

文章编号: 1673-9469(2012)01-0019-04

混合结构超高层建筑的施工过程模拟分析

吴天河, 高媛, 尉秀霞

(上海宝冶集团有限公司 钢结构分公司, 上海 201908)

摘要: 混合结构超高层建筑由于结构形式复杂, 施工周期普遍较长, 所以在施工安装过程中施工方案的不同以及实际施工荷载的施加顺序对结构的内力和变形影响较大。结合科威特中央银行总部大楼(Central Bank of Kuwait New Headquarters Building, 简称 CBK) 这一混合结构超高层建筑的施工安装工程实例, 应用有限元分析软件按照实际的施工顺序对施工过程进行模拟分析, 对比不同方案得出的分析结果, 可以了解不同施工方案中结构构件的应力变形在施工全过程中的发展情况, 进而通过比较选择较为合理的施工方案, 以确保复杂超高层建筑结构在施工过程中的安全。

关键词: 混合结构; 超高层建筑; 施工分析; 荷载效应

中图分类号: TU758.11

文献标识码: A

Simulation analysis of construction process of super high-rise hybrid structure building

WU Tian-he, GAO Yuan, WEI Xiu-xia

(Steel Structure Company of Shanghai Baoye Group Corp., Ltd, Shanghai 201908, China)

Abstract: As the super high-rise hybrid structure buildings are very complex and construction cycle is generally long, so that the different construction scheme and load sequence of actual construction load have a great impact on the internal forces and deformation of structure members during the construction process. Combined with the erection project of Central Bank of Kuwait New Headquarters Building (CBK), which is the super high-rise hybrid structure building, simulation analysis of actual construction process was studied by one finite element analysis software. By comparing the analysis result data of two different construction scheme, the different change tendency of member stress and deformation during all the construction process can be confirmed. And the more reasonable construction scheme is applied to ensure the construction safety through the construction process of complex super high-rise building.

Key words: hybrid structure; super high-rise building; construction analysis; load effect

现代超高层建筑在各国范围内的广泛应用, 不仅对其结构设计的挑战越来越大, 通常由于其建筑造型新颖以及结构形式复杂, 对此类超高层建筑的施工技术的要求也越来越高。设计师对于超高层建筑的结构设计分析都给予了足够的重视, 设计分析是以使用阶段的结构模型作为研究对象, 考察施加某个荷载工况或几个荷载的组合

工况下的荷载效应。然而超高层建筑的施工过程是一个伴随结构形态和荷载状态不断变化的动态过程, 会出现结构体系的转换、施工荷载的增减等情况, 施工阶段实际产生的荷载效应与使用阶段可能有较大不同, 因而存在较大的施工安全隐患^[1-2]。鉴于在我国有60%以上的工程结构倒塌事故因没有考虑施工过程的力学分析而导致, 规

收稿日期: 2011-11-12

作者简介: 吴天河(1978-), 男, 安徽安庆人, 工学博士, 工程师, 从事结构分析与设计工作。

范也建议考虑施工阶段的实际施工力学对结构产生的影响^[3]。

本文结合科威特中央银行总部大楼这一混合结构超高层建筑的施工安装工程实例,用施工力学的方法对施工过程进行模拟分析,不仅可以优选出安全经济的施工方案,还可以与施工同步监测所得的数据进行比较,对超高层建筑结构的安全施工提供技术支持。

