

大跨度复杂钢结构施工力学模拟的研究与应用

田黎敏^{1,2}, 郝际平^{1,2}, 郑江¹, 王先铁¹, 钟炜辉¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要:随着我国经济的发展,大跨度空间钢结构的形式也日趋复杂,施工过程对结构的影响不能忽略. 结构施工过程中的力学问题属于施工力学的范畴,是耦合了时间与空间的四维分析. 采用施工力学方法对三个大跨度复杂钢结构工程进行施工过程跟踪模拟分析,同时将有限元计算结果同实际监测结果进行对比. 研究表明:进行施工过程模拟分析不仅可以优化施工方案,而且可以保证施工过程中结构的安全并使成型结构的内力和变形满足设计要求. 在此基础上,给出一些关于大跨度复杂钢结构施工的建议和意见,为施工力学学科的研究和发展提供了参考.

关键词:大跨度钢结构;施工力学;力学模拟;有限单元法

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)03-0324-07

大跨度空间钢结构的形式复杂,施工周期长,建造过程中随着结构几何形态的变化,其荷载、刚度以及边界条件是分步形成的,呈现出时变的特性. 此时投入使用时的状态与施工过程中的状态不完全吻合,仅仅按照传统设计方法考虑整体结构建模,进行一次性施加荷载是远远不够的,即使结构成型,其变形和内力也与设计值相差较大,会使结构偏不安全. 特别是对于悬挑较大的大跨度复杂结构,结构在施工过程中可能由于丧失稳定而倒塌,或因为成型后内力和变形过大而表现出较高的风险. 因此利用合理的分析方法对结构进行施工过程的跟踪模拟分析,考虑“时间效应”和“路径效应”的影响是很有必要的. 本文采用施工力学方法对三个大跨度复杂钢结构工程进行施工过程模拟分析,同时将有限元计算结果同实际监测结果进行对比,验证了分析结果的正确性. 在此基础上,给出一些关于大跨度复杂钢结构施工的建议和意见,为施工力学学科的研究和发展提供了参考.

1 时变结构力学

时变结构力学是四维(三维空间和时间序列)力学分析过程,包括以下研究领域^[1-4]: (1)快速时变结构力学:结构状态或参数随时间变化迅速; (2)慢速时变结构力学:可采用离散性的时间冻结法近似处理结构随时间缓慢变化的过程; (3)超慢速时变结构力学:结构状态或参数随时间变化极其缓慢,即考虑腐蚀、裂缝、损伤以及材料老化等因素对结构的影响. 施工过程的力学模拟是力学理论与土木工程实践相结合的产物,主要研究结构几何形态、物理参数、边界条件随时间的变化,属于慢速时变结构力学的研究范围. 当材料非线性和几何非线性对结构施工过程的影响可以忽略时,施工力学分析属于线弹性时变力学,反之属于非线性时变力学. 对于大跨度复杂钢结构,材料通常处于线弹性状态,因此重点考虑几何非线性的影响.

2 算法概述

计算结构在成型过程中的内力发展和变形变化时,施工力学的一种常用分析方法是对结构进行施工全过程跟踪模拟分析,为施工过程的合理性提供理论依据,也为最不利构件的监测提供评判依据. 传统的施工模拟仅仅分析了每个施工子步下局部结构的内力和变形,并没有考虑施工步间的相互影响,而

收稿日期:2011-09-22 修改稿日期:2012-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178381);高等学校博士学科点专项科研基金(20096120110004)

作者简介:田黎敏(1983-),男,山西太原人,博士研究生,从事结构工程方面的研究.

现今的施工模拟分析已经克服了这一缺点,可以考虑后安装构件对已安装构件的影响,真正模拟施工的动态过程.施工力学以下几种分析方法^[5-10]:时变单元法、拓扑变化法以及一般有限单元法.施工力学主要采用一般有限单元法进行数值分析,这种方法具有域内全离散的特点,便于单元集合时采取增减单元的办法来实现解域的时变,现阶段已趋于成熟.

