

节段预制拼装城市高架桥工程实践与思考

张军锋¹, 裴昊¹, 李杰¹, 侯正宝², 吴彦革², 王斌²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中交一公局第七工程有限公司, 河南 郑州 451450)

摘要:以短线法箱梁节段预制拼装的某城市高架桥工程的一联桥梁为例,结合施工方案、数值仿真计算、理论安装坐标分析以及实际安装坐标测量统计,对城市高架桥梁节段拼装的施工方法、关键环节尤其是线形控制方法给出了思考和建议。

关键词:城市高架桥;节段预制拼装;施工仿真;线形控制

1 引言

PC 预制节段拼装施工是将桥梁的梁体划分为节段,在工厂或工场预制后在现场进行组拼,并施加预应力使之成为整体结构物的一种方法^[1-8]。该方法源于20世纪60年代的法国^[2-3],其所采用平衡悬臂拼装方法,也是现阶段的主要方法之一。在长期工程实践和技术探索中,平衡悬臂拼装亦发展有汽车吊和桥面吊两种模式,同时还出现了架桥机和龙门吊施工方法。由于这种施工方法存在诸多优点,如工厂生产质量容易控制,节段品质较高;预制节块有较长的存梁期,成桥后的混凝土收缩徐变更小;能减少现场工作量,降低施工风险和环境污染,包括粉尘、噪音和污水等;施工

速度快,场地占用小,能大幅减少对现场交通的干扰,尤其对于PC城市高架桥。

尽管该方法在发达国家已有较长的应用历史且已成为常规的建桥方案,美国在20世纪90年代提出的“提速桥梁施工”(Accelerated Bridge Construction, ABC)计划中,预制拼装就是其主要部分。在中国,节段预制拼装桥梁的应用案例依然较少,且以跨江跨海大桥和城市高架为主,前者如上海长江大桥、东海大桥、苏通长江大桥等,后者如上海沪闵高架、广州地铁四号线、厦门快速公交系统等,前者因现场施工环境恶劣需尽量减少现场施工且有条件便于构件运输和安装,后者则主要为加快工期减少对既有线路的交通影响,且近年来随着建筑装配化的产业趋势发展其应用发展较为迅速。

- [2] 黄浩. 风荷载作用下悬索桥受力分析与静风稳定性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 98-102.
- [3] 丁冬. 典型山区地形桥位良态风特性研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2017.
- [4] Solari G, Piccardo G. Probabilistic 3-D Turbulence Modeling for Gust Buffeting of Structures[J]. Probabilistic Eng Mech, 2001, 16: 73-86.
- [5] Hui MCH, Larsen A, Xiang HF. Wind Turbulence Characteristics Study at the Stone Cutters Bridge Site; Part I - Mean Wind and Turbulence Intensities[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 22-36.
- [6] Cheynet E, Jakobsen JB. Buffeting Response of a Suspension Bridge in Complex Terrain[J]. Journal of Structural

- Engineering, 2016, 128: 474-487.
- [7] 张志田, 李春光, 陈政清. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验研究[C]. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集(中册), 2007.
- [8] 胡峰强, 陈艾荣, 王达磊. 山区桥梁桥址风环境试验研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(6): 721-725.
- [9] 李永乐, 张明金, 徐昕宇, 等. 高海拔高温差深切峡谷桥址区日常大风成因[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 935-941.
- [10] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究[J]. 湖南大学学报, 2016, 43(7): 16-24.
- [11] 李永乐, 喻济昇, 张明金, 等. 山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(5): 530-542.

