

(70+120+120+70) m 大跨连续刚构桥施工监控

王磊

中铁九局集团第一建设有限公司, 江苏 苏州 215299

[摘要] 为了适应施工装备及桥梁结构受力要求, 大跨径连续刚构桥梁多采用悬臂现浇施工。现代桥梁建设多采用预应力混凝土结构, 从而使得连续刚构桥在建设和运营过程中结构受力和变形情况十分复杂。为了使桥梁尽量接近设计状态、具有更好的成桥状态, 保证施工质量和施工安全, 确保合龙后主桥线形和内力与设计一致, 有必要对桥梁施工过程进行监测。文中对东金沟松花江特大桥 (70+120+120+70) m 开展施工监控, 保证桥梁的变形和应力满足设计要求。可为相关工程的建设提供参考。

[关键词] 连续刚构; 施工监控; 高程; 应力

DOI: 10.33142/ec.v6i10.9694

中图分类号: U445.466

文献标识码: A

Construction Monitoring of (70+120+120+70) m Long-span Continuous Rigid Frame Bridge

WANG Lei

First Construction Co., Ltd. of China Railway No. 9 Group, Suzhou, Jiangsu, 215299, China

Abstract: In order to meet the requirements of construction equipment and bridge structure, long-span continuous rigid frame bridges are mostly constructed by cantilever cast-in-place construction. Modern bridge construction mostly adopts prestressed concrete structure, which makes the structure stress and deformation of continuous rigid frame bridge very complicated in the process of construction and operation. In order to make the finished bridge state of the bridge better conform to the design state, ensure the construction quality and construction safety, and ensure that the alignment and internal force of the main bridge after the closure are consistent with the design, it is necessary to monitor the construction process of the bridge. In this paper, the construction monitoring of Dongjingou Songhuajiangte Bridge (70+120+120+70) m is carried out to ensure the reliability and safety of the structure during the construction process, and to ensure that the deformation and stress of the bridge meet the design requirements. It can provide reference for the construction of rigid frame bridge and the development of monitoring.

Keywords: continuous rigid frame bridge; construction monitoring; elevation; stress

引言

预应力混凝土刚构桥起源于欧洲, 1953 年德国工程师乌利希·芬斯特瓦尔德在莱茵河上利用预应力混凝土现浇平衡悬臂施工法建成了 Worms 桥, 使得利用平衡悬臂施工体系建造 T 型刚构桥在德国得到应用, 并很快推广至全世界^[1]。随着高速交通的发展, 多伸缩缝或跨中带铰的 T 型刚构不能适应行车舒适性的要求, 因此行车条件更好的连续梁结构得到了新的发展^[2-3]。连续梁结构在施工时, 墩梁临时固结, 合龙后安设支座并进行体系转换成为连续结构。除两端外其结构其他部位无伸缩缝, 利于行车, 但随着连续梁跨径的增大, 结构所需的支点反力也随之增加。一座主跨 170m 左右, 桥宽 12m 左右的连续梁桥, 一个桥墩上至少需要安装至少两个承载力在 4000t 以上的巨型支座, 使得支座的设计、安装、成本以及后期养护变成了十分重要的问题^[4]。T 型刚构桥由于是墩梁固结结构, 在墩顶结构受力简单, 所以人们将 T 型刚构不设支座的优点与连续梁结构上部变形连续的优点相结合, 产生了连续刚构桥梁。

目前, 我国早期建造的大跨度连续刚构桥由于各种原因遭受了不同程度的病害侵害, 其主要形式可归为两类: 一是混凝土开裂, 如箱梁竖向开裂、箱梁底板纵向开裂、

箱梁腹板出现斜裂缝等; 另一个是主跨跨中下挠度过大。引起这些病害的原因可总结为设计和施工两方面, 主流观点认为可将具体成因归为: 混凝土收缩、徐变, 预应力材料的松弛以及施工缺陷等^[5-6]。为避免相似情况出现在新建桥梁上, 除了在设计上找原因, 对桥梁建设进行施工控制, 无疑成为了必然选择。通过施工现场的结构测试, 跟踪、计算、分析、预测成桥状态, 给施工过程提供技术和数据依据, 确保成桥时线型和内力符合设计要求。施工控制是保证桥梁施工质量和安全不可缺少的重要组成部分。

东金沟松花江特大桥 (70+120+120+70) m 预应力混凝土连续刚构桥是一座大跨公路桥, 同时该桥的施工环境复杂、施工周期较长, 所以对其应力、线形的监控难度较大。鉴于工程的复杂性, 需要合理的施工监控方案来确保梁体结构的成桥线形及应力状态满足设计要求, 保证安全施工。

