

节段预制悬臂拼装连续梁线形控制技术与实施

邓海¹, 苑少帅², 李海云¹

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 浙江航冠工程设计有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对悬臂拼装短线法预制、施工、合龙段线形控制难度大、精度要求高的问题,结合郑州东四环快速化工程项目节段预制悬臂拼装连续梁桥施工实例,基于精细化有限元分析与短线法理论,提出了施工线形及多种纠偏措施的主梁线控技术。通过精细化分析与现场实测数据的对比,提出不同的线形纠偏方案,并选取合适方法对悬臂拼装连续梁的线形进行有效控制,最后经过线形控制及纠偏得到良好的合龙线形。研究表明,运用空间三维坐标转换原理,得到理论安装线形,通过有限元施工阶段模拟,可为悬臂拼装节段梁的受力及线形参数提供参考;结合不同方法的特点充分利用各方法的优点共同控制线形变化,有效提高线形控制的精度和灵活性。

关键词:节段预制;悬臂拼装连续梁;线形控制;短线法

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0007-07

0 引言

随着现代化施工技术的逐步提升,节段预制悬臂拼装技术得到广泛应用,悬臂拼装的线形精度控制引起广泛研究。时学军^[1]针对短线法节段预制桥梁建立7参数坐标转换模型,提出并推导了最小二乘法坐标变换方法的公式;罗锦等^[2]针对大曲率短线匹配法提出充分考虑多种因素情况下的几何线形控制方法,结果证明线形控制良好;王朝阳^[3]通过建立有限元模型,针对短线法箱梁内力及线形控制进行了研究,提出了相应的线形控制方法及调整措施;刘海东等^[4]以广东轨道交通14号线为例,针对短线法考虑梁长、转角等误差的几何线形控制定位方法展开研究,线形实践控制良好。既有基于多种因素考虑对计算线形进行修正,使施工线形变为可准确预测,但是对于施工线形的控制精确程度、线形纠偏方法的研究还存在不足,针对预制悬臂拼装线形控制方法单一、纠偏精确量化不足,提出纠偏量化计算预估,多种方法相结合的方式对线形纠偏进行实践。

1 工程概况

以郑州市东四环快速化工程项目主线预制胶拼桥梁第02联(45+66+45)m连续梁为工程案例,全梁划分为52个梁段,一般长度为2.4、2.9、4.25 m,桥跨布置如图1所示。主梁为外等高内箱变高、倾斜腹板的双箱单室箱梁截面。箱梁横断面宽10 m,底板宽度为2.3 m,翼缘板长度为2.5 m。

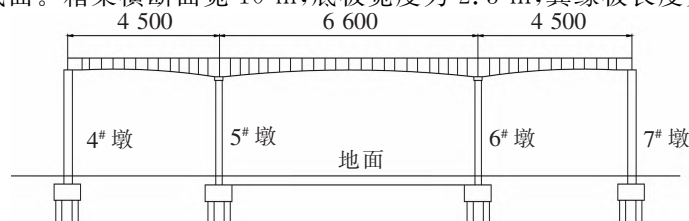


图1 连续梁桥跨布置图(单位:cm)

收稿日期:2022-10-09 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220302

作者简介:邓海(1975—),男,副教授,研究方向为桥梁和建筑结构力学性能分析和结构监控监测。E-mail:13933093219@126.com

邓海,苑少帅,李海云.节段预制悬臂拼装连续梁线形控制技术与实施[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):7-13.

