文章编号:1005-0523(2022)06-0037-08

列车风压对桥梁施工中架桥机受力性能的影响

杜 可[1],陈晓飞[2],张艺瀚[2],郑尚敏[1],程海根[1]

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 中铁二局集团有限公司,四川 成都 610031)

摘要:为了研究运营列车行驶中产生的风压对邻近新建铁路施工中架桥机的受力性能的影响,以新建昌景黄铁路客专项目为工程背景,通过建立数值分析模型,分析邻近营业线列车行驶过程中产生的侧向气动力对桥梁施工中架桥机全过程的受力状态的影响。研究结果表明:架桥机1号小车准备取梁时(施工阶段1),主梁2的变形状态受到侧向气动力的影响较明显,变形最大值为4.5 mm;主梁1及主梁2在30~65 m区域内,应力均呈现近似对称分布状态;架桥机1号小车和2号小车准备落梁时(施工阶段2),受到所吊装混凝土梁的影响,侧向气动力对架桥机2根主梁的变形状态均产生了一定的影响,最大差值分别为2.5 mm及3.6 mm;受到混凝土梁自重较大的影响,施工阶段2时侧向气动力对架桥机主梁变形影响较小,然而由于架桥机主梁应力最大值高达263.93 MPa,该阶段结构的安全系数较小,为了保证施工过程中的安全性,应对架梁施工全过程进行实时监控。

关键词:气动力;邻近营业线;架桥机;施工阶段;受力性能

中图分类号:U448 **文献标志码**:A

本文引用格式:杜可,陈晓飞,张艺瀚,等. 列车风压对桥梁施工中架桥机受力性能的影响[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):37-44.

Influence of Wind Pressure of Operating Trains on Mechanical Performance of the Bridge Erecting Machine in Construction of the Adjacent New Railway

Du Ke[1], Chen Xiaofei[2], Zhang Yihan[2], Zheng Shangmin[1], Cheng Haigen[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway No.2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the impact of operating trains on the operating performance of the bridge erecting machine in the construction of adjacent new railways, taking the newly-built Nanchang-Jingdezhen-Huangshan railway passenger dedicated project as the background, through the establishment of a numerical analysis model, the paper analyzes the lateral aerodynamic force generated during the train running near the operating line on the stress state of the whole process of bridge erecting machine in the bridge construction. The results show that the deformation state of the main beam 2 is obviously affected by the lateral aerodynamic force when the No. 1 trolley of the bridge erecting machine prepares to take the beam(Stage 1), and the maximum deformation is 4.5 mm. The stress of main beam 1 and main beam 2 are approximately symmetrically distributed in the area of 30-65 m. When the No. 1 trolley and No. 2 trolley of the bridge erecting machine are preparing to drop the beam (Stage 2), they are affected by the lifting of the concrete beam, and the lateral aerodynamic force has a certain influence on

收稿日期:2022-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52068025,51968024)

the deformation state of the two main beams of the bridge erecting machine, and the maximum difference is 2.5 mm and 3.6 mm respectively. Due to the large dead weight of the concrete beam, the lateral aerodynamic force has little effect on the main girders of the bridge erecting machine at Stage 2. However, since the maximum stress of the main girders of the bridge erecting machine is as high as 263.93 MPa, the safety factor of the structure in this state is relatively small. In order to ensure the safety during the construction process, real-time monitoring of the whole construction process of the girder is required.

Key words: aerodynamic force; near business line; bridge erecting machine; construction stage; force performance

Citation format:DU K,CHEN X F,ZHANG Y H,et al. Influence of wind pressure of operating trains on mechanical performance of the bridge erecting machine in construction of the adjacent new railway[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(6):37-44.