1 工程概况

CBK 工程项目位于科威特市的核心城区,其西北方向约 500 m 即科威特的王宫,北侧临阿拉伯海湾大街,隔街对面东北方向距离阿拉伯海仅 100 m 左右。此工程由塔楼及裙房两部分组成,塔楼地下三层,地上含夹层共四十二层,总建筑高度 238.475 m,总建筑面积 68 771 m²,结构总用钢量约为 11 000 多吨,其总体建筑效果如图 1 所示。流畅明快的钢结构斜交网格与阿拉伯世界传统白色外墙勾勒出来的是一艘气势恢宏的巨大三角帆船。它的建筑理念来源于阿拉伯民族的伟大发明大三角帆船,阿拉伯语称为“萨菲那赫”,是这个大部分被沙漠覆盖的国家作为海航民族的图腾。该建筑为非规则钢筋混凝土核心筒与外侧钢框架组合而成的混合体系超高层结构,整个建筑结构由底部的 L 形随着高度增高逐渐向等边直角三角形过渡,两直角边为钢筋混凝土剪力墙,斜边采用逐渐内收的斜向交叉巨型钢管混凝土斜柱形成斜交网格,斜柱双向倾斜,平面内夹角分为 14.4° 和 16.16° 两种,平面外角度 8.08°,并通过短梁与楼层边梁的腹板连接。钢结构和混凝土结构分别采用美国规范 AISC 360-05 和 ACI 318-02^[4-6]。



图1 科威特中央银行新总部大楼

Fig.1 Central Bank of Kuwait New Headquarters Building

2 施工方案

根据 CBK 工程的现场实际情况,该建筑的混凝土核心筒及外侧钢框架分别逐层施工,考虑混凝土与钢结构这两种结构体系的各自不同的施工要求和特点,结合施工现场的总体统筹部署,依据混合结构的施工经验并经过试算,最终确定混凝土核心筒的施工进度控制保持在领先对应的外围钢框架约四层这样的一个进度差值比较合理。借助混凝土核心筒剪力墙的一些特定位置预埋钢板埋件作为外围钢框架中楼层梁的一个端部支撑,另一个端部支撑则由斜交网格巨型钢管混凝土柱及边梁系统来提供。

在结构施工阶段,将整个施工平面划分为两个施工区段,各区段同时展开流水作业,分别以两直角边的外端部作为起点,同时向中间对称安装。混凝土核心筒的浇筑施工逐层由下往上进行,钢结构单个施工作业面的安装顺序为:斜交网格钢管柱的吊装就位→胎架脚手架搭设→钢框架边梁安装→楼层梁安装→压型钢板的铺设→楼层板的浇筑。

该工程在施工过程中有两个难点:(1) 转换层的安装,结构第 3-7 层为结构的转换层,由两榀大型钢管桁架组成,其中 3-5 层为 Truss 03,5-7 层为 Truss 05,Truss 05 与 Truss 03 的桁架平面方向成直角相交。Truss 05 的局部悬挑长达 25 m,Truss 03、Truss 05 各有两榀并且均为箱型截面,单榀重量分别为 90 t 和 142 t,节点连接全部采用全熔透焊接。(2) D42 构件的安装,此构件两端连接于 Truss 05 上,其跨度为 18 m,总重为 34 t,结构设计上是由上方斜交网格钢管混凝土柱群体系“提拉”D42 构件来协同分担此构件所承受的楼层荷载。

