

高层建筑新型大跨钢-混凝土转换桁架 施工力学性能分析

李子云¹ 郭孟涛¹ 李运富¹ 李胜利^{2,*}

(1.郑州市路通公路建设有限公司,郑州 450001; 2.郑州大学 土木工程学院,郑州 450001)

摘 要 大跨型钢-混凝土转换层桁架是一种新型高层建筑结构转换形式,监测并分析其施工期力学性能对高层建筑安全至关重要。结合实时监测和数值模拟两种方法对高层建筑新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学特性进行了分析。以位移和应力为指标,对比并验证了实时监测和数值模拟结果的一致性,总结出该新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学性能。结果表明:整个施工过程中,实时监测和数值模拟所得转换层桁架各杆件的应力和位移结果均满足规范要求,且有较大的安全裕度;施工楼层越高,该楼层荷载对桁架应力和位移影响越小;脚手架拆除阶段,桁架位移会出现大幅上升。本文采用的有限元计算方法可用于新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学性能分析。

关键词 高层建筑, 转换层, 钢桁架, 实时监测, 数值模拟

Analysis of Construction Mechanical Properties of Novel Large-Span Steel-Concrete Transfer Truss of High-Rise Building During Construction Stage

LI Ziyun¹ GUO Mengtao¹ LI Yunfu¹ LI Shengli^{2,*}

(1.Zhengzhou Lutong Highway Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2.School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract The large-span steel-concrete transfer layer truss is a novel conversion form of high-rise building structure. Monitoring and analyzing the mechanical properties during construction is critical to the safety of high-rise buildings. Real-time monitoring and numerical simulation technology were used in combination to analyze the mechanical characteristics of the large-span steel-concrete transfer layer truss of high-rise building during construction stage. In terms of displacement and stress as indicators, the consistency between the real-time monitoring values and the numerical simulation results is assessed and verified. In addition, the mechanical properties of the novel large-span steel-concrete transfer layer truss were presented. The results show that during the construction process, the stress and displacement values in each structural member of the conversion layer truss captured by real-time monitoring and derived from the numerical simulation meet the requirements of the specification and have a great safety margin; the higher the construction floor level, the smaller the influence of the vertical load on the truss stress and displacement; during the scaffold dismantling stage, vertical deflection would occur in the transferring truss. The finite element method can be used to evaluate the mechanical properties of the new large-span steel-concrete conversion layer truss.

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778587)

作者简介: 李子云,男,高级工程师,研究方向为土木工程(道路与桥梁)。E-mail:603079289@qq.com

* 联系作者: 李胜利(1979-),男,博士,教授,博导,主要从事结构抗风和健康监测研究。E-mail: lsl@zzu.edu.cn

Keywords high-rise building, conversion floor, steel truss, real-time monitoring, numerical simulation

0 引言

随着高层建筑的不断发展,对建筑的功能需求也越来越高^[1]。高层建筑结构复杂、规模大、施工周期长,结构时变特性显著^[2]。为了满足不同功能的需求,通常会在结构转换的楼层设置转换层^[3-4]。在高层建筑项目中,转换层发挥着承上启下的作用,同时也是该建筑的核心组成部分^[5-6]。桁架结构是转换层的一种常用形式,但其受力形式较为复杂^[7]。因此,对高层建筑桁架转换层施工期力学性能的研究显得十分必要。结构在施工过程中,其受力状态甚至支撑体系会发生变化,因此有必要对结构的施工全过程进行实时监测^[8-9]。

目前关于现场实测的方法应用于转换层结构和桁架结构的力学分析非常普遍。Ni等^[10]在深圳证券交易所大型浮动平台钢桁架结构上安装了结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)系统并重点对其应变和挠度进行了测量,在关键的施工阶段,SHM系统提供了有关结构应力和挠度变化的准确实时信息。Lee等^[11]提出了一种用于桁架桥结构节点和构件损伤实时监测的方法,并验证了该方法在实时健康监测系统中的应用优势。Park等^[12]提出了一种基于振动线应变仪(VWSG)的实用无线传感器网络系统(WSNS),并将其应用到正在施工的巨大桁架结构上,根据在16个月期间收集的应变数据,对施工过程进行了定量评估。

除现场实测外,数值模拟方法以及数值模拟与现场实测相结合的方法也广泛应用于转换层结构和桁架结构的力学分析。数值模拟的优点在于周期短、理论性强、分析全面。Nie等^[13]在不同地震记录输入下,利用数值模拟的方法对具有转换层的高层建筑进行了弹塑性动力响应分析的研究,为高层建筑转换层的设计提供了参考。Deng等^[14]对SCR转换层结构的施工过程进行了数值模拟,提出了一种方便、周期短的施工方法。He等^[15]以试验和数值模拟相结合的方法进行了分期施工背景下大跨钢桁架转换层的力学性能研究,结果表明,分段施工方法能充分利用钢材的特点,使结构的荷载效应更加合理。Yao等^[16]利用

