

大型造桥机工作状态数值模拟与试验

吕彭民¹,王斌华¹,刘兴车²

(1. 长安大学 工程机械学院,陕西 西安 710064; 2. 山东博瑞路桥技术有限公司,山东 济南 250101)

摘 要:以 MSS 50-15000 型造桥机为研究对象,利用 ANSYS 有限元计算分析软件,对浇注工况下造桥机的结构进行了强度和刚度分析,得到了造桥机结构的应力分布和挠度曲线,为造桥机的设计和施工过程中的标高调整提供了理论依据。根据有限元计算结果,对造桥机的大应力点、主梁垂向变形及其净变形进行测试,试验结果与计算结果基本一致。

关键词:机械工程;造桥机;滑移支架系统;有限元分析

中图分类号:U445.3 **文献标志码:**A

Numerical simulation and test of large overhead launching gantry

Lǚ Peng-min¹, WANG Bin-hua¹, LIU Xing-che²

(1. School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shandong Borui Road and Bridge Co Ltd, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: The MSS 50-15000 overhead launching gantry is taken as research object. The body's strength and stiffness after the pouring procedure are analyzed respectively by using the software ANSYS. The stress distribution and deflection curves are presented to give the theory references for the design and elevation of the overhead launching gantry. According to the finite element results of structure, the high stress point of structure and the vertical deflection and the net vertical deflection of girder are validated by the worksite test. The test results are identical with the calculating ones. 3 tabs, 12 figs, 10 refs.

Key words: mechanical engineering; overhead launching gantry; moving support system; finite element analysis

0 引 言

造桥机,又称滑移支架系统,是现代桥梁施工技术中的先进设备。利用造桥机墩顶原位造梁,不需预制梁场,工艺先进,施工方法简单可靠,适用范围广^[1-2]。由于造桥机可实现整跨或几跨预应力混凝土桥梁整体浇注,从而使桥梁施工质量和桥梁整体强度和刚度大为提高。MSS 50-15000 型造桥机是一种可实现整体浇注 50 m、浇加载荷可达 15 000

kN 的大型造桥机。该造桥机主要结构由钢板(材料:Q345B)和型钢(材料:Q235B)焊接而成,吊杆采用了精轧螺纹钢。在施工中,造桥机不仅要承受混凝土 15 000 kN 的静压力以及自重,还要严格控制混凝土的垂向变形,所以在保证主梁满足强度的同时,也要满足刚度要求^[3]。目前,造桥机还没有统一的设计标准,为了保证造桥机达到使用要求和结构安全可靠,有必要对其进行理论计算和试验研究。为此,本文利用 ANSYS 有限元计算分析软件,在浇

工况下,对 MSS 50-15000 型造桥机的结构进行了有限元分析计算,并根据计算结果,对其关键应力点进行应力测试,同时对造桥机的主梁垂向变形进行了检测。

1 造桥机有限元模型的建立

MSS 50-15000 型造桥机结构形式如图 1 所示。由于在主梁与牛腿梁以及吊杆与后横梁之间采用液压千斤顶连接,故在有限元计算时,将整个结构分为上部支架、下部牛腿梁和后横梁两部分进行计算^[4-10],施工阶段如图 2 所示。

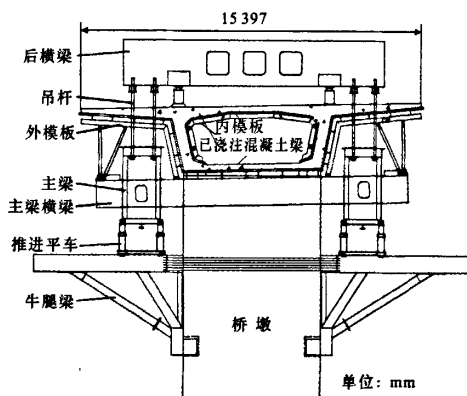


图1 造桥机横断面

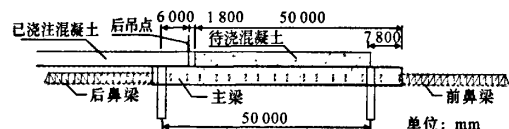


图2 造桥机施工阶段

1.1 上部支架有限元模型的建立

为了准确模拟 MSS 50-15000 型造桥机上部支架的实际结构,在有限元建模时,将内外模板及混凝土作为外载荷加在计算模型上,将主梁用板壳单元 shell 来模拟,将吊杆采用空间杆单元 link 来模拟,将鼻梁、横梁均采用空间梁单元 beam 来模拟;共划分板壳单元 67 616 个,杆单元 8 个,梁单元 2 816 个,节点 66 676 个,上部支架有限元模型见图 3。