收稿日期: 2021-06-09(修改稿)

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(编号: 192102310484)

作者简介: 张军锋, 男, 博士, 副教授. E-mail: brilliantshine@163.com

但是,阻碍预制拼装桥梁应用的难题主要在于其技术难度、建设规模、劳动力成本、机械化水平、吊运设备和条件、施工和管理水平等^[3],尤以后者最为突出,主要表现在对节段拼装桥梁线形控制的方法和精度上。该文以郑州市四环线及大河路快速化工程中的一联桥梁为例,分析节段拼装桥梁线形控制的方法并给出一些建议。

2 工程简介与施工方案

郑州市四环线及大河路快速化工程为闭合环线,路线全长约 93.030 km,其中绝大部分高架和匝道桥梁采用节段预制拼装技术施工,是中国市政道路中投资规模和工程体量最大的一个特大型城市立体交通项目,也是目前中国最大规模的短线法节段预制项目,下文以某立交工程的一联桥为例进行介绍。

该立交项目工程量大,施工区域狭小,且涉及大量的匝道甚至小半径匝道桥,限于技术水平和施工经验,仅对其中的直线和大半径曲线匝道桥梁采用了节段预制的施工方式,其余小半径曲线桥仍采用支架现

浇的施工方式(图 1)。实际上,等截面直线桥也是预制拼装工法最基本的应用对象,小半径曲线桥和变截面桥的节段预制精度控制更为复杂,应用较少。预制拼装桥梁结构基本为单箱单室等高斜腹板连续刚构体系,跨径为 30~38 m、2~3 跨一联,且均为等跨径布置,整个立交共有预制拼装桥梁 16 联;除一条匝道为 10 m 宽单向两车道桥梁外,其余均为主线且为双向六车道设置,上下行分离,单幅桥宽 13.5 m(图 2)。上部结构和下部结构分别采用 C60 和 C35 混凝土,预应力采用 1 860 MPa 钢绞线,临时锚固筋为 $\phi 32$ mm 精轧螺纹钢筋。

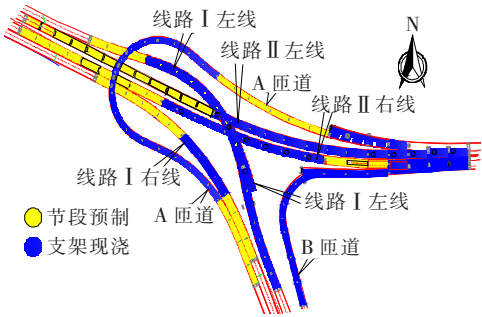
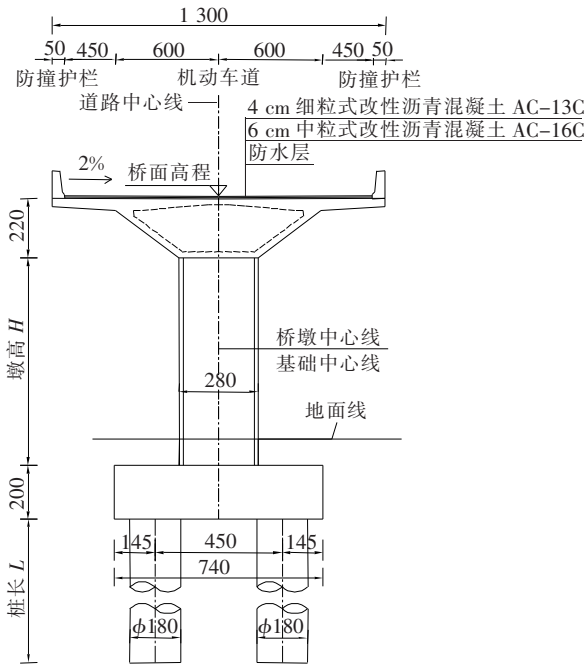
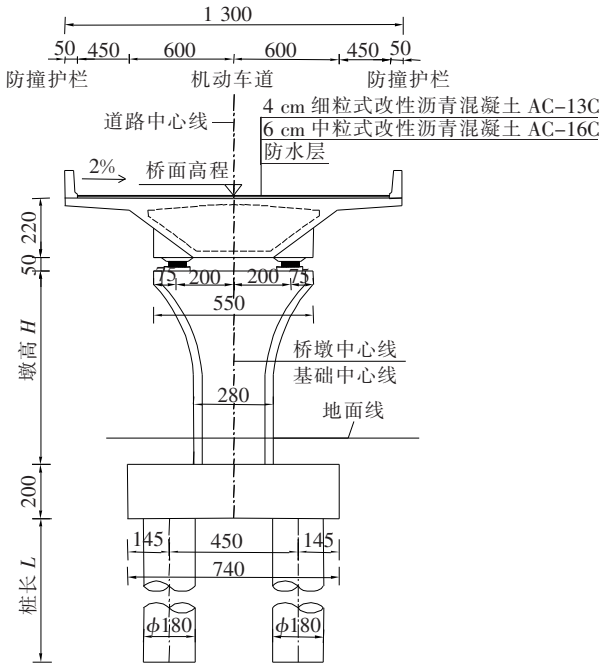