试验与数值模拟相结合的方法研究了框架-桁架-柱混合支承结构的抗震性能。Machacek等^[17]对复合钢-混凝土桥桁架进行了数值模拟分析。Lei等^[18]进行了钢桁梁组合梁剪力滞后效应的数值分析。Lai等^[19]进行了钢混组合桁梁自然振动分析的改进数值方法研究。Sangeetha等^[20]进行了复合空间桁架极限性能的试验和数值模拟研究。Ji等^[21]对空间桁架结构的损伤识别进行了数值模拟研究。在对现场结构进行实时监测的基础上加以数值模拟作为对照能够进一步验证监测结果,Ni等^[10]便使用实时监测和数值模拟相结合的方法展开研究。但是上述研究没有对施工期新型大跨型钢-混凝土转换层桁架进行实时监测。

本文在施工期对高层建筑新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学特性进行实时监测,并通过ANSYS软件对该结构进行数值模拟,监控施工期桁架的力学性能。将监测结果与模拟结果对比,分析总结得到该新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学性能,并验证该有限元计算方法对于实际工程的适用性。

1 现场实测

1.1 工程概况

郑州报业大厦总用地面积25 888.14 m²,总建筑面积179 284.09 m²,本工程地下3层、地上21层,最大建筑高度99.25 m,地下建筑埋深13.80 m。该工程建筑的场地类别为二类,安全等级为二级,建筑耐火等级为一级,结构使用年限为50年,建筑抗震设防类别为重点设防类。图1为高层建筑现场施工照片,图2为钢桁架。本研究中桁架施工分以下阶段:桁架卧倒在地面、桁架悬空、桁架悬空静载12小时、桁架吊装至转换层(桁架上层未施工)、施工到建筑第4层安装脚手架吊装桁架、浇筑第六层楼板时撤去脚手架。郑州报业大厦转换桁架负载上部17层的荷载,桁架杆件受力复杂且对结构安全至关重要。鉴于结构形态及构成对施工精度要求高,施工难度大,施工过程中结构受力状态复杂,因此对转换层桁架施工监测是非常必要的。

为保证结构施工过程的安全,确保各阶段的加载及施工顺序均满足设计要求,并对施工过程中可能出现的因施工偏差、误差累计等造成的构件失效提前进行预警,本工程采用抽检的方式选取受力最大的一榀桁架进行施工过程中的结构受力状态进行实时监测并预警。



图1 郑州报业大厦施工现场照片

Fig.1 Photos of the construction site of Zhengzhou news building

1.2 监测方法

郑州报业大厦在施工过程中,结构的应力和变形会发生较大变化,需对其进行施工实时监测,以便真实反映建筑物及其配套设施的空间性态和变形情况,为施工和安装提供坐标基准和实测数据参考。

表1

应力测点布置

Table 1

Arrangement of stress measuring points

序号	位置	测点数	传感器
1	上弦杆	6	埋入式应变计(焊接在型钢表面,埋在混凝土中)
		4	表贴式应变计(粘贴在混凝土表面)
2	下弦杆	9	埋入式应变计(焊接在型钢表面,埋在混凝土中)
		6	表贴式应变计(粘贴在混凝土表面)
3	腹杆	12	表贴式应变计(焊接在型钢表面)
合计		37	

主体结构封顶之前,转换桁架施工(提升)过程中,对桁架的施工应力进行监测,数据采集频率为1次/小时,直至单榀桁架安装完毕后。桁架转换层施工完成之后,每一层浇筑混凝土前后各监测一次,且在下一层施工之前要根据监测数据分析结果,对结构有限元模型进行修正,运用修正后的有限元模型进行下一阶段预测分析,确保下一阶段施工过程结构安全,如此反复,不断修正、预



