

文章编号:1673-2049(2017)02-0018-08

空间管桁架结构体育馆施工全过程模拟分析与健康监测

王秀丽^{1,2}, 荣子豪^{1,2}, 杨本学^{1,2}, 罗崇德³, 周岩⁴, 吴小燕⁵

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省建设投资(控股)集团总公司, 甘肃 兰州 730050; 4. 甘肃第六建设集团股份有限公司, 甘肃 兰州 730046; 5. 甘肃建投钢结构有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用有限元软件 ABAQUS 中的生死单元法模拟空间管桁架结构施工过程的吊装阶段,把模拟得出的杆件应力与节点位移结果作为模拟施工过程卸载阶段的初始条件。利用支座位移法对卸载阶段进行模拟,同时对比了3种卸载方法,并将分级分步卸载方法的模拟数据与健康监测数据进行对比,验证了模拟方法的可行性。结果表明:以吊装阶段结果为初始条件的卸载过程模拟可以找出临时支撑上部在施工过程中受往复荷载的杆件,施工中应增强这部分杆件的加固措施;分级分步卸载可以防止结构杆件应力与节点位移变化过快,避免整体结构由此产生设计中未考虑到的动力响应;模拟结果与实际健康监测数据较为吻合,分级分步卸载为最佳的卸载方案,在实际工程中更为适用。

关键词:空间管桁架结构;施工过程;数值模拟;健康监测;生死单元法

中图分类号:TU393.3 **文献标志码:**A

Whole Process Simulation Analysis and Health Monitoring of Spatial Pipe Truss Structure Gymnasium

WANG Xiu-li^{1,2}, RONG Zi-hao^{1,2}, YANG Ben-xue^{1,2}, LUO Chong-de³, ZHOU Yan⁴, WU Xiao-yan⁵

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Gansu Construction Investment (Holding) Group Corporation, Lanzhou 730050, Gansu, China; 4. Gansu Sixth Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730046, Gansu, China; 5. Gansu Construction Investment (Holdings) Group Corporation Steel Structure Co., Ltd, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The hoisting stage during construction process of spatial pipe truss structure was simulated by the birth and death element method in the finite element software ABAQUS. The simulation results of member bar stress and node displacement were used as the initial conditions for the unloading stage of simulation construction process. The unloading stage was simulated by the support displacement method. At the same time, the differences of the three unloading methods were compared. The feasibility of simulation method was verified by comparing the simulation data of the step by step unloading method with the health monitoring data. The results show that the simulation of unloading process with the hoisting stage results as initial conditions

收稿日期:2016-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51278236);甘肃省科技支撑计划项目(1504GKCA040)

作者简介:王秀丽(1963-),女,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangxl9104@163.com。

can be used to find out the member bars subjected to cyclic loading on the upper part of support in the construction process, and the strengthening measures of the member bars should be strengthened. The step by step unloading can prevent the stress of structural member bar and the displacement of node change too fast, and avoid the dynamic response of overall structure which is not taken into account in design. The simulation results agree well with the actual health monitoring data. The step by step unloading is the optimal unloading scheme which is more suitable for practical engineering.

Key words: spatial pipe truss structure; construction process; numerical simulation; health monitoring; birth and death element method

0 引言

近年来,随着土木工程技术水平迅速提高,各种空间结构向着大型化、复杂化的方向发展,大跨度空间结构的建造及其采用的技术已成为衡量一个国家建筑技术水平的重要标志^[1]。在中国产生了一批大跨度空间结构建筑^[2-5],如国家体育场、国家大剧院、上海新国际博览中心、国家游泳中心等。这些新型空间结构建筑无论是在设计阶段还是在施工阶段都对现行的设计规范、施工技术提出了新的要求,使得建筑业面临着新的问题^[6-7],那就是如何模拟空间结构的整个施工全过程。空间结构的施工阶段主要可分为2个阶段:吊装阶段和卸载阶段。这2个阶段都直接影响着空间结构的成形以及成形后的受力和变形情况^[8-9]。如果没有对施工过程进行准确的提前分析,就会在施工时产生没有预料到的偏差,导致成形情况与设计不符,因此需要在施工前对施工的全过程进行模拟。目前,学者对各种空间结构的施工过程模拟分析进行了大量研究,如伍小平等^[10]对国家大剧院钢壳体的施工全过程进行了模拟,在吊装阶段对比了静态分析与动态分析的差异;钱稼茹等^[11]对北京大学体育馆钢屋盖进行了基于ANSYS的施工过程模拟,为其刚性环的成功卸载提供了理论依据;田黎敏等^[12-13]讨论了路径效应对施工过程的影响;刘学武等^[14-15]对CCTV新台址主楼双Z形空间复杂结构进行了施工过程分析;王秀丽等^[16]对西宁体育馆的施工加载阶段进行了模拟,并与监测数据进行了对比;罗尧治等^[17-18]对空间结构健康监测与预警评估进行了研究与系统开发。

