

大型单边悬挑钢结构施工过程及模拟分析

刘海锋 张昌满

北京城建亚泰建设集团有限公司, 北京 100013

[摘要]随着我国经济发展和科技水平进步,大跨度悬挑钢结构被广泛应用于各种大型公共建筑。由于大跨度悬挑钢结构形式具有复杂性、多样性等特点,要求钢结构安装技术更加先进、施工顺序安排更加合理。国内针对大跨度、大空间的钢结构施工进行了丰富的研究,如国家体育场钢结构施工中采用模拟分析的方法对关键构件的调整,加快了施工进度,降低了用钢量,并提出了钢结构施工要点;崔晓强等对大跨度钢结构施工过程的结构分析方法进行了研究,提出了利用有限元软件对施工全过程跟踪的方法;刘勇庆对大悬挑悬挂结构施工过程进行的模拟分析,通过模拟数据的分析,确认合理的安装及卸载顺序,并进行监测。上述研究虽对北京新景商务楼现场施工具有一定的参考意义,由于本工程单边悬挑距离较大,临时支撑搭设高度较高,因此其研究指导性不足,针对本工程的实际施工特点,还需总结出一种行之有效的施工方法。

[关键词]单边悬挑钢结构;模拟分析;施工安装;卸载;监测

DOI: 10.33142/ec.v6i8.9093

中图分类号: TU393.304

文献标识码: A

Construction Process and Simulation Analysis of Large Unilateral Cantilevered Steel Structures

LIU Haifeng, ZHANG Changman

Beijing Urban Construction Yatai Group Co., Ltd., Beijing, 100013, China

Abstract: With the development of Chinese economy and technological progress, large-span cantilever steel structures are widely used in various large public buildings. Due to the complexity and diversity of the forms of large-span cantilever steel structures, it is required that the installation technology of steel structures be more advanced and the construction sequence be more reasonable. There has been extensive research on the construction of steel structures with large spans and spaces in China, such as the use of simulation analysis methods to adjust key components in the construction of steel structures in the National Stadium, which has accelerated construction progress, reduced steel consumption, and proposed key points for steel structure construction; Cui Xiaoliang et al. conducted research on the structural analysis method for the construction process of large-span steel structures and proposed the method of using finite element software to track the entire construction process; Liu Yongqing conducted a simulation analysis of the construction process of a large cantilever suspension structure, confirmed the reasonable installation and unloading sequence through the analysis of simulation data, and conducted monitoring. Although the above research has certain reference significance for the on-site construction of Beijing Xinjing Business Building, due to the large overhang distance on one side and the high height of temporary support installation in this project, its research guidance is insufficient. Based on the actual construction characteristics of this project, it is necessary to summarize an effective construction method.

Keywords: unilateral cantilever steel structure; simulation analysis; construction and installation; uninstall; monitor

引言

北京新景商务楼东侧为大型单边悬挑钢结构,最大距离为24.3m,用钢量约1000t。本工程通过建立有限元模型,接着进行模拟分析,从而安排合理的施工顺序。采用高空散装法进行施工,从地下三层开始搭设临时支撑(胎架),搭设高度18m,大悬挑结构安装完成后,进行临时支撑卸载,然后进行小悬挑结构和斜坡梁安装。同时对关键构件进行变形监测,实测值与模拟值对比表明:模拟分析能很好模拟施工过程中的受力状态,可为实际施工提供可靠依据^[1-4]。

因此,本文对北京新景商务楼进行施工过程模拟,合理安排悬挑结构施工顺序,记录单边悬挑结构关键构件在各个模拟阶段的变形量,并与实际监测结果进行对比分析,从而为悬挑体量较大、临时支撑较高、单边悬挑距离较长

的悬挑结构工程施工提供参考。

1 工程概况

北京市新景商务楼位于北京市东城区磁器口东北侧,南临广渠门内大街,西邻崇文门大街,地下3层,地上10层,建筑面积3.4万m²,建筑高度45m。地下1层为自行车库及商业用房;地下2层为汽车库及设备用房;地下3层战时为核六级人防物资库,平时为汽车库和设备用房;F1~4层为商业、影院、展览中心等;F5~10层为办公用房^[5]。建筑整体效果如图1所示。

大跨度单边悬挑结构位置在地上结构F1~F2层11~14/B~H轴线区域,最大悬挑长度为24.3m,宽度为30.5m。图2为悬挑结构三维模型,悬挑结构箱型梁、箱型立柱和箱型支撑材质为Q420GJC,其余的BH结构梁材质为Q345B。

