

预应力砼连续箱梁桥施工过程中线形监控研究

刘首峰

(义乌市精诚交通工程检测有限公司, 浙江 义乌 320000)

摘要: 以某高速公路 196 m 预应力砼连续箱梁桥为工程背景, 将改进 BP 神经网络运用到该桥施工过程中线形监控, 并将监控实测数据和相关理论计算数据进行对比分析。结果表明, 主梁理论计算值与实测累积变形较吻合, 线形光滑、顺畅, 线形控制效果较好。

关键词: 桥梁; 预应力砼; 连续箱梁; 线形监控; 施工过程

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0122-04

桥梁线形监控一直是研究重点和热点, 如汪顺平等利用有限元软件 MIDAS/Civi 2012 对悬臂挂篮施工方法和大节段支架现浇施工方法下大跨度变截面连续箱梁的受力特征进行对比分析, 得出大节段支架现浇施工过程中桥梁墩顶负弯矩较小, 且能缩短工期; 李国平将大跨径连续梁桥施工期结构变形和成桥线形为控制对象, 根据悬臂施工特点控制约束条件、目标函数、状态与变量及实施方法等, 取得了较好的效果; 洗尚钧对钢箱连续梁桥线形进行控制分析, 得到了制造及架设过程中线形变化规律及调整措施。该文针对某预应力砼连续箱梁桥, 运用改进 BP 神经网络模拟分析施工中线形变化规律。

1 工程概况

某跨江大桥全长 196 m, 为跨径 (50+80+50) m 预应力连续刚构桥。桥梁上部结构采用单箱单室截面, 顶板厚度为 28 cm, 宽度为 1 850 cm, 横坡为 1.5%; 底板宽度为 1 050 cm, 底板上沿顺桥向呈二次抛物线变化, 截面高度变化范围为 230~500 cm, 边墩支座及跨中截面梁高 230 cm, 中墩支座梁高 500 cm。箱梁顶面沿中心设置人字形横坡, 坡度为 1.5%。主梁采用三向预应力体系设置, 主梁砼强度等级为 C50, 按全预应力构件设置。主梁采用挂篮悬臂对称施工, 首先搭设现浇支架浇筑 0# 块, 然后安装挂篮悬臂施工浇筑 1#~11# 块标准段, 边跨现浇段采用满堂支架浇筑, 合龙段先边跨后中跨合龙, 最终进行结构体系转换, 施工完成主梁结构。主桥结构施工控制流程见图 1。

2 主梁模型建立及立模标高确定

为保障主梁准确合龙, 降低铺装难度, 使成桥线

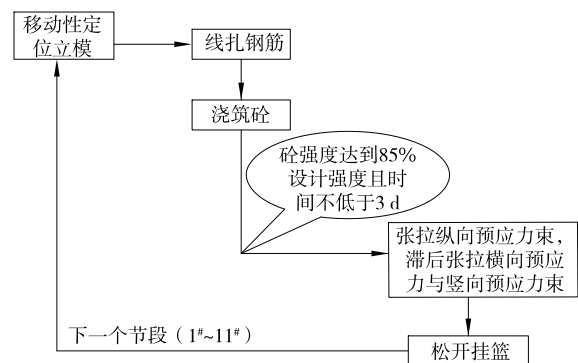


图 1 主梁节段施工流程

形满足要求, 施工过程中采用有限元软件 MIDAS/Civil 2010 对桥梁结构进行全过程模拟计算。采用梁单元建立全桥模型, 共分为 67 个节点、72 个单元 (见图 2)。