图 1 立交平面布置图



(a) 13 m 桥宽固结中墩横断面



(b) 13 m 桥宽交界墩横断面

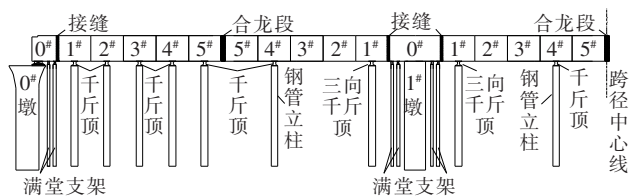
图 2 箱梁截面图(单位:cm)

主线桥箱梁宽 13 m,底板宽 2.8 m,悬臂长 4.0 m,梁高 2.2 m;匝道桥箱梁宽 10.0 m,底板宽 2.0 m,悬臂长 2.5 m,梁高 2.0 m。每跨由 10 个(30 m 和 33 m

跨径)或 12 个(35~38 m 跨径)预制节段梁组成,预制节段分为过渡节段和标准节段两种;墩顶附近设置 2 个 2.9 m 长的过渡节段,标准节段长度有 2.9、2.4 m。

在0#块和1#块处设置15 cm湿接缝,边中跨合龙段湿接缝为40 cm。主线桥/匝道桥一片梁混凝土最大方量为 $27 \text{ m}^3/18 \text{ m}^3$,最小方量为 $16 \text{ m}^3/13 \text{ m}^3$,整个立交共计有预制节段梁 $372+120=492$ 片。

以图1所示线路Ⅱ左线最右侧一联的典型 $3 \times 30 \text{ m}$ 箱梁主线桥为例,对其施工工序介绍如下(图3)。各桥墩即墩顶的0#块均现场浇筑,然后进行拼装架设。对于中墩两侧的节段,采用对称悬臂拼装施工方法,采用汽车吊或龙门吊将预制节段吊至钢管支撑上方,依次完成临时定位、界面抹胶、临时锚固张拉和顶板钢束张拉。为确保施工过程安全和线形,项目初期,随施工进度逐次在各号节段梁下搭设钢管支架,并在1#节段梁下方支架设置4个3向千斤顶用以精确调控节段梁的空间姿态,其他节段梁下仅设置普通千斤顶。随项目的推进和施工经验的增加,后期仅保留1#和4#节段梁下的钢管支架和千斤顶。对于边墩附近的节段,各节段下均设置钢管支撑进行节段拼装并完成临时锚固张拉,待所有5个节段均拼装完成后进行顶板钢束张拉。所有节段架设完成后进行边跨和中跨合并并张拉底板和腹板通长钢束。



(a) 工序示意



(b) 现场架设



(c) 1#块精调



(d) T构拼装

图3 施工工序示意图及现场图片

3 施工监控及效果

该工程的监控仅关注线形,也即确定节段的安装

坐标。首先根据梁场预制时预埋的6个定位点的局部坐标并考虑设计线形将其转化为施工现场的理论坐标(图4)^[9];同时通过施工过程的仿真模拟以及成桥状态的受荷分析,明确桥梁线形随施工进度的变化和荷载效应,从而确定成桥预拱度和施工预拱度;最终根据前两步工作确定节段梁安装坐标。

