

基于传递矩阵法和拼装角偏差的顶推梁体 无应力线形的实现

崔立恒¹, 宋涛², 连光炜¹, 郭志豪¹, 陈平达¹

1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250021; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要: 为确定待拼梁体的拼装高程, 保证成桥后梁体的拼装线形与理论制造线形一致, 针对传统的顶推桥梁施工控制特点, 以已拼装梁体与待拼梁体间的拼装角及其偏差为控制参数, 采用传递矩阵法计算待拼梁体的拼装高程。结果表明: 梁体的实测无应力线形与理论无应力线形高度吻合, 绝大多数测点的偏差均小于 10 mm, 表明此待拼梁体高程的计算方法简单、实用。在实际工程中的应用表明, 梁体顶推作业进展顺利, 梁体线形控制效果较好。

关键词: 桥梁工程; 顶推法; 无应力制造线形; 传递矩阵法; 拼装角偏差

中图分类号: U445.462

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2023)03-0109-06

引用格式: 崔立恒, 宋涛, 连光炜, 等. 基于传递矩阵法和拼装角偏差的顶推梁体无应力线形的实现[J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(3): 109-114.

CUI Liheng, SONG Tao, LIAN Guangwei, et al. Realization of unstressed alignment of incremental launching beam based on transfer matrix method and assembly angle deviation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(3): 109-114.

0 引言

桥梁工程中顶推施工速度较快, 设备简单, 噪声低, 在预应力钢筋混凝土等截面连续梁桥和斜拉桥梁的施工中应用广泛^[1-4]。顶推施工的关键步骤是确定梁体的拼装线形, 直接决定顶推结束后的梁体成桥质量^[5-8]。梁鹏等^[9]以苏通长江大桥为例, 讨论设计线形、成桥线形、无应力制造线形及安装线形间的关系, 采用大循环迭代法和旋转坐标法求解安装线形。Sasmal 等^[10]采用基于传递矩阵法的顶推施工确定梁体线形。秦顺全^[11]提出无应力状态法顶推施工, 以无应力曲率和无应力索长作为桥梁施工的基本控制参数。李乔等^[12]基于几何控制方法提出了桥梁全过程自适应施工控制系统。颜东煌等^[13]基于桥梁全过程自适应无应力构形控制思想, 推导考虑影响安装线形的主梁设计参数偏差、焊缝收缩差及温度影响等调整公式, 及节段主梁实时放样精确定位公式。董创文等^[14]提出考虑相位变化和组拼高程偏差的顶推梁体无应力线形的计算方法。李传习等^[15]提出基于相位变化的顶推曲梁桥自适应无应力构形的计算方法。林建平等^[16]以槽型组合梁为研究对象, 提出基于传递矩阵确定梁体安装线形的方法。Sampaio 等^[17]将三维虚拟技术应用于桥梁顶推线形观测中。顶推梁体拼装线形以相位变化和传递矩阵等方式控制梁体拼装线形, 但其存在应用不便或未能修正梁体拼装线形偏差等诸多不足。

本文提出基于传递矩阵和拼装角偏差推导顶推梁体安装高程的计算方法, 以两梁体间的拼装角为控制参数, 明确传递关系, 即时修正梁体线形偏差, 以期实现拼装线形和理论制造线形的统一。

收稿日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908017); 山东省交通运输厅科技计划项目(2018B61, 2021B119)

第一作者简介: 崔立恒(1988—), 男, 济南人, 高级工程师, 主要研究方向为大跨度桥梁结构分析, E-mail: 393542481@qq.com。

1 基于传递矩阵法和拼装角偏差的梁体顶推线形控制

顶推施工是指在拼装平台上完成梁体拼装,再采用顶推设备将拼装梁体向前顶推一段距离,在拼装平台上完成下节段的梁段拼装。重复以上步骤,完成整个梁体的顶推。为描述方便,将未完成拼装的梁体定义为待拼梁段,已拼装完成的梁体定义为已拼梁段。

根据无应力状态理论,将待拼梁段和已拼梁段视为无应力状态^[11]。为保障顶推施工质量,需保证顶推施工结束时梁体的无应力线形与理论制造无应力线形一致。在顶推过程中,已拼梁段的无应力线形不变,即在梁体拼装平台上保证梁体间的拼装角满足制造线形曲率。基于顶推施工,提出确定待拼梁段拼装高程的方法。钢梁拼装多为夜间作业,设温度场恒定,或温度场对梁体拼装的影响可忽略不计。