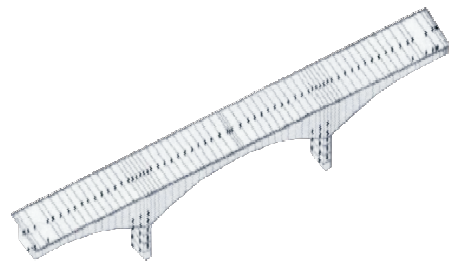


图 2 全桥计算模型

桥梁的线形监控主要通过调整立模标高来实现。首先确定悬臂浇筑各阶段的立模标高, 箱梁各节段实际立模标高按下式计算:

$$H_{i \text{ 立模}} = H_{i \text{ 设计}} + H_{i \text{ 理论预拱度}} + H_{i \text{ 预拱度调整}} + H_{i \text{ 挂篮变形}} \quad (1)$$

式中: $H_{i \text{ 立模}}$ 为第 i 节点的实际立模标准高度; $H_{i \text{ 设计}}$ 为第 i 节点的设计高程; $H_{i \text{ 理论预拱度}}$ 为第 i 节点的理论预拱度; $H_{i \text{ 预拱度调整}}$ 为参数误差产生的理论

预拱度的改变值; $H_{i \text{ 挂篮变形}}$ 为挂篮弹性压缩变形,由挂篮加载施压后计算得到。

该桥设计中将箱梁底面下沿高程与箱梁上顶面中心高程一起纳入理论预拱度中,施工过程中立模标高公式修正为:

$$H_{i \text{ 立模标高}} = H_{i \text{ 箱梁顶面中心高程}} - H_{i \text{ 设计预拱度}} + H_{i \text{ 实际预拱度}} + H_{i \text{ 挂篮变形}} \quad (2)$$

根据不同箱形截面设计高度,依据箱梁顶面中心高程可直接计算箱梁地面中心高程,对挂篮进行加载施压后,通过观察挂篮的受力与变形状况,分析由挂篮弹性压缩导致的变形。只要对实际预拱度值进行设定,即可得到每道工序段的实际立模标准高度。实际施工中,因存在很多不能预知的因素,桥梁结构的实际线形不易达到理想状态,当施工现场实测挠度与理论挠度存在差异时,应对设计参数进行调整,使其与实际施工状态的理论挠度相符,通过施工前的预测与施工后的调整使桥梁线形满足要求。该桥施工监控过程主要包括平面线形监控与箱梁高程线形监控,其中平面线形较易控制,故重点对箱梁高程线形进行监控,使其与目标线形相符。

3 线形状态预测分析

3.1 线形测点分布

在每个施工节段布置3个对称的高程测点,采

用水准仪对各截面标准高度进行测量,对各测点的箱梁曲线与挠度变化过程进行实时观测,并与预测值进行比较,为结构状态修正提供依据,确保箱梁悬臂端合龙精度与桥面线形满足要求(见图3)。

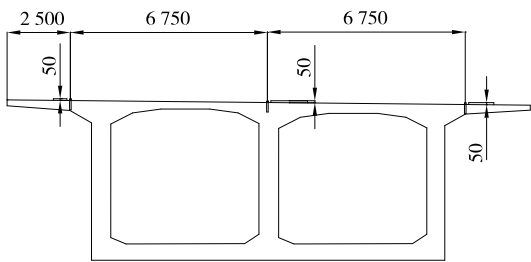


图3 线形测点的横断面分布(单位:cm)

3.2 线形预测

该桥施工过程中只针对重要设计参数砼容重进行误差修正。2#墩大道施工段与小巷侧施工段的砼节段自重不同,重点对8#施工段预应力钢筋张拉后的状况进行论述。标高取以0#块中心为基准点的相对高程。采用BP神经网络对线形进行预测,输入、输出参数见表1。

对2#墩大道8#块预应力筋张拉后线形状态进行预测。表1中实际标高与理论标高为2#墩大道8#块张拉后各施工段的截面标准高度,以表1中实测标高与理论标高分别作为输入、输出参数,通过整理,得式(3)、式(4)。

