

900 t 移梁机结构有限元仿真分析

陈士通¹, 崔晨光², 李玉安¹, 李义强¹

(1. 石家庄铁道大学河北省交通应急保障工程技术研究中心, 河北 石家庄 050043;

2. 中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116033)

摘 要: 为保证 900 t 移梁机的作业安全, 利用 ANSYS 有限元软件建立移梁机整体空间模型, 基于作业工况进行有限元分析。介绍了 900 t 移梁机的结构组成、功能特点和作业工况, 提出了移梁机有限元模型的建模原则与方法。结合各种作业工况进行移梁机有限元仿真分析, 得到不同工况下等效应力和结构变形云图, 并将仿真计算结果与试验数据进行了对比分析。结果表明, 利用上述建模原则得到的有限元仿真分析结果与试验数据较为吻合。最后分析了个别有限元结果与试验数据存在偏差的原因。研究结果可为移梁机的设计制造提供借鉴指导。

关 键 词: 移梁机; 有限元; 仿真分析; ANSYS

中图分类号: U 215.6; TH 213.5 **DOI:** 10.11996/JGJ.2095-302X.2016020269

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2016)02-0269-06

Finite Element Simulation Analysis of 900 t Girder Hoisting Machine Based on ANSYS

Chen Shitong¹, Cui Chenguang², Li Yuan¹, Li Yiqiang¹

(1. Hebei Engineering Research Center for Traffic Emergency and Guarantee, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineer Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd, Dalian Liaoning 116033, China)

Abstract: To ensure the operation safety of 900 t girder hoisting machine, the ANSYS is used to set up the whole 3D model for the girder hoisting machine, the finite element analysis for the girder hoisting machine is analyzed base on the working condition. The structure composition, functional characteristics and working condition of girder hoisting machine are introduced, then the modeling principle and method of finite element model are proposed for girder hoisting machine. Through the element simulation analysis, the equivalent stress and structural deformation for different working conditions are presented, and the finite element results and the test results are discussed in details, the result demonstrates that the simulation analysis results are consistent with the test results. Then the cause for deviation of the finite element results and the test results are analyzed. The research results is helpful for the design and manufacture of the girder hoisting machine.

Keywords: girder hoisting machine; finite element; simulation analysis; ANSYS

为了保证桥梁施工质量, 我国高速铁路和城际客专的桥梁施工大多采用“梁场提前预制箱梁, 再

利用架桥机进行箱梁架设”的施工方案。移梁机是预制梁场的专用起重设备, 其主要作用是在制梁台

收稿日期: 2015-07-26; 定稿日期: 2015-11-15

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重大项目(2014G008-A); 河北省教育厅资助科研项目(QN2014173)

作者简介: 陈士通(1977-), 男, 河北蠡县人, 高级工程师, 博士研究生。主要研究方向为桥梁运架设备。E-mail: chst@stdu.edu.cn

通讯作者: 李义强(1976-), 男, 河北辛集人, 讲师, 博士研究生。主要研究方向为桥梁工程。E-mail: 83001813@qq.com

座、存梁台座和装梁区之间进行 900 t 级箱梁移位、存放和装车。根据走行方式移梁机可分为轮胎式和轮轨式，轮胎式移梁机采用轮胎走行，一次性投资较大且后期保养费用高；轮轨式移梁机采用轮轨走行，需要铺设走行轨道，其技术成熟，性价比较高，因而得到了广泛应用^[1]。

移梁机属于特种设备目录中的门式起重机，为非标产品，多依据传统的设计计算方法进行产品设计，即结合功能需求，依据经验和简化计算进行初步设计，较少综合考虑作业工况进行仿真分析。相关文献研究多集中于产品结构、性能特点介绍^[2-3]。对起重设备进行有限元仿真分析，可明确结构受力，获取结构危险工况，有利于优化设计^[4-5]。为了提高仿真模型的建模速度和精确度，文献[6]提出了机械装备金属结构有限元模型建立的 8 条策略。