1 工程概况

1.1 总体情况

东金沟松花江特大桥位于桦甸市夹皮沟镇金沟村附近, 为跨越二道松花江而设置, 桥梁设计中心桩号 K212+250, 起止里程为: K211+690-K212+810, 桥长 1127m。

桥梁中心线与二道松花江交角为 145.5° (右偏角)。左幅跨径组合为 $18 \times 30 + 2 \times 40 + (70 + 120 + 120 + 70) + 3 \times 40$, 右幅跨径组合为 $20 \times 30 + (70 + 120 + 120 + 70) + 2 \times 40 + 2 \times 30$ 。设计荷载为公路 I 级, 桥宽 $2 \times 12.5\text{m}$ 。

主桥上部结构采用预应力混凝土连续刚构, 跨径组合 $(70 + 120 + 120 + 70)\text{m}$, 全长 380m 。主桥按照预应力混凝土全预应力构件进行设计, 箱梁采用变高度单箱单室直腹板断面, 如图 2 所示。上部结构共划分为 17 个梁段, 其中 0~15 号梁段为 T 构梁段; 16 号梁段为中、边跨合龙梁段; 17 号梁段为边跨现浇梁段。在 T 构梁段中, 0、1 号梁段采用托架现浇梁段, 2~15 号梁段采用挂篮悬臂浇筑, 16 号梁段采用挂篮浇筑, 17 号梁段采用支架现浇。主梁梁高从 2.8m 至 7.2m 按 1.75 次抛物线规律变化, 变化范围为 T 构 15 号块末端至 0 号块横隔板外侧, 梁高变化方程式 $H(\text{m}) = 4.4 \times (X/55.5)^{1.75} + 2.8$ 。梁高理论计算位置为箱梁中心处, 箱梁顶底板平行布置, 左右侧腹板等高。主梁段固定横坡 2%, 箱梁顶底横坡同桥面横坡。箱梁翼缘板悬臂长度为 275cm , 箱底宽 700cm , 箱梁顶板宽为 1250cm 。顶板基准厚度为 30cm , 悬臂板端部厚度 20cm 。全桥腹板变厚度 $80\text{cm} - 70\text{cm}$, 在 9#块处变化。底板厚度从 32cm 至 80cm 也按 1.75 次抛物线规律变化, 底板厚度变化方程式 $t(\text{m}) = 0.48 \times (x/55.5)^{1.75} + 0.32$ 。

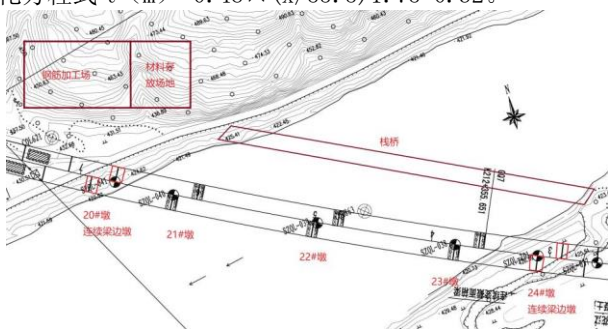


图 1 (70+120+120+70)m 连续梁平面布置示意图

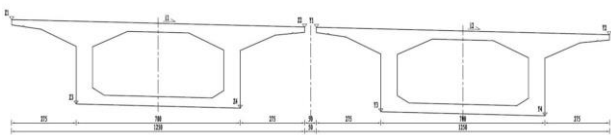


图 2 悬浇段标准断面 (左右幅)

1.2 自然条件

左幅 21#墩位于河道内, 勘察时水深 0.1m , 下部为厚约 5.5m 卵石层, 下伏强风化泥岩; 右幅 21#墩位于河道内, 勘察时水深 0.4m , 下部为厚约 5.2m 卵石层, 下伏强风化泥岩。左幅 22#墩位于河道内, 勘察时水深 2.2m , 下部依次为厚约 2.5m 卵石层+ 3.5m 细砂层, 下伏强风化泥岩; 右幅 22#墩位于河道内, 勘察时水深 1.6m , 下部依次为厚约 3.1m 卵石层+ 3.5m 细砂层, 下伏强风化泥岩。左幅 23#墩位于河道内, 勘察时水深 2.2m , 下部为厚约 4.9m