1.1 两相邻梁体间的传递矩阵

设有 n 段顶推梁,各梁段长 $l_i (i=1,2,\dots,n)$,待拼梁段高程为 H_i ,待拼梁段前、后高程差为 ΔH_i ,水平倾角为 θ_i ,则两相邻梁体的夹角 $\Delta\theta_i = \theta_{i-1} - \theta_i$,在各施工阶段 S ,两相邻梁段的拼装示意图如图 1 所示。

顶推钢梁的施工状态主要有理论无应力制造线形 N 、预拼装线形(用于确定钢梁理论拼装位置) C 和实际拼装线形 A 等线形状态,可用 $\Delta\theta_i$ 、 ΔH_i 和 l_i 描述梁体的线形状态,分别采用 $\Phi_{i-1} = [H_{i-1} \quad l_{i-1}]^T$ 、 $\Phi_i = [H_i \quad l_i]^T$ 描述已拼梁段 $i-1$ 和待拼梁段 i 的线形状态。

根据传递矩阵的概念^[10],梁段 i 的拼装传递方程为:

$$\Phi_i = T_i \Phi_{i-1},$$

式中: T_i 为传递矩阵, $T_i = \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} 1 & \sin \Delta\theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

理论无应力状态下梁段 i 的拼装传递方程为 $\Phi_i^N = T_i^N \Phi_{i-1}^N$,拼装传递矩阵

$$T_i^N = \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} 1 & \sin \Delta\theta_i^N \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中 $\Delta\theta_i^N$ 为梁段 i 理论无应力拼装角。

待拼梁段预拼装高程差为 ΔH_i^C ,根据实际测量得到已拼梁段 $i-1$ 的两端高程差 ΔH_{i-1}^C ,同时考虑修正梁体线形偏差,则预拼装状态下梁段 i 的拼装传递矩阵

$$T_i^C = \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} 1 & \sin \Delta\theta_i^C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Delta\theta_i^N - \Delta\beta_i^C) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\theta_i^C$ 为梁体线形偏差修正前的拼装角, $\Delta\beta_i^C$ 为梁体线形偏差修正后的拼装角。

考虑梁体线形修正后梁段 i 的预拼装传递方程为:

$$\Phi_i^C = T_i^C \Phi_{i-1}^C. \quad (2)$$

1.2 1#钢梁拼装高程及拼装角偏差计算

采用理论拼装高程 H_1^C 计算 1#钢梁理论无应力状态下的拼装高程 H_1^N ,即 $H_1^C = H_1^N$ 。

因拼装偏差、温度变化及焊接残余变形等因素干扰,1#钢梁与导梁拼装后的线形与理论无应力线形存在一定偏差,如图 2 所示。此偏差可描述为 1#钢梁 CB 绕接点 B 在竖平面 SOH 内转动 $\Delta\gamma_1^A$,即 1#钢梁的理论拼装位置与实际拼装位置的夹角。

根据几何关系,可得

$$\Delta\gamma_1^A = \arcsin \Delta H_1^A / l_1 - \arcsin \Delta H_1^C / l_1,$$

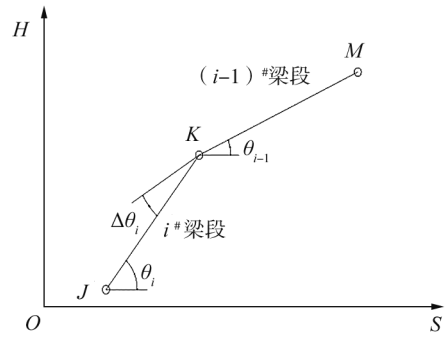


图 1 两相邻梁段的拼装示意图

式中: l_1 为1[#]钢梁长, ΔH_1^A 为1[#]钢梁实际拼装前、后高程差, ΔH_1^C 为1[#]钢梁理论拼装前、后高程差。

1[#]钢梁的待拼装位置与无应力理论拼装位置相同,二者间夹角为0,即 $\Delta\varphi_1^C = 0$ 。1[#]钢梁待拼装位置与理论拼装位置的夹角为 $\Delta\varphi_1^A = \Delta\gamma_1^A + \Delta\varphi_1^C$ 。1[#]钢梁的实际拼装位置与理论拼装位置的高程差,即1[#]钢梁拼装线形偏差为 $h_1^A = \Delta H_1^A - \Delta H_1^C$ 。