表1 BP神经网络输入、输出参数

| 截面号 | 温度/℃ | 梁高/m | 悬臂长度/m | 面积/m ² | A市侧施工节段自重/kN | 工期/d | 理论标高/m | 实际标高/m |
|-----|-------|------|--------|-------------------|--------------|------|--------|--------|
| 1 | 32.28 | 4.23 | 7.99 | 19.181 | 1 655.349 | 61 | 0.078 | 0.139 |
| 2 | 31.21 | 3.90 | 11.01 | 18.251 | 1 491.400 | 71 | 0.104 | 0.173 |
| 3 | 30.09 | 3.61 | 13.98 | 16.612 | 1 507.959 | 78 | 0.126 | 0.278 |
| 4 | 32.09 | 3.34 | 16.99 | 15.915 | 1 455.388 | 85 | 0.146 | 0.227 |
| 5 | 35.11 | 3.10 | 20.00 | 15.302 | 1 402.798 | 94 | 0.164 | 0.254 |
| 6 | 31.18 | 2.87 | 23.01 | 14.147 | 1 466.880 | 102 | 0.179 | 0.276 |
| 7 | 35.59 | 2.70 | 25.99 | 13.158 | 1 360.169 | 110 | 0.192 | 0.282 |
| 8 | 30.80 | 2.55 | 29.01 | 12.879 | 1 284.529 | 118 | 0.202 | 0.310 |

$$p = \begin{bmatrix} 32.38 & 31.21 & 30.09 & 32.09 & 35.11 & 31.18 & 35.59 & 30.80 \\ 4.23 & 3.90 & 3.61 & 3.34 & 3.10 & 2.89 & 2.70 & 2.55 \\ 7.99 & 11.01 & 13.98 & 16.99 & 20.00 & 23.01 & 25.99 & 29.01 \\ 19.181 & 18.251 & 16.612 & 15.915 & 15.302 & 14.147 & 13.158 & 12.879 \\ 1\ 655.349 & 1\ 491.400 & 1\ 507.959 & 1\ 455.388 & 1\ 402.798 & 1\ 466.800 & 1\ 360.169 & 1\ 284.529 \\ 61 & 71 & 78 & 85 & 94 & 102 & 110 & 118 \\ 0.078 & 0.104 & 0.126 & 0.146 & 0.164 & 0.179 & 0.192 & 0.202 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$t = [0.139 \ 0.173 \ 0.278 \ 0.227 \ 0.254 \ 0.276 \ 0.282 \ 0.310] \quad (4)$$

利用式(5)对表1中数据进行归一化处理,结果见表2。

$$x'=a+b\times\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{5}$$

式中: x' 为该组元素归一化后输入(输出)值; a 、 b 为常量,其值依据现实状况确定,该桥取 $a=0.2$ 、 $b=0.6$; x 为该组元素归一化前输入(输出)值; x_{\max} 为同一类输入(输出)值中最高值; x_{\min} 为同一类输入(输出)值中最低值。

表 2 归一化后的输入、输出参数

| 温度 | 梁高 | 悬臂 长度 | 面积 | 自重 | 工期 | 实际 测量 标高 | 理论 挠度 |
|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------------|----------|
| 0.440 | 0.800 | 0.200 | 0.800 | 0.800 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |
| 0.320 | 0.685 | 0.286 | 0.707 | 0.535 | 0.302 | 0.320 | 0.324 |
| 0.200 | 0.579 | 0.371 | 0.622 | 0.562 | 0.373 | 0.441 | 0.433 |
| 0.418 | 0.482 | 0.457 | 0.544 | 0.476 | 0.454 | 0.511 | 0.527 |
| 0.746 | 0.396 | 0.543 | 0.475 | 0.391 | 0.546 | 0.606 | 0.616 |
| 0.320 | 0.320 | 0.629 | 0.414 | 0.495 | 0.627 | 0.682 | 0.690 |
| 0.800 | 0.254 | 0.714 | 0.299 | 0.322 | 0.719 | 0.703 | 0.753 |
| 0.276 | 0.200 | 0.800 | 0.200 | 0.200 | 0.800 | 0.800 | 0.800 |