本文以 900 t 轮轨式移梁机为研究对象，结合其结构特点和作业工况，利用 ANSYS 有限元分析软件建立整体空间模型，针对各种作业工况进行仿真分析，并将其得到的计算结果与试验结果进行了比对分析，建模思路和分析方法对此类设备的设计优化和安全施工具有指导和借鉴意义。

1 移梁机结构及功能特点

1.1 整机结构

本文所研究的 900 t 轮轨式移梁机采用双门型主体框架(主梁、端梁和支腿)，辅以起升机构、走行机构、转向机构和电气系统，可以实现预制梁场的箱梁移位、存放和装车功能。移梁机总体结构如图 1 所示，主要技术参数如表 1 所示。

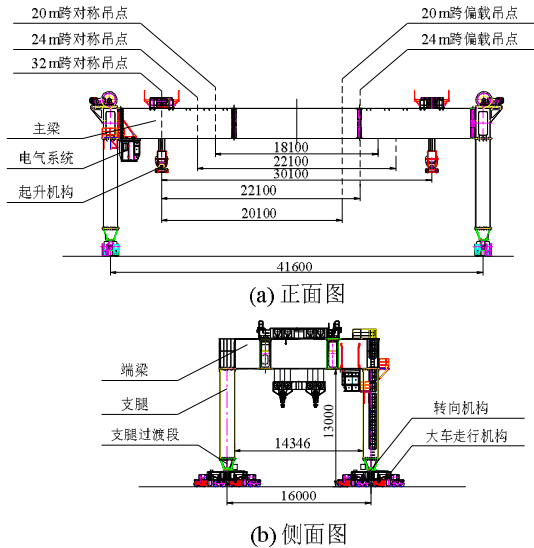


图 1 移梁机结构图

表 1 移梁机主要技术参数

序号	项目	参数	备注
1	额定起重量	900 t	32 m 跨梁重
2	整机重量	412 t	-
3	主梁跨度	41.6 m	净跨大于运梁车长度
4	端梁跨度	16 m	净跨大于运梁车宽度
5	可吊移梁跨	32~20 m	对称或非对称起吊
6	起升速度	0~0.5 m/s	变频调速
7	主梁静刚度	$L/700$	L 为主梁跨度
8	换区作业	-	大车 90°转向实现

1.2 功能特点

为了满足工程需要，移梁机需要具有以下代表性功能：

(1) 转向作业：梁场往往需要布置多排多列制梁和存梁台座，如图 2 所示，为满足在不同制梁区和存梁区间转换作业的需求，移梁机走行机构具有 90°转向功能，故移梁机具有纵走和横移 2 种作业工况。

(2) 变跨提梁：桥梁施工标段内，一般以 32 m 箱梁为主，但需要少量 24 m 或 20 m 跨箱梁进行桥跨调整，故预制梁场需要设置 3 种不同跨度的制梁台座和存梁台座。预制梁场施工条件较好时，如平原地带，24 m 和 20 m 跨制梁台座和存梁台座可单独设置，此时移梁机变跨时仍为对称起吊箱梁；当预制梁场施工条件较为恶劣或施工单位降低施工成本时，24 m 和 20 m 跨箱梁的一端台座往往与既有 32 m 跨箱梁台座共用，此时移梁机起吊箱梁时为偏载起吊作业工况。对称起吊和偏载起吊吊点位置如图 1 所示。