随着经济的飞速发展，我国的高铁建设也得到了大力的发展[1],而高铁桥梁的建设,大吨位架桥机起到了重要的作用。相关学者针对架桥机在桥梁建设过程中的受力状态及施工安全性开展了相应的研究。文献[2-3]针对节段预制桥梁架桥机施工过程中架桥机、吊杆及主梁之间的相互作用开展了研究，并对比研究了不同的施工步骤下吊杆的安全性能;文献[4-6]通过数值模拟对架桥机施工过程中的抗风性能进行了研究，研究表明强风作用下需要采取必要的防风措施;文献[7-11]利用有限元软件建立各种架桥机的数值模型，对各种架桥施工全过程进行了失稳风险的分析，并针对施工过程中可能出现的危险工况，提出了相应的措施,以保证施工的安全顺利进行;文献[12-14]针对实际工程中箱梁架设施工过程中产生的诸多问题，研制出了JQ850型双向步履架桥机并对其结构性能及关键施工技术开展了研究;刘金[15]对YJ900型架桥机进行了模态及瞬态动力学分析，通过对起升动载的分析获取主梁跨中处的位移变化和整机最大应力变化，并结合架桥机的前五阶频率和振型提出了一些结构方面的改进措施。王峰[16]通过对TLJ900架桥机过隧道架梁的影响因素开展了研究,总结出了完整的施工技术。周芳娟[17]通过ANSYS针对JQ900架桥机的支柱受载后的内力问题开展了研究。张玲[18]以实际工程为例,对铁路箱梁运架施工过程中的具体指标进行了重点分析,为施工安全提供了重要参照。文献[19-21]通过有限元软件ANSYS开展了两种不同型号架桥机施工过程的主要工况模拟，重点研究了架设过程以及局部应力的研究。

以上文献针对不同类型架桥机施工过程中的安全性能、稳定性能、抗风性能等进行研究,获得的研究成果在工程中得到了有效应用。随着我国铁路的飞速发展，由于设计路线以及土地占用等方面的原因,越来越多的邻近线铁路开始建设。由于两条铁路相邻,施工过程中,既有线铁路正在运营的高速列车产生较大的侧向气动力对新建铁路的施工会产生一定的影响，目前尚未见针对该方面的文献报道。基于此,以南昌市新建昌景黄铁路建设项目为工程背景，将开展营业线运营列车对邻近新建铁路施工中架桥机的受力性能影响的研究，以期为该类型铁路桥梁的施工建设提供相应的参考。

1 JQ900A型架桥机简介

JQ900A型架桥机为龙门式双主梁3支腿式结构,主要由机臂(即为架桥机的主梁)、1号小车、2号小车、1号柱、2号柱、3号柱、液压系统、电气系统、柴油发电机组以及安全保护监控系统等部分组成。可架设32,24,20 m双线整孔箱梁,适应架设最小曲线半径5 500 m,适应架设最大纵坡20‰,额定起重量900 t。该架桥机结构组成如图1所示(图中标注“5”表示“主梁1”及“主梁2”,由于立面图中二者重合,故仅标注为主梁)。

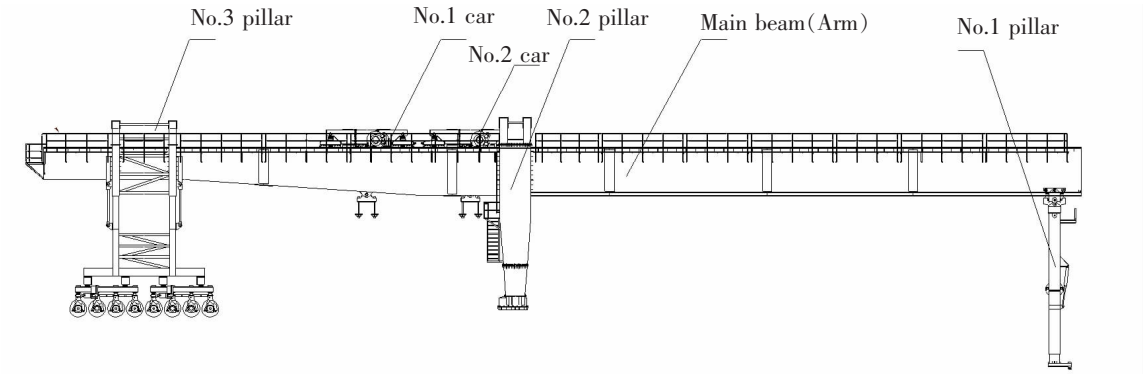


图 1　JQ900A 型架桥机外形结构总图

Fig.1　General drawing of JQ900A bridge erecting machine outline structure

2　结构分析模型建立

2.1　有限元模型建立

由于 JQ900A 型架桥机构造比较复杂，在建立结构有限元模型的过程中，根据主要研究对象,对结构进行适当简化,将双主梁以及 3 个支座通过杆单元进行模拟,而起重小车等通过采用施加质量单元的方式考虑其对结构稳定性的影响。采用桥梁通用有限元软件 Midas Civil 建立 JQ900A 型架桥机的有限元模型,如图 2 所示。架桥机有限元模型中有 112 个节点与 156 个梁单元组成，由于 3 个支腿均有一定的抗扭转能力,故在 3 个支柱底部均约束 3 个方向的平动自由度，主梁与支柱之间采用共节点的方式使二者连接成一个整体共同受力。

