

华润万家购物中心钢结构临时支撑卸载模拟与监测*

王兵¹, 谢丽宇¹, 李安勇², 范存新², 宋琛琛¹

(1. 同济大学结构与防灾研究所, 上海 200092; 2. 苏州科技学院结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011)

[摘要] 华润万家中心钢结构为大跨度、大悬挑平面钢桁架结构, 该钢结构施工时采用临时胎架进行支承, 现结构已经安装完毕, 需要对胎架进行拆除。为保证结构在胎架拆除及楼面混凝土浇筑等施工过程中的安全, 施工前对结构进行了有限元施工模拟, 确定了详细的施工方案, 并对钢桁架关键构件进行应力监测。监测结果与模拟结果吻合较好, 验证了采用施工模拟-现场监测的方法可以合理地制定施工方案, 从而可靠地保证了施工安全及质量。

[关键词] 钢结构; 监测; 施工模拟; 胎架拆除; 桁架

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2015) S1-0530-05

Support-unloading Simulation and Stress Monitoring of Huarun Vanguard Shopping Mall

Wang Bing¹, Xie Liyu¹, Li Anyong², Fan Cunxin², Song Chenchen¹

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China)

Abstract: The Huarun Vanguard steel-structure is a large span and large cantilever steel truss structure, the temporary jigs was used during its construction. The structure has been installed and the temporary jigs need to be removed. In order to ensure the safety of structure during the process of removing temporary jigs and pouring floor concrete, finite element analysis was carried out to simulate the unloading process. During the unloading construction, the strains of steel structure were also monitored. This procedure demonstrated that a proper construction scheme can be made following the procedure of construction simulation and site monitoring, thereby the safety and quality of structure can be guaranteed.

Key words: steel structures; monitoring; simulation; jigs removing; trusses

0 引言

近年来, 随着我国经济水平及结构设计、施工技术水平迅速提高, 大跨度、大悬挑钢结构的应用越来越多, 充分体现了钢结构经济、承载力高、跨越能力强等优点。但正是由于结构采用大跨度或者长悬臂, 增加了结构的施工难度, 因此, 此类钢结构在施工过程中需要为结构设置临时的胎架支撑, 在钢结构安装及焊接完毕后再对胎架进行拆除, 如国家体育场、中广核大厦、重庆大剧院等工程项目的施工卸载。

胎架拆除过程是结构体系的转变过程, 胎架支撑退出工作, 结构逐渐靠自身刚度抵抗外荷载, 在结构内产生内力重分布。因此为保证此类结构在胎架拆除过程及后续施工过程中的安全性, 新建工程有必要进行施工监测。施工监测的意义除保证重大复杂工程结构临时胎架支撑拆除过程中的安全性外, 还具有 2 个比较重要的意义: ①可以明确结构施工水平及施工缺陷, ②可以验证设计的理论分析模型是否正确。

1 工程概况

华润万家购物中心总建筑面积 52 776.5m², 地上 4 层, 地下 2 层, 建筑最大高度 24m, 总体结构包含混凝土结构与钢结构 2 部分, 结构现场照片如图 1 所示。本工程结构西侧④轴~⑩轴为混凝土框架结构, 其中与钢桁架相连处设有少量剪力墙; 东侧为混凝土筒体, 筒体与西侧混凝土结构之间 2 层(标高 5.650m)到屋顶(标高 21.850m)为钢结构, 钢结构包含 8 榀高度为 3 层与 4 层 2 层结构高度之和的钢桁架以及悬吊在主桁架体系上的 2 层钢结构梁板体系。东西方向 2 榀主桁架两端支承在西侧结构与东侧混凝土筒体上, 跨度为 34.2m; 南北方向 4 榀桁架支承在右侧筒体上, 为悬挑钢桁架, 悬挑长度为 12m; 另外 2 榀桁架两端分别支承在西侧混凝土结构及⑩轴线上悬挑桁架, 跨度分别为 36.6m 和 31.8m; 8 榀钢桁架间由 H 型钢梁相连, 结构平面布置及桁架编号如图 2 所示, 结构立面如图 3 所示。钢桁架各腹杆、弦杆截面均采用箱形截面, 最大截面尺寸为 □1 000 × 400 × 30 × 30, 楼层桁架间钢梁采用 H 型钢, 最大截面为 H600 × 300 × 12 × 20, 钢结构材质均为 Q345B。钢结构部分楼板采用压型钢板与混