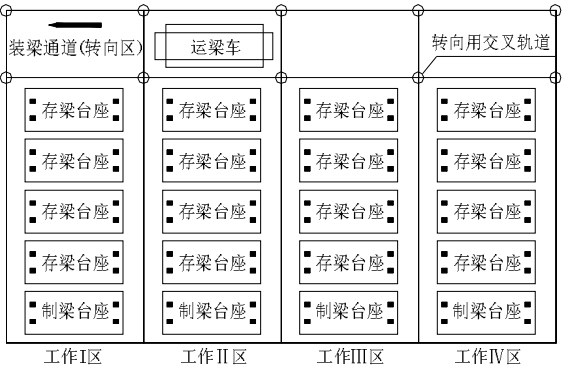


图 2 预制梁场台座布置图示

2 移梁机有限元建模

2.1 几何建模

ANSYS 有限元软件里提供了多种具有不同特

性的梁单元和板单元,既可实现弹性范围内或小变形的线性行为模拟,也可进行材料非线性(弹塑性、蠕变、超弹性等)、几何非线性(大变形、大转矩)和动力学仿真分析。移梁机的有限元建模需要结合结构特点,以满足工程需要为目的进行。在多次论证分析的基础上,确定900 t 移梁机整机结构采用梁单元进行几何建模,对于荷载路径传递不明确的结构采用板单元局部建模分析。这样既可以总体上明确结构受力情况,又可掌控局部复杂部位的结构安全,同时大量减小计算工作量。移梁机的几何建模思路如图3所示。

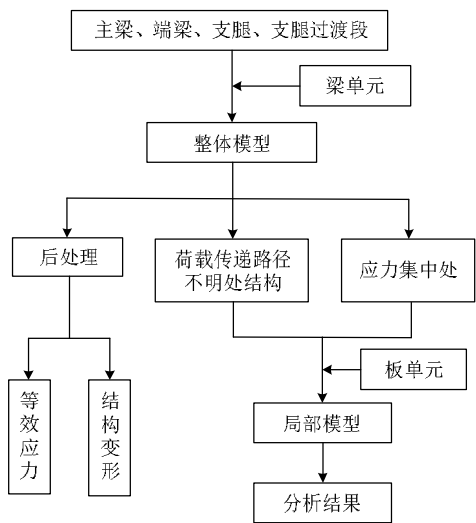


图3 移梁机建模思路

2.2 模型约束条件

合理的约束条件是有限元仿真分析取得正确结果的前提。移梁机约束条件的处理需注意2方面的问题:

(1) 移梁机各个构件之间的连接约束应与实际受力情况相同。如单根主梁设计制造时分为3个梁节,各梁节间利用拼接板通过螺栓连为一体,建模时各梁节之间应为刚性连接;而主梁和端梁连接则较为复杂,尽管螺栓同样按刚性连接处理,但由于主梁生根于端梁腹板上,实际作业时主梁与端梁连接处的竖向荷载会对端梁产生扭矩,如果建模时主梁端部节点位于端梁质心处,则有限元计算时会忽略主梁对端梁的附加扭矩,可通过质心偏移等方式处理。

(2) 支点约束应根据移梁机结构特点确定,移梁机支腿通过螺栓固定于大车走行机构的转向中枢上,转向中枢与大车走行机构车架间通过球型轴承连接,从而可实现大车走行机构以支腿为中心进行90°转向,故支点约束应为3个方向的位移约束,

不应约束各支点的转动自由度。

2.3 外部荷载的施加

模型中荷载的施加原则是将外部荷载等效处理后施加到相应位置。

(1) 自重加载。在ANSYS 前处理程序中输入材料密度,求解程序中输入重力加速度,程序会根据各个单元参数自动计算,按分布荷载施加于结构上。由于移梁机各个构件均为不同厚度钢板焊接而成,焊缝重量约占结构总重的5%左右,因此将重力加速度乘以1.05的系数予以考虑。

(2) 司机室、卷扬机、走台栏杆等构件重量可通过集中荷载的方式直接施加于相应位置。

(3) 箱梁荷载。可根据吊点位置和吊点数量简化为集中荷载,在合理考虑冲击系数的基础上,施加于主梁上。需注意的是吊具在主梁上的作用方式与作用位置,根据实际情况决定是否考虑偏载对主梁引起的扭转作用。

(4) 风载。主要考虑2部分:①直接作用于移梁机结构上的风载,根据规范计算后直接施加于结构相应位置;②作用于起吊箱梁上的风载,需要将其折算至吊具与主梁作用位置进行施加。