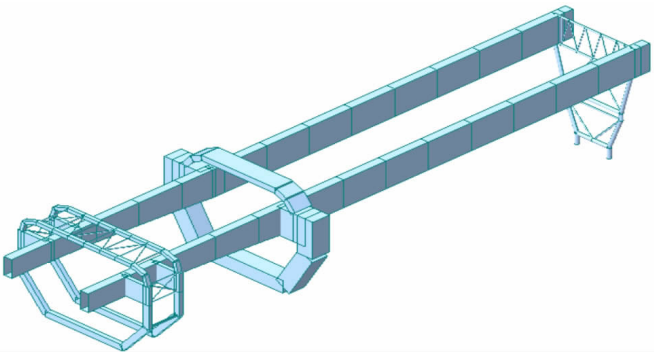


图 2　JQ900A 型架桥机有限元模型

Fig.2　Finite element model of JQ900A bridge erecting machine

2.2　荷载计算方法

本文主要研究 JQ900A 型架桥机在风荷载作用下结构的受力性能及稳定性能,故分析中仅考虑结构的自重、邻近营业线高速列车运营过程中产生的侧向气动力以及自然静力风荷载的作用,架桥机受力如图 3 所示,图中主梁 2 为受到侧向气动力与自然风荷载直接作用的主梁，而主梁 1 则是背风主梁,考虑到迎风主梁的遮挡效应,该梁风荷载施加通过 CH(截面阻力系数)进行适当折减,且在准备落梁阶段需要考虑箱梁的风阻效应(见式(1))。根据数据统计,新建线路与邻近营业线的水平距离在 2~20 m,本文取最不利距离 2 m 开展研究,运营车辆时速为 350 km/h,邻近营业线高速列车运营过程中产生的侧向气动力按照《铁路桥涵设计规范》(TB 10002-2017)进行计算。分析中考虑了驶过列车引起的侧向气动压力和气动吸力作用,均采用了 5 m+5 m 的移动面荷载方式施加(如图 3 所示)。自然静力风荷载作用按照式(1)进行计算

$$F_H=\frac{1}{2}\rho V_g^2 C_H D \tag{1}$$

式中:ρ 为空气密度,kg/m^3;V_g 为风速,m/s;C_H 为构件截面阻力系数;D 为截面高度,m。

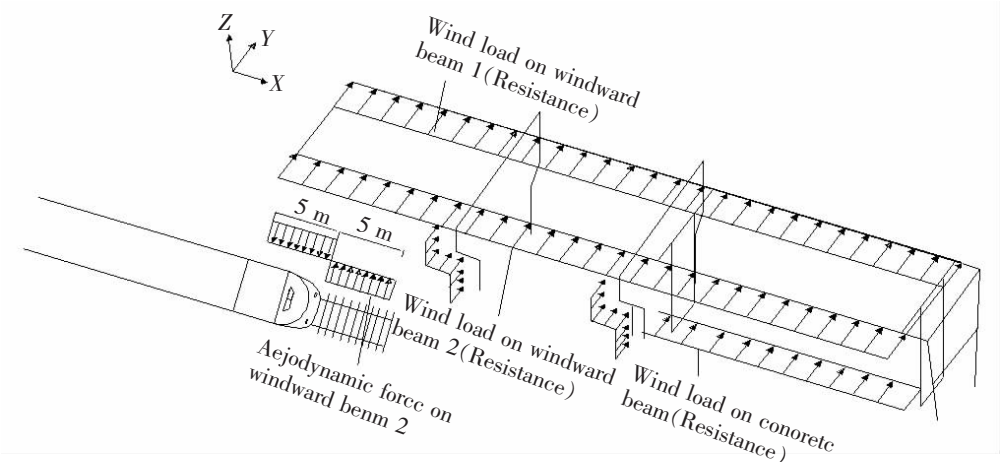


图3 JQ900A型架桥受力示意

Fig.3 Force diagram of JQ900A type bridge

3 结构受力分析

3.1 分析工况

由于列车运营中产生的侧向推力与吸力会作用于整个架桥机,通过设置多种工况分析列车驶过架桥机全过程对结构受力的影响。当列车行驶至与架桥机平行相遇时,荷载工况为工况1,当列车行驶过架桥机10,25,40,55,65 m时荷载工况分别为工况2~6;自然风荷载则选取南昌近50年内最大的风速29 m/s。将结构自重、自然风荷载与侧向气动力进行组合,具体如表1所示。