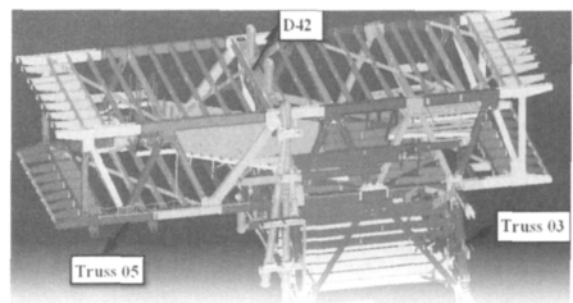


图2 Truss 03、Truss 05以及D42构件的空间位置图

Fig.2 Spatial location sketch of Truss 03, Truss 05 and D42

Truss 03、Truss 05 以及 D42 构件的空间位置如图 2 所示。

3 施工过程有限元分析

通常设计师在进行结构设计时重点考察使用阶段建筑结构在不同荷载工况及其组合作用下的荷载效应,而实际上结构的自重荷载是在施工过程中随着施工进度逐渐施加到结构构件上的,竣工时恒荷载作用下所产生的内力和变形是由各施工步的荷载效应依次累积而成,施工过程的“路径”和“时间”效应直接影响施工阶段及使用阶段结构的受力性能,特别是对于时变结构力学的大型复杂结构,可能会在施工过程中由于结构丧失稳定性或发生强度破坏而导致工程坍塌事故,也可能在竣工状态下结构内力和变形过大而导致其在使用阶段与其他荷载效应组合以后呈现较高的安全风险^[7-8]。实际施工荷载和施工顺序的不同对于施工分析结果的影响可能会非常大,原因在于:(1)竖向构件的刚度差导致构件的压缩变形不一致,竖向位移差会导致水平构件附加弯矩尤其是负弯矩增大,对于超高层建筑来说,层数越高这种荷载效应越明显。(2)结构在实际建造过程中逐层施加荷载会引起相应的内力和变形,但这种内力和变形不会影响到未建的上层结构,同样未建成的上层结构也不会影响已建结构的整体刚度,因而结构在不同的施工阶段具有不同的整体刚度。

较为准确的施工过程模拟分析方法为施工加载法,每个施工荷载步计算分析时,在前一个荷载步计算结构刚度矩阵的基础上增加考虑新荷载步的刚度贡献,依次迭代,如有 N 个荷载步,则要形成 N 次结构刚度矩阵并进行 N 次内力分析。因其计算过程复杂,可以采用数值方法进行模型分析,本文采用大型通用有限元分析软件 ETABS 9.5 对 CBK 工程的施工过程进行分析计算。为使分析模型尽可能与实际吻合,结合本工程实际施工方案中将施工全过程划分为 34 个施工荷载步,再按照施工荷载步的不同逐步施加荷载。在分析计算中,考虑了恒荷载、施工阶段活荷载、温度荷载以及风荷载这些荷载中最不利荷载组合作用下结构构件的受力和变形,结构的有限元模型如图 3 所示。

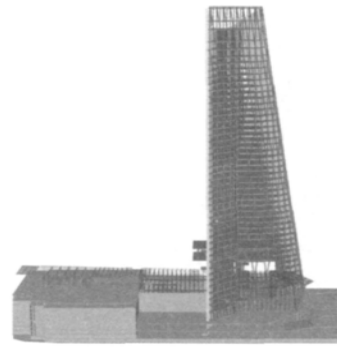


图3 整体结构有限元模型

Fig.3 Finite element model of total structure

本工程的结构转换层中大跨度大悬挑的钢构件和型钢混凝土构件较多,施工过程中对于结构转换层构件的强度和刚度验算非常重要。通过初步有限元分析试算,发现在 D42 上方斜交钢管混凝土柱群形成有效的“提拉”体系之前,D42 杆件的应力和变形都比较大,给施工安全带带来隐患。在制定施工方案时针对这个问题结合现场实际空间位置条件特别给 D42 构件增设下部临时桁架支撑。同样通过试算发现,等到斜交网格钢管混凝土柱以及相应的边梁楼层梁第 28 层安装完成时,上方的柱群能够与 D42 构件整体协同工作,此时即可将桁架支撑卸载撤走。根据上述试算的结果合理地调整模型进行分析计算最终得出转换层区域所有杆件的最不利工况下的应力比如图 4 所示。最大应力比小于 0.85,大部分构件的应力比都较低,满足设计要求。Truss 03 和 Truss 05 构件的最大竖向变形值分别为 15.3 mm 和 17.8 mm,D42 构件在下部临时桁架支撑卸载前后的最大竖向变形值分别为 22.0 mm 和 39.6 mm,均满足美国规范 AISC 360-05 的变形小于 $L/240$ 的限值规定。