连续梁各梁段安装采用“支架现浇 0[#] 节段, 支架拼装 1[#] 节段桥, 桥面吊机悬臂拼装后续节段”的工艺, 具体预制及施工阶段如图 2 所示。

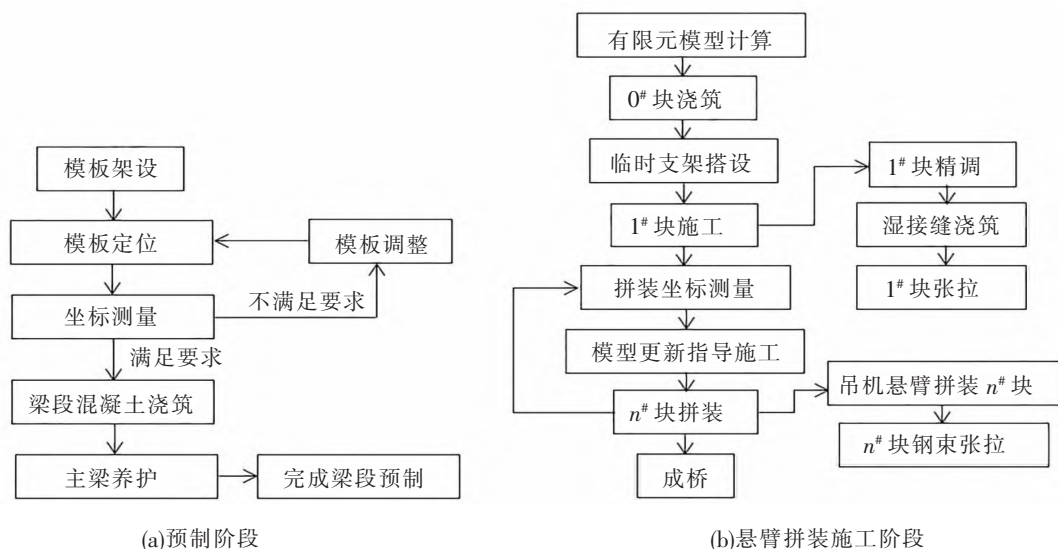


图 2 各阶段施工流程

2 理论线形计算及总体控制方案

主梁采用短线法预制, 短线法采用可调整模板的方式逐块浇筑节段主梁, 具有节省场地、预制高效的优点, 但需在施工过程中严格控制预制线形, 以保证主梁施工受力合理, 线形美观。

2.1 短线法理论线形计算

根据切线迭代法通过逐次迭代计算得到无限逼近的理想线形。假设原节点的位移为 (u_A, v_A, θ_A) , 通过式(1)不同节点间的几何关系, 计算得出新节点的位移

$$\begin{cases} u_B = u_A + L_0 [\cos(\alpha + \theta_A) - \cos \alpha] \\ v_B = v_A + L_0 [\sin(\alpha + \theta_A) - \sin \alpha] \\ \theta_B = \theta_A \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可推出式(2), 式(2)中采用夹角无限小时, 其值近似等于自身正弦值。

$$\begin{cases} u_B = u_A - L_0 \theta_A \sin(\alpha + \theta_A/2) \\ v_B = v_A + L_0 \theta_A \cos(\alpha + \theta_A/2) \\ \theta_B = \theta_A \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_A, v_A, θ_A 分别为后端原节点的累计位移; u_B, v_B, θ_B 分别为前端新节点的累计位移; α 为无应力状态下, 新增单元中心轴线与水平间的夹角; L_0 为新增单元在无应力状态下的长度。

2.2 空间坐标转换原理

节段梁在预制场内预制完成后需要运送至现场进行拼装, 此时需要将预制场内的线形控制坐标转换到当地的整体坐标系下。由于梁预制过程中无高程影响, 施工过程中已考虑预拱度影响, 故将其视为二维平面坐标转换^[5], 将梁段转换坐标作为施工线形使用。