具体过程是先将结构的整体模型一次性在软件中给出,再按照相应的施工步骤把结构的杆件、边界条件以及荷载工况划分为不同的施工步,运算时只考虑所算施工步之前的变形和内力并且冻结了之后结构的所有构件,下一阶段的变形和内力随上一阶段进行调整.一个单元被冻结(钝化)并不意味着把该单元删除,而是将其刚度矩阵乘以某一个极小的因子,此时被钝化单元的质量、载荷以及比热等特性就被看成无限小的量,对其他单元不产生作用,相应的在模型求解过程中也不包括钝化单元的因子.同样,一个单元被激活也不是指在原有模型中添加新的单元,而是把之前钝化的单元激活,使质量、刚度等特性恢复默认值.有限单元法就是按照预计的施工步将正在安装的杆件激活,而将还未安装的杆件钝化,达到真实模拟施工的目的(基本过程如图1所示).

现以一个5层建筑的竖向柱为例进行分析,若整个建筑模型分别施加荷载后将其结果相加的话,则为一般设计分析(图2a);若考虑每层施工阶段,以累计的概念施加载荷再将结果相加的话,则为考虑各层施工阶段的分析过程(图2b).令各层上部荷载作用下的相对竖向位移值为1,并将两种分析下的竖向变形结果进行比较(图2c).图中竖向箭头为所加载荷,虚线为正在施工的楼层.

一般而言,大跨度空间结构的屋盖结构为钢结构,所以分析时可以考虑不用考虑材料的时变性,使得分析较为简化,但是由于结构成型后变形比较大,往往需要对施工过程中结构设置预调值(补正值),以达到控制结构位形的目的.仍以5层建筑竖向柱为例分析,某层变形预调值的大小是后期工序所施加的上部层荷载对其产生的竖向变形(图2c).

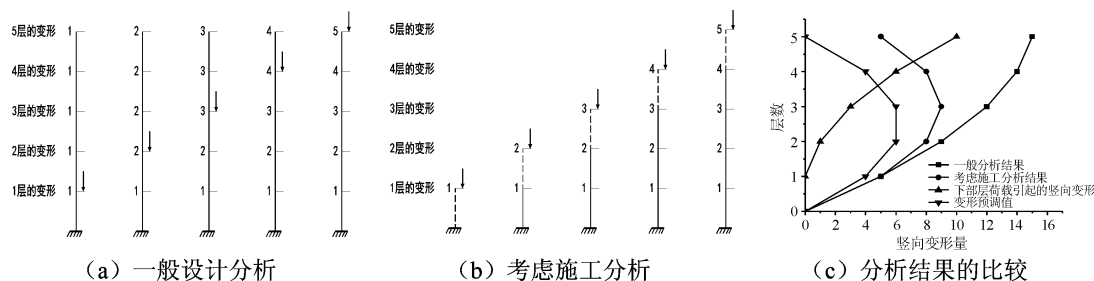


图2 一般设计与考虑施工分析结果

Fig. 2 Analytical design and results

由以上分析可知,考虑施工过程影响的分析结果和一般设计分析结果相差较大.在建造大跨度复杂钢结构时,设计人员必须对结构进行施工过程模拟分析,同时预测和控制施工过程的内力和变形变化,保证施工过程中结构的安全.

3 荷载分项系数的取值

《建筑结构可靠度设计统一标准》中荷载分项系数是根据有关基本变量的统计特征,以概率分析为基础经优选确定的.对于大跨度复杂钢结构体系,施工过程中主要承受自重荷载,可变荷载较小(二者相差较大),因此采用由永久荷载控制的组合进行承载能力极限状态分析.在大跨度复杂钢结构的施工过程中,缺陷效应^[11-12]对结构的影响较大,施工模拟时必须考虑.将缺陷进行局部分析虽然可以精确确定其对结构的影响效应,但这种方法计算量较大,而且确定缺陷有一定困难,需针对具体问题进行分析.