将表 2 中数据转变成下列矩阵:

$$P=\begin{bmatrix} 0.440 & 0.320 & 0.200 & 0.418 & 0.746 & 0.320 & 0.800 & 0.276 \\ 0.800 & 0.685 & 0.579 & 0.482 & 0.396 & 0.320 & 0.254 & 0.200 \\ 0.200 & 0.286 & 0.371 & 0.457 & 0.543 & 0.629 & 0.714 & 0.800 \\ 0.800 & 0.707 & 0.622 & 0.544 & 0.475 & 0.414 & 0.299 & 0.200 \\ 0.800 & 0.535 & 0.562 & 0.476 & 0.391 & 0.495 & 0.322 & 0.200 \\ 0.200 & 0.302 & 0.373 & 0.454 & 0.546 & 0.627 & 0.719 & 0.800 \\ 0.200 & 0.324 & 0.433 & 0.527 & 0.616 & 0.690 & 0.753 & 0.800 \end{bmatrix}$$
$$t=[0.200 \ 0.320 \ 0.441 \ 0.511 \ 0.606 \ 0.682 \ 0.703 \ 0.800]$$

得到仿真预测数据为:

$$A=[0.181 \ 0.373 \ 0.431 \ 0.435 \ 0.650 \\ 0.727 \ 0.682 \ 0.784]$$

再将该矩阵反归一化,得:

$$A=[0.091 \ 0.235 \ 0.191 \ 0.231 \ 0.234 \\ 0.289 \ 0.307 \ 0.286]$$

3.3 线形预测结论

运用 BP 神经网络对该桥线形进行预测,并与实测值对比,结果见表 3~5。

根据表 3~5,该桥合龙精度为:1#墩大道边跨 10.89mm,中跨 18mm,小港侧边跨 16.29mm,边

表 3 1#墩标高预测值与理论计算值、实测值的比较

| 截面号 | 工况 | 理论标 高/m | 实测标 高/m | 预测标 高/m | 实测值— 理论值/m | 实测值— 预测值/m |
|-----|--------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 3 | 3#块张拉 | -0.177 | -0.080 | -0.116 | 0.097 | 0.036 |
| 4 | 4#块张拉 | -0.222 | -0.168 | -0.176 | 0.054 | 0.008 |
| 5 | 5#块张拉 | -0.269 | -0.222 | -0.224 | 0.049 | 0.004 |
| 6 | 6#块张拉 | -0.318 | -0.269 | -0.274 | 0.049 | 0.004 |
| 7 | 7#块张拉 | -0.370 | -0.317 | -0.367 | 0.053 | 0.050 |
| 8 | 8#块张拉 | -0.425 | -0.374 | -0.378 | 0.051 | 0.004 |
| 9 | 9#块张拉 | -0.487 | -0.433 | -0.453 | 0.054 | 0.019 |
| 10 | 10#块张拉 | -0.561 | -0.518 | -0.540 | 0.043 | 0.022 |

表 4 2#墩标高预测值与理论计算值、实测值的比较

| 截面号 | 工况 | 理论标 高/m | 实测标 高/m | 预测标 高/m | 实测值— 理论值/m | 实测值— 预测值/m |
|-----|--------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 3 | 3#块张拉 | 0.126 | 0.206 | 0.189 | 0.080 | 0.017 |
| 4 | 4#块张拉 | 0.145 | 0.226 | 0.193 | 0.081 | 0.033 |
| 5 | 5#块张拉 | 0.163 | 0.252 | 0.230 | 0.087 | 0.022 |
| 6 | 6#块张拉 | 0.178 | 0.275 | 0.271 | 0.096 | 0.004 |
| 7 | 7#块张拉 | 0.192 | 0.281 | 0.263 | 0.090 | 0.018 |
| 8 | 8#块张拉 | 0.202 | 0.310 | 0.286 | 0.108 | 0.024 |
| 9 | 9#块张拉 | 0.204 | 0.288 | 0.281 | 0.084 | 0.007 |
| 10 | 10#块张拉 | 0.206 | 0.291 | 0.277 | 0.085 | 0.015 |