二维坐标系下, 局部坐标与整体坐标的几何转换关系如图 3 所示, 图 3 中 xOy 为整体坐标系, XOY 为局部坐标系。

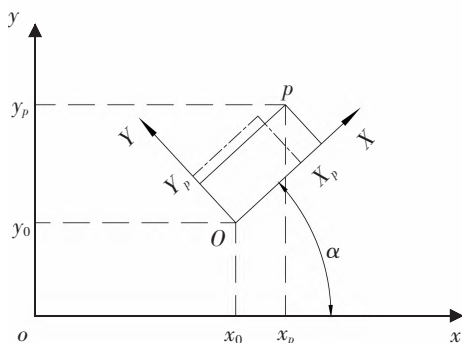


图 3 二维平面坐标转换示意图

局部坐标系是在预制阶段为控制预制线形在预制场内设置的坐标,为了配合施工线形控制,将局部坐标转换为施工控制坐标需要进行坐标转换。空间坐标转换中,整体与局部坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\epsilon_y \\ \epsilon_y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

将任意 2 个控制点的坐标值带入式(3),便可获取转换坐标中的其余参数。利用几何关系得到坐标转换计算公式为

$$\begin{cases} x_p = X_p \cos \alpha + Y_p \sin \alpha + x_0 \\ y_p = X_p \sin \alpha + Y_p \cos \alpha + y_0 \end{cases} \quad (4)$$

为了便于快速得到计算坐标,利用编程,将公式(4)改变为矩阵形式,经简化得到坐标转换计算公式

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(5),转换得到 1# 梁段的坐标数据,如表 1 所示,其他梁块坐标依次转换。

表 1 5# 墩 1# 块西侧坐标转换表

m

节段号	点名	X_p	Y_p	z	x	y
小里程	后中	41 764.012	5.251	99.544	43 831.859 4	82 168.254 0
	前中	41 766.091	5.252	99.617	43 829.780 9	82 168.284 5
	右后	41 763.993	8.047	99.483	43 831.835 0	82 165.457 9
	右前	41 766.087	8.048	99.564	43 829.741 9	82 165.488 9
	左后	41 764.044	2.453	99.600	43 831.869 9	82 171.051 6
	左前	41 766.106	2.434	99.668	43 829.809 3	82 171.102 3
大里程	后中	41 764.012	5.251	99.540	43 831.859 4	82 168.254 0
	前中	41 766.091	5.252	99.620	43 829.780 9	82 168.284 5
	右后	41 763.993	8.047	99.480	43 831.835 0	82 165.457 9
	右前	41 766.087	8.048	99.560	43 829.741 9	82 165.488 9
	左后	41 764.044	2.453	99.600	43 831.869 9	82 171.051 6
	左前	41 766.106	2.434	99.670	43 829.809 3	82 171.102 3

2.3 悬臂拼装线形控制总体方案

线形控制总体方案分为逐步修正和直接修正 2 种。大偏差应通过后续多阶段逐渐纠偏,以减小线形折角,当偏差小时可直接纠正。同时节段预制拼装连续梁桥在预制、施工过程中,需要严格控制以下要点^[6]:

- (1) 预制时立模标高控制精度满足要求;
- (2) 梁段线形拼装定位精确控制;
- (3) 施工过程中误差纠偏及时有效。

3 节段箱梁有限元模拟

为了配合施工及线形控制,采用有限元软件 Midas Civil 对连续梁施工阶段及成桥状态进行精细化建模分析。

3.1 有限元模型

建立左右双幅整体跨度为(45+66+45)m 的连续梁模型,主梁截面、预应力筋均采用 CAD 导入建立,模型将连续梁离散为 166 个单元、168 个节点。有限元整体模型如图 4 所示。

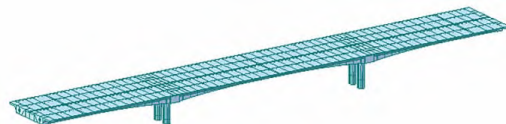


图 4 有限元模型图(单位:mm)

3.2 连续梁计算结果

连续梁最大悬臂施工阶段下的变形量如图 5 所示。最大悬臂下,最大位移为 3.08 mm,整体趋于向上微拱状态。

通过对连续梁进行有限元分析,提取各施工阶段的变形曲线可知,拼装施工时整体呈上拱状态,随着悬臂拼装的节段增加,各节段最大上拱位移逐渐增加,直到 8[#]