1.3 梁段*i*的拼装高程及梁体线形偏差

顶推($i-1$)[#]段梁体前移一段距离后,梁体由待拼梁段变为已拼梁段。此时,梁体的无应力线形保持不变,可视为梁体随1[#]梁段做刚体运动。

待拼梁段与已拼梁段的拼装偏差如图3所示。其中 $K^N J^N$ 为由已拼梁段($i-1$)[#]的理论拼装位置按理论拼装角 θ_i^N 计算得到的待拼梁段*i*[#]的理论拼装位置, $K^A J^0$ 为由已拼梁段($i-1$)[#]的实际拼装位置按 θ_i^N 计算得到的待拼梁段*i*[#]理论拼装位置, $J^N J^0$ 为待拼梁段理论拼装高程与实际拼装高程间的偏差 Δh_i^C 。计算待拼梁段*i*[#]的拼装位置需先修正 θ_i^N ,使待拼梁段*i*[#]的末端与理论拼装位置重合,实现待拼梁段的梁体线形偏差的修正。根据图3所示几何关系, θ_i^N 的修正角 $\Delta\beta_i^C = \Delta h_i^C / l_i$,其中 $\Delta h_i^C = \Delta h_{i-1}^A + l_i \sin \Delta\varphi_{i-1}^A$, φ_{i-1}^A 为已拼梁段($i-1$)[#]的实际拼装位置与理论拼装位置的夹角。

待拼梁段的拼装角 $\Delta\theta_i^C = \Delta\theta_i^N - \Delta\beta_i^C$ 。

根据已拼梁段*i*[#]的梁体前、后梁段高程及式(1)(2)计算可得待拼梁段*i*[#]的传递方程为:

$$\Phi_i^C = [\Delta H_i^C \quad l_i]^T = \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Delta\theta_i^N - \Delta\beta_i^C) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H_{i-1}^C \\ l_{i-1} \end{bmatrix},$$

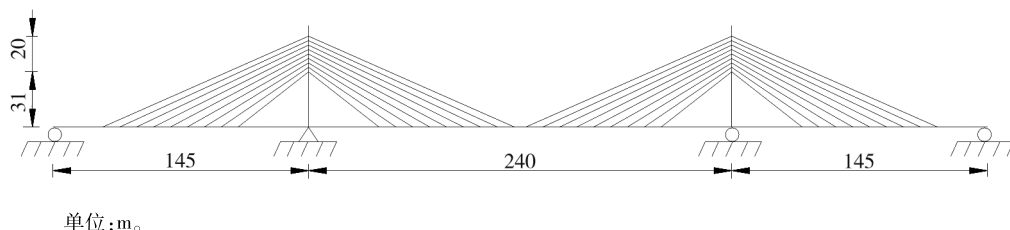
式中: ΔH_i^C 为待拼梁段*i*[#]理论拼装前后的高程差, ΔH_{i-1}^C 为待拼梁段($i-1$)[#]理论拼装前后的高程差。

待拼梁段*i*[#]的实测高程 H_i^A 与理论安装高程 H_i^C 的偏差为 $\Delta h_i^A = H_i^A - H_i^C$ 。

2 工程应用

2.1 工程概况

某双塔三跨矮塔斜拉桥结构为145 m+240 m+145 m,如图4所示。主梁为单箱三室钢箱梁,钢箱梁高4.80 m,宽28.50 m,桥面设有坡度为2%的横坡,底板水平,箱梁横断面如图5所示。钢箱梁全长530.00 m,有56个节段,标准节段长9.60 m,最长节段长13.00 m。采用顶推法拼装主梁,经19轮次顶推作业完成梁体拼装,顶推长462.80 m,钢导梁长45.10 m,布设5个临时墩,根据成桥标高设置墩顶标高。