* 国家自然科学基金资助项目(51478356; 51208377)

[作者简介] 王兵, 硕士研究生, E-mail: 1332793@tongji.edu.cn

[收稿日期] 2015-10-12

混凝土组合楼板 除 2 层局部楼面板厚为 120mm 其余板厚均为 150mm ,压型钢板采用 1.2mm 厚闭口压型钢板 连接件采用圆柱头栓钉。



图 1 钢结构现场

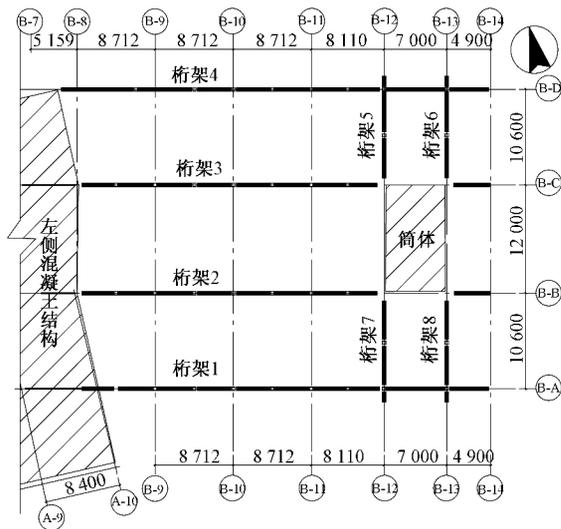


图 2 钢结构部分桁架编号及结构平面布置

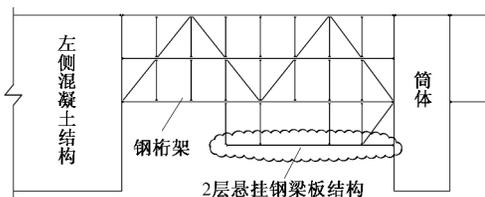


图 3 结构立面

由于钢桁架跨度大 ,悬挑长度长 ,钢桁架在安装过程中 ,在各榀桁架主要节点下方布置 24 组临时支撑胎架 ,作为钢结构的临时支撑体系 其中 9 ~ 18 号胎架支撑在结构 2 层底部 ,其余胎架支撑在结构 3 层的底部。现场胎架支撑立面如图 4 所示 ,胎架平面布置及编号如图 5 所示。待所有钢结构安装焊接完毕后 ,再对胎架进行拆除 ,此时结构由胎架受力转化为钢结构自身受力 ,引起钢结构部分内力重分布 ,各构件也将会有明显的应力变化。因此对施工过程(含各层楼面混凝土的浇筑)进行施工模拟 ,并在各主要受力杆件上布置应力(应变)测点实时监控结构施工过程中的应力状态 ,保证钢结构部分卸载(胎架拆除)及加载(楼板浇筑)安全顺利进行 ,为本工程钢结构施工的关键控制环节。