其中C轴和G轴箱型梁在+5.5m处和+14.7m处由变截面的箱型梁组成,从11轴线截面为口1400×1000×100×100mm到14轴线截面变为口1200×1000×60×60mm过渡。14轴、C轴立面和G轴立面为桁架支撑立面,支撑结构为箱型结构,截面为口1200×600×80×80mm、口900×600×50×50mm、口600×600×40×40mm。箱形柱截面最大为口1600×800×100×100mm。



图1 建筑效果图

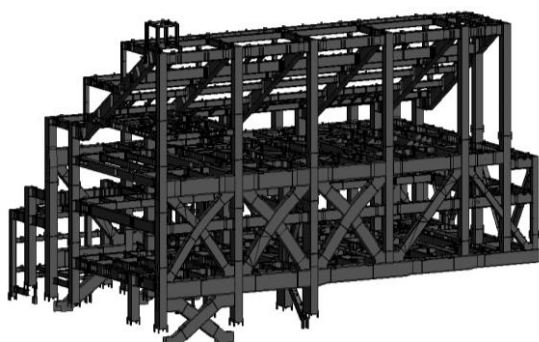


图2 悬挑结构三维模型图

2 悬挑钢结构方案

2.1 悬挑桁架施工流程

整体施工流程为:编制施工方案→技术交底→深化设计→材料采购→构件加工→胎架安装→大悬挑结构(11~14轴/B~G轴)安装→胎架卸载→小悬挑结构(11~14轴/G~H轴)安装→斜坡梁安装→后续工程施工。

大悬挑+小悬挑+斜坡梁结构分段吊装顺序为:F1层C、G列处的下弦梁安装→11-12轴/F1-F3层桁架安装→12-13轴桁架安装→13轴-13₂轴桁架安装→C列和G列桁架中间钢柱及平台梁→14轴立面桁架安装→胎架卸载→11~14轴的G~H列区域小悬挑安装→斜坡梁安装

2.2 临时支撑(胎架)安装

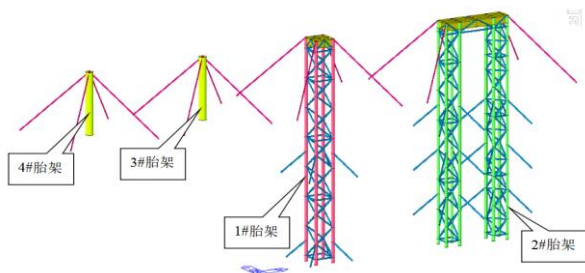


图3 胎架三维模型图

本工程共有4组胎架,其中1#、3#、4#胎架为单组胎架,2#胎架因为避开地下室剪力墙结构而设置成组合胎架。分别设置在G列12轴(4#)、C列12轴(3#)、G列14轴(1#)、C列14轴(2#),从地下三层(-15.250m)生根,直至悬挑桁架下弦梁底部位置,使上部荷载传至筏板基础。1#支撑胎架使用截面为1.5×1.5m标准组合胎架,标准节主肢用PIP273×20mm(Q235B)的圆管;2#支撑胎架使用截面为1.2×1.2m标准组合胎架,标准节主肢用PIP245×8mm(Q235B)的圆管,其余支撑PIP121×10mm(Q235B)组成格构式钢架;3#、4#胎架为P609×16(Q235B)圆管。

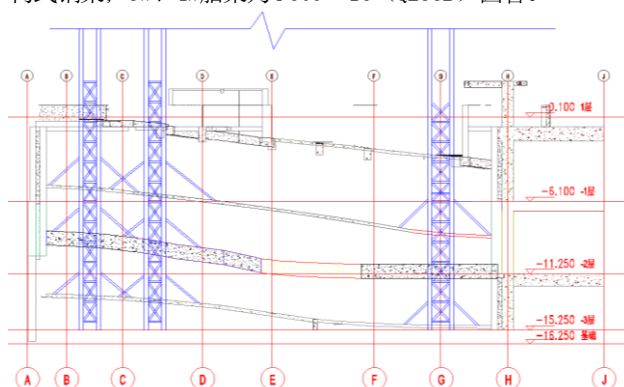


图4 支撑立面图(14轴)

由于胎架搭设高度较高,1#、2#、3#、4#胎架在F1层位置拉缆风绳,缆风绳与地面夹角保持在30°~45°之间,胎架管拉结点位于2/3层间高度处。在地下其他部分采用支撑稳固措施,如图4支撑立面图(14轴)。

