.曲线连续刚构桥非对称施工横向位移对比及截面应力研究[J].公路,2019,64(5):61-67.
- XIAO Hongbo, ZHAO Junyi, YANG Guolin, et al. Comparisons of Asymmetric Construction Lateral Displacement and Study of Section Stress of Curved Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Highway, 2019, 64(5): 61-67.
- [6] 陈龙宇,刘世忠,赵瑶琴.曲线连续刚构桥平面线形控制体系[J].公路,2014,59(7):133-137.
- CHEN Longyu, LIU Shizhong, ZHAO Yaoqin. Plane Linear Control System of Curved Prestressed Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Highway, 2014, 59(7): 133-137.
- [7] 陈龙明.大跨度曲线连续刚构桥受力与变形分析[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- CHEN Longming. Stress and Deformation Analysis of Long Span Curved Continuous Rigid Frame Bridge[D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2014.
- [8] 汪永田.大跨径高墩曲线桥悬臂施工的变形研究[J].中国水运,2011,11(7):209-210.
- WANG Yongtian. Study on Deformation of Long Span Curved Bridge with High Piers During Cantilever Construction[J]. China Water Transportation, 2011, 11(7): 209-210.
- [9] 吕海燕,马 锋,王 朋.高墩大跨PC曲线连续刚构桥受力和变形研究[J].长沙铁道学院学报(社会科学版),2011,12(4):214-215.
- LÜ Haiyan, MA Feng, WANG Peng. Study on Stress and Deformation of PC Curved Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers and Long Span[J]. Journal of Changsha Railway University(Social Science Edition), 2011, 12(4): 214-215.
- [10] 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 (Natural Science), 2013, 32(S1): 864-868.

(责任编辑:廖友媛)