图 4 施工现场胎架支撑立面

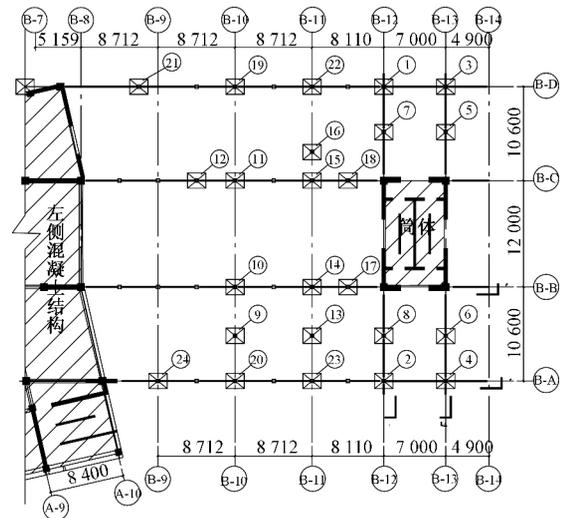


图 5 胎架平面布置

2 施工方案的提出

由于胎架的拆除过程是胎架卸载的过程 ,同时也是结构加载过程。因此不同的胎架拆除顺序 ,不同的楼板浇筑顺序 ,结构的内力也会不同 ,因此在施工前 ,必须确定较为完善的施工方案。该施工方案既要能保证钢结构在胎架拆除过程中安全可靠 ,避免拆除过程中过大的应力突增 ,又要保证施工方便。

2.1 临时胎架支撑卸载原则

8 榀钢桁架全部安装焊接完毕后进行胎架拆除 ,此时钢桁架自重主要由胎架承受转换为主要由钢桁架自身承受。为了结构的安全 ,在胎架拆除前确定胎架拆除原则: ①先行拆除非支撑在主桁架底部的临时胎架支撑(由于拆除这些位置上的胎架 ,对结构及其他胎架受力影响小); ②尽量不改变主体结构的受力模式; ③重要受力桁架主要支承点处临时胎架采用液压千斤顶辅助卸载 ,予以最后拆除; ④先拆除支撑在 2 层的胎架 ,使悬挂于主桁架上的 2 层梁板恒载尽快地传递到主桁架 ,更加符合结构的受力模型; ⑤满足以上原则的基础上 ,优先拆除应力比最大的胎架支撑。

2.2 胎架拆除顺序

经现场调查发现 ,位于最东侧 B-13 轴线上的 5 ~ 8 胎架与 B-8 轴线上的 17 号胎架由于施工方原因 ,胎架

并未与结构进行有效接触,胎架支承点与结构有大约 2mm 脱缝,相当于 5~8,17 号胎架在胎架拆除方案执行前就已经事实上拆除。基于此,在详细检查其他各组胎架与结构均形成有效支承后,采用有限元分析软件 Midas Gen8.36 进行施工模拟分析,然后根据 2.1 节确定的胎架拆除原则,制定如下拆除顺序:①拆除 9,13,16 号胎架,胎架并非支撑在主桁架上的胎架,拆除后对主体结构及其他胎架影响较小;②拆除 10,11,12 号胎架,此 3 个胎架支撑在结构 2 层,且经过施工模拟分析,应力较大;③拆除 14,15,18 号胎架,胎架支撑在 2 层,经过施工模拟分析,应力次之;④拆除 19,20 号胎架,胎架应力较大;⑤拆除 21~24 号胎架,胎架应力次之;⑥拆除 7,8 号胎架,胎架为支撑在悬挑桁架底部的胎架,采用液压千斤顶同步辅助卸载;⑦拆除 1,2 号胎架,胎架支撑在悬挑桁架底部的悬挑端,是重要受力桁架底部的临时支撑,最后采用液压千斤顶同步卸载拆除。

3 施工模拟

3.1 模拟方法及结构模型

根据设计资料,分别利用有限元软件 Sap2000 V15 与 Midas Gen8.36 建立整楼几何模型,几何模型与设计资料一致;模型中梁、柱、桁架腹杆及弦杆用梁单元模拟,筒体和剪力墙用墙单元模拟,临时胎架支撑采用只受压不受拉单元模拟,桁架结构自重由程序自动计算;各个节点刚度与设计的假定一致,采用刚接或铰接。2 个软件得到的结构各阶自振周期及各施工阶段胎架支承点位移基本相同,验证了模型的准确性。最终施工模拟以采用 Midas Gen8.36 计算的结果为准。