图2 转换层桁架施工现场照片

Fig.2 Photo of construction site of conversion floor truss

应力测量是结构施工监测中的重要内容。通过对结构构件的应变监测可得到其应力,这里采用振弦式应变传感器对施工过程中受力较大的桁架、附属构件及临时支撑构件进行抽检监测,其自带温度传感器,可同时监测施工过程中的温度场变化规律,从而对应力结果进行修正。根据理论分析初步结果以及施工现场条件,确定了桁架构件施工过程中应力测点的位置和数量。应力测点布置见表1,测点布置图见图3、图4。其中包括25个转换层桁架弦杆测点和12个腹杆测点,共计37个应力测点,每个测点布置1个传感器。振弦式传感器是以拉紧的金属弦作为敏感元件的谐振式传感器,灵敏度 $\pm 0.10\%$;量程:800~3 500 Hz;频率精度:0.1 Hz;温度0.25 °C;工作温度:-20 °C~70 °C。本仪器可用于监测和检测,抗干扰能力强,数据接口设有防雷保护功能,适用施工过程中桁架构件的应力变化测量。

测,从而确保施工整个过程结构安全。主体结构封顶后,砌筑装饰工程施工过程中,根据施工进度计划,综合考虑施工荷载情况,应力每天监测一次,根据监测数据分析结果,对结构有限元模型进行修正,运用修正后的有限元模型进行下一阶段砌筑工程施工后转换层应力和位移预测分析,确保下一阶段施工过程结构安全,如此反复,不断修正、预测,从而确保砌筑装饰工程施工整个过程结

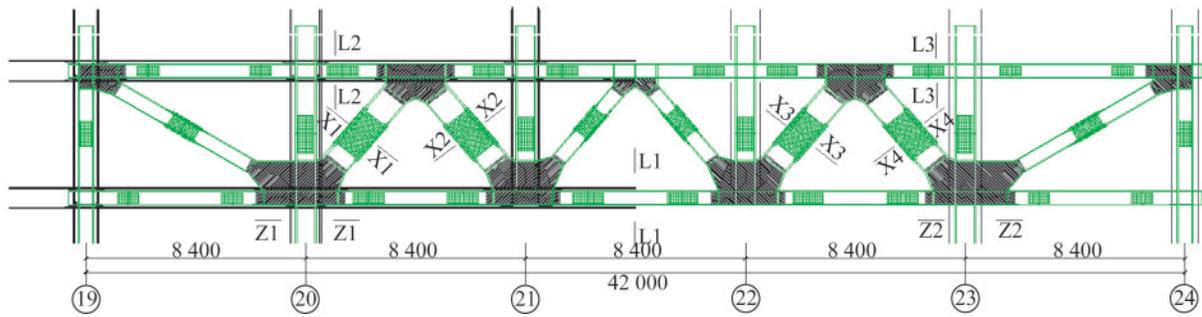


图3 桁架构件内力测点布置及数量示意图(单位:mm)

Fig.3 Schematic diagram of the arrangement and number of internal force measuring points of truss members (Unit:mm)