析. 为了保证考虑缺陷效应后的可靠指标不低于目标可靠指标, 建议在施工过程模拟分析时, 适当调整加大恒载分项系数至 1.5, 用以考虑缺陷效应产生的影响.

4 工程算例

4.1 深圳湾体育中心

深圳湾体育中心钢结构屋盖属于超大跨度空间钢结构体系, 采用单层空间变曲面弯扭斜交网格结构, 由单层网壳、双层网架(综合馆和游泳馆)及竖向支撑组成. 建筑平面尺寸约为 $500\text{ m} \times 240\text{ m}$, 空间变曲面弯扭箱型截面将主体育场、综合馆、游泳馆有机的结合在一起. 内部采用较少支撑形成大空间, 外部形成一个包裹, 形如“春茧”(图 3).

深圳湾体育中心单层网壳将下沉广场幕墙、游泳馆、综合馆、大树广场和主体育场由西向东连接为一体. 竖向支撑系统主要有四部分, 分别是支撑网壳的树形柱(4 分叉和 6 分叉)、支撑网架的 V 形柱、展望桥核心筒立柱和下沉广场西立面幕墙柱, 如图 4 所示. 由于结构的悬挑长度大, 竣工位形与设计位形存在一定的偏差, 这就要求分析时要考虑变形预调值, 对结构的位形进行控制. 对于此类跨度较大的复杂结构(对温度比较敏感), 还要进行合理分区, 施工时进行合拢分析, 重点考虑温度作用对合拢的影响.



图 3 整体效果图以及实际工程

Fig. 3 Overall rendering effect and actual engineering drawing

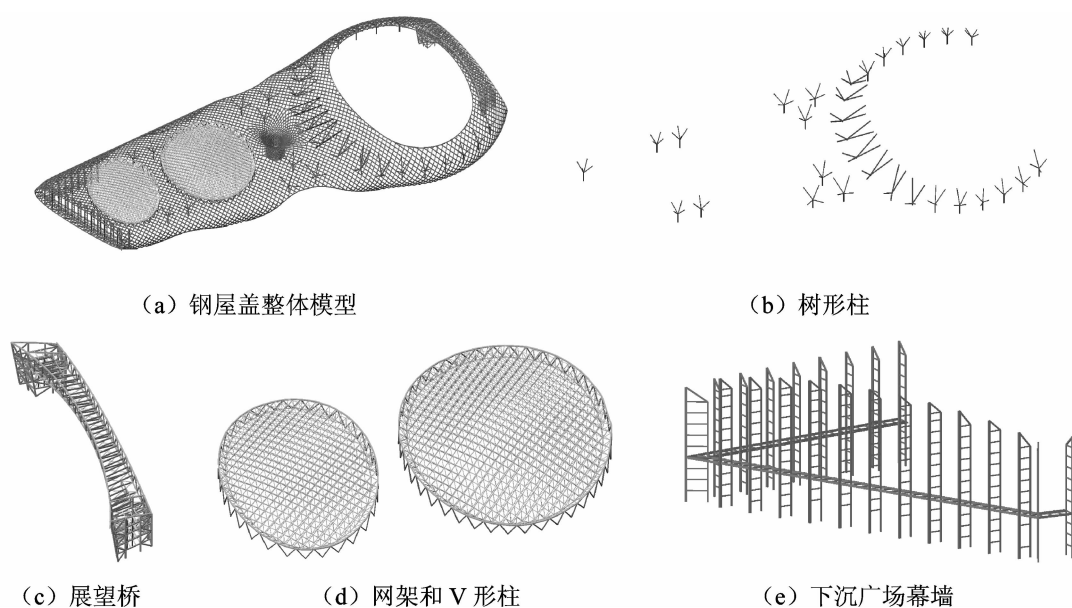


图 4 深圳湾体育中心钢结构体系

Fig. 4 System of steel structure

软件模拟施工过程时将整体结构分为 A、B 两个施工区, 按照先网壳后网架、先支撑后屋盖、先两边后中间的原则分别同时进行施工, 安装完成后进行合拢. 两个施工区均分为 10 个步骤进行施工过程模拟, 待两区合拢完成后再将单层网壳下部的临时支撑卸载. 图 5 给出了第 5 施工步下 A、B 两区结构单元应力.