由于钢桁架跨度大,悬挑长度大,在拆除胎架过程中,可能会产生较大变形,从而引起几何非线性。本次施工模拟,考虑几何非线性,采用非线性累加模型分析,即每个施工步骤完成后在新变形完成后的模型进行下一步施工步骤。再根据施工步骤工期进度进行施工步骤定义,每一施工步结束后,程序将冻结此施工步之前的胎架支撑或者激活该施工步以前浇筑的楼面恒荷载。具体施工步及施工工况定义如表 1 所示。施工模拟仅考虑恒荷载作用,不考虑活荷载及风荷载作用。

3.2 模拟分析结果

施工模拟分析结果表明,胎架拆除过程中,钢桁架的应力及变形变化较平稳,没有出现应力突增,胎架在拆除过程中,钢结构最大应力为 26.2MPa,所有楼面混凝土浇筑完成后,钢结构最大应力为 49.6MPa,最大应力比为 0.15,钢结构部分应力处于较为合理的水平,具有较高的安全富余度。胎架拆除过程中,钢桁架最大挠度为 6mm,发生在桁架 4 跨中,悬挑桁架端部挠度不大,仅为 3.5mm。楼面混凝土浇筑过程中,结构挠度逐渐增加,待所有楼面混凝土浇筑完毕后,钢桁架挠度

表 1 施工步及施工工况定义

施工步	施工模拟工况
CS1	拆除 9,13,16 号胎架
CS2	拆除 10,11,12 号胎架
CS3	拆除 14,15,18 号胎架
CS4	拆除 19,20 号胎架
CS5	拆除 21~24 号胎架
CS6	拆除 7,8 号胎架
CS7	拆除 1,2 号胎架
CS8	浇筑屋面层楼面混凝土
CS9	浇筑四层楼面混凝土
CS10	浇筑三层楼面混凝土

较大,桁架 1 与桁架 4 跨中最大挠度分别为 12mm 与 10mm,悬挑桁架端部最大挠度为 8.5mm,满足钢结构规范关于受弯构件挠度 1/400 限值,其中 1 为受弯构件的跨度(悬臂、伸臂梁或桁架为悬伸长度的 2 倍)。

4 监测方案及监测过程

4.1 监测原理及温度补偿

由于夏季施工,施工现场温度变化大;3~5 楼面未浇筑,结构易受雨水侵袭,且监测时间较长,采用传统的电阻应变片很难适应现场复杂的施工条件,影响监测数据的可靠性。而振弦式应变计具有温度补偿功能,且具有安装方便、现场适应能力强等优点,故本次施工监测采用振弦式应变计。

根据施工环境和监测要求,测点处应变测量采用表面式 JTM-V5000E(F) 型振弦式应变计,该应变计的原理为将一定长度的钢弦张拉在两个端块之间,端块焊接于钢结构表面,钢结构的变形使得两端块相对移动并导致钢弦张力变化,张力的变化使得钢弦谐振频率改变,通过测量谐振频率的改变量可以测得钢材的应变。

由于夏季钢构件表面温度变化较大,结构本身及应变计会随温度变化伸长或缩短,从而导致应变计测量应力(应变)并非结构真实的应力(应变),故需对钢构件表面进行全程温度监测, JTM-V5000E(F) 型振弦式应变计内置温度测量装置,能够进行温度补偿,还原结构的真实应力(应变)。但结构因为温度变形受到约束引起的温度应力无法利用应变计自身予以补偿,因此各施工步完成后的应力(应变)监测数据均在上午采集,此时温度变化小,温度应力低。