表1 架桥机加载工况

Tab.1 Load condition of bridge erecting machine

Case	Load combination description
1	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(0 m)
2	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(10 m)
3	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(25 m)
4	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(40 m)
5	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(55 m)
6	Dead load + natural wind load + aerodynamic force(65 m)

根据既有线高速列车驶过新建线路的全过程中架桥机处于不同的施工阶段,本文选取架桥机1号小车准备取梁为施工阶段1,1号小车和2号小车准备落梁为施工阶段2。

由于架桥机是承受周期性载荷的结构,应采用弹性设计准则以防止发生低周疲劳。架桥机除集中轮压及构件端面挤压所引起的局部应力外,结构内不允许有塑性开展,对于塑性材料,应取材料的屈服极限为其标准抗力。故结构静强度的设计准则为

$$\sigma \leqslant [\sigma]=\sigma_s/n \tag{2}$$

式中:σ为结构危险点处的应力,Pa;σ_s为材料的屈服极限,Pa;n按照《铁路桥涵设计规范》(TB 10002-2017)计算;$[\sigma]$为与载荷组合类别相应的许用应力,Pa。

结构的静态刚性以结构在规定载荷作用下指定截面的静态挠度的倒数$1/Y_L$来表征。静态刚性的设计准则为

$$Y_L \leqslant [Y_L] \tag{3}$$

式中:Y_L为许用挠度值。对于工作级别为A3的架桥机,跨中位置:$[Y_L]=\frac{L}{500}$,悬臂位置:$[Y_L]=\frac{L}{500}$。

3.2 位移分析

以架桥机施工过程中的施工阶段1及施工阶段2为研究阶段,分析获取架桥机结构处于最不利变形状态的荷载组合,分析结果如图4、图5所示。

由图4可知,当架桥机处于施工阶段1状态时,由于受到既有线高速列车行驶过程中的侧向气动力的影响,架桥机主梁的变形有所不同。主梁2在气动力与自然风荷载的共同作用下,变形呈现两区间的变形分布:① 0~25 m各工况下梁体变形呈现一致增大趋势,且变形较小,最大仅为2 mm;② 25~65 m各工况下梁体变形呈现抛物线分布,且气动力的作用对梁体变形的影响较明显;其中,主梁变形最大值在工况4与工况6之比为1.56,该差