通过分析, 得到结构在施工过程中的最大竖向变形为 -266 mm , 最大应力为 -207.34 MPa , 均发生在临时支撑的卸载阶段, 施工过程中杆件的最大应力比为 0.76, 整体结构合拢后其值有显著降低, 整

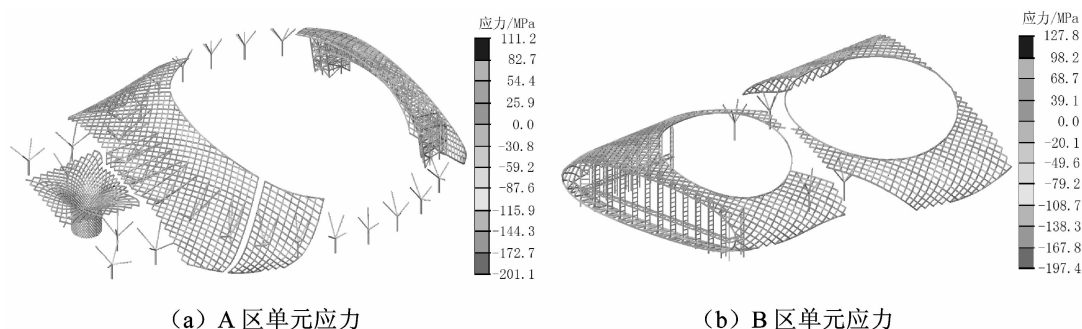


图5 第5施工步下A、B两区单元应力

Fig. 5 Stress of structure of the fifth construction step

体刚度明显增大. 由于将荷载基本组合的恒载分项系数取为 1.5, 所以建造过程中的实际监测数值要小于有限元计算值, 但建造过程中结构的整体变化趋势是完全相同的.

4.2 世界大学生运动会主体育场

世界大学生运动会主体育场钢屋盖属于单层折面空间网格体系. 建筑平面尺寸为 $274\text{ m} \times 289\text{ m}$, 最大悬挑跨度为 68.4 m , 整个钢结构屋盖与混凝土看台完全脱开, 由 20 个球铰支座支承, 荷载通过空间折面结构每个杆件的拉、压、弯传递到底部支座上(图 6). 在整个网壳合拢之前, 无法形成空间受力形态, 为了保证结构安全, 一定要设置大量的临时支撑(图 7)辅助施工.

对结构进行施工模拟时完全按照实际施工顺序进行, 即将整体结构以南北轴线为界, 划分为 A、B 两个施工区, 按照先内环后外环、先支撑后主体、先合拢后卸载的原则进行同步施工. 在施工力学模拟时, 为了提高计算的准确性, 将临时支撑同主体结构一同建入模型. 整个建造过程分为 15 个步骤(共有 82 个子步)进行, 前 12 步为安装施工步, 后 3 步为卸载施工步. 图 8 给出了结构的计算模型.

由于篇幅原因, 仅给出钢结构屋盖分级卸载过程中的部分计算结果, 并将有限元计算结果同实际监测结果进行比较, 给出 A2、B2 杆件在卸载施工过程中的应力对比和内环部分节点的竖向变形对比如图 9 所示. 其中, 0 施工步表示卸载前, 11 施工步表示卸载完的复测值.