单位:m。

图4 桥梁结构立面图

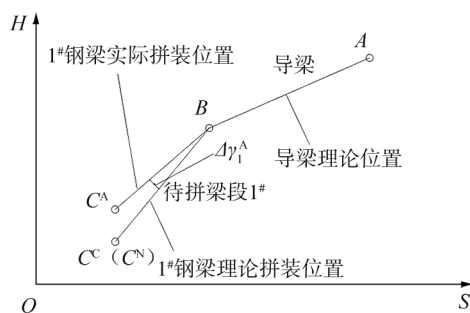


图2 1[#]钢梁拼装及拼装角偏差示意图

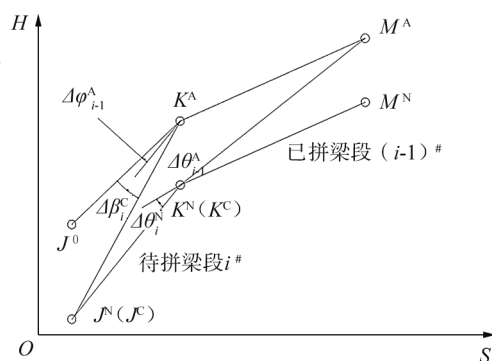


图3 待拼梁段*i*[#]拼装及拼装角偏差示意图

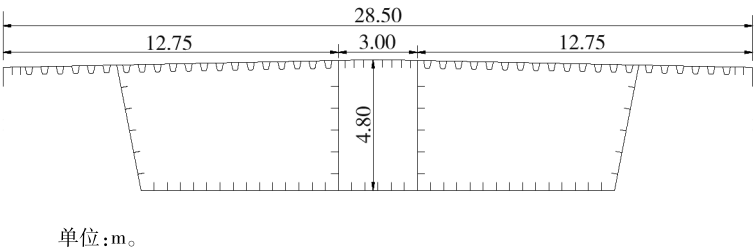


图 5 箱梁横断面图

2.2 梁体理论无应力制造线形

此桥钢箱梁的无应力制造线形为变曲率竖曲线,采用矩形法确定梁体制造线形,梁体上、下焊缝宽度差如表 1 所示。

表 1 典型梁段上、下焊缝宽度差

编号	l_i/m	$\Delta\theta_i^N/(\text{^\circ})$	焊缝宽度差/mm	编号	l_i/m	$\Delta\theta_i^N/(\text{^\circ})$	焊缝宽度差/mm
SB15	2.619	0	0	SB1	8.700	0.040 3	3.38
SB14	11.442	0.005 6	0.47	SBC	13.000	0.025 9	2.17
SB13	9.600	0.025 9	2.17	SC1	8.700	0.023 5	1.97
SB12	9.600	0.035 8	3.00	SC2	9.600	0.029 8	2.50
SB11	9.600	0.023 9	2.00	SC3	9.600	0.035 8	3.00
SB10	9.600	0.017 9	1.50	SC4	9.600	0.029 8	2.50
SB9	9.600	0.017 9	1.50	SC5	9.600	0.035 8	3.00
SB8	9.600	0.035 8	3.00	SC6	9.600	0.029 8	2.50
SB7	9.600	0.047 7	4.00	SC7	9.600	0.029 8	2.50
SB6	9.600	0.047 7	4.00	SC8	9.600	0.035 8	3.00
SB5	9.600	0.029 8	2.50	SC9	9.600	0.029 8	2.50
SB4	9.600	0.041 8	3.50	SC10	9.600	0.035 8	3.00
SB3	9.600	0.029 8	2.50	SC11	9.600	0.033 3	2.79
SB2	9.600	0.035 8	3.00	SC12	11.200	0.029 4	2.46

注:SB*i* 为边跨梁体编号, $i=1,2,\cdots,12$;SC*i* 为中跨梁体编号, $i=1,2,\cdots,12$ 。

由表 1 可知:梁体无应力制造线形的平均焊缝宽度差约为 3.00 mm,受梁体高度及现场实际条件制约,采用矩形法现场拼装梁体。

2.3 待拼梁段高程确定

以满堂支架形式拼装梁体 SB12~SB15,自 SB11 开始进行顶推作业。梁体 SB11 长 9.600 m,待拼梁段 SB11 的拼装位置与理论拼装位置的夹角为 0,顶推平台的纵向坡度为 1.137%,导梁末端长 49.827 m,梁体 SB11 末端的高程为 49.718 m;待拼梁段 SB10 梁体长 9.600 m,理论拼装角 $\theta_2^N=0.017\ 9^\circ$,可得 $\Phi_1^C=[H_1^C\ l_1]^T=[49.718\ 9.600]^T$,传递矩阵 $T_2^C=\frac{9.600}{9.600}\begin{bmatrix} 1 & \sin 0.017\ 9^\circ \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\Phi_2^C=[H_2^C\ l_2]^T=T_2\Phi_1^C=[49.730\ 9.600]^T$ 。