在实际工程中,由于吊装阶段完成时桁架杆件已产生应力和位移,在此基础上进行卸载可能导致部分杆件产生反复荷载,对杆件的破坏较大。目前的研究分析通常是把吊装阶段和卸载阶段分开进行,没有考虑吊装阶段的应力、变形情况对卸载阶段

的影响。本文利用有限元软件ABAQUS中的生死单元法对空间结构吊装阶段进行模拟分析,相比把工程每个施工阶段的模型当成一个分析模型单独模拟的静态模拟方法,采用生死单元法的模拟方法属于动态模拟方法,使结果更接近实际。同时以吊装阶段的分析结果为卸载阶段模拟的初始条件,基于杆件应力与关键点位移对比3种卸载方法对整体结构造成的影响。确定最佳卸载方案同时与实际监测数据进行对比,验证模拟方法的可行性。基于临夏体育馆空间管桁架结构,对其施工全过程进行分析,得到了施工过程中比较危险的阶段点,为保证施工过程的安全顺利进行提供理论依据,同时也为同类型空间结构施工全过程模拟提供参考。

1 施工方案介绍

1.1 工程概况

临夏体育馆项目屋盖采用大跨度空间管桁架结构,该结构受力合理,传力简洁。主体结构最短轴约92 m,最长轴约156 m。主体结构最外边缘南北悬挑约8.01 m,东西悬挑约21.60 m,屋盖最高点结构标高22.4 m。主体结构包括了主桁架、次桁架、环桁架以及支撑杆件,如图1所示。主桁架主要采用倒三角管桁架形式,次桁架采用单片式管桁架形式。每榀主桁架坐落在2根混凝土柱上,通过铰支座或滑动支座连接固定。部分次桁架悬挑段也与混凝土柱连接,连接点采用滑动支座。

1.2 施工方案

1.2.1 吊装阶段

根据工程结构特点,将屋盖钢结构分为4个区域,其中3~14轴为主桁架结构区域(A区),以中轴线分为A1,A2两个区域。3~14轴以外为次桁架悬挑结构区域,分为B1,B2两个区域。

整个钢结构主要构件为14榀主桁架、次桁架及外围2圈环桁架,径向主桁架为倒三角截面形式,次

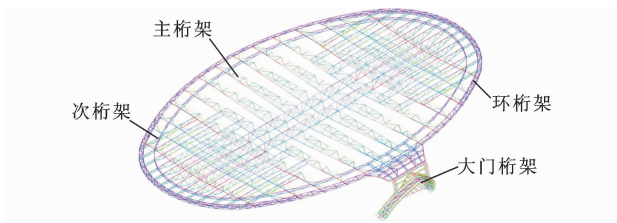


图 1 主体结构桁架

Fig. 1 Trusses of Main Structure

桁架为单片桁架。现场安装分为 2 条施工路线,首先安装 A1 区,顺时针从 3 轴位置逐步完成该区域桁架安装工作,然后主吊机转至 A2 区域,从 16 轴位置逐步完成该区域桁架安装工作。与此同时,B2 区次吊机首先安装悬挑环桁架,待 A1 区主桁架安装完成,为 B2 区次桁架安装提供作业面后,沿顺时针方向安装悬挑区域次桁架,最后以同样的顺序安装 B1 区钢结构,如图 2 所示。