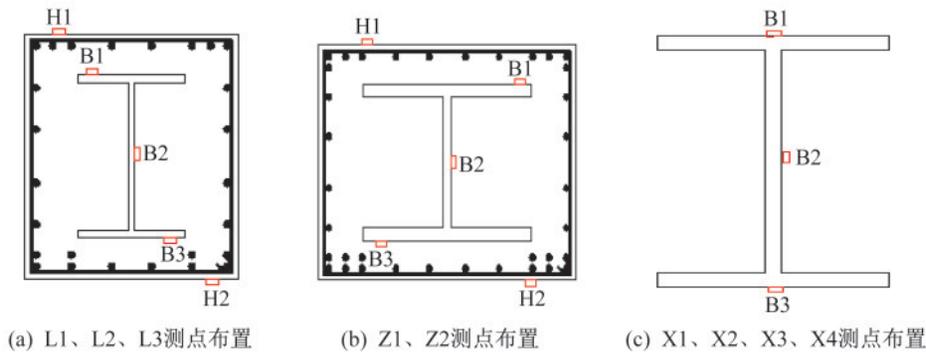


图4 桁架构件测点截面示意图

Fig.4 Schematic diagram of measuring points of truss structure components

构安全。

结构变形是反映结构形态的主要参数之一,这里着重选取桁架结构位移敏感区域,共计5个

竖向变形测点,包括:桁架支座节点2个竖向变形测点,桁架中间节点2个竖向变形测点和基准站1个竖向变形测点(图5)。

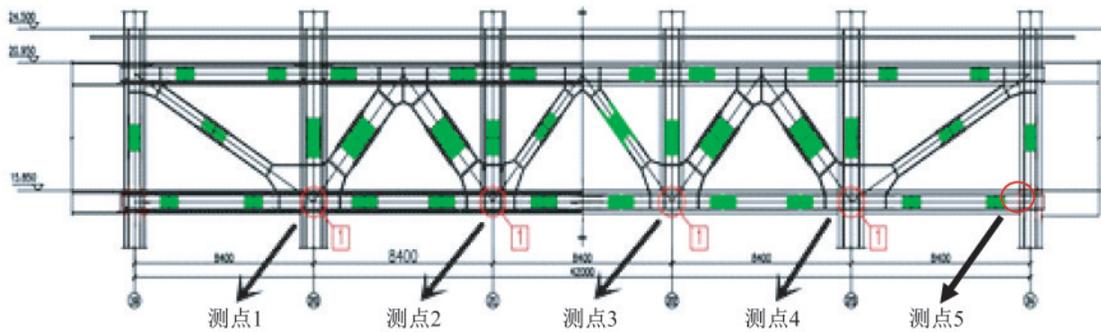


图5 桁架位移监测点布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of truss displacement monitoring points

竖向变形拟采用静力水准仪(图6)对桁架变形进行实时在线监测。采用自动化数据采集仪(图7)对各传感器的数据进行实时采集,然后通过无线发射模块将采集到的数据传送给数据接收服务器进行数据汇总、处理。主体结构封顶前后,位移监测频率为每小时采集一次。根据监测数据分析结果,对结构有限元模型进行修正。本研究确定以第5个水准仪布置点作为基准点(图5),基准点没有在桁架上且不是悬空的。由其他水准仪

测点测得的实测值与基准点测得值之差可以得到所需的位移值。

2 数值模拟

2.1 计算方法

采用 ANSYS 对桁架和建筑整体进行建模,采用实体单元对转换层刚桁架进行建模,采用



图6 静力水准安装图

Fig.6 Static level installation drawing



图7 数据采集仪

Fig.7 Data acquisition instrument

梁板单元对报业大厦进行建模。图8为桁架有限元模型,图9为报业大厦整体有限元模型。调节桁架网格尺寸小于0.2 m时,计算结果趋于稳定且变化很小,故桁架的有限元单元大小取0.2 m。调节

建筑网格尺寸小于0.5 m时,计算结果趋于稳定且变化很小,故建筑的有限元单元大小取0.5 m。表2为根据建筑采用的材料属性确定的结构计算参数。

表2

结构计算参数

Table 2

Calculation parameters

计算参数	桁架	梁柱	板
弹性模量/Pa	2.06×10^{11}	3.6×10^{10}	3.0×10^{10}
泊松比	0.28	0.23	0.24
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	5 200	2 400

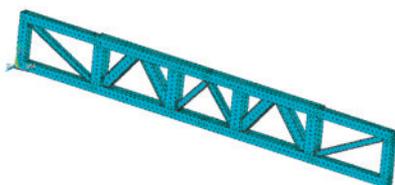


图8 桁架有限元模型

Fig.8 Finite element model of the truss

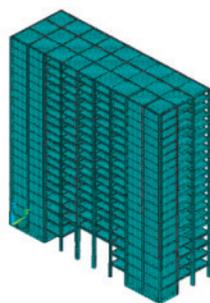


图9 建筑整体有限元模型

Fig.9 Finite element model of the building

2.2 计算工况

钢桁架转换层的主要功能是将其上部结构传递来的荷载转换到下部支撑构件上,转换结构承受的荷载很大,是整个建筑结构的关键部位。因

此对钢桁架转换层结构的受力影响因素进行分析是十分必要的。

在施工期间,每个施工阶段结构的几何形态、受力体系及边界条件都是随着时间变化的,因此需要分工况讨论。桁架吊装前,桁架所受荷载为钢结构及附属结构自重。上部结构施工时,上部结构与转换桁架共同作用,作为一个单独工况。桁架有限元模型计算结果如图10所示。在桁架安装过程中,所受荷载为钢结构及附属结构自重、施工中临时的人、机荷载、温差引起的荷载等。钢桁架转换层整体桁架受力情况的影响因素比较多,比如:转换桁架上部框架梁的刚度会对转换桁架的受力产生影响;转换桁架端部支撑结构与转换层直接相连,其刚度会对桁架的受力产生影响;建筑地基的不均匀沉降会使结构的内力增加,也会对桁架的受力产生影响;另外桁架不同的支撑方式使得支撑结构对桁架的约束程度也不同;结构构件在温度的作用下会膨胀或收缩,在温度变化时,结构的温度应力也不同。吊装完成后建筑前十二层有限元模型计算结果如图11所示,整体有限元计算结果如图12所示。