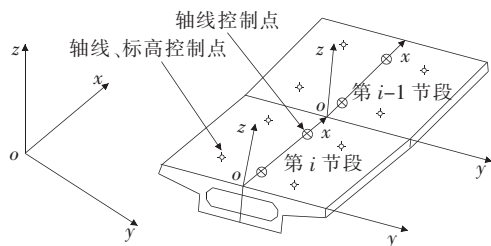


图4 节段梁定位点及坐标转换示意图

数值仿真采用Midas/Civil有限元软件建模(图5)。模型包括主梁、桥墩以及主梁和桥墩之间的边界条件,不含承台和基础,全桥划分为95个单元,148个节点。中墩与主梁采用“刚性连接—刚体”进行模拟;边墩在施工阶段采用“弹性连接—刚性”模拟,在边跨合龙时改为采用释放相应约束的“刚性连接”以模拟支座。节段梁下的钢管支撑采用“弹性连接—只受压”形式模拟,根据刚度等效原则在模型中每个主梁节点下均设有改弹性连接。上述支撑随施工进度逐次激活,至拆支架阶段全部被钝化。

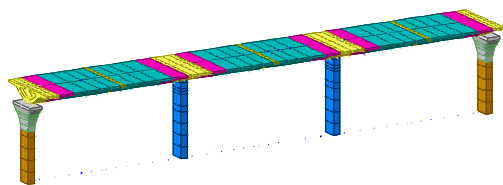


图5 有限元模型示意图

因结构、边界和施工过程的对称性,仅给出一半结构的模拟结果,即左边跨和中跨的左半跨(图6)。

从图6可知:合龙之前的T构悬拼和边墩支架施工过程中,主梁变形极小,不足1 mm,这是因为顶板束与自重效应基本抵消,同时悬臂长度较小;边跨合龙束和通长束张拉之后,因边跨底板束偏多,造成的边跨有明显上拱中跨略有下挠,其此趋势在成桥10年后略有加剧。同时,实际拼装过程测量发现,在整个悬臂拼装阶段,各节段的安装偏差与模拟结果偏差极小,基本在3 mm以内,合龙精度亦容易满足施工标准,故不再给出图示。但在合龙束和通长束张拉后,整桥实测变形却与模拟结果的偏差略大,两者在跨中的偏差达到

5~7 mm(图 6),且均以加剧上拱为特征。这一方面可能是因为数值模拟结果受材料特性、预应力损失、收缩徐变效应等的影响使计算结果与实际情况偏差较大,另一方面也可能是因为节段拼装受胶结缝影响更易发生变形。

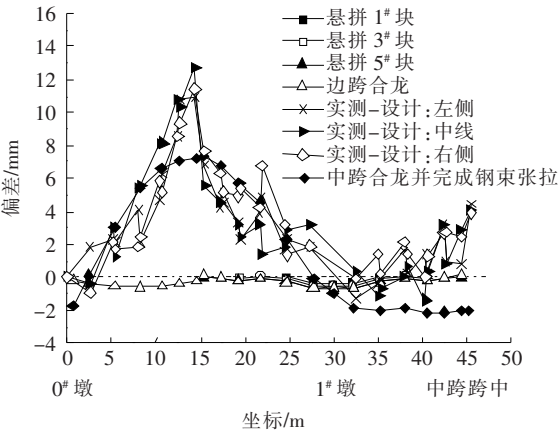


图 6 关键阶段竖向位移结果

4 工程思考

整个立交项目实施过程中,在测量和监控部门的配合下,线形控制良好,且现场拼装速度较常规悬臂浇筑方法显著提升,理想状态下一组人员半天即可完成 T 构左右共两个节段的安装和临时锚固,另半天完成钢束穿束和张拉,第二天即可转入下一个悬臂节段;一个边墩附近的所有节段亦可在 2 d 内完成拼装和预应力张拉。通过整个项目的实施,对城市高架桥的节段预制拼装有如下思考和总结:

(1) 关于梁场预拼。由于梁场与现场施工分属不同单位,结合项目的实际情况,各预制场应对出厂的首联预制主梁进行梁场逐节预拼与联合预拼。梁场逐节预拼是指将预制节段梁两两依次在拼装台架上拼装,其目的是验证节段梁端面是否匹配、预应力管道是否匹配、预应力管道是否顺畅等,如有缺陷应在梁场内整改完成。梁场联合预拼是指将半跨预制梁在拼装台架上整体预拼装,其目的是验证预应力穿束、实测预应力偏差系数与摩擦系数以指导预应力张拉。各梁场应编制梁场试拼操作手册及质量缺陷修复预案,试拼过程不得破坏节段梁端面及剪力键。

(2) 关于 1# 块安装。基于悬臂拼装的节段梁安装工艺,1# 块的安装姿态直接决定了最大悬臂状态的合龙精度及合龙线形,故必须采取一切必要的措施提

高 1# 块的安装精度。结合项目的实际情况,拟定项目 1# 块安装的允许偏差如表 1 所示。但实际上,由于预制场的节段梁尺寸控制精度并没有更高,甚至比上述安装精度还要低(表 2),因此项目实施中 1# 块安装的精度往往无法达到上述要求,只能对每个测点的平面尤其是高程偏差独立控制在±2 mm 以内。

表 1 1# 块安装的允许偏差

| 项目 | 允许偏差/mm | 测量方法 |
|--------|---------|--------------------|
| 轴线竖向倾角 | ±2 | 轴线上两个测点的竖向相对高差 |
| 轴线平面倾角 | ±2 | 轴线上两个测点的水平相对偏位 |
| 端面横坡倾角 | ±2 | 端面上高程测点的竖向相对高差 |
| 节段中心位置 | ±2 | 轴线上两个测点连线中心的绝对位置偏差 |

表 2 预制节段生产精度

| 项目 | 允许偏差/mm |
|---------|---------|
| 顶部表面平整度 | ±5 |
| 长度 | ±10 |
| 宽度 | +50 |
| 断面尺寸 | 高度 ±5 |
| 壁厚 | +50 |

(3) 关于其他节段安装。尽管项目实施中的线形总体控制良好,但由于该立交项目的各联桥中,大部分都有平竖曲线(图 1),尽管梁场根据设计线形制作的节段已考虑了平弯和竖弯,但现场拼装时发现,曲线越明显,坐标偏差也越大。另外,通过合理调整节段梁临时锚固和永久预应力各自的张拉顺序,以及 4# 梁下方的千斤顶行程,亦可对安装坐标进行一定的纠偏。

(4) 关于合龙精度。合龙精度主要由 1# 块的安装精度以及拼装过程中的定位精度决定。结合该项目的实际情况,拟定该项目合龙时单侧悬臂端部箱梁轴线高程及轴线平面的允许偏差 Δ_1 和 Δ_2 、合龙段两侧轴线相对偏差 Δ_3 和两侧翼缘端部高差 Δ_4 均为±15 mm(图 7)。对于每联 3 跨刚构桥,由于平弯和竖弯的存在,每个中墩 T 构两侧的坐标偏差和两个中墩 T 构的坐标偏差均不对称,两个边墩附近节段因独立施工,其端部节段与 T 构端部节段的坐标偏差亦不一致,故而造成 3 个合龙段左右坐标偏差不易控制。为此施工时按照 T 构 1、T 构 2、边墩 1 和边墩 2 共 4 个区段的顺序施工,在后续区段拼装时,根据已完成区段端部节段的坐标偏差对该区段拼装坐标进行适当调整,从而保证合龙精度。

