DOI: 10.7672/sgjs2025110112

单层平板网格结构逆作施工分析及监测研究

张 茜[1,2],王元清[2],崔翰墨[1],张文学[1]
(1. 中铁建工集团有限公司,北京 100060; 2. 清华大学土木工程学院,北京 100084)

[摘要] 为解决单层平板网格结构逆作施工结构体系不完整、施工风险高的难题,开展单层平板网格结构逆作施工过程数值模拟与现场监测研究。制定平板网格结构逆作分区提升方案,研究单点及多点超提对结构的影响,开展结构逆作提升过程风险控制研究,给出结构提升过程的同步提升控制方案及提升抗风控制措施。结合结构施工监测,验证施工仿真分析的准确性及施工方案的可行性。采用结构设计与施工一体化协同分析及复杂节点多尺度精细化分析,评估复杂结构施工成型过程对结构设计使用阶段的影响。

[关键词] 平板网格;逆作法;监测;提升;施工技术
[中图分类号] TU765 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)11-0112-06

Reverse Construction and Monitoring of Single-layer Flat Grid Structure

ZHANG Xi[1,2], WANG Yuanqing[2], CUI Hanmo[1], ZHANG Wenxue[1]
(1. *China Railway Construction Engineering Group*, *Beijing* 100060, *China*;
2. *Department of Civil Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract: To solve the technical problems of incomplete structural systems and high construction risk in the reverse construction of single-layer flat grid structures, the numerical simulation and field monitoring of the reverse construction process of single-layer flat grid structures are carried out. The upside-down partition lifting scheme of flat grid structure was developed. The influence of single-lifting-point overlift and multi-lifting-point overlift on the structure was studied. The risk control research of the upside-down lifting process of the structure is carried out, and the synchronous lifting control scheme and wind resistance control measures of the structure lifting process were given. Combined with the structural construction monitoring, the accuracy of the construction simulation analysis and the feasibility of the construction scheme were verified. The influence of the construction forming process of complex structures on the use stage of structural design was evaluated by using the integrated collaborative analysis of structural design and construction and the multi-scale fine analysis of complex nodes.

Keywords: flat grid; top-down method; monitoring; lifting; construction

0 引言

单层网格结构施工期间结构体系不完整、施工风险高,即使施工过程安全,也可能由于不恰当的施工方法造成较大的附加应力残留在结构内部,为后续结构设计使用阶段埋下安全隐患。选择合理的施工方法跟踪预测并控制设计与施工各阶段内力和变形是确保工程结构安全的关键环节。

整体提升是大跨屋盖结构常见的施工方法,利用液压提升设备将在地面拼装的大跨结构提升至设计位置[1-4]。北京城市副中心图书馆屋盖为单层平板网格结构,屋盖下部地上为剪力墙、斜向支撑及梁柱构件组成的复杂山体结构,地下为 2 层地下室。不同于传统施工工艺,本工程采用逆作分区提升施工方法,待地下室结构施工完成后,先分区逆作提升屋盖钢结构,再浇筑屋盖楼板,最后施工屋盖下部主体结构。利用纤细结构铰接柱与临时支撑组成三角支撑体系,将地面拼装的平板屋盖分区提升至设计位置,提高焊接质量的同时可实现多区流转作业,缩短工期。

平板网格结构逆作施工过程存在以下问题:提升吊点多,同步提升控制难;平板网格结构提升时下部主体结构未施工,提升支撑架抗侧刚度小,施

[作者简介] 张 茜,博士,高级工程师,E-mail: 360341566@qq.com
[收稿日期] 2025-01-26

工风险高;采用逆作法将屋盖结构提升至设计位置后,支撑屋盖结构的铰接柱未与下部楼层形成有效连接,施工阶段与使用阶段结构体系差异大,不当的卸载方法可能导致结构倒塌[5]。因此需确定合理的施工方案,并进行施工期间的风险控制,结合施工监测保证结构施工安全的同时减小施工过程对设计阶段的影响。