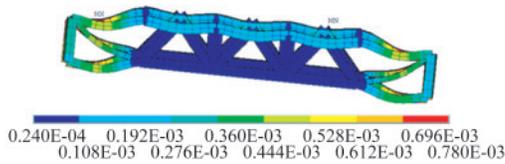


图 10 桁架有限元计算结果

Fig.10 Finite element calculation results of the truss

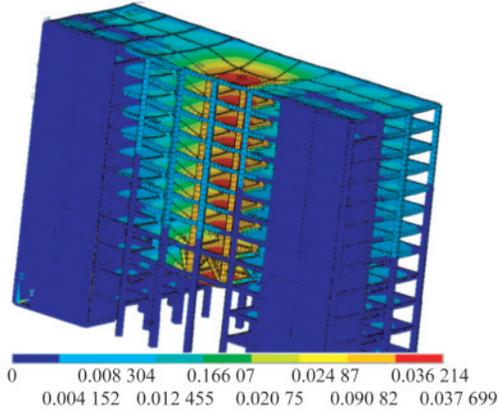


图 11 建筑前十二层有限元计算结果

Fig.11 Finite element calculation results of the first twelve floors of the building

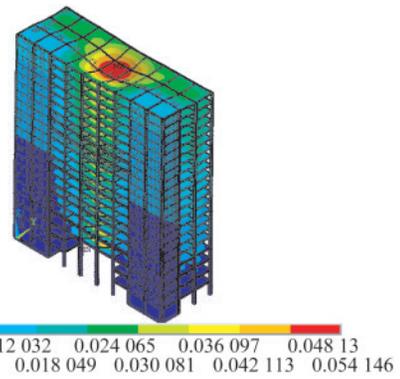


图 12 整体建筑有限元计算结果

Fig.12 Calculation results of the overall building finite element

(测点 B3)整体偏大。下弦杆在各施工阶段受力较小,从各测点实测结果得到,上翼缘(测点 B1)以压应力为主,腹板(测点 B2)均为拉应力,下翼缘(测点 B3)均为压应力。

如图 14 所示,斜腹杆在各施工阶段实测结果随荷载增加整体呈现增大趋势,X1、X2、X3 测点上翼缘以拉应力为主,X4 测点上翼缘承受压应力且整体值较小;X1、X2、X4 测点腹板以压应力为主,X3 测点腹板承受拉应力;X1、X2、X4 测点下翼缘以压应力为主,X3 测点下翼缘以拉应力为主。柱在各施工阶段承受压应力,上弦杆和下弦杆实测应力值随荷载增加变化不大,腹板应力值随荷载呈增大趋势,如图 15 所示。工程主体完工后,监测桁架中各测点基本承受轴压力作用,该榀桁架受到周围桁架的挤压作用。

3 结果与讨论

3.1 应力分析

3.1.1 实测结果分析

上弦杆在各施工阶段中均承受压应力,各测点压应力值实测结果未随荷载的增加而增大,整体变化趋势先增大后减小,如图 13 所示。斜腹板(测点 B2)压应力值较上翼缘(测点 B1)和下翼缘

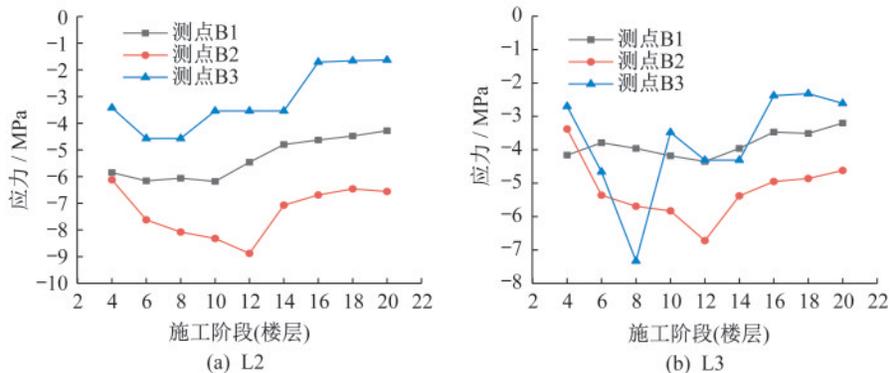


图 13 各施工阶段上弦杆实测轴力

Fig.13 Measured axial force of the upper chord at each construction stage

根据《型钢-混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)及《混凝土结构设计规范》[GB 50010—2010(2015年版)]计算得到桁架的腹杆和弦杆