3 有限元仿真分析

移梁机的仿真分析需要结合作业过程进行工况组合,然后针对各个工况进行计算。在此选取典型工况进行说明。

3.1 对称起吊工况

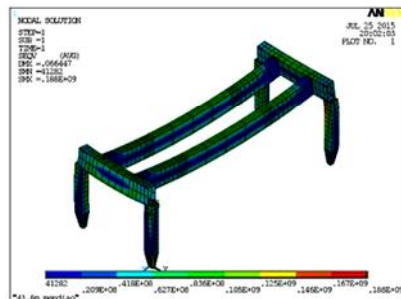
高速铁路和客运专业以32 m跨预制箱梁为主,辅以24 m和20 m跨箱梁用桥跨里程调整。其中32 m跨箱梁最重,但其吊点位置靠近主梁端部,20 m跨箱梁较轻,但其吊点位置最接近主梁跨中,故需要分别对3种跨度箱梁进行计算分析。图4、5分别给出了3种跨度箱梁起吊时移梁机结构的复合应力和结构变形云图。

分析图4可知:移梁机对称起吊32 m跨箱梁时,结构出现最大应力188 MPa,其位置为支腿上端内侧;起吊24 m和20 m跨箱梁时,最大应力部位发生于主梁吊点处和支腿上端内侧位置,但结构最大应力值有所降低;3种跨度箱梁起吊时,支腿上端内侧均为结构最大应力位置,其原因在于箱梁引起的竖向荷载通过端梁传递于支腿时,由于移梁机横向为门架结构,端梁在荷载作用下产生下挠,故支腿上端内侧竖板受力较大且大于外侧,荷载沿着支腿向下传递过程中逐渐分布均匀。为保证作业安全,支腿上端设计时应局部加强,以利于竖向荷

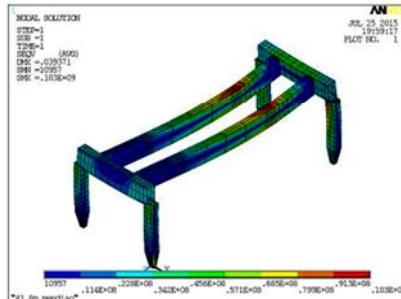
载在最短传递路径内实现均匀分布。

分析图 5 可知, 移梁机对称起吊 32 m 跨箱梁时, 主梁竖向挠度最大, 最大挠度值 $f=0.066 \text{ m}$ $>L/700=0.059 \text{ m}$ (L 为主梁跨度), 不符合规范要求。

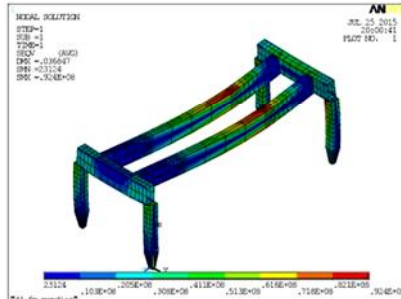
其实不然, 主梁跨中挠度计算应考虑主梁支点处的影响, 因为主梁支撑在端梁上, 支点位置也发生了下挠, 考虑支点处竖向位移后, 主梁刚度满足规范要求。