1　结构设计及施工方案

1.1　结构设计

北京城市副中心图书馆正投影尺寸 168m×168m,结构高度 21.5m,总用钢量 16 300t,钢材强度等级 Q355。屋盖由 144 片 14m×14m 的平面交叉网格单元组成,每个网格单元包含 1 根钢柱和 1 个叶片结构。各网格单元间构件通过焊接连接成整体,叶片结构由箱型钢梁焊接组成,纤细异形柱顶与屋盖通过爪状铸钢件连接,柱底部与地下室顶板铰接。屋盖下部主体为框架-剪力墙结构,楼层山体结构错层复杂(见图 1)。为保证屋盖结构施工质量与安装精度,首先在地面拼装屋盖平板网格结构,然后分区提升(见图 2)。

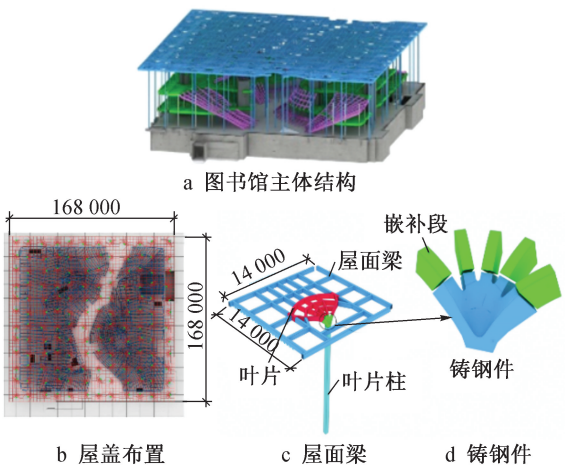


图 1　图书馆结构布置

Fig. 1　Structure layouts of library

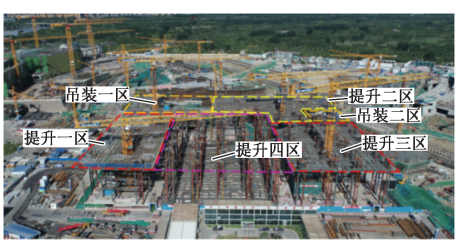


图 2　图书馆施工分区

Fig. 2　Construction zones of library

1.2　结构提升方案

1)提升装置布设

依据结构施工分区,在提升区每个网格单元内设置 1 个提升支架,将提升吊点设置在结构柱附近,减小结构施工成型对使用阶段的影响,保证叶片梁与异形柱的安装精度。设计永临结合的提升支架,通过 2 根临时钢管柱与 1 根结构纤细叶片柱组成三角支撑架,并在顶部设置三角联系桁架,保证网格结构提升过程中的抗侧刚度(见图 3)。

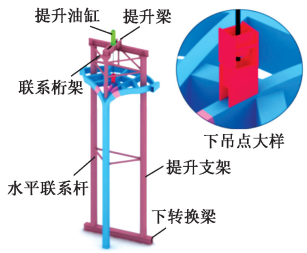


图 3　提升支撑架布置

Fig. 3　Layout of the support frame

2)提升过程系杆转换

进一步通过构造加强结构提升过程的整体刚度,在提升支架中部设置水平系杆,将屋盖结构提升至提升高度一半处悬停,进行 1 次提升过程支架系杆转换。首先在提升屋盖下部 1m 处安装水平转换系杆,待安装完成后,拆除提升结构上部 1m 处的水平临时系杆,继续提升屋盖结构至设计位置,并嵌补叶片梁与柱间的连接杆件(见图 4)。

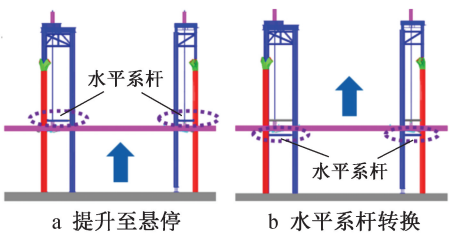


图 4　提升过程中的连接杆件转换

Fig. 4　Connecting rod conversion during lifting

2　施工过程风险控制

2.1　同步提升分析

整体提升过程中,提升快的吊点发生超提,提升慢的吊点出现卸力,导致被提升结构发生内力重分布,存在安全隐患,因此需分析控制结构同步提升过程。以提升三区为例,该区设有 27 个提升支架,吊点提升质量为 17.8~39.9t。在每个提升支架顶部放置 1 台 100t 液压油缸,并分别布置 4~6 根 ϕ^s15.2 钢绞线。