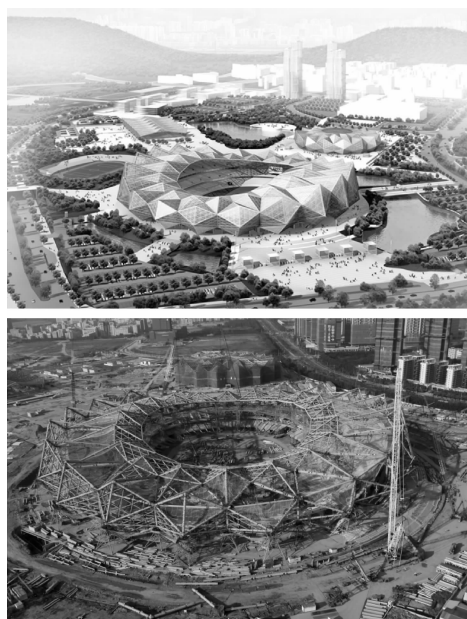


图6 整体效果图以及实际工程

Fig. 6 Overall rendering effect and actual engineering drawing



图7 现场内环支撑的安装

Fig. 7 Construction of support structure

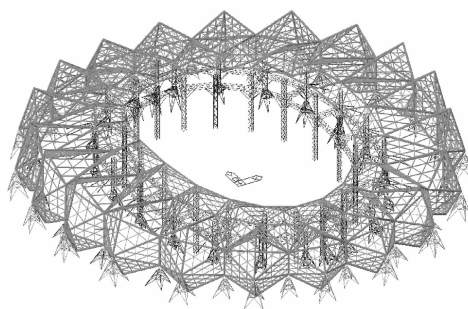


图8 结构有限元模型

Fig. 8 FEA model of structure

由以上曲线可知,理论计算结果与实际监测结果的数值和趋势吻合都比较好,对采用高空原位拼装法的空间结构而言,临时支撑卸载前后主体结构均有较大的竖向变形,最大应力发生突变的可能性也比较大,所以在这一过程中结构还是有一定危险性的,一定要保证结构的施工质量.分析中还发现考虑施工过程影响的杆件最大应力为一

218.56 MPa,设计状态下杆件的最大应力为一114.29 MPa,前者大约为后者的二倍,所以不能忽略施工对结构的影响.此外考虑施工过程影响的结构最终竖向最大变形为一332 mm,设计状态下结构的最大竖向变形为一328 mm,差别较小且均发生在结构东西两侧内环节点处,说明在这种施工方案下,施工过程对结构的最终成型影响较小,趋近于设计状态,所以采用有限单元法来模拟整个施工过程是比较可靠的.

4.3 亚运会体操馆

亚运会体操馆的建筑平面尺寸为228 m×121 m,最高点标高为32.5 m,钢结构屋盖体系由115根 $\Phi 600 \sim \Phi 1200$ mm的钢管柱支撑,由外圈桁架、内圈桁架、片状主桁架和箱型次梁组成(图10).对于此类跨度较小的“馆”类结构,临时支撑大多采用脚手架的形式,同时由于结构最终变形量较小,所以不用对结构进行预调值设置,在施工中也仅采用高空原位拼装法进行施工即可.

对结构进行施工模拟时完全按照施工进度及现场要求,先安装外圈桁架,再安装片状主桁架,而后安装内圈桁架,最后再对临时脚手架进行卸载.整个建造过程按照12个步骤进行模拟,前11步为安装施工步,第10施工步为内圈桁架的合拢,第12步为卸载施工步.脚手架支撑点的布置编号和结构有限元计算模型分别如图11、图12所示.本工程在主体结构安装完成后要对临时支撑进行卸载,比较合理的一种卸载方法是采用计算机分级同步卸载.表1给出了结构在施工过程中的变形、应力以及应力比结果.