应力规范限值分别为 290 MPa 和 310 MPa,而实际测量结果还远未达到该值,故该桁架有较大安全裕度。

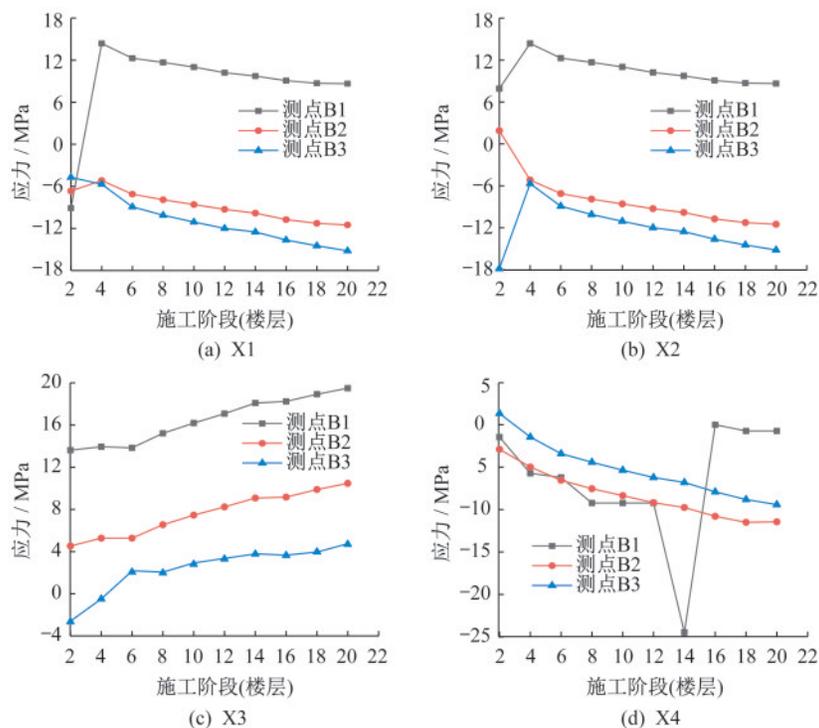


图 14 各施工阶段斜腹杆实测轴力

Fig.14 Measured axial force of diagonal web at various construction stages

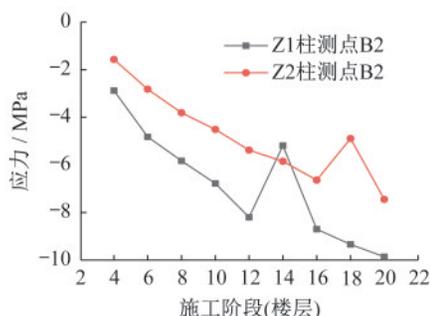


图 15 各施工阶段Z1和Z2柱实测轴力

Fig.15 Measured axial forces of Z1 and Z2 columns at various construction stages

3.1.2 实测结果与计算结果对比分析

为更加直观对比桁架在整个施工阶段的实测结果与计算结果,选取L2、L3上弦杆,X1、X2、X3、X4斜腹杆,Z1、Z2柱绘制在逐层施工时各测点应力变化曲线,如图16所示。由此可得出:各施工阶段实测结果与计算结果存在不同程度差异。逐层施工时,计算结果呈现线性增大趋势,上弦杆的实测结果与计算结果差异较大,甚至得到受压受拉两种相反的结果,经过现场原始数据对比,第8层实测值出现突变是由于传感器出现问题导致(图16(a)),斜腹板和柱的实测结果呈现增大的趋势,与计算结果相一致。实际施工过程中,材料堆放、机械设备等不利干扰因素会影响实测结果,

导致结果出现波动,但随着上部结构逐层施工,多数测点监测到应力整体呈现增大趋势,这与计算结果变化趋势相吻合。

3.2 位移分析

3.2.1 实测结果分析

为了确定施工阶段桁架的位移状态,从建筑施工至第6层开始对桁架中关键节点的位移进行了实时监测。图17所示为桁架各阶段的位移监测结果,测点1与测点4位于桁架跨中1/5和4/5处,测点2与测点3位于桁架跨中2/5和3/5处,测点1与测点4的位移相对测点2和测点3较小,这与理论相符。测点1与测点4的结果相近,测点2与测点3的结果相近,这是由于测量的桁架为对称结构,且测点对称分布。测点1与测点4之间的差值相对于测点2与测点3较小,这可能是由于施工期间荷载对跨中位置的影响较大。四个测点均表现为上升的趋势,且施工后期上升平缓,表明施工楼层越高,该层楼荷载对桁架位移影响越小。图17中测点1的第9-11层与测点2的10-11层测量结果出现了较大的波动,为测量中的奇异值,或是测量人员或者测量仪器设备等导致的错误测量结果,可以剔除。根据《型钢-混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)及《混凝土结构设计规