采用 MIDAS 有限元软件建立提升结构计算分析模型,同步提升分析仅考虑提升过程结构自重。被提升结构采用梁单元模拟,考虑节点质量,结构

自重系数放大 1.1 倍。考虑到钢绞线只能承受拉力,在各提升吊点处设置竖向刚度为 10^8kN/m 的弹簧支座,同时约束提升吊点水平位移。同步提升控制原则如下:各吊点提升力不超过液压油缸允许值;提升过程结构杆件应力比<1。

1)单点超提分析

先进行单点不同步分析,对某吊点施加向上的强制位移,固定其余吊点,分析在液压油缸及结构应力允许范围内该点超提变形限值。提升三区吊点分布如图 5 所示,其中编号 N34 表示第 3 排第 4 列吊点,单点超提竖向变形限值如图 6 所示,吊点 N34 达到超提变形限值时各点反力如图 7 所示。由于单层平板网格结构对单点超提变形并不敏感,各吊点允许的超提变形范围为 60.8~787mm,第 2 排中部吊点变形由液压油缸承载力限值控制,变形限值<100mm,最小超提变形为 60.8mm。边排非角部提升吊点超提变形限值范围为 100~200mm,由液压油缸承载力或提升结构杆件应力比限值控制。角部提升吊点超提变形限值>200mm,由提升结构构件应力比限值控制。

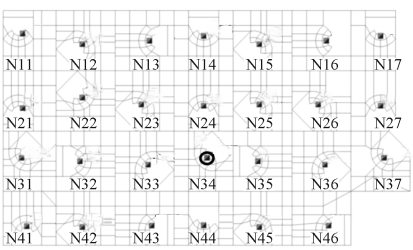


图 5 吊点布置

Fig. 5 Lifting point arrangement

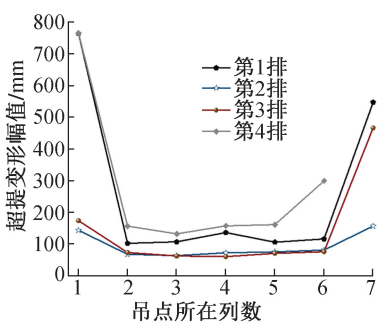


图 6 各吊点竖向变形限值

Fig. 6 Vertical deformation of single point over lifting

2)多点超提分析

多点超提分析结果如图 8,9 所示。由于吊点 N34 超提变形限值最小,超提 60.8mm 时达到液压油缸承载力限值 980kN,因此吊点 N34 对不同步提升变形最敏感。为确定多点超提的最不利路径,从吊点 N34 开始,增加 1 个吊点,分析达到提升控制

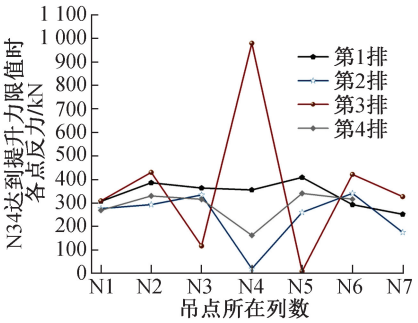


图 7 吊点 N34 达到超提变形限值时的各点反力(单位:kN)

Fig. 7 Reaction force at each point when N34 reaches the limit of over lifting deformation(unit:kN)