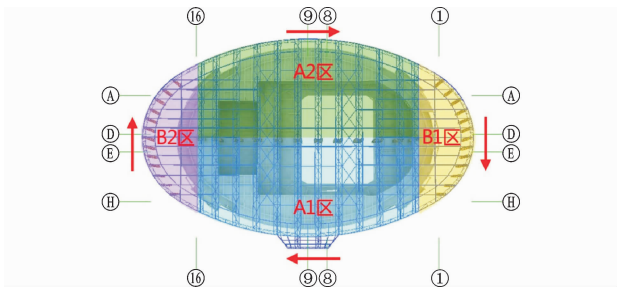


图 2 施工顺序

Fig. 2 Construction Sequence

1. 2. 2 卸载阶段

针对本文项目的空间管桁架结构,提出了 3 种卸载方案,包括分级分步卸载、同级分步卸载、分级同步卸载。

(1)分级分步卸载

分级分步卸载为采用千斤顶分步卸载,计算每榀主桁架跨中支撑胎架处的理论卸载值,根据最大卸载值确定卸载的分级数(每级最大卸载 15~20 mm)。图 3 为胎架布置。通过千斤顶的回程来控制屋面的变形,实现分阶段整体分级分步卸载。分别从胎架 TJ-6,TJ-7 开始,同时对称向两侧进行第 1 级卸载,再按照以上顺序,进行第 2 级、第 3 级卸载。胎架卸载顺序为:TJ-6,TJ-7→TJ-5,TJ-8→TJ-4,TJ-9→TJ-3,TJ-10→TJ-2,TJ-11→TJ-1,TJ-12→TJ-23,TJ-24→TJ-15,TJ-20→TJ-14,TJ-16,TJ-19,TJ-21→TJ-13,TJ-17,TJ-18,TJ-22→TJ-25。根据重力荷载和施工荷载作用在主体结构上而产生的支撑点上的位移量来确定总卸载量,再确定分级卸载量。

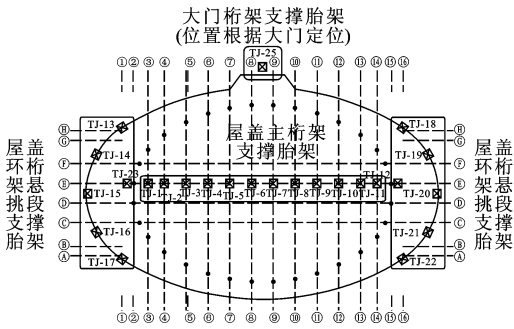


图 3 胎架布置

Fig. 3 Arrangements of Bed-jigs

(2)同级分步卸载

同级分步卸载不分级数,1 次卸载量即为总卸载量。卸载顺序同级分步卸载。

(3)分级同步卸载

分级同步卸载根据各胎架的总卸载量确定分级数,所有胎架同时进行第 1 级卸载,然后依次同时进行第 2 级、第 3 级卸载。

2 吊装阶段

2. 1 模型建立

本文项目中的管桁架主材为热轧无缝钢管,材质均为 Q345C 钢,采用考虑强化的双斜线模型,屈服强度为 345 MPa,极限强度为 490 MPa。根据不同杆件的截面情况,赋予不同的截面属性。根据管桁架的受力情况,模拟采用梁单元 B31,每个节点有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。根据实际设计情况,确定结构的约束条件,其中支座 1~4 为固定支座,支座 5~8,11~14 为单向约束支座,支座 9,10 为活动支座,ABAQUS 所建有限元模型如图 4 所示。钢结构屋盖屋面恒载为 0.5 kPa,活载为 0.6 kPa。除了钢结构屋盖本身的重力荷载外,保守起见,考虑了施工荷载,施工荷载取屋面恒载的 30%。

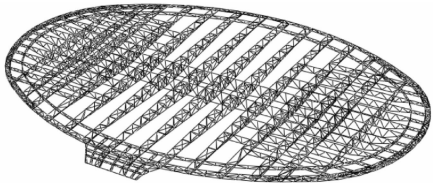


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model

2. 2 生死单元法

利用有限元软件 ABAQUS 中的生死单元法对施工过程的吊装阶段进行模拟。生死单元法是在建立模型时先把结构模型整体建立,然后“杀死”在第 1 步中不需要的单元,随着逐步“激活”在各分析步

中需要的单元,最终“激活”整个模型。生死单元法的“杀死”单元实际是给单元刚度矩阵乘以一个很小的系数,使这部分单元在计算中不发挥作用^[19-20]。这种方法可以模拟已吊装部分的变形导致其后部分吊装位置的改变情况,使模拟情况更符合实际。

2.3 观测点布置

选取最具代表性的主桁架 ZHJ08 与次桁架 CHJ8(图 5),在其上选取关键点进行观测,测点布置如图 6 所示。

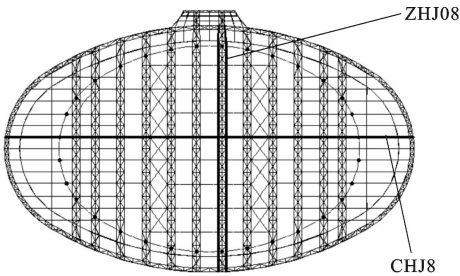


图 5 主桁架 ZHJ08 与次桁架 CHJ8

Fig. 5 Primary Truss ZHJ08 and Secondary Truss CHJ8

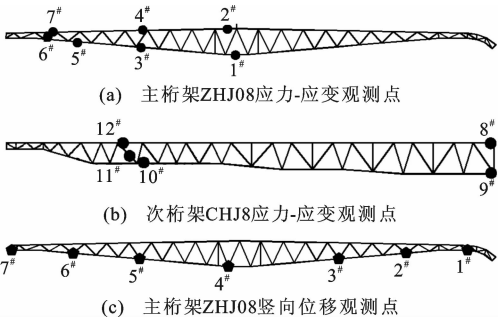


图 6 测点布置

Fig. 6 Arrangement of Measuring Points

2.4 模拟结果

根据本文项目实际施工过程的吊装分区,把模拟过程分为 5 个阶段,第 1 阶段吊装 A1 区域的主桁架和 B2 区域的环桁架,第 2 阶段吊装 A2 区域的主桁架和 B1 区域的环桁架,第 3 阶段吊装次桁架,第 4 阶段吊装 A1 和 A2 区域的环桁架,第 5 阶段吊装大门上半部分。模拟应力结果如图 7 所示。