(a) 32 m 跨箱梁

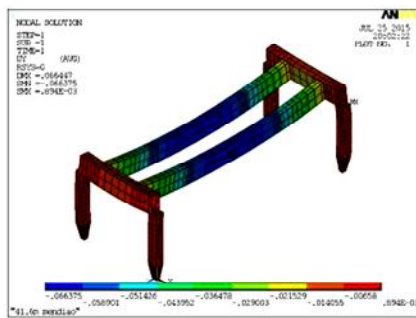


(b) 24 m 跨箱梁

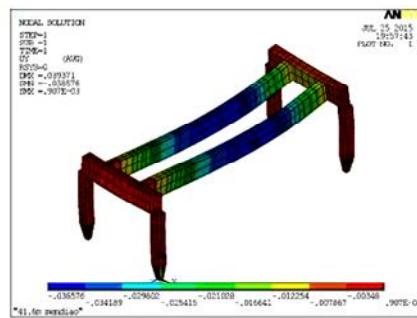


(c) 20 m 跨箱梁

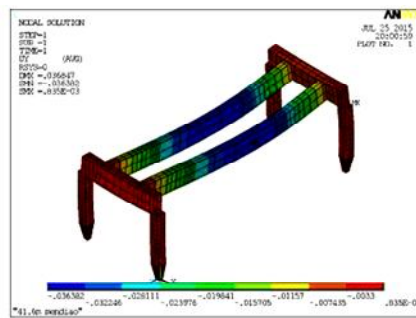
图 4 整机结构应力云图



(a) 32 m 跨箱梁



(b) 24 m 跨箱梁



(c) 20 m 跨箱梁

图 5 整机结构竖向变形图

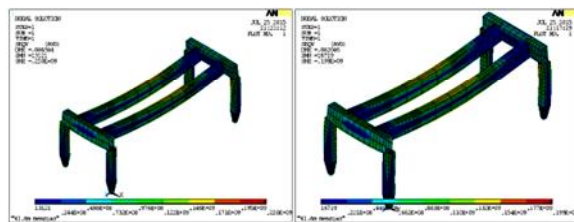
3.2 偏载起吊箱梁

当 24 m 和 20 m 跨箱梁一端与 32 m 箱梁共用台座时, 移梁机进行 24 m 或 20 m 箱梁起吊、移位作业时, 需偏载起吊箱梁, 对结构受力较为不利, 因此, 有必要对这 2 种工况进行计算分析。24 m 和 20 m 跨箱梁偏载起吊时的复合应力和结构变形云图如图 6、7 所示。

综合分析图 6、7 可知, 尽管 24 m 和 20 m 箱梁重量小于 32 m 箱梁, 但由于偏载起吊时一侧吊具接近于主梁跨中位置, 主梁跨中挠度加大, 24 m 和 20 m 跨箱梁偏载起吊时, 主梁跨中挠度分别为 0.088 m 和 0.082 m, 此时即便考虑主梁支点位置处竖向位移, 主梁跨中最大挠度约 $0.075 \text{ m} > L/700$; 主梁挠度加大致使端梁面外扭转加大, 继而导致支腿弯曲程度加大, 故支腿上端应力进一步提高, 最大应力为 220 MPa(24 m 跨箱梁偏载起吊)。

考虑偏载起吊箱梁工况较少, 且主梁跨中应力在弹性范围内, 此外, 由于 900 t 移梁机为定点起吊, 主梁上没有起重小车行走, 主梁挠度略大不影响

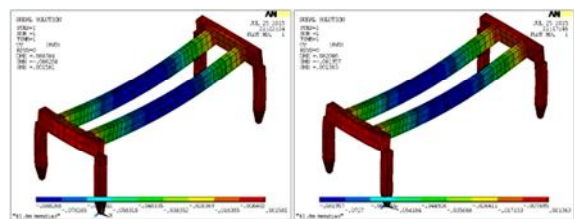
结构安全, 故设计制造时没有对主梁的结构刚度采取加大措施。



(a) 24 m 跨箱梁

(b) 20 m 跨箱梁

图 6 整机结构应力云图



(a) 24 m 跨箱梁

(b) 20 m 跨箱梁

图 7 整机结构竖向变形图

3.3 移梁机重载纵向行走

当移梁机换区作业时,移梁机需要重载纵向行走(大车走行方向与主梁轴向一致),此时,移梁机支腿在大车走行方向上没有了轨道的刚性约束,当前方和后方大车走行不严格同步时,有可能导致前、后支腿距离产生变化,对于有限元模型而言,即产生了支点位置偏差 Δ ,进而对整机结构受力产生影响。为了明确重载纵向行走不同步对结构的影响,通过在有限元模型中支点位置施加位移荷载的方式,模拟前后支腿距离的变化。图8、9分别为支点位置偏差 Δ 为-0.15 m、-0.10 m、-0.05 m、0、0.05 m、0.10 m和0.15 m时,结构最大应力和跨中最大挠度变化曲线。