可编程计算后续梁段的拼装参数,以 SC8~SC11 节段为例,结果如表 2 所示,其余梁段做类似处理。

表 2 SC8~SC11 梁段的拼装参数

已拼梁段 编号	待拼梁段 编号	l_i/m	$\Delta\theta_i^N/(\text{^\circ})$	$\Delta\beta_i^C/(\text{^\circ})$	$\Delta\theta_i^C/(\text{^\circ})$	H_i^C/m		H_i^A/m		$\Delta h_i^A/\text{mm}$
						已拼梁段	待拼梁段	已拼梁段	待拼梁段	
SC7	SC8	9.600	0.029 8	0.020 1	0.009 7	49.491	49.493	49.491	49.498	5
SC8	SC9	9.600	0.035 8	0.013 7	0.022 1	49.689	49.693	49.689	49.699	6
SC9	SC10	9.600	0.029 8	0.030 5	-0.007 0	49.575	49.574	49.575	49.573	-1
SC10	SC11	9.600	0.035 8	-0.012 3	0.048 1	49.456	49.457	49.456	49.460	3

2.4 后续梁体线形控制结果

已拼梁体顶推到某一工况下,根据梁体实测线形扣除自重作用下的挠度曲线,得到梁体的无应力线形,与理论无应力线形的偏差如图 6 所示。由图 6 可知:梁体的实测无应力线形与理论无应力线形高度吻合,绝大多数测点的偏差小于 10 mm,可实现梁体的高精度拼装。

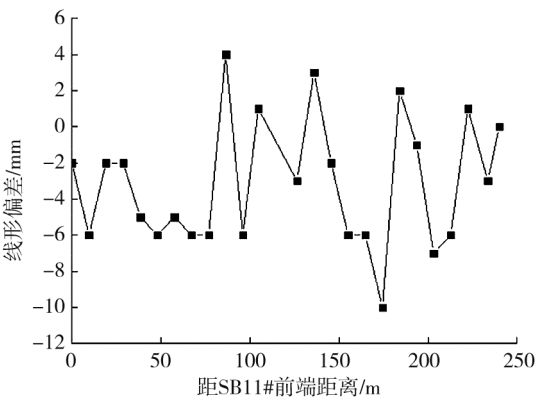


图 6 某工况下梁体无应力线形与理论线形偏差

3 结束语

1) 基于传递矩阵法和拼装角偏差,提出梁体拼装高程的计算方法,以拼装角及其偏差为控制量,采用传递矩阵计算梁体待拼高程,实时修正因拼装偏差、大气温度变化及焊接残余变形等引起的拼装角偏差,使梁体拼装线形与理论制造线形基本一致,采用自编程序即可计算拼装参数,简单直观。

2) 顶推梁体拼装高程的计算方法可保证已拼梁体和待拼梁体间的无应力线形与梁体理论制造线形统一,保证梁体顶推结束成桥后的梁体无应力线形与理论线形统一。此方法还可用于确定大节段拼装和悬臂拼装等施工梁体线形。

上述研究基于温度恒定状态,在实际梁体拼装工作中,一般需考虑温度场的影响,下一步研究将考虑沿腹板高度方向上的温度梯度变化。

参考文献:

[1] 吴皋,颜东煌,许红胜,等.大跨度桥梁钢箱梁拼接顶推施工过程线形控制的若干问题[J].北京交通大学学报,2006,30(增刊):150-152.
WU Gao, YAN Donghuang, XU Hongsheng, et al. Several linear-control questions of long span steel box girder in spelling and thrusting case[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006,30(Suppl.):150-152.

[2] 张玉平,董创文.江东大桥双塔单跨空间主缆自锚式悬索桥的施工控制[J].公路交通科技,2010,27(7):76-82.
ZHANG Yuping, DONG Chuangwen. Construction control of self-anchored suspension bridge with two pylons and single span spatial cables in Jiangdong Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research, 2010,27(7):76-82.

[3] 王俊,李传习.变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工临时墩标高调整方案确定[J].中外公路,2011,31(3):177-182.