卵石层, 下伏强风化泥岩; 右幅 22#墩位于河道内, 勘察时水深 2.6m , 下部为厚约 4.5m 卵石层, 下伏强风化泥岩。

桥址区属北温带大陆性季风区, 四季分明。

桥址区地表水主要为二道松花江支流, 属于二道松花江水系。河流受大气降水影响较大, 补给来源以大气降水为主, 局部河流地段由地表径流补给。

1.3 施工流程

(1) 桩基承台施工

- ①施工机具进场, 平整场地, 放样, 完成施工前期准备。
- ②河中设置围堰, 钻孔, 主墩设置永久钢护筒, 并绑扎钢筋笼, 浇筑桩基混凝土, 完成桥墩桩基施工。
- ③桥墩开挖基坑, 破桩头, 浇筑混凝土垫层, 绑扎钢筋, 埋设冷却水管, 浇筑混凝土, 完成桥墩承台施工。

(2) 墩台施工

- ①立模、绑扎钢筋, 浇筑混凝土, 完成墩身施工;
- ②下部结构施工完成。

(3) 0 号梁段施工

- ①搭设 0 号梁段支架, 立模、绑扎钢筋。定位索、F 索纵向预应力管道。
- ②定位竖向、横向预应力管道。
- ③分层、对称浇筑梁段混凝土, 达到龄期后脱模, 脱模龄期不小于 5 天 (下同)。

(4) 1 号梁段施工

- ①搭设托架, 在托架上立模、绑扎钢筋。接长纵向预应力管道。
- ②接长纵向预应力管道。
- ③分层、在托架上对称浇筑 1 号梁段浇筑施工, 达到龄期后脱模。

④按先后顺序对称张拉纵向预应力 T1、F1, 张拉预应力混凝土龄期不小于 7 天 (下同)。

(5) 2 号梁段施工

- ①拆除托架, 在 1 号梁段上安装挂篮。
- ②在挂篮上立模、绑扎钢筋。
- ③接长纵向预应力管道。
- ④完成“四”中 2-5 工序。

(6) 3-15 号梁段以及边跨现浇段施工

- ①移动挂篮, 与 2 号梁段相同的施工工序对 3-15 号梁段施工。
- ②完成 3 号~15 号梁段的施工。
- ③同时整平场地, 搭设边跨现浇段落地支架, 并提前预压。
- ④与上相同的施工工序完成 17 号梁段的施工。
- ⑤达到龄期后脱模, 张拉预应力钢束。

⑥若确认受力不需要 T_y 预应力管道,即可采用真空压浆法灌注 C55 水泥纯浆,封闭 T_y 管道。

(7) 中跨合拢

①中跨合拢前移动中跨挂篮至最大悬臂,施加水平推力。之后在悬臂端各设置一个平衡水箱,并安装劲性骨架,立模绑扎钢筋。

②接长纵向预应力管道。

③分层、对称浇筑合拢段混凝土,等量泄出水箱中的水,达到龄期后脱模。

④切断劲性骨架,张拉纵向预应力钢束 Z 、 B_z 。

⑤若确认受力不需要 y 预应力管道,即可采用真空压浆法灌注 C55 水泥纯浆,封闭 y 管道。

⑥完成中跨合拢施工。

(8) 边跨合拢

①在支架上安装劲性骨架,立模并绑扎钢筋,接长纵向预应力管道。

②分层、对称浇筑合拢段混凝土,达到龄期后脱模。

③切断劲性骨架,依次先后对称张拉纵向预应力钢束 B 、 H 。

④若确认受力不需要 B_y 预应力管道,即可采用真空压浆法灌注 C55 水泥纯浆,封闭 y 管道。

⑤张拉剩余竖向预应力。

(9) 全桥施工完成

①各齿板封锚,完成上部箱梁施工。

②拆除挂篮后拆除边跨临时支架,完成体系转换。

③二期铺装及附属设施施工,主桥施工完毕。

2 主梁挠度变形监测方法

2.1 控制流程

从挂篮的前移定位至预应力钢束张拉完毕是本桥施工的一个周期,每个周期中有关施工控制的步骤如下:(1)根据预先设定的挂篮位置,施工单位将进行精确的测量,以确保挂篮的准确定位。通过精确的测量,确定挂篮的标高,并将其及时传达给控制小组;(2)立模板、绑扎钢筋;(3)在开始浇注混凝土之前,应该测定每一个已经建成的桥墩的高程测点,并重新测定挂篮的高程海拔;(4)经过施工控制小组的详细分析,若需要进行调整,将提供最终的标高;(5)第二天,对整个桥梁进行全面的检查,复测所有测点;(6)在安装完横向预应力钢筋之后,复测所有高程测点;(7)经过精确的测量,根据分析结果,给出下一施工阶段挂篮的理论标高。重要的是,在每次施工结束后,必须对所有的测点进行测量,并分析实际施工结果与预期目标之间的差异,以便及时调整已经出现的偏差,以确保达到所需的精度。这样,才能对下一次施工进行预测。