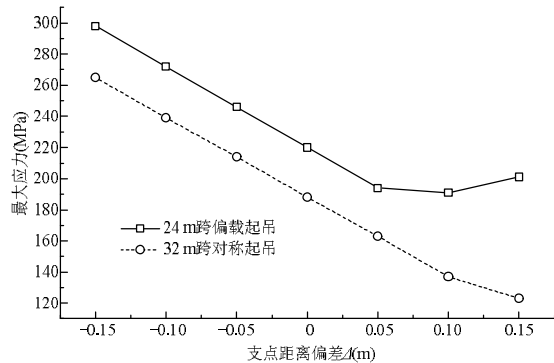


图8 整机最大应力与支点位置偏差 Δ 关系曲线

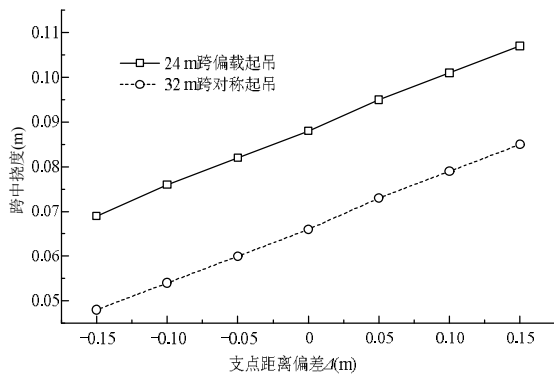


图9 主梁跨中挠度与支点位置偏差 Δ 关系曲线

分析图8可知,当支腿距离小于标准值时,即 Δ 为负值时,随着 Δ 的减小,整机最大应力逐渐变大,其原因在于支腿向跨内收缩时,一定程度上加大了支腿上端的弯曲受力;当支腿距离大于标准值时,即 Δ 为正值,随着 Δ 的变大,整机最大应力出现了先降后增的变化趋势,其原因在于支腿向跨外张开时,减小了支腿上端内侧弯曲应力,应力幅值出现降低,当向外张开程度继续变大时,变相增大了主梁跨中弯矩,整机的最大应力区转移至主梁跨

中区段,应力幅值又出现了上升,如图10所示,图中红色位置代表最大应力区域。

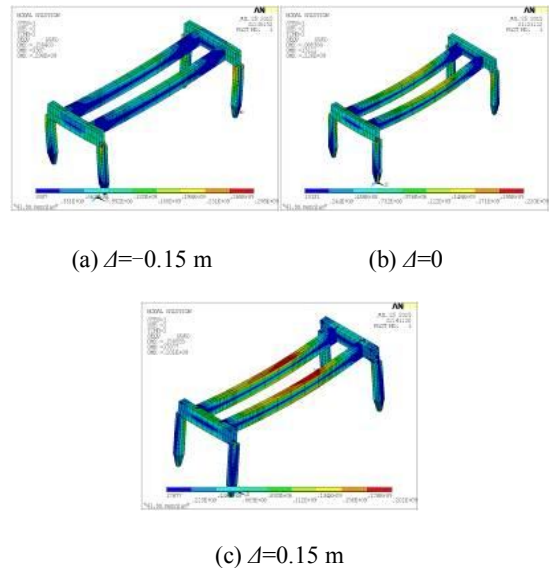


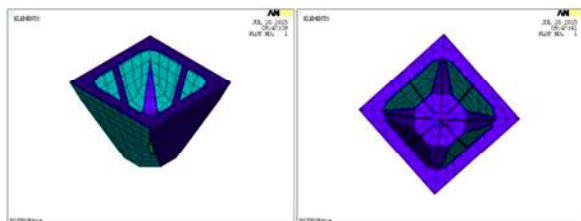
图10 结构最大应力区随支点位置偏差 Δ 变化图

分析图9可知,主梁跨中挠度随着支腿间距离的增大线性加大,究其原因: Δ 为负值时,支腿向跨内收缩对于主梁而言减小了跨中弯矩,导致了挠度的减小; Δ 为正值时,支腿向跨外张开对于主梁而言加大了跨中弯矩,导致了挠度的加大。

综合图8、9可知,支腿下部间距的变化对整机应力和主梁跨中挠度影响非常明显,因此移梁机重载纵向行走时,需要精确调整大车走行的同步性,且应采取技术措施(如支腿间安装测距装置,支腿间距偏差 Δ 超标予以报警、停机),实时监控同步行走情况。