2.3 胎架卸载方案

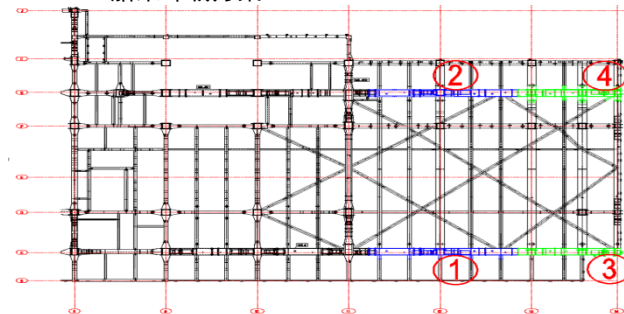


图5 支撑卸载点布置图

悬挑结构的支撑塔架卸载过程既是释放塔架中的内力和拆除塔架的过程,也是悬挑结构产生变形和结构体系稳步成型的过程。在此过程中,支撑塔架和结构体系中的受力十分复杂^[6]。因此,需合理布置卸载点数量和位置,以及确定合理的卸载顺序和方法进行临时支撑卸载施工。

根据梁下部支撑设置情况,布置4个卸载点,如图5所示。根据卸载点理论反力值及卸载高度表,胎架支撑点的最大位移量为-12.96mm,拟采用分阶段分级同步卸载:每个胎架先卸载一半位移量,观察3小时后再将剩余的位移量卸载完成。

表1 卸载点理论反力值及卸载高度表

卸载点序号	卸载点反力理论反力值	卸载点理论位移值	千斤顶型号
1	2307KN	3.07mm	350T
2	2048KN	3.85mm	350T
3	1790KN	10.17mm	350T
4	2253KN	12.96mm	350T

2.4 悬挑结构安装

本工程悬挑构件最大重量约 53t, 采用搭设临时支撑, S560K25 塔吊和 LTM1800 型 800 吨汽车吊配合吊装, 在高空进行组焊焊接成整体, 并通过液压千斤顶工艺进行卸载施工。悬挑结构在 11~14 轴安装范围内, 根据塔吊起重能力以及构件平面布置: 12~14 轴区域, 作业半径在 22.4m 内, 重量小于 25 吨的构件; 11~12 轴区域, 作业半径 30m, 重量小于 18.6 吨的构件全部采用 S560K25 型塔吊安装。以上区域内, 构件重量超过塔吊起重能力的采用 LTM1800 型 800T 汽车吊吊装。

大悬挑结构分区进行安装, C 列和 G 列桁架下弦安装完成后, 将后续安装按照轴线中间主梁分为 4 个区, 分别为 11 轴-12 轴, 12 轴-13 轴, 13 轴-13 $\frac{1}{2}$ 轴, 14 轴立面桁架。小悬挑结构分层进行安装, 安装顺序为: 1、首先安装 F1 层 12 轴 G-H 列小悬挑梁, 吊装就位后用 5t 手拉葫芦拉紧; 2、安装 12 轴 H 列钢柱及 11-12 轴的 H 列钢梁; 3、安装 F2 层 12 轴的 G-H 列及 11-12 轴 H 列钢梁; 4、12-14 轴 G-H 列钢构件安装顺序同 F1~F2 层 11-12 轴 G-H 列安装顺序; 5、最后将小悬挑区域剩余次梁补齐。

3 施工过程模拟分析

3.1 模拟方法

本工程采用 MIDAS Gen 2019 软件建立了主体结构-悬挑结构-临时支撑三维有限元分析模型, 如图 6 示。几何模型与设计数据一致; 结构质量由程序自动考虑; 钢材材料模型由线弹性材料假设; 节点连接刚度与设计假设一致, 模拟采用刚接或铰接^[7]。根据悬挑结构施工过程的各个阶段, 在施工模拟过程中划分了 6 个模拟状态, 施工模拟工况为: 工况 1-胎架安装、工况 2-大悬挑安装、工况 3-胎架卸载、工况 4-小悬挑安装、工况 5-斜坡梁安装。

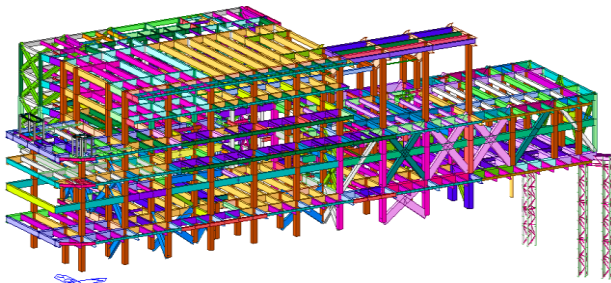


图6 主体结构-悬挑结构-临时支撑三维有限元分析模型

3.2 模拟分析结果

施工模拟分析结果表明, 在整个施工过程中, 悬臂结

构的最大变形和应力比始终保持在合理的水平。除工况 2 这一阶段的变形和构件应力变化较大外, 其他构件的应力和变形都比较平缓。这是因为工况 2 是一个临时支座拆除过程, 并且结构系统和载荷传导方向发生变化, 所以差异较大。分析结果表明, 在整个施工过程中, 结构构件的最大应力比为 0.65, 最大变形量为 20.99mm<24350/400=60.875mm, 二者均满足要求。模拟施工过程的最大变形图和最大应力比如图 7、8。