在桥梁浇注过程中,不仅要求造桥机自身满足强度要求,同时对浇注成型后的混凝土的垂向变形有严格限制。因此,在有限元计算时既要计算混凝土的自重对造桥机主梁产生的垂向变形,以备施工时调整标高用,又要计算主梁在自重和载荷作用下的总变形和应力,以控制主梁的强度与刚度。

1.2 牛腿梁有限元模型的建立

根据牛腿梁结构的对称性,取一根牛腿梁为研

究对象。牛腿梁采用板壳单元来模拟,预拉钢筋用梁单元来模拟,橡胶支座采用弹簧单元来模拟;共划分板壳单元 11 064 个,梁单元 42 个,弹簧单元 545 个,节点 32 795 个。每根预拉钢筋预紧力为 500 kN,为了精确地模拟钢筋预紧力,本文借用 ANSYS 中加温度载荷的方法,在钢筋中产生所需要的预紧力。具体方法如下:假设预拉钢筋长为 L ,截面积为 A ,弹性模量为 E ,初始温度为 T_0 ,工作温度为 T_1 ,线膨胀系数为 α 。设预拉钢筋两端自由,则伸长量为 ΔL_t ,即: $\Delta L_t = \alpha(T_1 - T_0)L$;若预拉钢筋两端固定,且 $T_1 - T_0 < 0$,则在预拉钢筋内部产生预紧力 P ,因为 $L_t/L = P/(EA)$,所以 $P = (\Delta L_t EA)/L = \alpha EA |T_1 - T_0|$ 。牛腿梁预紧钢筋为直径 $\Phi 36$ mm 精轧螺纹钢, $A = 1.017 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $\alpha = 13.5 \times 10^{-6} \text{ m}/^\circ\text{C}$, $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,则 $|T_1 - T_0| = 500\,000 / (13.5 \times 10^{-6} \times 2.06 \times 10^{11} \times 1.017 \times 10^{-3}) = 176.786^\circ\text{C}$,可施加温度载荷为 -176.786°C 。牛腿梁有限元计算模型见图 4。



图3 上部支架有限元计算模型 图4 牛腿梁有限元计算模型

1.3 后横梁有限元模型的建立

造桥机在浇注工作状态下,前端载荷通过前牛腿梁传到前桥墩来承受,后部载荷通过吊杆传到后横梁,由后横梁通过支撑油缸将力传递到已浇注好的桥梁上。因此,后部吊杆与后横梁也是造桥机的主要受力构件。后横梁有限元计算模型如图 5 所示,模型中共划分板壳单元 4 770 个,梁单元 4 个,节点 14 058 个。



图5 后横梁有限元计算模型

2 造桥机有限元计算结果分析

造桥机在浇注状态下,主梁 Von Mises 应力分布见图 6,最大主应力 $\sigma_{\max} = 142 \text{ MPa}$,位于前支撑主梁内侧腹板处。主梁变形曲线见图 7。主梁垂向总变形 $\delta_z = -7.1095 \text{ cm}$,主梁挠跨比 $\lambda = \frac{\delta_z}{l} = \frac{7.1095}{50 \times 100} = \frac{1}{703}$, l 为跨度。主梁垂向净变形 $\delta_i = -5.6156 \text{ cm}$,吊杆在浇注时受轴向拉应力作用,

$\sigma_{\max}=115$ MPa。牛腿梁在浇注状态下的应力分布见图 8。 $\sigma_{\max}=228$ MPa。后横梁应力分布见图 9, $\sigma_{\max}=200$ MPa。该造桥机在最大受力状态下满足强度和刚度要求。