4.2 测点布置原则

由于应变计数量有限,无法对钢桁架所有杆件进行应力(应变)监测,只能得到一部分结构杆件上的应力(应变)信息。因此测点的布置位置、传感器的数量以及布设方向对监测结果起到决定性作用。为尽可能全面地反映钢结构受力模式、应力大小,达到验证胎架拆除方案是否合理及设计的理论分析模型是否正确的目的,制定以下测点布置原则:①测点应布置在桁架受力较大杆件上;如桁架端斜腹杆,上下弦跨中杆件、上

弦端部杆件,悬挑桁架根部杆件等;②测点布置应符合经济性、合理性以及现场实施方便性的原则;对于桁架上弦测点应变仪的设置与测试需考虑钢梁顶面压型钢板混凝土楼板的存在;③区分各测点杆件的受力模式,将测点分为轴力测点及轴力与弯矩共同作用测点;对于轴力测点仅需布置1个应变计,对于弯矩与轴力共同作用测点,则需要布置2个及其以上应变计;④各测点应优先选择受施工干扰小杆件,如桁架腹杆上(应变计安装精度影响小);⑤测点应避开焊接区域。

4.3 测点布置

通过华润万家购物中心钢结构施工模拟分析,并遵循4.1节确定的测点布置原则,最终在8榀主桁架上选取35个包含主要弦杆、腹杆的应力(应变)监测点,对于某些受力较为复杂的弯矩、轴力共同作用测点,布置2个应变计,以尽可能反映测点的实际应力(应变)状态,其中1,7,13,19,30,32号测点为永久测点,用于后期结构装修及使用过程中的应力监测,其余测点上的应变计在3层楼面混凝土浇筑完成后予以拆除。具体应力(应变)测点的布置详如图6所示,构件上应变计布置现场如图7所示。

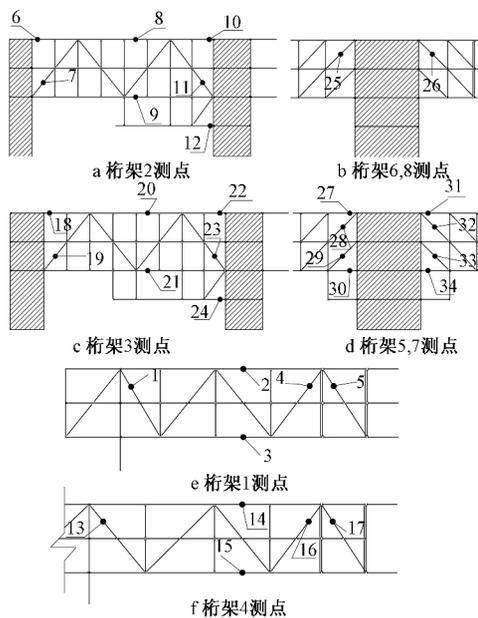


图6 各榀钢桁架应力(应变)测点布置



图7 腹杆上应变计及应变计保护罩

4.4 监测数据分析

实测应力数据的获得为进行温度补偿后各个测点采集的应变值乘以钢材的弹性模量。各构件钢材均采

用Q345B,弹性模量取206GPa。测点监测应变数据采集时间均为各施工步完成后的第2天上午,以尽量减小温度应力的影响。胎架拆除过程中,测点实测最大应力为17.8MPa,发生在CS4施工步第8测点上。3层混凝土浇筑(对应CS10)完成后,测点实测最大应力为38.2MPa,应力比为0.114,发生在第7测点上,结构在施工过程中处于较低的应力水平。各个测点应力实测值在施工过程中平稳变化,在胎架拆除过程中未出现应力突增,结构在胎架拆除过程中安全可靠。