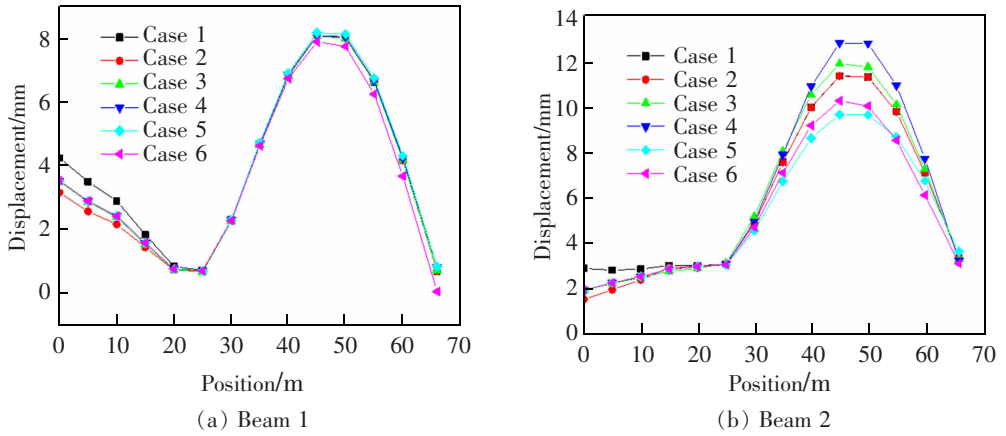


图 4　施工阶段 1 时双主梁位移变化

Fig.4　Displacement variation of double girder at Construction stage 1

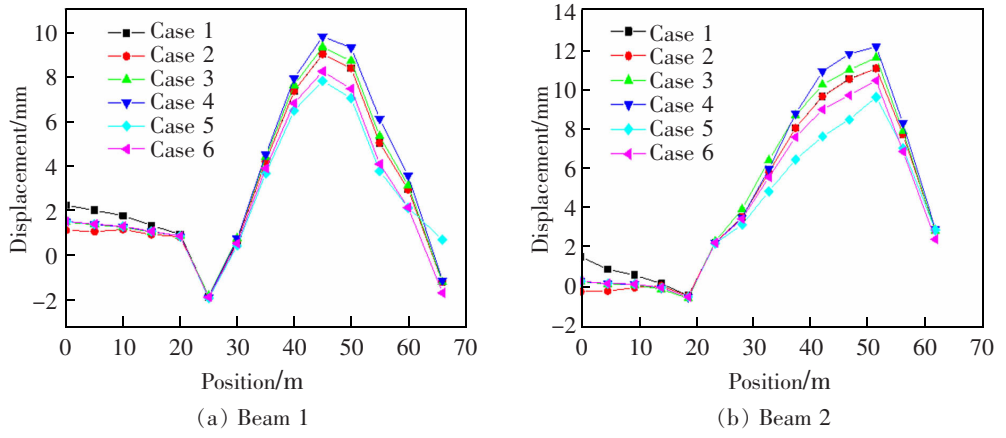


图 5　施工阶段 2 时双主梁位移变化

Fig.5　Displacement variation of double girder at Construction stage 2

异主要与气动力作用的位置有关,前者作用在 1 号柱与 2 号柱之间,后者则是作用在 1 号柱附近。由于主梁 1 处于背风面(图 3 所示),受到风荷载作用有所折减,但却受到主梁 2 变形的间接影响。在不同荷载工况作用下，主梁 1 变形与主梁 2 相似,总体亦呈现两区间的变形规律:① 第 1 区间(0~25 m),主梁呈一致减小的变形规律（最大值为 4.23 mm),该区间受到气动力的影响较明显(工况比较);第 2 区间(25~65 m),主梁 1 变形亦呈抛物线分布,且受到气动力的间接影响不明显(最大值为 8.17 mm)。

由以上变形数据可知,主梁 2 与主梁 1 变形最大值(12.49,8.17 mm)均小于$[Y_1]=\frac{34\ 300}{550}$=62.3 mm,架桥机主梁变形均在允许范围之内。

由图 5 可知，当架桥机处于施工阶段 2 状态时,由于 2 根主梁上吊装了一片箱梁,在气动力、自然风荷载以及自重的组合作用下,架桥机 2 根主梁的变形状态与施工阶段 1 存在一定的差异。该工况下 2 根主梁亦呈现两区间变形规律,但主梁 2 与主梁 1 的区间界限有所不同,主梁 2 为 0~20 m,而主梁 1 为 0~25 m,变形规律相同且变形值均较小。然而,两主梁在第 2 区间存在一定的差异:① 主梁 2 变形不再呈抛物线分布规律，20~55 m 区间呈递增变化,55~65 m 区间则呈递减变化，变形最大值为 12.11 mm;② 主梁 1 变形在第 2 区间总体上还是呈现抛物线分布规律,变形最大值为 9.81 mm,2 根主梁在工况 4 作用下变形最大。从结构安全角度来说,变形最大值均小于$[Y_1]=\frac{34\ 300}{550}$=62.3 mm,该阶段架桥机主梁变形均在许用范围之内。

综上所述,由于架桥机是两跨 3 支撑结构,1,2 号柱之间跨径较小,受到的荷载作用较小,跨中位移变化不明显,而 2,3 号柱之间跨径较大,受到的荷载作用也大,跨中位移变化较大。由于架桥机在梁