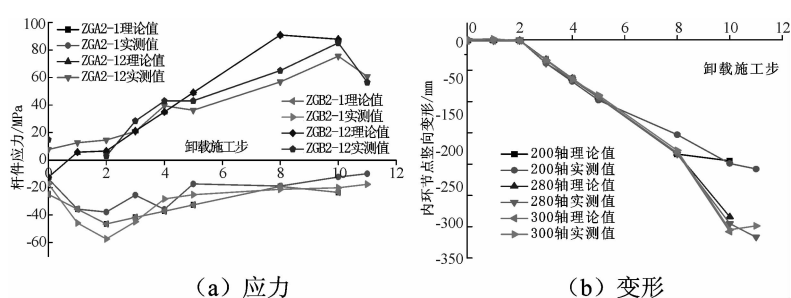


图9 有限元计算结果和实际监测结果对比

Fig. 9 Contrast curve between theory and measure

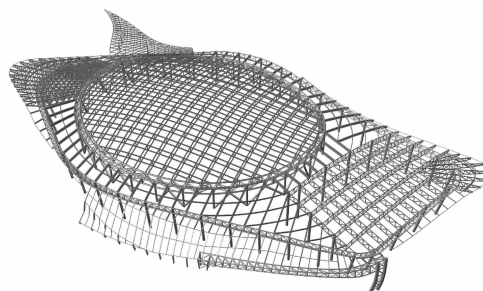


图10 整体效果图以及钢屋盖三维图

Fig. 10 Overall rendering effect and 3D view drawing

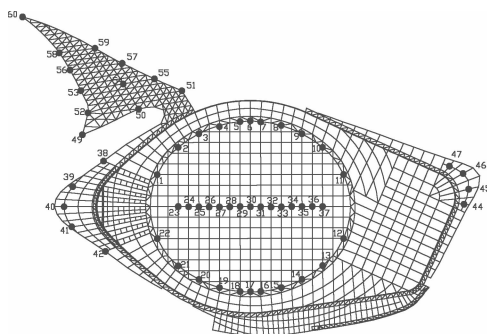


图11 脚手架支撑点的布置

Fig. 11 Layout of support point

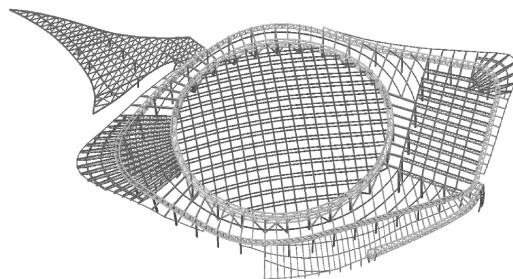


图12 结构有限元模型

Fig. 12 FEA model of structure

表 1 计算结果
Tab.1 Calculation results

施工步骤	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
最大变形(X向)/mm	0.9	0.9	3.6	6.2	4.9	4.6	5.6	5.7	7.7	6.0	6.1	30.3
最大变形(Y向)/mm	-0.8	-0.8	2.5	-4.8	-4.1	-4.0	-4.0	3.8	5.9	3.7	3.9	-28.4
最大变形(Z向)/mm	-1.6	-3.7	-13.7	-27.2	-25.7	-25.3	-28.1	-28.0	-36.2	-26.5	-26.5	-323.1
最大应力/MPa	18.3	34.8	62.9	97.7	93.7	93.6	92.4	92.3	113.8	91.8	91.8	91.9
最大应力比	0.06	0.12	0.21	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.38	0.31	0.31	0.31

通过以上分析,可知竖向变形起决定作用,临时支撑主要提供竖向支撑和侧向刚度,支撑卸载后竖向变形明显增大.在第 10 步(内圈桁架合拢)下,结构的最大变形和应力均有所减小,整体刚度明显增大.结构在施工过程中的应力比最大为 0.33,按此种方法施工安全性较高.

5 施工建议

施工力学模拟研究表明,施工过程对结构影响显著,采用合理的施工方法尤为重要.根据以上分析,给出一些关于大跨度复杂钢结构施工的建议如下:

- (1)应建立全面的施工监测体系,在施工过程中对结构的定位、应力以及变形实行全过程实时监测.
- (2)尽量使构件在地面完成拼接,减少高空焊接量,并应考虑温度变化和风荷载对结构的影响.
- (3)为了避免缺陷,保证工程质量,工厂的加工制作环节也非常重要.同时对于大型构件,还应注意构件在运输过程中的变形.
- (4)主体结构与支撑结构连接处的工装平台应保证足够的刚度,确保施工过程的精度满足要求.