2.2 误差控制标准

通过对桥梁的挠曲性能进行精确的监测,确保桥梁的成桥线形与设计线形相一致,并且误差在足《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650—2020)的范围内,即+15mm 到

-15mm。据此,关键工序施工误差控制标准为:(1)通过挂篮定位,将定位和预报的高度偏移限定在 $\pm 5\text{mm}$ 范围内;而当纵向预应力钢束被安装完毕,若梁端高程的实际测量值和预期的偏移值大于 $\pm 5\text{mm}$,则必须对其产生的偏移量进行深入的研究和分析,并采取相关的调整措施;(2)合拢误差应在 15mm 和-5mm 之间,确保梁面线形的平顺性。

(3)为保证梁面高程,对每施工阶段梁面混凝土即将浇筑完毕时的高程进行控制,施工中根据此高程浇筑混凝土,梁面浇筑后高程误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。(4)成桥后梁底绝对高程与设计高程误差在+15mm 和-15mm 之间;梁顶板绝对高程经修整后需满足+15mm 和-15mm 的精度要求,梁体线形平顺。

2.3 挠度观测测点布置

挠度观测资料是控制成桥线形最主要的依据,东金沟松花江特大桥(70+120+120+70)m 连续刚构线形监测断面设在每一阶段的端部,梁底标高直接测量该段模板前端。

为了确保顶板的设计标高,并且为今后的悬浇阶段提供参考,在 0#块上安排了 15 个高程测点,以便进行精确的测量。

悬浇阶段每个监测断面上布置 5 个高程观测点,其中两对为对称,如图 3 所示,不仅可以测量箱梁的挠度,同时可以观测箱梁是否发生扭转变形。

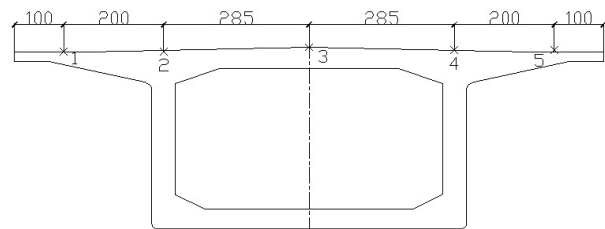


图 3 标高测点布置图

3 主梁结构应力监测方法

3.1 控制流程

主梁测试断面选择边跨合龙段,中跨合龙段以及支点等关键截面,共 10 个测试断面。

各测试断面仪器布置情况如图 4 所示,钢筋应力计分别布置在顶板顶层钢筋网的下侧和底板底层钢筋网的上侧,实际布设时可根据现场情况作适当的调整,每个断面布置 4 根钢筋应力计。

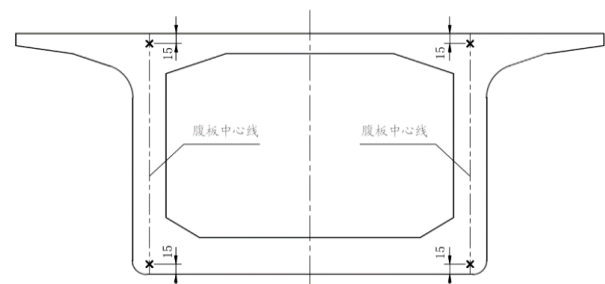


图 4 箱梁断面上的应变计位置图

3.2 应力计初值设定及测试时间

东金沟松花江特大桥(70+120+120+70)m连续刚构梁体结构用悬臂浇筑法施工,应力计根据施工控制前期计算结果埋设在各测试断面。由于混凝土在初凝后将发生很大的水化热,对测试结果影响较大,故一般钢筋应力计的初值设定设在混凝土的初凝时刻,可以降低水化热等对测试结果的影响。为了减小温度对测试结果的影响,测量时间选择在早晨太阳出来之前,同时记录梁体的温度以进行温度修正。