体的吊装中对定位要求较高,施工阶段1,2中主梁2的最大位移均大于10 mm,故需要在施工过程中对架桥机进行实时位移监控,以保证安装及运梁过程的准确性。

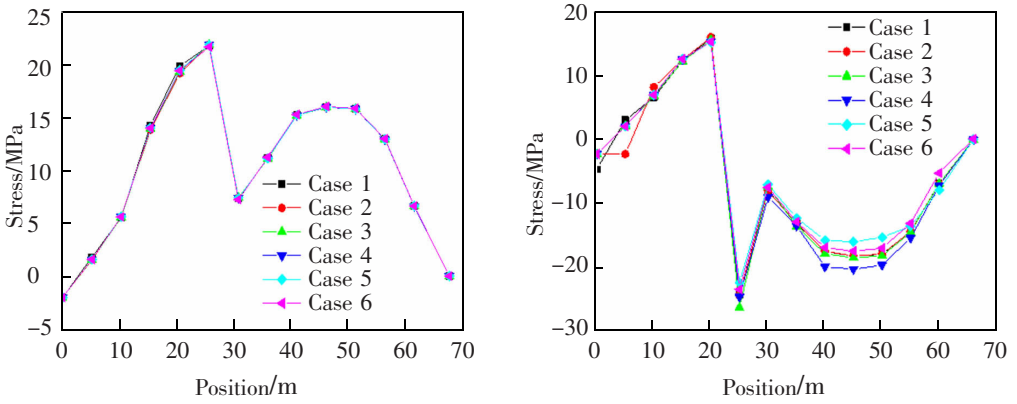
3.3 应力分析

以架桥机施工过程中的施工阶段1及施工阶段2为研究阶段,分析获取架桥机结构处于最不利应力状态的荷载组合,分析结果如图6、图7所示。

由图6可知,当架桥机处于施工阶段1时,由于受到侧向气动力及自然风荷载的共同作用,架桥机2根主梁应力状态均呈现非对称分布。主梁1在0~25 m时,应力状态处于递增的变化趋势,在30~65 m时,应力状态呈现正抛物线分布,而在2号支柱附近(25~30 m),主梁应力处于骤变的状态,变幅约为20 MPa。主梁2由于直接受到气动力的影响,当气动力作用区域不同时,主梁应力分布有较明显的变化。在0~20 m时,应力状态同主梁1相似,处于递增的状态;而在30~65 m区间时,应力状态呈现负抛物线分布,该分布状态与主梁1相反,说明气动力对其影响较明显;而在2号支柱附近(20~30 m),主梁应力处于骤变的状态,变幅约为40 MPa,该区域处于较危险截面。

主梁1与主梁2发生的最大应力位置均位于25 m处,分别为21.83,26.21 MPa,均小于$[\sigma]=\frac{\sigma_s}{n}=\frac{345}{1.22}=282.8$ MPa。架桥机2根主梁应力均在许用范围之内。

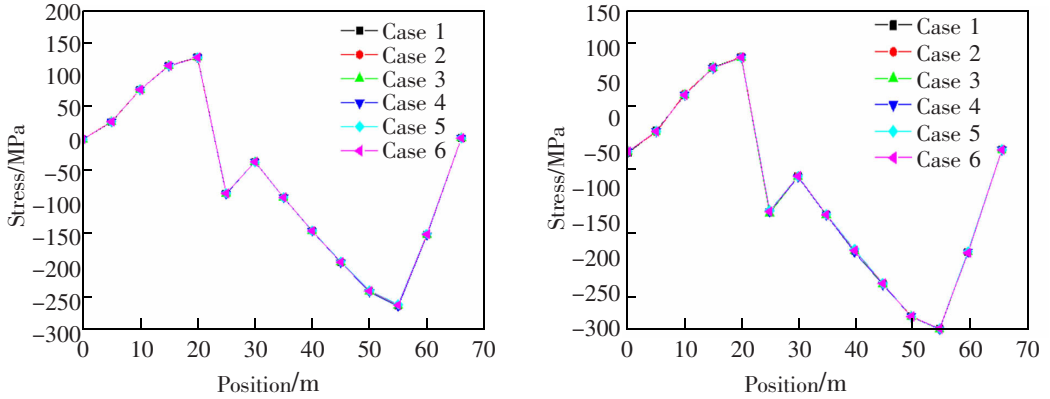
由图7可知,当架桥机处于施工阶段2时,由于架桥机主梁上吊装32 m的混凝土梁,所以自重荷载对结构的应力状态影响最大,此时侧向气动力及自然风荷载的影响均较小。主梁1与主梁2的应力大小及分布基本相同,受到混凝土梁的自重影响,1号支柱与2号支柱及2根主梁基本处于受拉状态,而2号支柱与3号支柱的区域应力则