吊装各阶段的杆件最大应力与最大位移如表 1 所示。由模拟结果可以看出,第 1 阶段结构应力最大值出现在 B2 区域的环桁架末端,应力值为 82.1 MPa。这是由于第 1 阶段结构还未形成稳定的整体结构。环桁架处于单独支撑在胎架之上,没有次桁架的侧向约束,环桁架末端处于悬臂状态,所以受力较大,符合实际情况。第 2 阶段吊装了与第 1 阶段吊装区域对称的 A2 和 B1 区域,使整体结构逐渐趋于稳定,应力最大值出现在主桁架中间区域的腹杆

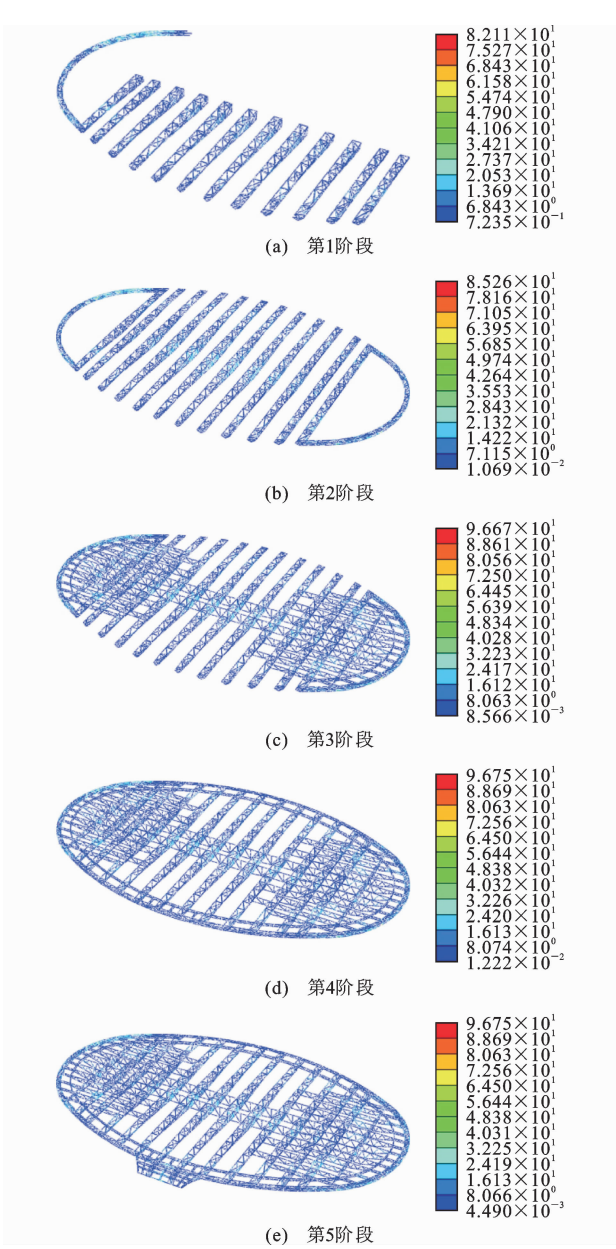


图 7 吊装阶段应力(单位:MPa)

Fig. 7 Stresses at Hoisting Stage (Unit:MPa)

表 1 杆件最大应力和最大位移模拟结果

Tab. 1 Simulation Results of Maximum Stresses and Displacements of Bars

吊装阶段	杆件最大应力/MPa	杆件最大位移/mm
第 1 阶段	82.1	95.1
第 2 阶段	85.3	102.7
第 3 阶段	96.7	104.1
第 4 阶段	96.8	105.6
第 5 阶段	96.8	105.6

部分。由于主桁架中间区域有胎架进行支撑,所有中间腹杆会出现受压的情况。第 3 阶段吊装次桁架,整体结构已基本达到稳定,受力情况已与成形后的管桁架结构一致。第 4,5 阶段形成整体结构,结

构已达稳定状态。在吊装阶段应力较大值出现在 B1 和 B2 区域的环桁架末端以及主桁架中间部分的腹杆。因此,在施工过程中应对这些区域重点观察,防止出现杆件应力过大或受压杆件失稳的情况出现。