3.3 混凝土收缩和徐变的影响建立

对于超静定结构,混凝土的收缩和徐变将引起结构次内力以及钢筋与混凝土之间的应力重分布,须将混凝土的收缩和徐变引起的钢筋应力增量扣除。为了消除混凝土收缩、徐变对测试结果的影响可以在每道工序(如张拉预应力钢筋)之前测一次数据,若该施工过程较短,则认为每道工序间发生的混凝土收缩、徐变量很小,不予考虑,以增量的结果形式对每个阶段进行监测,若施工周期较长,必须对测试数据进行处理。

4 仿真模型

采用有限元计算软件MIDASCIVIL对全桥进行模拟分析,采用梁单元模拟箱梁结构,按照图纸建立材料、截面,考虑钢束张拉及预应力损失、挂篮自重、混凝土湿重、混凝土收缩徐变、温度变化等,按照工序对每个施工阶段进行激活。全桥模型如图5所示,选取典型施工工况,即钢束张拉、悬臂浇筑,分别如图6、图7所示。



图5 全桥模型

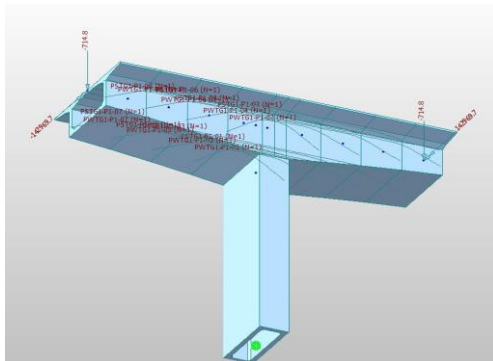


图6 钢束张拉模拟

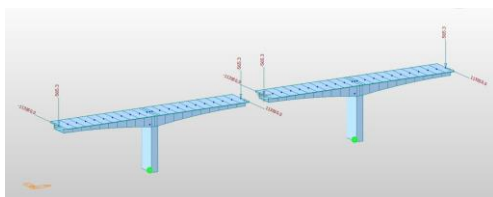


图7 悬臂浇筑施工

考虑各施工阶段自重、挂篮和模板自重、预应力、收缩徐变、施工临时荷载、二期荷载等效应,根据选用的参数和计算模型,输入参数值,对该桥上部结构主梁各个施工阶段进行静力分析,可计算出各个单元截面的挠度变形值,将各截面的挠度变形量作为施工控制的依据,预测施工阶段的预拱度和立模标高。悬浇节段施工分为混凝土浇筑前、混凝土浇筑后、预应力张拉前、预应力张拉后、挂篮移动前、挂篮移动后六种工况,综合考虑各种荷载效应,建立计算模型,输入参数值,计算出各种工况下的每节段的挠度变形值,继而计算出各节段在每种工况下标高理论值。边跨现浇段分为混凝土浇筑前、混凝土浇筑后、预应力张拉前、预应力张拉后四种工况,综合考虑各种荷载效应,建立计算模型,输入参数值,计算出每种工况下节段的标高理论值。应力计算主要考虑混凝土浇筑后、预应力张拉前、预应力张拉后三种工况,根据建立的计算模型,输入控制参数值,计算出应力控制断面的应力最大值和最小值,均在梁体混凝土强度安全范围内。

5 监控作业流程

在大跨径预应力混凝土箱梁桥的建造中,由于受到许多因素的影响,包括桥梁的结构强度、梁的质量、施加的负荷、混凝土的收缩速率、环境条件以及预应力的尺寸。初始的施工监控理论计算模型都假定这些参数值为理想值。为了避免由于模型参数的不准确而导致的理论计算与实际施工结果的偏差,必须在施工过程中对这些参数进行准确地识别和预测。如果发现有较大的设计偏差,建议设计方更改理论设计值,而如果是普遍存在的参数偏差,我们可以通过优化来解决。整个监控工作的流程如图8所示。

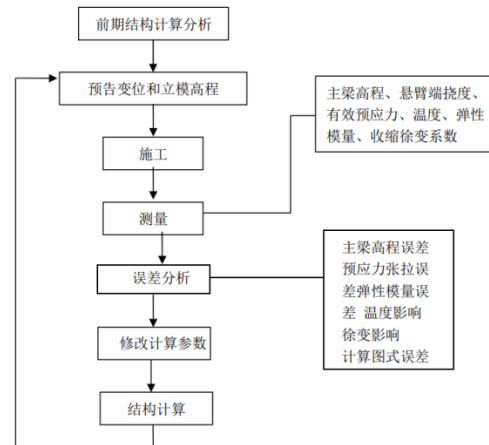


图8 自适应施工控制方法流程图

初始预拱度 H_{ygi} 可以抵消施工中产生的各种挠度变形。其计算公式如下:

$$H_{ygi} = f_{1i} + f_{2i} + f_{3i} + f_{gl}$$

其中, f_{1i} -由混凝土收缩、徐变在*i*节段产生的挠度;

f_{2i} -由二期恒载在*i*节段产生的挠度;

f_{3i} -由1/2静活载在*i*节段产生的挠度;

f_{gl} -挂篮变形值。

计算得到各个施工节段的理论预拱度值,如表 1 所示。

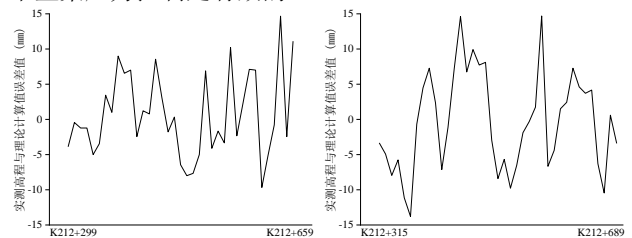
表 1 各个施工节段理论预拱度表

边跨预拱度		中跨预拱度	
施工节段位置	预拱度值	施工节段位置	预拱度值
(m)	(mm)	(m)	(mm)
-	-	0	0
1.65	0	2	2
4	2	4	5
6	3	6	7
8	4	8	9
10	6	10	12
12	7	12	14
14	8	14	16
16	9	16	18
18	9	18	19
20	10	20	21
22	11	22	23
24	11	24	24
26	12	26	26
28	12	28	27
30	13	30	29
32	13	32	30
34	13	34	31
36	13	36	32
38	13	38	34
40	13	40	34
42	13	42	35
44	12	44	35
46	12	46	36
48	11	48	36
50	11	50	37
52	10	52	37
54	9	54	38
56	8	56	38
58	8	58	38
60	6	60	38
62	5		
64	4		
66	3		
68	1		
70	0		

注: (1) 正值为向上设置预拱度, 负值为向下设置预拱度;
(2) 中跨预拱度只列出一半, 对称设置;
(3) 预拱度设置应保证线形平顺。

6 施工监控结果

东金沟松花江特大桥 (70+120+120+70) m 连续刚构桥的竖向线形始终处于精密而可靠的控制之中。成桥后的实测高程与理论高程误差值如图 9 所示, 左幅桥高程差值在 (+14.67~9.67)mm, 右幅桥高程差值在 (+14.70~13.79)mm, 均在规范要求的 (+15~-15)mm 范围内, 这表明在整个施工过程中对平面线形的控制是安全有效的, 达到了监控量测的目的。在整个悬臂施工过程中和成桥后主梁的应力状态始终处于可靠的控制之中, 梁体最大拉应力为 0.86MPa, 小于其抗拉强度设计 1.89MPa; 最大压应力 12.5MPa, 小于其抗压强度设计值 23.1MPa, 梁体结构一直处于安全可靠的施工状态之中, 这表明在整个施工过程中主梁应力控制是有效的。



(a) 左幅桥 (b) 右幅桥

图 9 成桥后实测高程与理论高程差值

7 结论

针对 (70+120+120+70)m 连续刚构的施工控制提出了合理的线性监测方案, 建立了合理高效的自适应施工控制方法工作流程, 在实际工程施工控制过程中, 及时收集施工过程的基础数据和技术信息, 从而成功完成对实际工程的施工控制, 监控结果表明该连续刚构桥梁成桥后的实测高程与理论计算差值不超过 15mm, 整个悬臂施工过程中和成桥后主梁的应力状态始终处于可靠的控制之中, 这表明在整个施工过程中线形控制是有效的。

[参考文献]

- [1] 向中富. 桥梁工程控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
 - [2] 刘成龙, 陈强, 李振伟. 温度对悬浇法施工桥梁长悬臂箱梁标高的影响及其对策[J]. 桥梁建设, 2003(1): 3-4.
 - [3] 顾安邦, 常英, 乐云祥. 大跨径预应力连续刚构桥施工控制的理论与方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 1999, 18(4): 47-53.
 - [4] 李开建. 盐淮桥 (60+100+60) m 连续梁悬臂施工控制技术研究与实践[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
 - [5] 李军志. 预应力混凝土连续刚构桥施工仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
 - [6] 赵超. 长联预应力混凝土连续梁桥施工监控[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- 作者简介: 王磊 (1983—), 男, 辽宁沈阳人, 学历: 本科, 职称: 高级工程师, 研究方向: 桥梁工程。