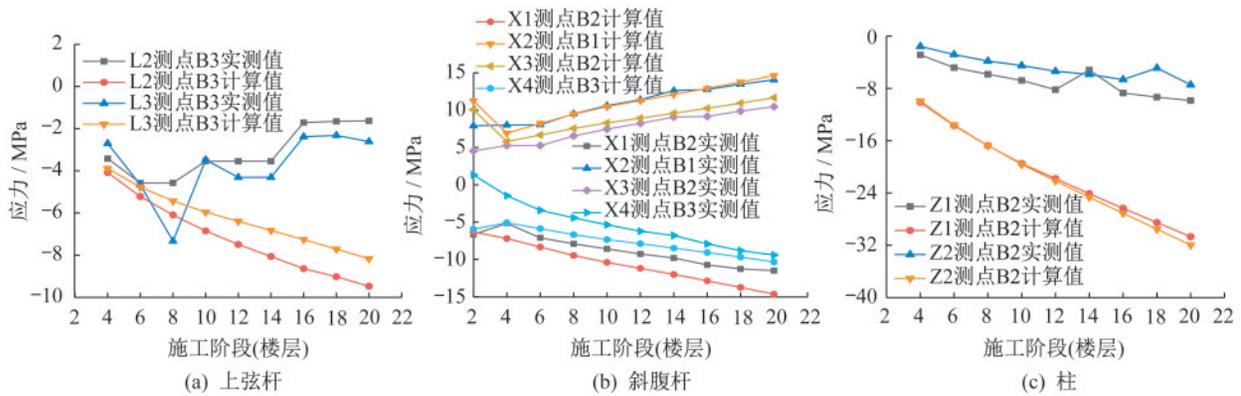


图 16 各施工阶段实测值与计算值对比

Fig.16 Comparison of measured and calculated values at various construction stages

范》(GB 50010—2010)计算得到桁架的位移规范限值为 63 mm,而实际测量结果还远未达到该值,故该桁架有较大安全裕度。

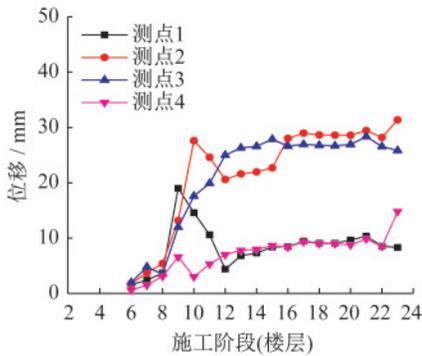


图 17 位移实测结果

Fig.17 Measurement results of displacement

3.2.2 实测结果与计算结果对比分析

如图 18 所示,为了验证本文采用的型钢-混凝土转换层桁架有限元计算方法的正确性,对比桁架的位移测量结果和计算结果。图 18 中计算结果与测量结果变化趋势一致,且相差较小。表明本文采用的计算模型与实际结构相似,能够很好得到比较准确的计算结果。且测点 1、4 的计算结果与测量结果差值比测点 2、3 大。测点 2 和测点 3 在施工阶段到达 9 层时,计算值与实测值均出现了大幅度的上升,这是由于第 9 层施工期间拆除了桁架下方的脚手架,计算时同时去除了桁架下方的约束。

4 结论

本文利用实时监测和有限元模拟两种方法对施工期的高层建筑新型大跨型钢-混凝土转换层

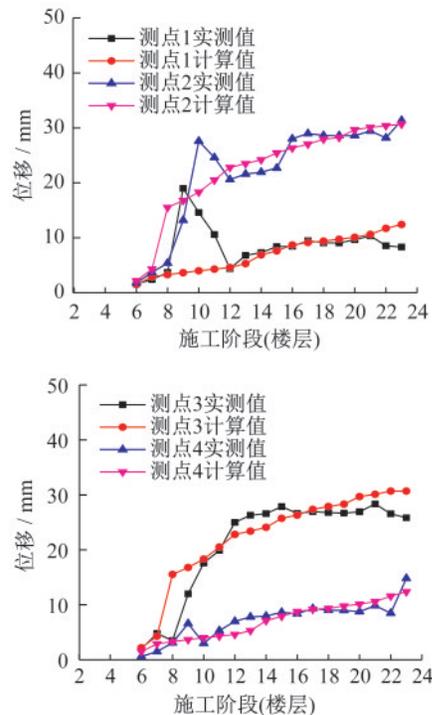


图 18 位移实测结果与计算结果对比

Fig.18 Comparison of displacement of measurement results and calculation results

桁架的施工期力学特性进行分析,主要结论如下:

(1) 整个施工过程中转换层桁架各杆件的应力和位移均满足规范要求,且有较大的安全裕度。可在保证结构安全的条件下适当调整桁架的材料与结构以降低工程造价。

(2) 桁架下方脚手架拆除阶段,桁架位移会出现大幅上升,应在确定安全的情况进行脚手架拆除,且建议脚手架不能一次性拆除,应分步进行脚手架的拆除工作。

(3) 随着施工楼层的增高,桁架的应力和位移变化越小,施工楼层越高,该层楼荷载对桁架应

力和位移影响越小。

(4) 除上弦杆外有限元模拟结果与现场实际监测结果吻合度较高,表明有限元模拟方法可以用于新型大跨型钢-混凝土转换层桁架的力学性能分析,为后期的现场施工和安全预警提供指导和参考。

参 考 文 献

- [1] Ni Yanchun, Lu Xilin, Lu Wensheng. Operational modal analysis of a high-rise multi-function building with dampers by a Bayesian approach [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 286-307.
- [2] Yuan Zhijie, Sun Guangjun, Wu Xiaoping, et al. Research on vertical deformation and pre-deformation control of three-tower connected super high-rise structure during construction [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022, 31 (4) : e1913.
- [3] Nie Jingwei, Liu Hongbing, Fang Zhao. Elastic-plastic seismic response analysis of high-rise building with transfer storey [J]. Advanced Materials Research, 2013, 671-674(2): 1341-1345.
- [4] Zhang Chongyang, Bian Guangsheng, Liu Na, et al. Study on analysis and design of structure transfer storey in business-living building [J]. Progress in Structure, 2012, 166-169: 409-413.
- [5] Wang Zhongxin. The influence of seismic behavior of web-type column-transfer structure caused by rigidity variation of the transfer storey [J]. Advanced Materials and Process Technology, 2012, 217-219: 1106-1109.
- [6] He Mingwei. Study on the mechanical behavior of long-span steel truss transfer storey [J]. Advanced Materials Research, 2014, 838-841: 219-226.
- [7] Quesada Olmo N, Jimenez Martinez M J, Farjas-Abadia M. Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology [J]. Measurement, 2018, 123: 115-124.
- [8] Zheng Wenhao, Dan Danhui, Cheng Wei, et al. Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method [J]. Measurement, 2019, 141: 460-471.
- [9] Hong Junhao. Health monitoring of joint conditions in steel truss bridges with relative displacement sensors [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2016, 88: 360-371.
- [10] Ni Yiqing, Xia Y X, Ye Xiaowei. Structural health monitoring of a tall building with huge floating platform [J]. Advances in Science and Technology, 2013, 83: 177-187.
- [11] Soon Gie Lee, Gun Jin Yun. A statistical reference-free damage identification for real-time monitoring of truss bridges using wavelet-based log likelihood ratios [J]. Smart Structures and Systems, 2013, 12(2): 181-207.
- [12] Park Hyo, Lee Hwan, Choi Se, et al. A practical monitoring system for the structural safety of mega-trusses using wireless vibrating wire strain gauges [J]. Sensors, 2013, 13(12): 17346-17361.
- [13] Nie Jingwei, Liu H B, Fang Z. Elastic-plastic seismic response analysis of high-rise building with transfer storey [J]. Advanced Materials Research, 2013, 671-674: 1341-1345.
- [14] Deng Nianchun, Wei Jianhui, Deng Yu. Simulation of construction process combining steel truss integral lifting with concrete pouring for src conversion layer structure [C]//Proceedings of the 2016 International Conference on Architectural Engineering and Civil Engineering, 2016.
- [15] He Mingwei. Study on the mechanical behavior of long-span steel truss transfer storey [J]. Advanced Materials Research, 2014, 838-841: 219-226.
- [16] Yao Zeliang, Lui E M. Experimental and numerical investigation of the seismic performance of an A-frame-truss-column hybrid supporting structure [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 20(9): 1277-1298.
- [17] Josef Machacek, Martin Cudejko. Composite steel and concrete bridge trusses [J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3136-3142.
- [18] Lei C, Tian J L, Li S S, et al. Parameter analysis on shear lag effect of composite girder with steel truss webs [C]//Proceedings of the 2016 International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development, 2016, 75: 224-230.
- [19] Lai Zhipeng, Jiang Lizhong, Zhou Wangbao, et al. Improved finite beam element method to analyze the natural vibration of steel-concrete composite truss beam [J]. Shock and Vibration, 2017(5): 1-12.
- [20] Sangeetha P, Senthil R. A study on ultimate behaviour of composite space truss [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 21(3): 950-954.
- [21] Ji Weihong, Song Yupu, Liang Bing. Numeric simulation for structure's damage identification of space truss [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2007, 2(4): 423-428.