6 结 论

本文采用施工力学方法对三个大跨度复杂钢结构工程进行施工过程模拟分析,同时将有限元计算结果同实际监测结果进行对比,得出以下结论:

- (1)对于大跨度复杂钢结构,施工过程对结构的影响不可忽略,采用有限单元法对结构进行施工力学模拟分析是很有必要的.
- (2)采用有限单元法对结构进行施工力学分析能够较好的模拟施工过程,计算结果同实际监测结果吻合较好,分析结果可靠.
- (3)采用弹性支座模拟施工的精度较差,对于大跨度复杂钢结构,建议将临时支撑同主体结构一同建入模型中进行施工全过程模拟分析.
- (4)有限单元法对刚性结构模拟较好,对于柔性结构有其局限性,一般都只能保证变形和受力的趋势和设计状态是一致的,具体的变形量却不完全一致.所以有必要对施工力学的具体算法进行研究,编制相应的程序,并且将设计与施工有效地结合在一起,为结构工程的发展提供有效的参考.

参考文献 References

[1] 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 structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 105-108.

[2] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 41-45.
CAO Zhi-yuan. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 41-45.

[3] CHOI C K, KIM E D. Multistory frames under sequential gravity loads[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(11): 2373-2384.

[4] CHOI C K, CHUNG H K, LEE D G, et al. Simplified building analysis with sequential dead loads-CFM[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 188(4): 944-954.

[5] 范 重,刘先明,胡天兵,等. 国家体育场钢结构施工过程模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 134-143.

- FANG Zhong, LIU Xian-ming, Hu Tian-bing, et al. Simulation analysis on steel structure erection procedure of the National Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 134-143.
- [6] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 83-88.
- CUI Xiao-qiang, GUO Yan-lin, YE Ke-ming. Research on the construction mechanics method of long-span steel structure[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 83-88.
- [7] 刘学武, 郭彦林, 张庆林, 等. CCTV 新台址主楼施工过程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.
- [8] 郭彦林, 崔晓强. 大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨[J]. 工业建筑, 2004, 34(12): 1-5.
- GUO Yan-lin, CUI Xiao-qiang. Key mechanical problems and their discussion in construction process of larger-span steel structures [J]. Industrial Construction, 2004, 34(12): 1-5.
- [9] 郭彦林, 刘学武. 钢结构施工力学状态非线性分析方法 [J]. 工程力学, 2008, 25(10): 19-24.
- GUO Yan-lin, LIU Xue-wu. State nonlinear finite element method for construction mechanics analysis of steel structure[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 19-24.
- [10] 郝际平, 郑江, 王先铁, 等. 大运会主体育场施工过程力学模拟与分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(4): 457-463.
- HAO Ji-ping, ZHENG Jiang, WANG Xian-tie, et al. Mechanic simulation and analysis of the main palaestra of the world university games during the construction process[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(4): 457-463.
- [11] 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 Universidad Sports Centre[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 70-77.
- [12] 田黎敏, 郝际平, 戴立先, 等. 深圳湾体育中心结构施工过程模拟分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 118-121.
- TIAN Li-min, HAO Ji-ping, DAI Li-xian, et al. Simulation analysis on erection procedure of Shenzhen bay sports center[J]. Building Structures, 2011, 41(12): 118-121.

Study and application of mechanical simulation of large-span complex steel structure in construction process

TIAN Li-min^{1,2}, HAO Ji-ping^{1,2}, ZHENG Jiang¹, WANG Xian-tie¹, ZHONG Wei-hui¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Following the economic development, the large-span spatial structure tends to become more and more complex. The impact of construction process can not be neglected. The construction mechanic combined with structure mechanic and construction technology. It is necessary to analyze the internal force and deformation of three large-span complex steel structures in the construction process by using the method of construction mechanics. The result from theory and practice were compared. The analytical results show that construction mechanic can be used in selecting and guiding the construction to guarantee the construction safety. On this basis, the paper also gives some suggestions and comments about construction of the large-span complex structure. These results provide a reasonable basis for the further development of construction mechanics and engineering application.

Key words: large-span steel structure; construction mechanics; mechanics simulation; finite element method