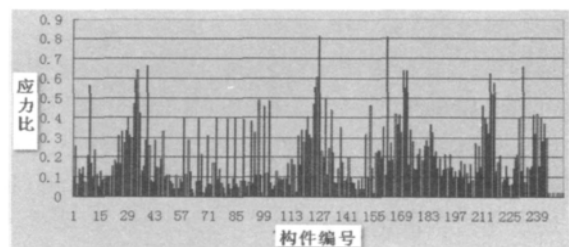


图4 结构转换层构件应力比

Fig.4 Stress ratio of members on structural transfer floor

Truss 05 的端部悬挑较长,结构设计时考虑到

转换层区域主要杆件的受力均衡,在桁架平面内设置了 D479、D480、D656 以及 D657 等支撑构件。原施工方案计划在第 26 层安装结束后再安装 Truss 05 的悬挑部分,此时支撑亦需要安装就位。根据现场的实际施工条件和合理缓解工期紧张的考虑,工程建设各方拟考察在第 14 层安装结束后即提前安装此悬挑部分的可行性。通过施工过程的有限元分析结果发现, D479、D480、D656 以及 D657 等支撑构件的最大轴力由原施工方案工况下的 3 190 kN、-5 561 kN、3 207 kN 与 -5 543 kN 依次变为新施工方案工况下的 3 223 kN、-5 619 kN、3 242 kN 与 -5 601 kN,虽然新施工方案中轴力均有所增大,但是也均小于各支撑杆件的设计

荷载,因而新的施工方案提前安装此悬挑部分不会给施工安全带来隐患。

D42 构件所在楼层第 7 层为关键楼层,此楼层关键节点的两种施工方案下的竖向变形值在施工全过程中的累积变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出由于施工顺序的变化,荷载步中施加的荷载不同最终导致节点在对应施工阶段的竖向变形值也有较大的不同,因此可以考察施工过程中不同施工阶段的荷载效应是否存在不安全因素。由于随着施工过程的结束两种方案的最终建造成形是同样的,同时可以发现不论原方案还是现方案,节点的最终荷载效应体现出的总竖向变形值是一样的。

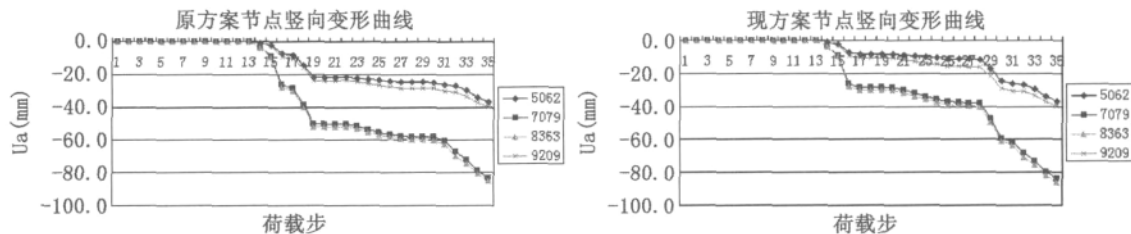


图5 两种施工方案过程中节点的竖向变形值

Fig.5 Vertical deformation values of nodes in two construction scheme process

根据本工程的结构构造以及现场施工的条件,施工荷载步还可以更为精细划分为 63 步。对此荷载分步工况下的结构模型进行施工过程的有限元模拟分析,对比先前的施工荷载步为 34 步的情形下的分析结果,发现施工荷载步更多的情况下结构构件的应力和变形数据都要略大一些,并且将这两组变形数据与本工程现场实际监测的变形数据相比可以看出施工荷载步更多的情况下的数据更接近与实际监测值。

4 结论

1) 施工过程中实际产生的阶段性荷载累积效应可能会给施工带来安全隐患,本工程中第 28 层楼层梁柱体系安装完成之前,在 D42 构件下方设置合适的临时支撑桁架可以使得转换层的受力和变形满足规范限值要求。

2) 施工顺序以及施工荷载施加步骤的不同会造成施工过程中结构构件的位形和应力的发展累积过程不同。

3) 施工荷载步划分越精细,施工过程模拟分析的结果数据与实际现场监测的结果数据就越接近。

参考文献:

- [1] 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): 41-46.
- [2] 李惠明. 高层建筑施工过程中的安全分析[D]. 北京: 清华大学, 1992.
- [3] JGJ 3-2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
- [4] ANSI-AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [5] ANSI-AISC 360-05, Commentary Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [6] ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete[S].
- [7] 郭彦林, 刘学武. 大型复杂钢结构施工力学问题及分析方法[J]. 工业建筑, 2007, 37 (9): 1-8.
- [8] 刘学武. 大型复杂钢结构施工力学分析及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.

(责任编辑 刘存英)