条件的 2 个吊点发生相同超提变形的极小值,由此确定第 2 个吊点位置,在此基础上再增加 1 个吊点,分析 3 个吊点超提变形的极小值,由此确定第 3 个吊点位置,以此类推。计算分析表明,多点超提竖向变形限值由液压油缸极限承载力控制,对应的提升结构构件始终处于弹性状态。随着超提吊点个数的增加,最大竖向超提变形限值呈先减小后增大的趋势。当超提吊点个数由 1 个增至 5 个时,竖向超提变形限值由 60.8mm 降至 51.4mm;当多点同时超提吊点个数增至 8~15 个时,对应的竖向超提变形限值为 47.84~48.46mm,幅值变化较小;当吊点超提个数继续增加时,结构大多数吊点已发生相同的超提变形,仅有少数吊点滞后,整体结构对不同步提升不敏感,超提变形限值增加。多点超提最小变形出现在 12 个吊点同时超提 47.87mm 时,由此控制各提升吊点超提竖向变形差≤40mm。提升施工过程中,结构每提升 2m 悬停,用全站仪测量各吊点变形差并采用液压系统进行控制及调整。

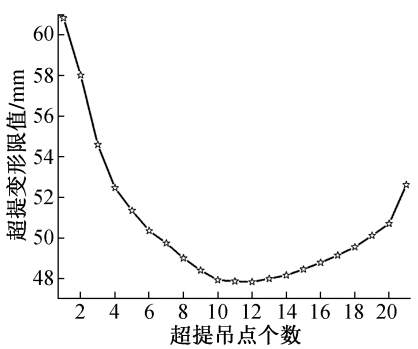


图 8 多点超提竖向变形限值

Fig. 8 Vertical deformation limit of multiple lifting points over lifting

2.2 抗风分析

在提升过程中,风荷载会使提升支架及被提升

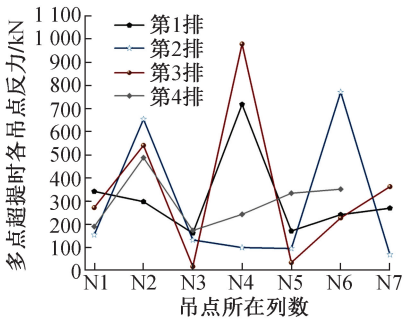


图 9　多点达到超提变形限值时各点反力(单位:kN)

Fig. 9　Reaction force at each point when multiple lifting points reach the limit of over lifting deformation(unit:kN)

结构产生较大的侧移变形。被提升结构各吊点处的侧向弹性约束通过单摆模型考虑。由于各提升吊点侧向摆幅角度 θ 较小,$\sin\theta \approx \tan\theta$,侧向刚度由侧向力与侧移的比值确定:

$$K_x = K_y = F_{xi}/\Delta \approx F_{zi}/l$$

式中:K_x,K_y 分别为 x,y 向的侧向刚度;Δ 为侧移;i 为吊点个数;F_{xi} 为侧向力;F_{zi} 为各吊点提升力;l 为提升过程中钢绞线下吊点至提升装置顶部的高度。

分别计算四、六级风荷载作用下提升结构受力及变形。提升吊点受到的水平约束与风荷载均随着提升高度的增加而增大。考虑不同提升高度水平约束的变化,分别分析不同提升高度与风力等级下杆件应力比及提升结构侧移。其中应力比对应 1.3 恒荷载+1.5 风荷载工况,侧移变形为 1.0 恒荷载+1.0 风荷载工况。计算分析表明,随着风荷载的增加,结构应力比及侧移呈现增加的趋势;随着提升高度的增加,提升结构应力比与侧移呈现变小的趋势。屋盖结构刚脱离胎架时,提升结构在风荷载作用下的应力比及侧移最大。在四、六级风荷载作用下结构最大侧移分别为 255,788mm。控制结构提升环境为微风环境,风力等级不超过四级。整个提升过程提升结构及支架最大应力比均<0.4,结构侧移为弹性变形可恢复,因此结构提升过程抗风性能满足要求(见图 10)。