表2 施工模拟结果

施工阶段	CS02	CS03	CS04	CS05
最大变形/(mm)	6.08	15.38	18.09	20.99
最大应力比	0.54	0.6	0.52	0.65

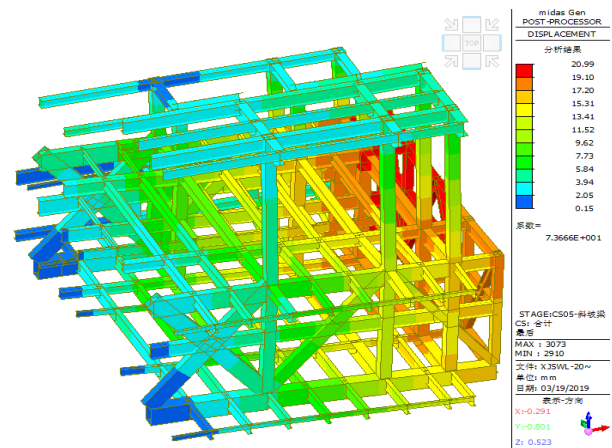


图7 最大变形图

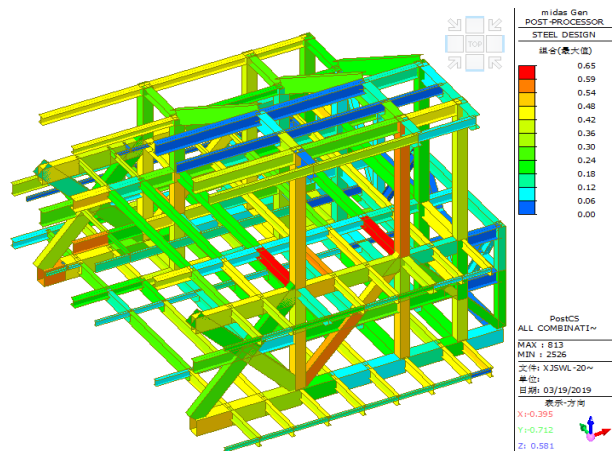


图8 最大应力比图

4 位移监测与模拟数据对比

在悬挑结构的施工过程中, 施工条件的变化会引起结构的巨大变化。因此, 对各阶段工况关键构件的位移进行监测, 以保证结构在施工过程中的安全稳定, 并将监测结果与模拟数据进行对比。本悬挑结构荷载基本都会传递到 C 列和 G 列桁架下弦, 从而将荷载传递至 11 轴的框架柱, 这是悬挑结构最关键的支撑, 因此, 在 F1 层 10-14/C 和

10~14/G 位置钢梁的轴线交点位置处作为变形监测点,共 8 个监测点,如图 9 所示为 C 轴上节点的变形监测点 1、3、5、7; G 轴上节点的变形监测点对应分别为 2、4、6、8。各施工阶段对应监测次序为:

1 大悬挑结构安装完成→2 胎架卸载完成→3 小悬挑结构安装完成→4 斜坡梁安装完成

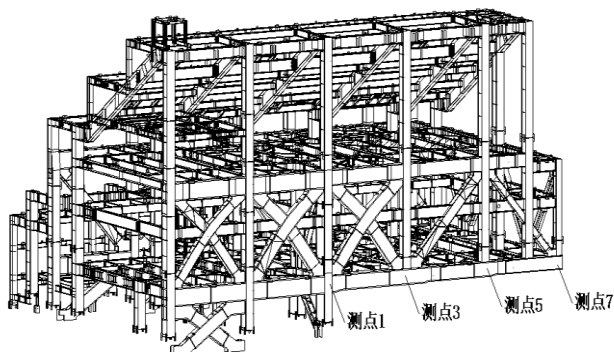


图 9 监测点布置图

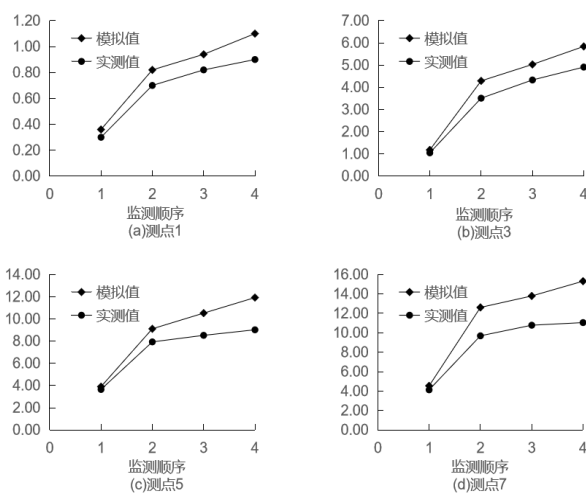


图 10 部分监测点对比图

从图 10 可以看出,同一测点监测结果与模拟数据的变化曲线趋势大致相同,这说明运用 MIDAS Gen 2019 进行模拟可以很好的反映实际施工过程,为施工的顺利进行提供依据。同一测点实测数据基本上小于模拟数据,这说明现场施工采取有利措施,很好地控制结构的变形。

不同测点的数据,越靠近悬挑根部的测点实测值和模拟值越小,增长趋势也越小。这是因为 11、12 轴和 C、G 轴为封闭稳定的立体桁架,承受了来自大悬挑结构、小悬挑结构及斜坡梁结构的荷载。这就相当于悬臂梁受到均布荷载,根部变形量小于端部变形量,如图 11 所示,悬挑区域简化为悬臂梁 AB,且受到均布荷载 q,测点 1、3、5、7 简化对应如图 11,任意一点的挠曲线方程为:

$$w = -\frac{qx^2}{24EI}(x^2 - 4lx + 6l^2)$$

所以,由图 11 和任意一点的挠曲线方程可知,越靠

近悬挑根部的测点实测值越小。

图 11 中, w3 为简化为小悬挑结构安装完成对应的挠曲线方程, w4 为简化为斜坡梁结构安装完成对应的挠曲线方程。从 w3 到 w4 这个阶段,测点 1 和测点 7 相比较可看出,这个过程种测点 1 的变化量明显小于测点 7,这也说明了越靠近悬挑结构根部的测点的实测值增长趋势也越小。

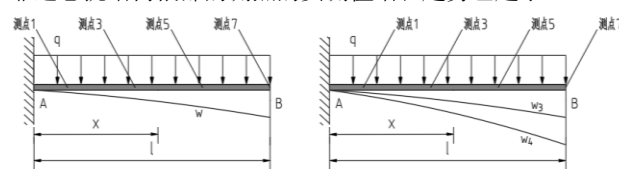


图 11 悬挑结构简化分析图

因此,将单边悬挑结构简化为悬臂梁,可以分析悬挑结构部分构件的变形趋势;利用有限元模型可以更好的预测钢构件安装过程中关键构件的变形,对采取起拱措施提供了可靠依据。

5 结语

临时支撑搭设前,需要进行模拟分析,验证其是否满足强度、刚度和稳定性要求。临时支撑卸载时,采用 350t 液压千斤顶,按照节点要求的卸载值进行分级卸载,并通过计算机控制每次位移下降,自动对比调整。

悬挑结构安装前,利用有限元软件对施工过程进行模拟分析,由模拟结果可知,施工过程中构件的最大变形为 20.99,最大应力比为 0.65,均满足要求,由此来进行施工顺序的安排。

对关键构件进行变形监测,并将实测值与模拟值进行对比分析,发现实测值略小于模拟值,二者变化均为上升趋势,实测值上升趋势相对平缓。分析结果表明:悬挑结构施工顺序比较合理,模拟分析可对施工过程进行较为准确的预测,为实际施工提供依据。

【参考文献】

- [1] 沈世钊. 大跨空间结构的发展一回顾与发展[J]. 土木工程学报, 1998(3): 22-28.
 - [2] 范重, 刘先明, 胡天兵. 国家体育场钢结构施工过程模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2007, 4(28): 26-32.
 - [3] 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): 33-37.
 - [4] 刘勇庆. 大悬挑悬挂混合结构施工过程及模拟分析[J]. 施工技术, 2020, 49(2): 22-31.
 - [5] 赵博尧, 徐福江, 盛平. 北京新景商务楼结构设计[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 11-16.
 - [6] 韩杰, 黄浩, 赵超. 某超高层建筑悬挑钢结构施工模拟分析及现场监测[J]. 施工技术, 2013, 42(8): 22-26.
 - [7] 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): 28-33.
- 作者简介: 刘海峰 (1985.8—), 男, 籍贯: 内蒙古赤峰, 研究方向: 土建施工, 职称: 工程师, 学历: 本科。