表 5 1#墩大道标高预测值与理论计算值、实测值的比较

| 截面号 | 工况 | 理论标高/m | 实测标高/m | 预测标高/m | 实测值－理论值/m | 实测值－预测值/m |
|-----|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| 3 | 3#块张拉 | 0.126 | 0.202 | 0.190 | 0.076 | 0.012 |
| 4 | 4#块张拉 | 0.142 | 0.208 | 0.208 | 0.066 | 0.002 |
| 5 | 5#块张拉 | 0.159 | 0.241 | 0.252 | 0.082 | －0.011 |
| 6 | 6#块张拉 | 0.173 | 0.250 | 0.262 | 0.077 | －0.013 |
| 7 | 7#块张拉 | 0.185 | 0.262 | 0.263 | 0.078 | －0.001 |
| 8 | 8#块张拉 | 0.193 | 0.296 | 0.266 | 0.103 | 0.031 |
| 9 | 9#块张拉 | 0.194 | 0.283 | 0.269 | 0.088 | 0.014 |
| 10 | 10#块张拉 | 0.193 | 0.271 | 0.222 | 0.079 | 0.049 |

跨、中跨合龙精度均未超过 20 mm,满足控制要求。
各截面高程值见表 6~9。

表 6 1#墩大道高程值

| 截面号 | 里程桩号 | 箱梁顶面中心高程/m | | 立模箱顶高程/m | 预测箱顶高程/m |
|-----|-----------|------------|-------|----------|----------|
| | | 设计 | 实测 | | |
| 11 | K11+660.9 | 11.88 | 11.89 | 11.88 | 11.87 |
| 10 | K11+664.5 | 11.96 | 11.98 | 11.96 | 11.95 |
| 9 | K11+668.1 | 12.03 | 12.05 | 12.05 | 12.09 |
| 8 | K11+670.8 | 12.09 | 12.11 | 12.11 | 12.10 |
| 7 | K11+673.9 | 12.14 | 12.17 | 12.17 | 12.12 |
| 6 | K11+676.9 | 12.19 | 12.22 | 12.22 | 12.21 |
| 5 | K11+680.0 | 12.24 | 12.67 | 12.27 | 12.26 |
| 4 | K11+682.9 | 12.29 | 12.32 | 12.32 | 12.31 |
| 3 | K11+685.9 | 12.33 | 12.40 | 12.40 | 12.37 |
| 2 | K11+689.1 | 12.37 | 12.42 | 12.42 | 12.37 |
| 1 | K11+691.9 | 12.40 | 12.43 | 12.43 | 12.39 |

表 7 1#墩小港侧高程值

| 截面号 | 里程桩号 | 箱梁顶面中心高程/m | | 立模箱顶高程/m | 预测箱顶高程/m |
|-----|-----------|------------|-------|----------|----------|
| | | 设计 | 实测 | | |
| 1 | K11+707.9 | 12.60 | 12.61 | 12.60 | 12.59 |
| 2 | K11+710.9 | 12.63 | 12.67 | 12.63 | 12.65 |
| 3 | K11+714.1 | 12.66 | 12.68 | 12.66 | 12.66 |
| 4 | K11+716.8 | 12.68 | 12.68 | 12.68 | 12.68 |
| 5 | K11+719.9 | 12.71 | 12.71 | 12.71 | 12.72 |
| 6 | K11+723.1 | 12.73 | 12.72 | 12.73 | 12.73 |
| 7 | K11+725.8 | 12.75 | 12.73 | 12.74 | 12.73 |
| 8 | K11+728.9 | 12.76 | 12.76 | 12.76 | 12.73 |
| 9 | K11+732.1 | 12.77 | 12.74 | 12.76 | 12.73 |
| 10 | K11+735.5 | 12.78 | 12.74 | 12.77 | 12.69 |
| 11 | K11+738.9 | 12.78 | 12.74 | 12.76 | 12.69 |