主梁张拉完成,上拱位移最大 8.166 mm,随后上拱位移逐渐减小,直至 11[#]块拼装完成,见图 6(a)。成桥后,在二期恒载及 10 a 收缩徐变工况下,桥梁线形变化曲线如图 6(b)所示。

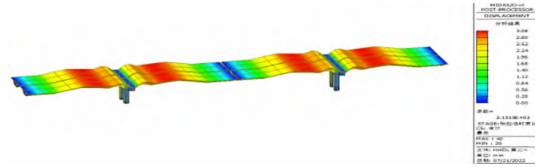


图 5 最大悬臂状态线形计算结果

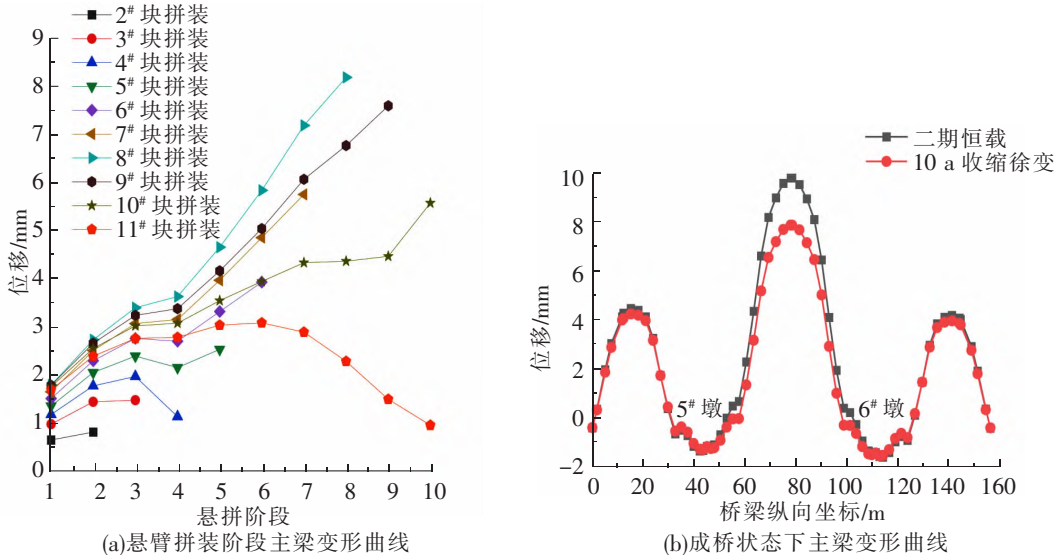


图 6 各阶段线形计算结果

提取各阶段线形与设计线形结合,可以得到制造线形,指导预制工作,同时根据施工阶段悬臂拼装线形为施工线形控制提供保障。

4 施工线形控制及纠偏实施

在桥址处进行节段梁的拼装工作时,悬拼主梁的线形控制内容如下,控制标准如表 2 所示。

- (1) 根据转换坐标及施工模拟参数指导施工拼装阶段线形的控制。
- (2) 在节段箱梁拼装过程中,应及时、多次测量。若偏差超过容许极限值,则需要后一节段拼装时进行相应的调整以纠正或减小偏差。
- (3) 及时分析造成偏差的因素,并选用合适的方法进行纠偏。

表 2 线形控制误差标准

节段拼装验收标准		合龙段两侧允许误差	
项目	标准值/mm	项目	允许值/mm
立面偏差	± 10	立面高程	± 20
轴线偏差	± 10	中心线偏位	± 10

4.1 线形纠偏措施

节段梁拼装纠偏方法可分为以下 4 种^[6-12]。

4.1.1 施加环氧树脂垫片

环氧树脂垫片纠偏的原则是哪偏垫哪。垫片厚度由线形偏差量决定,与纠偏量间的几何关系如图 7(a)所示。所需垫片厚度计算公式如式(6)所示,同时需注意应考虑垫片自身变形等因素带来的纠偏损