以第 5 阶段末的结构受力和变形状态为卸载阶段模拟的初始条件,在此基础上对结构进行 3 种卸载方式的模拟。

3 卸载阶段

空间结构的卸载阶段就是拆除胎架的阶段,这一阶段实则为结构的加载阶段,也是整体结构最重要、最危险的施工阶段,这一阶段完成的好坏直接影响着整体结构成形后的受力、变形情况^[21]。为了确定本文项目的最佳卸载方案,基于支座位移法对临夏体育馆屋盖结构的卸载进行分级分步卸载、同级分步卸载、分级同步卸载 3 种方法的卸载,对比结果,找出最为合理的卸载方案。

3.1 支座位移法

建模时无需建立临时胎架,只需在胎架处设置限制竖向位移的支座。计算时通过对支座施加竖向位移来模拟卸载时胎架的拆除^[22]。这种方法建模简单,对多数空间结构都适用。

3.2 模拟结果

3.2.1 应力分析

由有限元软件 ABAQUS 模拟 3 种卸载方法,对比观测点数据,列出关键点应力数据,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,卸载阶段空间管桁架结构上弦杆受压,下弦杆受拉,腹杆受压(2[#], 4[#], 7[#], 8[#], 12[#]为上弦杆;1[#], 3[#], 5[#], 9[#], 10[#]为下弦杆;6[#], 11[#]为腹杆)。支座处 6[#]腹杆、主桁架中间部分的 2[#]上弦杆和 1[#]下弦杆以及变截面 3[#]下弦杆受力较大。特别是主桁架中间部分的 2[#]上弦杆和 1[#]下弦杆出现了吊装阶段和卸载阶段拉应力、压应力交错的情况,在吊装阶段 2[#]上弦杆和 1[#]下弦杆由于下部胎架的支撑,使其在吊装阶段的受力状态出现与设计时相反的情况,而卸载阶段随着胎架的拆除,受力状态逐渐恢复为设计时的受力状态,施工时对这些部分应当更加注意。其余所有杆件应力观测点受力最大处为 3[#]下弦杆,但未超过 80 MPa,处于安全受力状态。

对比 3 种卸载方法,其中分级分步卸载应力会出现阶梯式变化,即卸载位置在观测点附近时变化较大,当卸载位置不在观测点附近时,应力变化量较

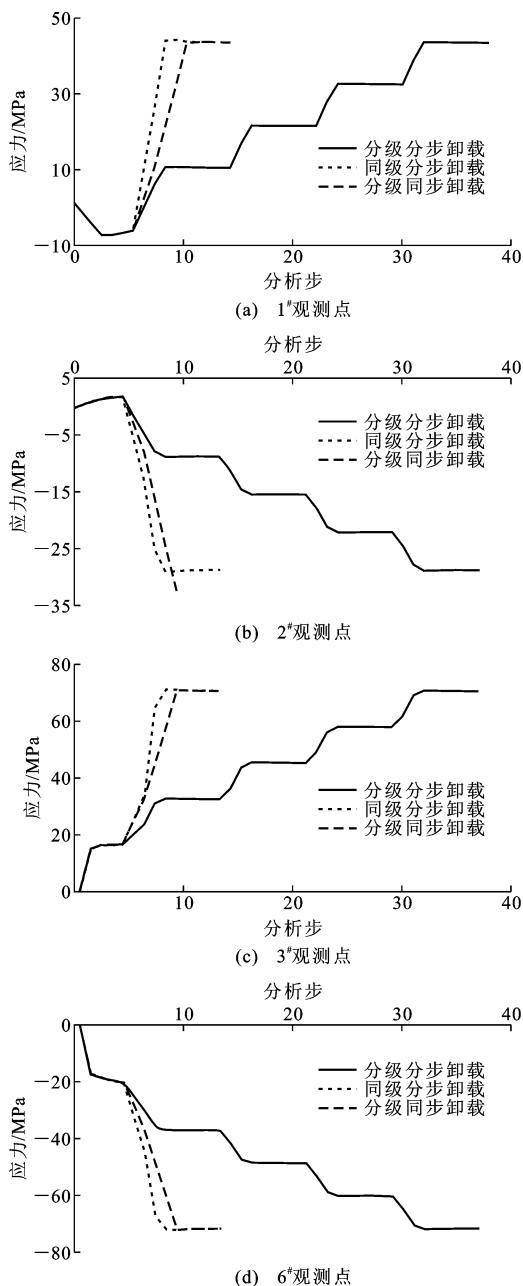


图 8 观测点应力

Fig. 8 Stresses of Observation Points

小。同级分步卸载时间较分级分步卸载短暂,最后达到的应力极限与分级分步卸载时相似。分级同步卸载时间更为短暂,最后应力极限与其余 2 种卸载方式相似。通过对比 3 种卸载方法,可以得出同级分步卸载和分级同步卸载时间较为短暂,应力变化较快,对于整体结构而言,在卸载时对结构产生较大的影响,甚至会产生动力荷载作用,对整体结构不利,建议施工卸载时使用分级分步卸载方法。