表 8 2#墩大道高程值

| 截面号 | 里程桩号 | 箱梁顶面中心高程/m | | 立模箱顶高程/m | 预测箱顶高程/m |
|-----|-----------|------------|-------|----------|----------|
| | | 设计 | 实测 | | |
| 11 | K11+740.8 | 12.78 | 12.73 | 12.76 | 12.74 |
| 10 | K11+744.5 | 12.78 | 12.76 | 12.77 | 12.75 |
| 9 | K11+748.1 | 12.77 | 12.75 | 12.77 | 12.74 |
| 8 | K11+751.1 | 12.76 | 12.77 | 12.76 | 12.75 |
| 7 | K11+754.0 | 12.75 | 12.75 | 12.74 | 12.73 |
| 6 | K11+757.2 | 12.73 | 12.75 | 12.73 | 12.74 |
| 5 | K11+760.0 | 12.71 | 12.73 | 12.71 | 12.70 |
| 4 | K11+762.9 | 12.68 | 12.70 | 12.69 | 12.67 |
| 3 | K11+766.1 | 12.66 | 12.68 | 12.66 | 12.67 |
| 2 | K11+769.1 | 12.63 | 12.65 | 12.63 | 12.66 |
| 1 | K11+771.9 | 12.59 | 12.62 | 12.59 | 12.63 |

表 9 2#墩小港侧高程值

| 截面号 | 里程桩号 | 箱梁顶面中心高程/m | | 立模箱顶高程/m | 预测箱顶高程/m |
|-----|-----------|------------|-------|----------|----------|
| | | 设计 | 实测 | | |
| 1 | K11+787.9 | 12.40 | 12.44 | 12.40 | 12.44 |
| 2 | K11+791.2 | 12.37 | 12.43 | 12.39 | 12.41 |
| 3 | K11+794.1 | 12.33 | 12.36 | 12.33 | 12.36 |
| 4 | K11+797.2 | 12.24 | 12.32 | 12.29 | 12.34 |
| 5 | K11+800.0 | 12.19 | 12.29 | 12.24 | 12.28 |
| 6 | K11+802.8 | 12.14 | 12.24 | 12.19 | 12.25 |
| 7 | K11+805.8 | 12.09 | 12.19 | 12.14 | 12.19 |
| 8 | K11+809.1 | 12.03 | 12.14 | 12.08 | 12.15 |
| 9 | K11+811.7 | 12.03 | 12.06 | 12.03 | 12.04 |
| 10 | K11+814.8 | 12.91 | 11.98 | 11.96 | 11.99 |
| 11 | K11+818.9 | 12.88 | 11.89 | 11.89 | 11.87 |

实际变形值的误差较小,只有极少数测点实测高程与设计高程出现较大偏差。主要原因是标高测点在施工中被压弯与破坏或测量中存在一些不可避免的因素,如大风等使主梁产生振动、仪器不准等。

由表 6~9 可知:经过施工线形监控,各墩梁合龙后实测标高与设计标高差异不大,理论计算值与

气温降低,但未采取外保温措施导致砼边缘热量散失较快。采用PVC管作为冷却水管时,龄期84 h前砼内部最大温差明显高于钢管作为冷却水管时,但84 h后最大温差相差不大。PVC管、钢管作为冷却水管时砼内部最大温差的发展趋势一致。