失量。

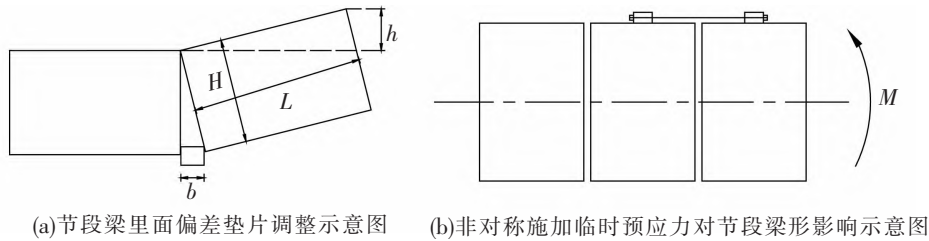


图 7 节段梁线形控制示意图

由于调整线形需要的垫片厚度与预制梁段的梁高相比很小,近似可忽略(平面偏差的纠正与高程偏差纠正原理相似),则有

$$h = bL/H \quad (6)$$

式中, b 为环氧树脂垫片厚度; H 为预制节段梁高度; L 为预制节段梁长度; h 为预制梁段需要纠正的高度。

4.1.2 调整临时预应力

临时预应力采用对称张拉,纠偏通过控制预应力筋的张拉力及张拉顺序完成,临时预应力由螺母、千斤顶控制,可使线形控制精度大大提高。若发现拼装节段有垂头现象,可张拉临时钢束,先进行顶板上临时钢束张拉,也可在张拉过程中将顶板预应力适当加大,此时在节段梁中产生弯矩 M ,节段梁开始有向上抬头的趋势。若节段梁拼装中有抬头现象,可张拉节段梁间的临时钢束,先进行箱梁底板临时钢束张拉,也可在张拉过程中将底板预应力适当加大,此时节段梁开始有向下垂头趋势。

4.1.3 增设湿接缝

当实测线形与理论线形偏差过大,可增设湿接缝调整线形误差,但会增加施工成本。

4.1.4 胶缝纠偏

当出现微小线形误差时,可用增加或减小胶缝厚度的方式对线形纠偏,但由于胶厚应保证在 $2 \sim 3$ mm 内^[13],故此法纠偏范围很小。

4.2 线形控制及纠偏实践

由于临时预应力纠偏法可以提高线形控制精度且临时预应力张拉为必须的施工过程,故在设计允许范围内将临时预应力张拉灵活化、精度化,并优先使用于施工中,如图 8 所示。



图 8 临时预应力张拉纠偏

以 5# 墩大里程侧的 10# 块为例,经测量 5# 墩大里程侧 10# 块高程偏差 -11.7 mm,规范要求偏差量应小于 ± 1 cm,需对节段进行纠偏,由于超出偏差较小,故可进行一次纠正。优先采用临时预应力张拉纠偏,将顶板中心 2 根临时预应力同时张拉,且边测量边控制线形变化。

由于偏差量较大,本次在箱梁底部加入 3 mm 厚度的环氧树脂垫片,环氧垫片理论纠偏量为 3.95 mm,此时应注意理论纠偏量应大于实际偏差量,这是因为实际纠偏过程中应考虑环氧树脂垫片、梁体自身变形等因素,纠偏后偏差量为 -8.2 mm,实际纠偏量为 3.5 mm,故实际纠偏量需根据实测确定。