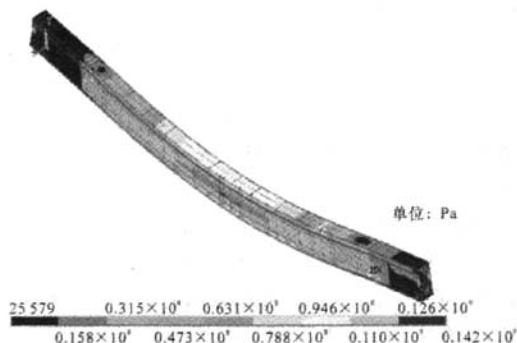


图 6 主梁 Von Mises 应力分布

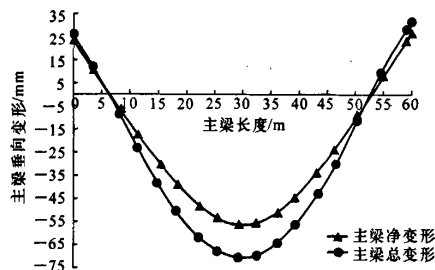


图 7 主梁垂向变形分布

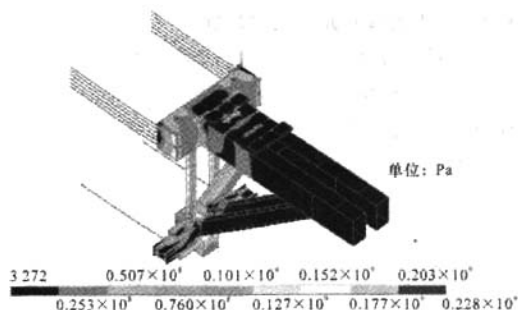


图 8 牛腿梁 Von Mises 应力分布

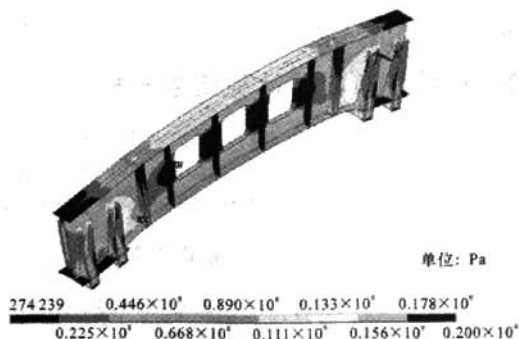


图 9 后横梁 Von Mises 应力分布

3 MSS 50-15000 型造桥机结构试验

为了验证计算结果的准确性和确保造桥机施工安全可靠,在南京第三长江大桥 D1 标段对该造桥机进行了现场检测,在主梁、牛腿梁、吊杆和后横梁等部位均贴了应变片和应变花(单向应力状态部位贴应变片,复杂应力状态处贴应变花)。进行试验时,造桥机已拼装完毕,且位于工作位置,所有结构在自重作用下已产生应变,所以测得应力数据不包括造桥机自重作用,即仅为混凝土载荷产生的应力。

结构在应变花处最大主应力 σ_{\max} 和最小主应力 σ_{\min} 按下式计算^[10]

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{1 - \mu} + \frac{1}{1 - \mu} \cdot \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 - [2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x - \epsilon_y)^2]} \right\}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \cdot \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 - [2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x - \epsilon_y)^2]} \right\}$$

式中: ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{45° 分别为应变花在水平、垂直和 45° 方向的应变值; E 、 μ 分别为材料的弹性模量和泊松比。

主梁、牛腿梁和后横梁测点位置见图 10~图 12。主梁大应力点的测试结果与相应的计算结果见表 1;主梁垂向总变形测试结果见表 2;主梁垂向净变形测试结果见表 3。

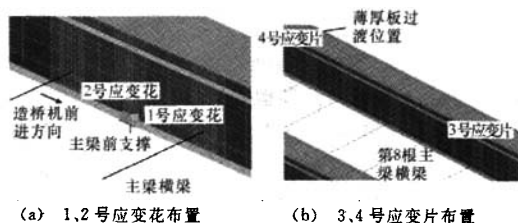


图 10 主梁测点布置

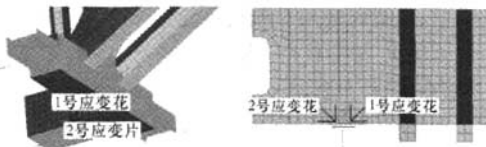


图 11 牛腿梁测点布置

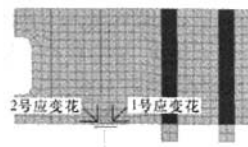


图 12 后横梁测点布置

4 结 语

(1)采用空间板壳单元和梁单元建立 MSS 50-15000 型造桥机主要结构的计算模型,其计算结果与试验结果相当吻合,说明用有限元方法对造桥机进行结构分析是一种行之有效的方法。结构强度和