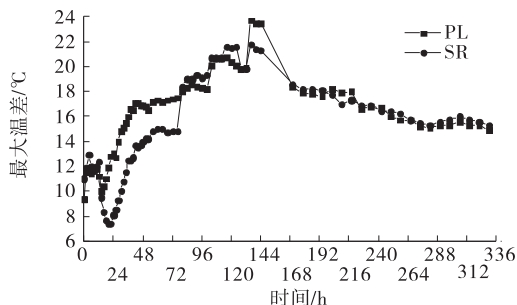


图10 砼内部最大温差发展曲线

图11为砼内部最高温度随时间的变化速率。由图11可知:冷却水管采用PVC管和钢管时,承台砼内部最高温度变化速率发展趋势基本一致,但采用PVC管作为冷却水管时砼内部最高温度变化速率波动小于采用钢管作为冷却水管时,表明PVC管作为冷却水管更有利于稳定控制砼内部最高温度。

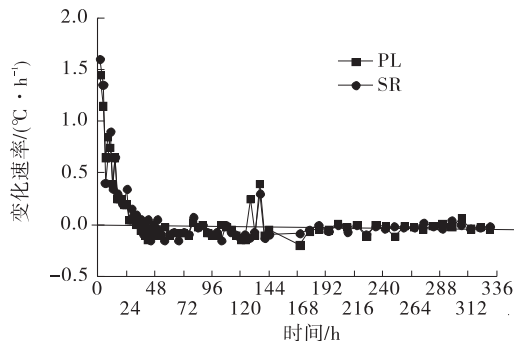


图11 砼内部最高温度变化速率

5 结论

(1) PVC管及钢管作为冷却水管均能控制砼内部中心最高温度,且PVC管作为冷却水管时砼内部最高温度变化速率波动较小,更有利于稳定控制砼内部最高温度。

(2) 采用PVC管作为冷却水管时,在升温阶段,承台砼内部最大温差与采用钢管作为冷却水管时相比更大,但在降温阶段承台砼内部温差比钢管更小,在使用冷却水管控制砼内部温差时,除控制冷却水进水温度、流量外,还应根据冷却水管材质在不同阶段采取保温措施。

参考文献:

- [1] 鲁正刚,王修信.考虑水管冷却的大体积混凝土承台温度控制研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1172-1178.
- [2] 戴镇潮.大体积混凝土的防裂[J].混凝土,2001(9):9-11.
- [3] 钊传华,毕波,赵忠斌.大体积混凝土温度控制技术在永乐油田桥梁工程中的应用[J].油气田地面工程,2018,37(9):91-94.
- [4] 黄绍龙,吕寅,丁庆军,等.大桥承台大体积混凝土的温度控制与施工[J].建筑技术,2011,42(5):438-440.
- [5] 朱伯芳.聚乙烯冷却水管的等效间距[J].水力发电,2002(1):20-22.
- [6] 王家泽.PVC塑料管在大体积混凝土中的应用[J].安徽冶金科技职业学院学报,2011,21(2):34-35.
- [7] 中国冶金建筑协会.大体积混凝土施工规范:GB 50496-2009[S].北京:中国计划出版社,2009.

收稿日期:2019-12-25

(上接第125页)

4 结论

- (1) 该桥变形值小于20 mm,满足控制要求。
- (2) 合龙精度符合设计要求。
- (3) 桥梁合龙后,左右对称性较好。
- (4) 主桥线形平顺、流畅,与预期目标一致。

参考文献:

- [1] 谭冠生.罕遇地震作用下高墩大跨连续刚构桥地震响应分析[J].铁道建筑,2016,56(6):27-30.
- [2] 董爱平.高墩大跨连续刚构桥施工控制研究及其温度

效应分析[D].成都:西南交通大学,2004.

- [3] 白午龙,张煜,石雪飞,等.山区高墩大跨连续刚构桥施工阶段稳定性影响参数分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(增刊1):839-843+851.
- [4] 杨立财,葫芦河特大桥连续刚构施工线形控制技术[J].铁道建筑,2012,52(3):14-16.
- [5] 周党伟.大跨度变截面悬臂箱梁施工线形控制技术[J].铁道建筑,2012,52(6):16-18.
- [6] 徐斌.高墩大跨连续刚构桥的设计及关键技术研究[J].铁道建筑,2015,55(6):10-13.

收稿日期:2019-08-09