3　结构施工监测分析

3.1　监测方案

对提升三区进行施工监测,在叶片梁跨中 D1,D2 处设置反射片,利用全站仪监测变形数据(见图 11)。在叶片梁应力及其变化幅度较大处布置正弦式传感器监测杆件应力应变。依据计算结果,将应力测点分别布置在叶片梁应力较大的 B1,B2 处及提升吊点附近 B3 上下翼缘处(见图 12),其中 a 代表梁上翼缘,b 代表梁下翼缘。

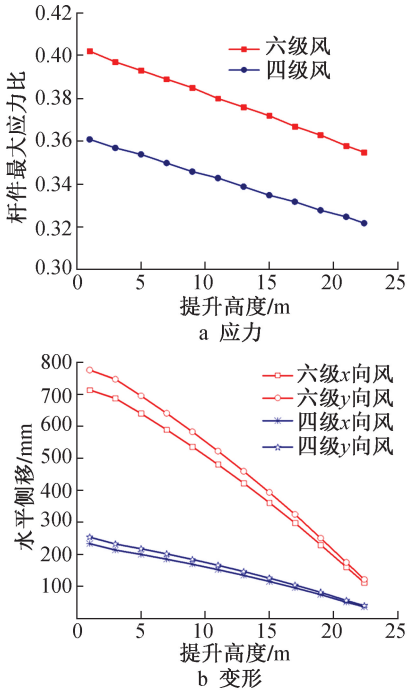


图 10　风荷载作用下提升结构应力和变形

Fig. 10　Stress and deformation of lifting structure under wind load

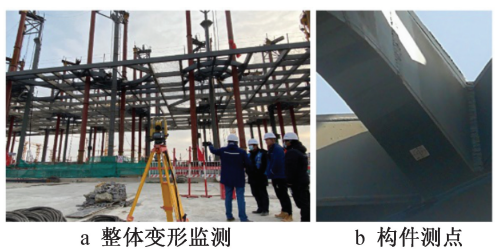


图 11　提升三区监测布置

Fig. 11　Monitoring arrangement of lifting zone 3

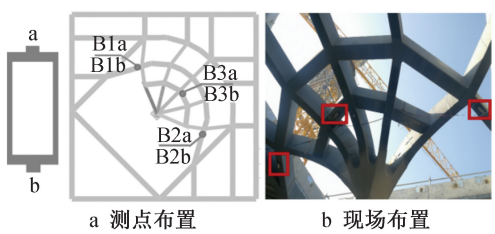


图 12　提升单元应力监测

Fig. 12　Stress monitoring of lifting unit

3.2　监测结果分析

平板网格屋盖结构逆作施工过程主要包括 4 个施工步骤 S1~S4,分别为提升屋盖结构至设计位置、嵌补提升结构与结构柱间的连接杆件、分批卸载提升支架及浇筑屋盖结构上的楼板。建立提升三区施工过程计算分析模型,依据施工方案中的施工顺序分别将被提升屋盖结构、提升支架、钢绞线、

叶片嵌补杆件、剪力墙、下部楼层结构定义成不同的结构组,通过对各施工阶段结构组、边界组、荷载组的激活与钝化处理,实现结构施工全过程仿真计算分析。楼板与剪力墙采用壳单元模拟,梁、柱、铸钢件及临时支撑构件采用梁单元模拟,钢绞线采用只受拉桁架单元模拟,铸钢件与梁、柱连接节点刚接,结构柱底铰接。

梁应力监测结果如图 13 所示,梁测点位置上下翼缘分别承受拉应力与压应力,屋盖楼板未浇筑前,同一梁测点断面对应的上翼缘拉应力与下翼缘压应力幅值相当;屋盖梁上楼板浇筑后,梁上下翼缘应力增加显著,因楼板对梁上翼缘具有一定的约束作用,同一位置梁下翼缘应力较上翼缘应力大约 20%。