4.3 线形偏差分析及纠偏结果

5[#]墩左右双幅 T 构高程、轴线偏差曲线如图 9 所示。

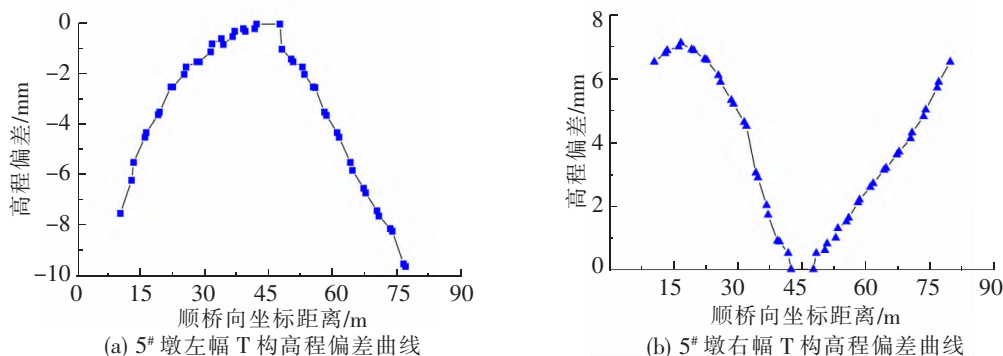


图 9 5[#]墩 T 构高程偏差图

由图 9 可知,5[#]墩左幅最大高程偏差量为-9.6 mm,位于大里程侧 11[#]节段主梁架设后,即跨中合龙口处;5[#]墩右幅小里程侧最大高程偏差量为 7.1 mm,位于 45 m 跨 10[#]节段主梁处,此时会在本阶段内对 10[#]块进行一次纠偏,在 11[#]节段处高程误差有所减小,为达到理想线形在 11[#]块继续纠偏。

5[#]墩左右双幅主梁 T 构架设施工轴线偏差曲线如图 10 所示。

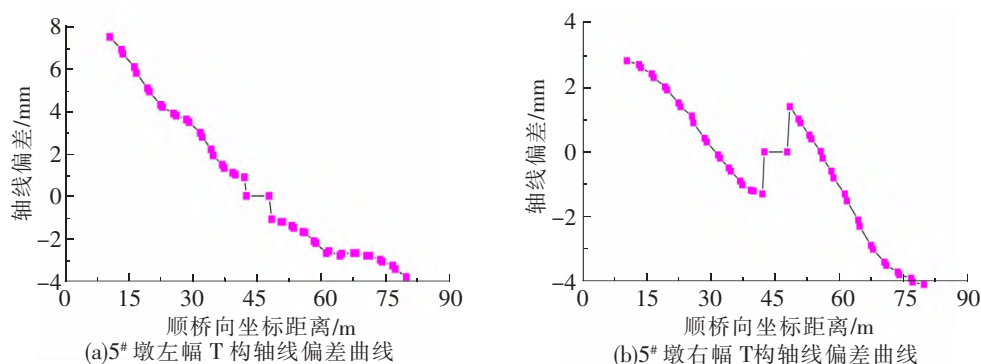


图 10 5[#]墩 T 构轴线偏差图

由图 10 可知,5[#]墩左幅最大轴线偏差 7.5 mm,位于边跨 11[#]块主梁,即小里程侧边跨合龙口,此时偏差已经较大,需在本阶段对轴线偏差进行纠偏;右幅轴线最大偏差 4.0 mm,位于大里程侧 11[#]块主梁。主梁高程与轴线在 5[#]墩附近偏差量均出现不同程度的突变,最大突变量为 1.39 mm,这是由于 1[#]块与 0[#]块间存在 15 cm 的湿接缝,可一次性纠正线形误差。综上所述,经线形控制与纠偏,合龙口高程最大偏差量为 2.3 mm,最大中心偏差量为 2.5 mm,远小于规范限值,线形控制精度得到有效提高。

5 结论

以郑州市某预制胶拼连续梁桥为研究对象,通过精细化有限元分析及纠偏技术对连续梁施工线形进行控制,进而得到良好的成桥线形。主梁拼装线形通过多次测量和量化纠偏,已大大提高线形控制精度,但测量纠偏过程需要人工配合,综合可得出以下结论,可为节段拼装线形控制提供一定借鉴:

(1)建立有限元模型为线形控制提供保证。根据模型得到各施工阶段的受力、变形参数,拼装过程中最大变形为 8.166 mm,实测过程中线形受温度场、混凝土弹性模量等因素影响,应及时将实测数据回归计算模型,以便更加准确地为悬臂拼装安全施工、线形控制提供指导。

(2)以临时预应力控制线形为主,环氧树脂垫片为辅,逐步与直接纠偏为原则,及时监控并纠正偏差。经线形控制及纠偏,合龙口最大高程最大偏差量为 2.3 mm,远小于高程验收标准 20 mm 的限值,中心偏位为 2.5 mm,远小于中心偏位 10 mm 的规范限值,证明纠偏方案可靠合理,拼装桥梁线形控制精度得到

有效提高。

(3)监控信息收集、纠偏自动化需要进一步提升。主梁拼装施工过程中,主要通过临时预应力张拉、施加环氧树脂垫片的方式,将偏差量化、精度化调整的方式用于线形纠偏,虽有效减小线形偏差但是由于多次测量调整让施工控制还存在局限性,因此可设置自动采集测量设备、纠偏设备,将线形精度化控制过程转变为自动化、智能化。

参 考 文 献

- [1]时学军. 短线法节段预制桥梁几何线形控制的坐标变换方法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 103-107.
- [2]罗锦, 侯文崎, 崔大鹏. 大曲率短线匹配连续刚构桥空间几何线形控制[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(7): 1738-1746.
- [3]王朝阳. 节段悬臂箱形梁桥拼装施工力学特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(8): 106-110.
- [4]刘海东, 侯文崎, 罗锦. 短线节段预制拼装桥梁几何线形三维控制方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 769-778.
- [5]曾雷. 短线匹配预制梁悬臂拼装线形控制研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(8): 10-13.
- [6]杜振华, 张政. 铁路节段预制胶拼连续梁桥设计总结与思考[J]. 铁道建筑技术, 2020(5): 66-69.
- [7]杨胜, 杨伟. 城市桥梁短线法节段预制拼装关键技术控制研究[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 89-96.
- [8]董传新, 燕春阳, 韩宗芳. 连徐高速铁路连续梁节段预制装配式施工技术[J]. 工程技术研究, 2020, 5(11): 78-79.
- [9]解兵林, 余晓琳, 胡雨, 等. 短线法节段梁预制拼装过程控制技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1453-1461.
- [10]朱佳友. 短线法节段梁预制拼装线形控制[J]. 中国高新科技, 2021(7): 124-125.
- [11]戴东利. 短线法预制节段梁线形综合控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(3): 79-82.
- [12]王朝阳. 节段悬臂箱形梁桥拼装施工力学特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(8): 106-110.
- [13]张立青. 节段预制拼装法建造桥梁技术综述[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12): 63-66.

Linear Control Technology and Implementation of Segmental Precast Cantilever Assembly Continuous Beam

Deng Hai¹, Yuan Shaoshuai², Li Haiyun¹

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Zhejiang Hangguan Engineering Design Co. Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the requirements of difficult linear control and high precision in the precast, construction and closure segments of cantilever assembly short-line method, combined with the case of constructing the segmental precast cantilever assembly continuous beam bridge of East Fourth Ring Expressway in Zhengzhou city, and based on refined finite element analysis and short-line method theory, the main beam linear control technology of construction alignment and various corrective measures was proposed in the research. Through the comparison of refined analysis and field measured data, different alignment rectification schemes were proposed, and the appropriate method was selected to effectively control the alignment of cantilever assembled continuous beams. Finally, better closure alignment was obtained through alignment control and rectification. The research shows that the theoretical installation alignment can be obtained by using the space three-dimensional coordinate transformation principle, and the finite element construction stage simulation can provide reference for the stress and alignment parameters of cantilever segmental beam. Combined with the characteristics of different methods to make full use of advantages of each method to control line shape change, it can effectively improve the accuracy and flexibility of linear control.

Key words: segmental precast; continuous cantilever beam; linear control; short-line match method