5 施工模拟分析与实测数据对比分析

限于篇幅限制,下面给出部分具有代表性测点各施工步的实测应力值与计算模拟应力值的对比,具体对比结果如图8所示。

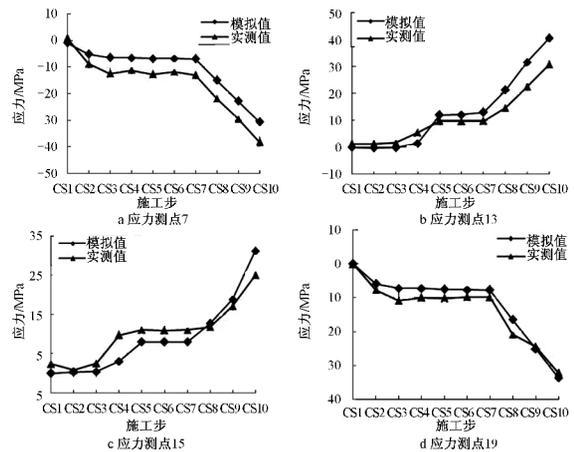


图8 钢桁架部分代表性测点的应力监测值与模拟值对比

由图8可知,应力监测值与应力模拟值的变化趋势基本一致,吻合度较高,测点应力在各施工步施工过程中变化均匀。测点应力总体上随施工步的增加而逐渐增大,表明胎架拆除过程实际上也是相当于结构自身加载的过程。各施工步下测点应力模拟值与实测值误差介于5%~30%,大部分测点应力监测值与模拟值误差<20%,表明监测结果数据合理可靠,大体上能够满足工程的实际要求。总之,通过应力监测值与模拟值的对比,表明监测结果数据合理可靠,本次施工监测达到指导实际施工过程的目的;另一方面也说明实际结构模型与设计者采用的计算模型较为符合,验证了设计的理论分析模型的正确性。

6 结语

湖州华润万家购物中心钢结构跨度大、悬挑长度大,施工过程应力控制是结构施工过程中的关键问题。在考虑各种不利因素,将施工模拟仿真技术与现场监测技术有机结合起来是此次胎架安全拆除的技术保证。通过应力监测值与模拟值的比较分析,得出以下结论。

1) 本次监测数据表明胎架在拆除过程中,结构各测点应力始终处于较为合理状态,各测点应力没有出

现应力突增的现象,保证了结构在拆除过程中的安全性。

2) 应力监测值与模拟值施工过程中应力变化趋势一致,吻合度较好,各施工步下模拟值与实测值误差介于5%~30%,大部分测点应力监测值与模拟值误差<20%,表明监测结果数据合理可靠;监测方案达到指导施工的目的。

3) 通过应力监测值与模拟值的对比,表明实际结构模型与设计者采用的计算模型较为一致,验证了设计采用的理论分析模型的正确性。

4) 由于应变计安装精度、杆件制作以及其他一些在施工模拟中难以考虑到的因素,如温度应力、风荷载作用,实际结构节点刚度无法精确满足设计假定,应力监测值及模拟值存在一定偏差。如何在施工模拟中考虑上述问题,显得十分有意义。

参考文献:

[1] 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.

[2] 韩杰,赵超,黄浩. 中广核大厦钢结构关键节点施工阶段受力分析及应变监测[J]. 建筑结构,2014(9):39-42.

[3] 叶芳芳,余志武,袁俊杰. 重庆大剧院大悬挑结构卸载分析[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(3):122-126.

[4] 郝玉松,张宇鹏,张治刚,等. 长春汽车博物馆钢结构施工监测[J]. 施工技术,2011,40(10):33-35.

[5] 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):40-42.

[6] 张慎伟,楼昕,张其林. 钢结构施工过程跟踪监测技术与工程实例分析[J]. 施工技术,2008,37(3):62-64.

[7] 曾志斌,张玉玲. 国家体育场大跨度钢结构在卸载过程中的应力监测[J]. 土木工程学报,2008,41(3):1-6.

[8] 张玉玲,曾志斌,王丽. 国家体育场大跨度钢结构温度监测系统研究及其在卸载时的应用[J]. 钢结构,2008,23(7):51-54.

[9] 罗永峰,叶智武,陈晓明,等. 空间钢结构施工过程监测关键参数及测点布置研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(11):108-115.