表 1 主梁及吊杆应力值有限元计算结果与试验测试数据

测点编号	测点位置	应力计算 (含自重)/ MPa	应力计算 (不含自 重)/MPa	应力试验 测试/ MPa
主梁 1 号 应变花	前支撑处主梁内 侧腹板(前鼻梁侧)	91.5	75.5	79.50
主梁 2 号 应变花	前支撑处主梁内 侧腹板(后鼻梁侧)	142.0	92.1	86.00
主梁 3 号 应变片	主梁最大垂向变形 处的上盖板上表面	-115.0	-91.6	-104.00
主梁 4 号 应变片	主梁上盖板板厚过 渡段的薄板上表面	-75.7	-65.1	-60.70
吊杆 5 号 应变片	沿吊杆轴向布置	115.0	95.6	98.00
牛腿梁 1 号 应变花	插入桥墩孔的牛腿 梁腹板	101.0	86.0	86.13
牛腿梁 2 号 应变片	插入桥墩孔的牛腿 梁下底板	115.0	98.1	105.32
后横梁 1 号 应变花	千斤顶支撑处的腹 板外侧	147.0	106.0	115.00
后横梁 2 号 应变花	千斤顶支撑处的腹 板内侧	117.0	80.4	87.50

表 2 主梁垂向总变形有限元计算结果与试验测试数据

测点位置	计算结果/cm	试验测试结果/cm
第 8 根主梁横梁对应的主梁位置	-7.11	-7.5

注:负号表示变形方向垂直向下。

表 3 主梁垂向净变形有限元计算结果与试验测试数据

测点位置	计算结果/cm	试验测试结果/cm
第 9 根主梁横梁对应的主梁位置	-5.62	-5.6

注:负号表示变形方向垂直向下。

刚度计算结果可指导结构设计和结构改进。

(2)用加温度荷载的方法模拟在钢筋中产生需要的预紧力是简易可行的处理方法。

(3)数值计算所得的主梁挠度曲线可指导施工现场的主梁标高调整。

(4)本文提供的计算方法可为其他同类型产品的设计提供参考。

参考文献:

References:

[1] 王立新. 移动支架造桥系统在我国铁路上的应用与展望[J]. 铁道建筑技术, 2002, 19(6): 6-10.
WANG Li-xin. Application and prospect of the movable scaffolding system on the railway construction in China [J]. Railway Construction

Technology, 2002, 19(6): 6-10.
[2] 王斌华, 吕彭民, 吴纪生. 造桥机主梁高强连接螺栓群的有限元计算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 97-100.
WANG Bin-hua, LÜ Peng-min, WU Ji-sheng. Finite element analysis of high-strength bolts for overhead launching gantry's main girder[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26 (1): 97-100.
[3] 王斌华. 滑移支架系统结构设计 with 关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
[4] 郝建民, 耿刚强, 张智龙. 电弧喷涂铝对高强度螺栓摩擦型连接面抗滑移系数的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(4): 85-87.
HAO Jian-min, GENG Gang-qiang, ZHANG Zhi-long. Effect of arc spraying aluminium on anti-slide coefficient of friction type high-strength bolt adjacent plane[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(4): 85-87.
[5] 张祖强, 李平昌. ANSYS 有限元程序在结构工程领域的应用[J]. 四川建筑, 2004, 24(2): 51-52.
ZHANG Zu-qiang, LI Ping-chang. Application of ANSYS software on construction engineering [J]. Sichuan Architecture, 2004, 24(2): 51-52.
[6] 丁 华, 朱茂桃, 赵刻水. 液压挖掘机动臂的有限元分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 118-120.
DING Hua, ZHU Mao-tao, ZHAO Yan-shui. Finite element analysis of arm of hydraulic excavator[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (4): 118-120.
[7] 娄 平, 曾庆元. 移动荷载作用下板式轨道的有限元分析[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 29-33.
LOU Ping, ZENG Qing-yuan. Finite element analysis of slab track subjected to moving load[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 29-33.
[8] 博嘉科技. 有限元分析软件—ANSYS 融会贯通 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
[9] Silva J G S, Da P C G, Vellasco S, et al. Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61 (9): 1108-1134.
[10] 吕彭民. 大型复杂结构抗疲劳设计[M]. 西安: 科学技术出版社, 1999.