3.4 局部结构板单元分析

通过移梁机梁单元整体有限元分析,可以从总体上掌握了解结构受力的薄弱环节。对于在设计过程中结构复杂、荷载路径传递不明确的构件,可以利用板单元建模,在整体有限元分析的基础上,提取所建模型部位荷载,进行仿真分析。如移梁机的支腿上端与端梁接触部位,应力集中现象明显,如不能确定结构是否安全,可以利用板单元建立局部模型进行分析。此外,支腿下部与大车走行机构连接的支腿过渡段,支腿断面与大车走行机构连接处尺寸相差较大,需大幅收缩支腿截面尺寸,为了确保支腿上竖向荷载安全传递至大车走行机构,过渡段结构设计为四棱体向八棱体过渡的组合结构,较为复杂,人为无法判断荷载传递路径,需要利用板单元建模分析。图11利用shell63单元建立支腿过渡段有限元模型。



(a) 正视图

(b) 俯视图

图 11 shell63 单元建立的过渡段模型

4 试验结果对比

为了解移梁机作业时的真实受力情况,对 32 m 跨箱梁作业状态的结构应力及挠度进行了检测,移梁机试验照片及应变接线图如图 12 所示。应力检测结果与仿真分析结构对比如表 2 所示。主梁跨中挠度测试值为 0.050 m,小于与仿真分析结果 0.066 m-0.008 m=0.058 m(0.008 m 为主梁支点下挠值),其原因在于有限元计算时,箱梁重量以集中力的方式施加,移梁机实际作业时,吊具与主梁接触面具有一定宽度,采用集中力的方式加载偏于安全。



图 12 移梁机试验照片及应变接线图

表 2 应力检测结果与仿真分析对比

位置	应力(MPa)		备注
	检测	仿真	
主梁跨中上翼板	102	110	
支腿上端内侧竖板	153	188	检测项应力值已叠
支腿中部竖板	82	90	加自重应力
支腿过渡段	70	53	

由表 2 可知,主梁跨中和支腿中部位置的检测应力与仿真分析结果基本吻合,说明利用梁单元建

立整体模型可以真实地掌握了解结构受力的总体情况。支腿上端内侧竖板实测应力小于仿真分析结果,其原因在于梁单元不能详细体现复杂部位的结构组成,有限元仿真分析结果存在局部应力略高现象(如图 4(a)支腿上端局部区域),而实际结构利用多道竖向筋板将荷载进行了分载;支腿过渡段实测应力大于仿真分析结果,究其原因因为支腿过渡段为四棱体向八棱体过渡的组合结构,为保证结构的局部稳定性,内设多道加劲板,焊缝较多,导致贴片位置存在应力集中现象,故测试得到的应力大于仿真分析结果。待移梁机多次受载后,由焊缝引起的应力集中体现可以得到一定程度的释放。

5 结 论

本文利用 ANSYS 有限元分析软件,对移梁机重载起吊及走行工况进行了力学性能仿真分析,并与移梁机现场加载试验结果进行了对比。结果表明,结合实际作业工况,在合理设置计算参数的基础上,可以利用 ANSYS 有限元分析软件正确仿真模拟移梁机作业过程中的力学性能,对移梁机等桥梁运架设备的设计开发具有一定的参考借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 陈士通,刘嘉武,孙志星. GJY900 型铁路客运专线轮轨式提梁机[J]. 工程机械, 2007, 38(6): 18-20.
- [2] 江 涛,赵素梅,周 恒,等. MG900型提梁机的设计及应用[J]. 建筑机械化, 2013, 34(2): 64-65.
- [3] 徐光兴,崔 巍,陈士通. MT900/41.5轮轨式提梁机[J]. 建筑机械, 2009, (4): 91-93.
- [4] 张建超,王 军,刘 涛,等. 造桥机结构的有限元仿真分析[J]. 图学学报, 2013, 34(4): 98-104.
- [5] 陈士通,孙志星,李向东,等. 基于线刚度比的提梁机结构动力特性分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(11): 77-81, 97.
- [6] 朱会文,黄启良,王宗彦,等. 机械装备金属结构有限元建模策略研究与应用[J]. 图学学报, 2013, 34(5): 143-147.