(a) Beam 1 (b) Beam 2

图6 施工阶段1时双主梁应力变化

Fig.6 Stress variation of double girder at Construction stage 1



(a) Beam 1 (b) Beam 2

图7 施工阶段2时双主梁应力变化

Fig.7 Stress variation of double girder at Construction stage 2

处于受拉应力状态。由图可知主梁 1 和主梁 2 最大应力均位于 55 m 处，分别为 263.93，253.96 MPa，均小于$[\sigma]=\frac{\sigma_s}{n}=\frac{345}{1.22}$=282.8 MPa，主梁应力均在允许范围，然而该状态结构的安全系数较小，施工中需要进行实时监控。

4　结论

1）架桥机处于施工阶段 1 时，主梁 2 的变形状态受到侧向气动力的影响较明显，变形最大差值在 4.5 mm，与主梁 1 相比，侧向气动力改变了 2 号支柱之后主梁的变形状态。

2）架桥机处于施工阶段 2 时，由于 2 根主梁上吊装了一根混凝土梁，使得结构受到的侧向气动力增大，从而使得主梁 1 及主梁 2 的变形状态受到侧向气动力的影响均较明显，差值分别约为 2.5 mm 及 3.6 mm，且在 30~65 m 时，2 根主梁应力分布曲线呈现相反状态。

3）架桥机处于施工阶段 1 时，由于侧向气动力的影响，主梁 1 及主梁 2 在 30~65 m 时，应力呈现近似对称分布状态。

4）架桥机处于施工阶段 2 时，由于架桥机主梁上吊装的混凝土梁自重较大，此时侧向气动力及自然风荷载对结构应力状态影响均较小，然而该状态架桥机的主梁应力较大（均大于 250 MPa），结构的安全系数较小，施工中需要进行实时监控。

参考文献：

[1] 张诚，刘敏，严利鑫. 高速铁路对我国区域经济影响的研究[J]. 华东交通大学学报，2020，37(2)：64-71.
ZHANG C，LIU M，YAN L X. Impact of high-speed rail on regional economy in China[J]. Journal of East China Jiaotong University，2020，37(2)：64-71.

[2] 吴东升. 城市节段预制拼装箱梁桥结构设计的技术特点与创新[J]. 中外公路，2021，41(1)：70-75.
WU D S. Technical characteristics and innovation of structural design of urban segmental precast girder bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway，2021，41(1)：70-75.

[3] 任才，吴东升. 节段预制桥梁架桥机协作受力及吊杆拆除方法研究[J]. 桥梁建设，2021，51(4)：66-72.
REN C，WU D S. Research on coupling behavior of overhead crane and removal method of suspenders of precast segmental bridge[J]. Bridge Construction，2021，51(4)：66-72.

[4] 李永乐，杨怿，陈杰，等. 龙门式双主梁架桥机施工抗风性能研究[J]. 桥梁建设，2011(4)：10-29.
LI Y L，YANG Y，CHEN J，et al. Study of wind resistant performance of double main beam over-head launching gantry in construction process[J]. Bridge Construction，2011(4)：10-29.

[5] 刘树堂. 架桥机跨武广高速铁路时的抗风稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报，2018，15(4)：40-47.
LIU S T. Research on wind-resistance stability of the bridge-erecting machine acrossing the Wuhan-Guangzhou high-speed rail[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2018，15(4)：40-47.

[6] 汪斌，李永乐，郝超，等. 大跨度连续刚构桥钝化主梁气动特性数值分析[J]. 四川建筑科学研究，2008，34(5)：29-33.
WANG B，LI Y L，HAO C，et al. Numerical simulation of aero dynamic characteristics of the blunt deck of long span continuous rigid frame bridges[J]. Sichuan Building Science，2008，34(5)：29-33.

[7] 李世龙. DJ 型架桥机架设铁路 T 梁的横向失稳风险分析[J]. 高速铁路技术，2016，5(7)：39-52.
LI S L. Lateral instability risk analysis of erecting T-type railway beams by using DJ-series bridge erection machine[J]. High Speed Railway Technology，2016，5(7)：39-52.