3.2.2 位移分析

从所有位移观测点中选取位于主桁架一侧的 4 个观测点数据进行对比,结果如图 9 所示。

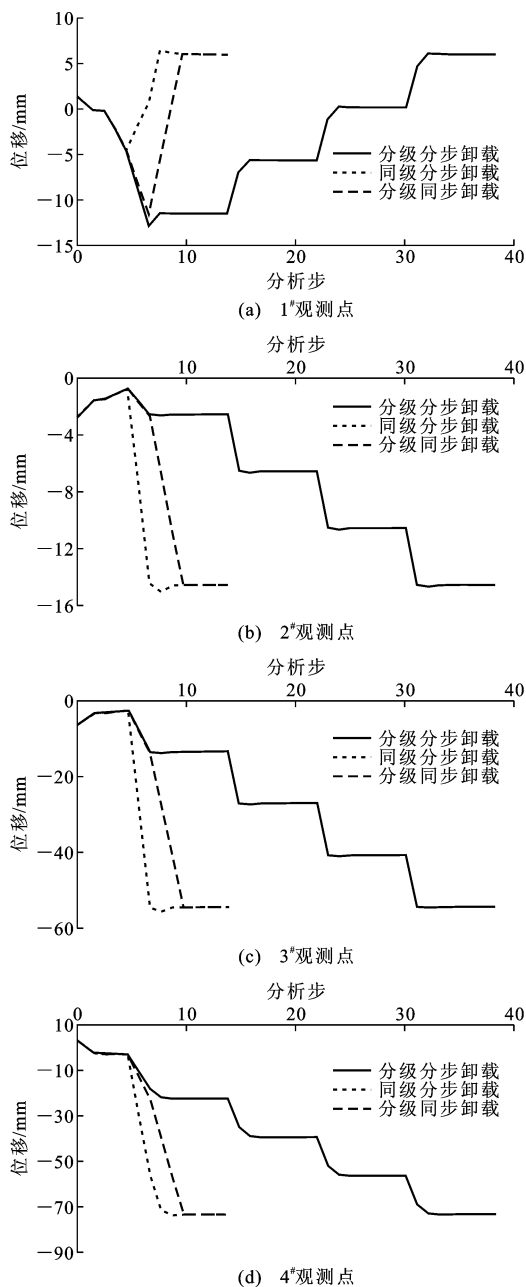


图9 观测点位移

Fig. 9 Displacements of Observation Points

4个观测点位于主桁架一侧,其中1#点位于最外侧。由图9可以看出,在吊装阶段与卸载阶段后期1#点的竖向位移向上,这是由于胎架的存在使1#点成为了悬臂端,由于支座和胎架中间主桁架部分竖向向下的位移使得支座外悬臂端1#点竖向位移向上,与实际相符,其余各点的竖向位移均向下。

由图9还可以看出,分级分步卸载的位移出现了同应力变化相似的阶梯式变化,且分级分步卸载不会使结构的位移变化过快,导致设计阶段未预见的动力荷载出现。建议卸载时采用分级分步卸载方法。

3.3 健康监测

本文项目的实际卸载采用分级分步卸载。为保证卸载时结构整体安全性^[23],利用钢弦应力传感器(图10)对关键杆件的应力情况进行了健康监测。健康监测数据与数值模拟数据对比结果如图11所示。由图11可以看出:实际分级分步卸载应力会发生阶梯式变化,这与数值模拟结果相符;实际监测数据与数值模拟数据相差不大,验证了数值模拟方法的可行性。



图10 钢弦应力传感器

Fig. 10 Steel String Stress Sensor

4 结语

(1)利用有限元软件 ABAQUS 中的生死单元法可以模拟空间管桁架结构的吊装阶段,数值模拟结果表明结构在吊装时 B1 和 B2 区域的环桁架处于受力较大状态,施工过程中应引起注意,防止环桁架腹杆因受压过大而导致失稳破坏。

(2)以吊装阶段的应力和变形情况为初始条件分析卸载过程,可以分析出部分杆件会受到往复荷载作用,在实际施工中应加强重视。

(3)分级分步卸载方法可以使主体结构的应力呈现阶梯式变化,防止结构内力变化过快和因主体结构产生未在设计中考虑到的动力荷载而使主体结构产生破坏。

(4)对空间管桁架结构进行了健康监测,实际监测数据与数值模拟数据较为吻合,验证了分级分步模拟方法的正确性。

参考文献:

References:

- [1] 蓝天,张毅刚.大跨度屋盖结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
LAN Tian,ZHANG Yi-gang. Seismic Design of Long Span Roof Structures[M]. Beijing: China Architect-

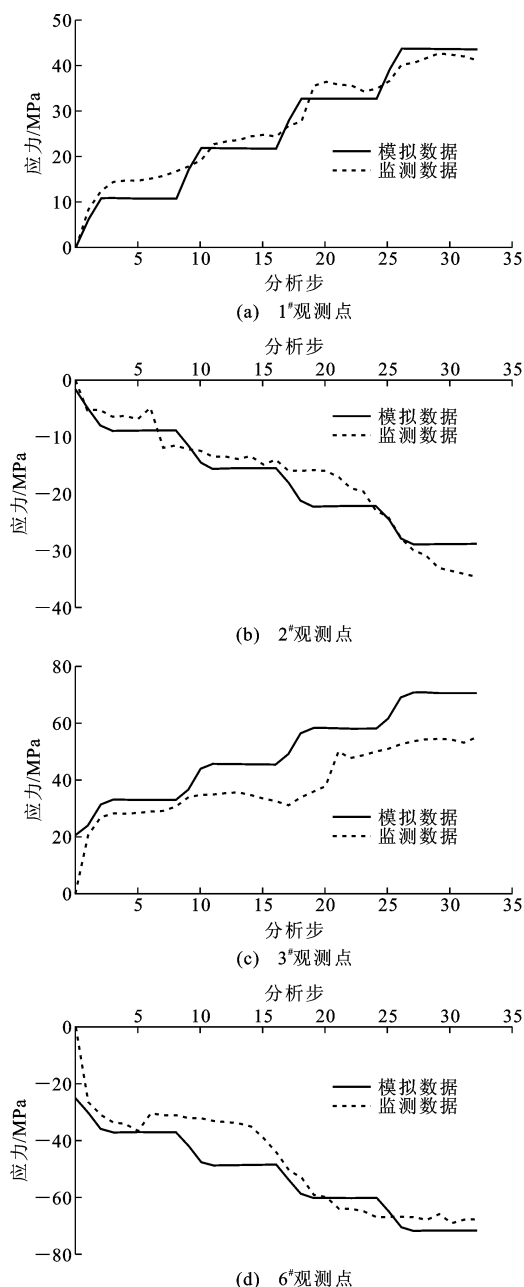


图 11 应力对比

Fig. 11 Comparisons of Stresses

ture & Building Press, 2007.

- [2] 范重, 刘先明, 胡天兵, 等. 国家体育场钢结构施工过程中模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 134-143.

FAN Zhong, LIU Xian-ming, HU Tian-bing, et al. Simulation Analysis on Steel Structures Erection Procedure of the National Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 134-143.

- [3] 郭彦林, 刘学武, 赵瑛, 等. 国家体育场钢结构安装方案研究[J]. 施工技术, 2006, 35(12): 23-27.

GUO Yan-lin, LIU Xue-wu, ZHAO Ying, et al. Study on Erection Schemes for the Steel Structure of Na-

tional Stadium[J]. Construction Technology, 2006, 35(12): 23-27.

- [4] 伍小平, 高振锋, 李子旭, 等. 国家大剧院钢壳体安装中卸载方案分析[J]. 建筑施工, 2005, 27(6): 6-8.

WU Xiao-ping, GAO Zhen-feng, LI Zi-xu, et al. Analysis of Load-relieving Proposal for Installation of Steel Structured Shell of the National Grand Theatre [J]. Building Construction, 2005, 27(6): 6-8.

- [5] 蒋金生, 叶可明. 上海新国际博览中心钢桁架结构的施工及临时支拆拆除的卸载过程分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 118-122.

JIANG Jin-sheng, YE Ke-ming. Construction Method and Dismantling Process Analysis of Temporary Shoring Structure for the Roof of Shanghai New International Expo Center [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 118-122.

- [6] 董石麟, 邢栋, 赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J]. 空间结构, 2012, 18(1): 3-16.

DONG Shi-lin, XING Dong, ZHAO Yang. Application and Development of Modern Long-span Space Structures in China [J]. Spatial Structures, 2012, 18(1): 3-16.

- [7] 董石麟. 中国空间结构的发展与展望[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 38-51.

DONG Shi-lin. Development and Expectation of Spatial Structures in China [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 38-51.

- [8] 周观根, 陈湘, 王永梅, 等. 南昌国际体育中心体育场大悬挑钢桁架施工关键技术[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 78-81.