[4] 张晔芝,谢晓慧.铁路特大桥钢箱梁顶推过程受力分析及改善方法[J].中国铁道科学,2009,30(3):21-26.
ZHANG Yezhi, XIE Xiaohui. The mechanical behaviors and improvement measures of railway grand bridge during incremental launching of the steel box girder[J]. China Railway Science, 2009,30(3):21-26.

[5] 周绪红,吕忠达,狄瑾,等.大跨径简支转连续箱梁桥的线形观测与控制[J].中国公路学报,2007,20(3):54-59.
ZHOU Xuhong, LÜ Zhongda, DI Jin, et al. Line shape observation and control of simple-supported-to-continuous long-span box girder bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(3):54-59.

[6] 董创文,李传习,张玉平,等.变曲率竖曲线梁顶推过程支点标高调整方案确定的单步模数搜索合成法[J].土木工程

- 学报,2015,48(1):101-111.
- DONG Chuangwen, LI Chuanxi, ZHANG Yuping, et al. Single-step modulus search and composition method for determining the scheme of support elevation adjustment during girder launching with vertically varied curvatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(1):101-111.
- [7] 熊正强. 变曲率竖曲线连续钢梁桥顶推施工线形控制研究[J]. 中外公路,2015,35(4):187-191.
- [8] JUNG K H, KIM K S, SIM C W, et al. Verification of incremental launching construction safety for the ilsun bridge the world's longest and widest prestressed concrete box girder with corrugated steel web section[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011,16(3):453-460.
- [9] 梁鹏,肖汝诚,徐岳. 超大跨度斜拉桥的安装构形与无应力构形[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006,26(4):49-53.
- LIANG Peng, XIAO Rucheng, XU Yue. Assembled geometry and unstrained geometry of super long span cable-stayed bridges[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2006,26(4):49-53.
- [10] SASMAL S, RAMANJANEYULU K. Transfer matrix method for construction phase analysis of incrementally launched prestressed concrete bridges[J]. Engineering Structures, 2006,28(13):1897-1910.
- [11] 秦顺全. 桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [12] 李乔,卜一之,张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J]. 土木工程学报,2009,42(7):69-77.
- LI Qiao, BU Yizhi, ZHANG Qinghua. Whole-procedure adaptive construction control system based on geometry control method[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(7):69-77.
- [13] 颜东煌,陈常松,董道福,等. 大跨度钢主梁斜拉桥的自适应无应力构形控制[J]. 中国公路学报,2012,25(1):55-58.
- YAN Donghuang, CHEN Changsong, DONG Daofu, et al. Control of self-adaptive zero-stress configuration for long-span cable-stayed bridge with steel main girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25(1):55-58.
- [14] 董创文,李传习,王琛. 考虑相位变化及组拼高程误差的顶推梁体无应力线形的实现[J]. 土木工程学报,2013,46(8):74-82.
- DONG Chuangwen, LI Chuanxi, WANG Chen. Achieving unstressed geometry of incrementally launched girders considering phase shift and elevation deviation during assembly stage[J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(8):74-82.
- [15] 李传习,周群,董创文. 顶推钢箱梁的梁段制造构形与无应力线形实现[J]. 公路交通科技,2018,35(5):40-48.
- LI Chuanxi, ZHOU Qun, DONG Chuanwen. Fabrication configuration and unstressed geometry achievement of beam segment of incrementally launched steel box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research, 2018,35(5):40-48.
- [16] 林建平,汪劲丰,陈春雷,等. 槽形组合钢梁桥顶推施工线形控制[J]. 桥梁建设,2014,44(4):102-106.
- LIN Jianping, WANG Jinfeng, CHEN Chunlei, et al. Geometric shape control of trough steel girder composite bridge constructed by incremental launching method[J]. Bridge Construction, 2014,44(4):102-106.
- [17] SAMPAIO A Z, MARTINS O P. The application of virtual reality technology in the construction of bridge:the cantilever and incremental launching methods[J]. Automation in Construction,2014,37:58-67.

Realization of unstressed alignment of incremental launching beam based on transfer matrix method and assembly angle deviation

CUI Liheng¹, SONG Tao², LIAN Guangwei¹, GUO Zhihao¹, CHEN Pingda¹

1. Shandong Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250021, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract : To determine the assembly elevation of the beam to be assembled and ensure that the assembly
(下转第128页)