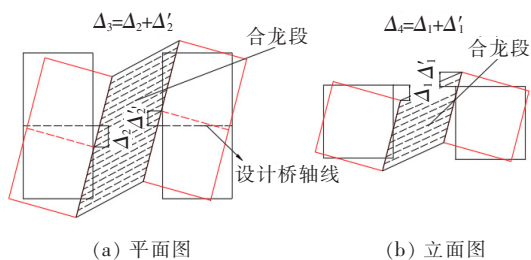


图7 合龙精度示意图

(5) 关于线形应急纠偏。各节段拼装完成且预应力张拉前后均应对节段坐标进行精确测量,据此确定该节段的坐标偏差并预测合龙时的误差。根据该项目实际情况,当该节段坐标偏差大于 ± 10 mm或预测合龙误差超过前述要求时,则需要采用应急纠偏措施进行线形调整。应急线形纠偏基本技术原则:① 提前制定方案:架设开始前制定应急线形纠偏专项施工方案;② 动态预测偏差:每个节段安装完成后,应对其进行精确测量,并对合龙偏差进行预测,为后续纠偏提供数据支撑;③ 分级多次纠偏:纠偏过程应在多个节段内完成,严禁在一个节段内剧烈调整线形。应急线形纠偏的方法是设置环氧树脂垫片,设置环氧树脂垫片的节段缝,容易出现胶体不密实的病害,且对结构的刚度造成不利影响,严重时危及结构安全,不到万不得已禁止利用设置垫片的方式调整拼装线形。应对所有纠偏节段缝的涂胶工艺、质量及胶体挤出性进行查验,确保节段缝处的胶体密实。

(6) 关于测量。精确测量是保证节段梁安装精度的前提,必须采取一切措施确保测量数据可靠及精准。其中控制网的精度指标及布设密度,应根据桥梁的形式、跨径及设计要求的施工精度来确定。另外,由于项目为城市外环高架路,施工过程中临近地面层仍有大量车辆包括重车通行,重车通行时会带来明显的振动,故测量时应避开重车振动的影响。

(7) 关于梁场与施工单位的配合。该项目实施中,由梁场负责节段梁预制,施工方负责现场拼装,且梁场与施工方是两个独立的单位,而两家单位均按同一套图纸进行各自环节的生产施工,这实际上把传统的由施工单位独立完成的施工任务拆分为两家单位完成,故而梁场和施工方的密切配合尤为重要。比如,梁场节段梁尺寸的临时调整、定位点坐标在生产和存梁期的偏差以及对安装坐标的调整、梁场1#块和施工方

0#块线形的平滑衔接措施尤其是预应力管道定位的匹配等,均需要双方及时沟通,以免现场拼装时出现1#块预应力管道无法对接和各节段坐标偏差过大等问题。另外,两家单位也各有自己的监控单位,监控单位对坐标数据了解更为清晰,也需要密切配合。同时,梁场往往是临时设施而非永久工程,项目完工后要拆除。为避免因配合不良导致的施工问题,今后尽可能让节段梁预制和现场拼装由一家单位完成,这样也仅需一家监理和监控单位,更容易保证数据全流程无缝共享和内部各部门高效协作。

5 结语

以郑州市四环线及大河路快速化工程中的一联桥梁为例,结合施工方案、数值仿真计算、理论安装坐标分析以及实际安装坐标测量统计,对城市高架桥梁节段拼装的施工方法、关键环节尤其是线形控制方法给出了思考和建议,可供类似工程参考并促进节段拼装技术的发展。

参考文献:

- [1] 严国敏. PC预制节段拼装桥梁的现状与其研究动向[J]. 国外桥梁, 1998(1): 50—53, 78.
- [2] Walter P J, Muller J M. Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges[M]. New York: A Wiley—Interscience Publication, 1982.
- [3] 尹德兰. 预制拼装桥[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [4] 王渊. 城市高架轨道交通节段拼装桥梁施工及控制技术研究[D]. 中南大学硕士学位论文, 2008.
- [5] 何维利. 城市桥梁预制节段拼装技术研究[C]. 2005年全国桥梁学术会议论文集, 2005.
- [6] 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.
- [7] 张门哲, 涂光亚, 王双喜, 等. 短线拼装法施工的宽幅多节段混凝土箱梁的预制控制[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 148—152.
- [8] 张鸿, 王敏, 郑和晖. 节段预制拼装波腹板组合结构桥梁工艺试验[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 94—97.
- [9] 方蕾. 短线预制悬臂拼装连续梁桥施工线形控制研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2008.