ZHOU Guan-gen, CHEN Xiang, WANG Yong-mei, et al. Key Construction Technology for the Steel Truss with Large Cantilever on the Stadium of Nanchang International Sports Center [J]. Construction Technology, 2010, 39(8): 78-81.

- [9] 周观根, 姚谏. 建筑钢结构制作工艺学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

ZHOU Guan-gen, YAO Jian. Fabrication Technology of Construction Steel Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

- [10] 伍小平, 高振锋, 李子旭. 国家大剧院钢壳体施工全过程模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 40-45.

WU Xiao-ping, GAO Zhen-feng, LI Zi-xu. The Analysis of Whole Erection Process for Steel Shell of National Grand Theatre [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(5): 40-45.

- [11] 钱稼茹, 张微微, 赵作周, 等. 北京大学体育馆钢屋盖施工模拟与监测[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 13-

- 20.
- QIAN Jia-ru, ZHANG Wei-jing, ZHAO Zuo-zhou, et al. Simulation and Monitoring for the Construction of the Steel Roof of the Peking University Gymnasium[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 13-20.
- [12] 田黎敏, 郝际平, 陈 韬, 等. 世界大学生运动会主体育场施工过程模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 70-77.
- TIAN Li-min, HAO Ji-ping, CHEN Tao, et al. Simulation Analysis on Erection Procedure of Main Stadium for the Universiade Sports Centre[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 70-77.
- [13] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 105-108.
- WANG Guang-yuan. On Mechanics of Time-varying Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 105-108.
- [14] 刘学武, 郭彦林, 张庆林, 等. CCTV 新台址主楼施工过程中结构内力和变形分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(9): 22-29.
- LIU Xue-wu, GUO Yan-lin, ZHANG Qing-lin, et al. Analysis of Internal Force and Deformation for the New CCTV Headquarters During the Construction Process[J]. Industrial Construction, 2007, 37(9): 22-29.
- [15] 郭彦林, 刘学武, 刘禄宇, 等. CCTV 新台址主楼钢结构施工变形预调值计算的分阶段综合迭代法[J]. 工业建筑, 2007, 37(9): 16-21.
- GUO Yan-lin, LIU Xue-wu, LIU Lu-yu, et al. Analysis Method of Pre-set Construction Deformation Values for the New CCTV Headquarters[J]. Industrial Construction, 2007, 37(9): 16-21.
- [16] 王秀丽, 李 瑛, 杨文伟. 大跨钢结构施工加载健康监测及模拟分析[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 49-54.
- WANG Xiu-li, LI Ying, YANG Wen-wei. Health Monitoring and Simulation Analysis over Construction Loading Process for Long-span Steel Structure[J]. Spatial Structures, 2012, 18(4): 49-54.
- [17] 罗尧治, 沈雁彬, 童若飞, 等. 空间结构健康监测与预警技术[J]. 施工技术, 2009, 38(3): 4-8.
- LUO Yao-zhi, SHEN Yan-bin, TONG Ruo-fei, et al. Health Monitoring and Early Warning Technology in Spatial Structure[J]. Construction Technology, 2009, 38(3): 4-8.
- [18] 苑佳谦. 大跨度空间结构灾害预警评估理论与系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- YUAN Jia-qian. Theoretical Research and System Development on Safety Assessment and Early Warning in Spatial Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [19] 郑 江. 复杂刚性钢结构施工过程力学模拟及计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- ZHENG Jiang. Research of Mechanics Emulation and Calculating Methods During Construction Process of Complex Rigid Steel Structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [20] 郝际平, 田黎敏, 郑 江. 深圳大运中心主体育场施工过程模拟分析[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 52-54.
- HAO Ji-ping, TIAN Li-min, ZHENG Jiang. Simulation Analysis of Construction Process of Shenzhen Universiade Sports Center Main Stadium[J]. Construction Technology, 2010, 39(8): 52-54.
- [21] 王秀丽, 仲海民. 大跨度钢屋盖卸载方案及现场监测[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(6): 108-111.
- WANG Xiu-li, ZHONG Hai-min. Unloading Plan of Large Span Steel Roof and Its Field Monitoring[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(6): 108-111.
- [22] 刘学武, 郭彦林, 郭宇飞. 千斤顶单元法在大跨度钢屋盖拆撑过程数值模拟中的应用[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 24-28, 33.
- LIU Xue-wu, GUO Yan-lin, GUO Yu-fei. Application of Jack Element Model for Numerical Simulation of Removing Temporary Supports of Large-span Steel Roof[J]. Construction Technology, 2010, 39(8): 24-28, 33.
- [23] 刘 涛. 大跨度空间结构施工的数值模拟与健康监测[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- LIU Tao. Numerical Simulation and Health Monitoring in Construction Process of Large-span Space Structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.