[8] 李世龙，王心利. DJ 型架桥机架设铁路 T 梁的纵向失稳风险分析[J]. 高速铁路技术，2019，10(3)：55-59.
LI S L，WANG X L. Longitudinal instability risk analysis of erecting T-type railway beams by using DJ-series bridge erection machine[J]. High Speed Railway Technology，2019，10(3)：55-59.

[9] 王心利. 双梁式架桥机横向稳定性分析及防止倾覆的措施[J]. 铁道工程学报，1999，16(2)：104-107.
WANG X L. Analysis on lateral stability of double-armed bridge erecting machine and preventive measure against over-turning[J]. Journal of Railway Engineering Society，1999，16(2)：104-107.

[10] 尹卫. JQ600 型箱梁架桥机架梁稳定性分析计算[J]. 建筑机械，2004，25(2)：68-70.
YIN W. Stability analysis and calculation of frame beam for bridge erecting machine JQ600 with box cross section beam[J]. Construction Machinery，2004，25(2)：68-70.

[11] 程晔，谢瑾荣，张乐亲. TPZ/48 钢箱梁式架桥机施工状态下屈曲稳定性研究[J]. 中国铁道科学，2012，33(1)：35-40.
CHENG Y，XIE J R，ZHANG L Q. Study on the buckling stability of TPZ/48 steel box girder type bridge erection

machine under construction state[J]. China Railway Science, 2012,33(1):35–40.

[12] 熊国辉. JQ850型双向步履架桥机工程应用研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(3):91–95.
XIONG G H. Engineering application research of JQ850 bidirectional walking bridge erecting machine[J]. Journal of Railway Engineering Society,2019,36(3):91–95.

[13] 李珍西,冯强. 高速公路850 t非对称箱梁双幅双向架桥机的研究[J]. 建筑机械,2017(4):102–104.
LI Z X,FENG Q. Research on 850 t asymmetric box girder double–way bridge erector of expressway[J]. Construction Machinery,2017(4):102–104.

[14] 胡旭东,沈超. 850 t偏心箱梁无级可调吊具的研究[J]. 工程机械,2017(2):42–46.
HU X D,SHEN C. 850 t Eccentric box girder stepless ad justable lifting tool research[J]. Construction Machinery and Equipment,2017(2):42–46.

[15] 刘金. 运架一体式架桥机的结构分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
LIU J. The structural analysis of transport–erectin integrated erector[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

[16] 王峰. 石太客运专线TLJ900型架桥机过隧道架梁施工技术[J]. 铁道工程学报,2007(S1):269–273.
WANG F. Construction technique of girder erection with bridge girder erecting machine TLJ900 while passing through tunnel on Shijiazhuang–Taiyuan railway passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(S1):269–273.

[17] 周芳娟. 900 t架桥机支柱有限元分析[J]. 机械,2010,(6):56–58.
ZHOU F J. Finite element analysis of 900 t bridge erecting machine supports[J]. Machinery,2010(6):56–58.

[18] 张玲. 铁路箱梁运架施工受力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):1317–1320.
ZHANG L. Mechanical analysis of the railway box beams in the construction stage[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering Edition), 2012,36(6):1317–1320.

[19] 曾雁辉. JQ900系列架桥机两种型号起重小车的对比分析[J]. 铁道建筑技术,2011(S1):250–252.
ZENG Y H. The comparative analysis on two kinds of hoisting trolley of JQ900 series bridge erecting machine[J]. Railway Construction Technology,2011(S1):250–252.

[20] 宋大炜,杨永清. JQ900架桥机局部应力的有限元分析[J]. 四川建筑,2004(6):92–93.
SONG D W,YANG Y Q. Finite element analysis of local stress of JQ900 bridge erecting machine[J]. Sichuan Architecture,2004(6):92–93.

[21] 王光欣,张智莹. 广珠城际JQ450型架桥机总体设计及有限元分析[J].工程机械,2008(11):50–53.
WANG G X,ZHANG Z Y. General design and finite element analysis of JQ450 bridge erector between guangzhou and zhuhai[J]. Construction Machinery and Equipment, 2008(11):50–53.



第一作者:杜可(1997—),男,硕士研究生,研究方向为轨道交通线路防灾减灾。E–mail:1050123269@qq.com。



通信作者:陈晓飞(1984—),男,高级工程师,研究方向为桥梁施工工艺。E–mail:12490559@qq.com。

(责任编辑:刘棉玲)