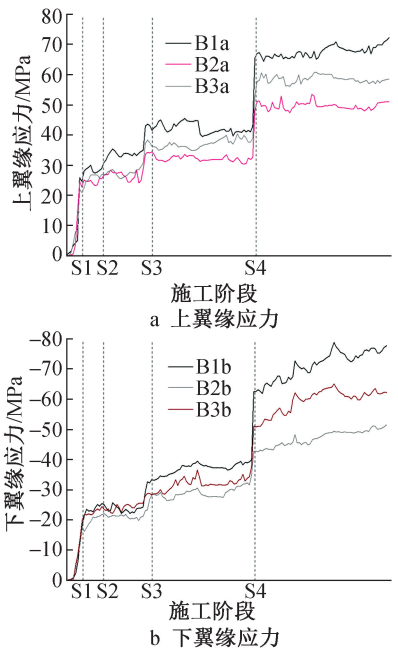


图 13 梁应力监测结果

Fig. 13 Stress monitoring data of beams

梁受力和变形监测结果和理论分析结果对比如图 14 所示,施工监测与模拟得到的各阶段梁应力与变形趋势一致,由于铸钢件节点造型及受力复杂,对叶片梁实际约束与结构整体模型假定略有出入,结构柱底并非完全铰接,因此计算值较实测值大约 20%。随着施工过程的推进,梁应力与变形不断增大,待楼板浇筑完成后,由梁自重及楼板荷载引起的应力仍<90MPa,对于 Q355 钢强度富余较大。待屋盖结构上部混凝土楼板浇筑后,叶片梁跨中测点 D1 竖向变形实测值为 20.1mm,为结构跨度的 1/697,满足施工安装精度要求;提升三区端部测点 D2 竖向变形实测值为 9.96mm,满足与其他区杆件嵌补精度要求。结构施工监测验证了施工提升及卸载方案的合理性及施工全过程仿真分析的准确性。

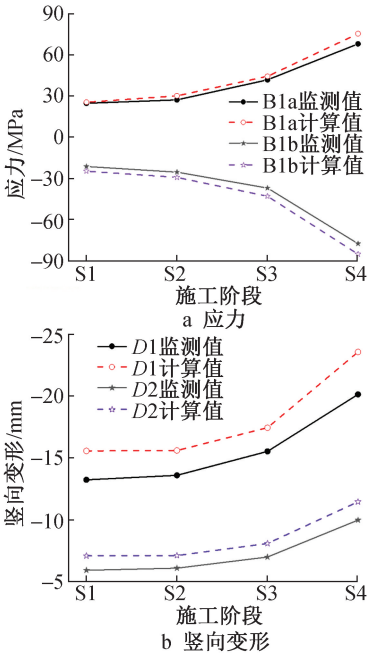


图 14 梁受力和变形监测结果和理论分析结果对比

Fig. 14 Comparison of beam monitoring data and analytical data

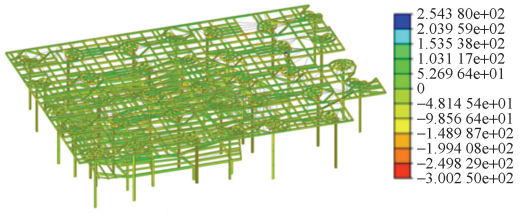
4 结构施工成型过程对设计阶段的影响

4.1 结构弹性应力分析

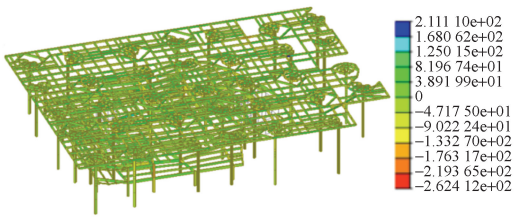
考虑结构施工全过程计算分析模型的基础上,继续施加结构设计使用阶段恒荷载与活荷载,同时考虑 50 年一遇基本风压为 0.45kN/m^2 的风荷载及 8 度多遇地震的组合,进行整体结构设计使用状态计算分析,并与未考虑施工成型过程的结构设计一次性加载状态进行对比分析,如图 15 所示。考虑结构施工成型过程对设计阶段的影响,在最不利荷载组合 1.3 恒荷载+1.5 活荷载+0.9 风荷载作用下,屋面梁最大应力为 254.4MPa,较不考虑施工成型过程的设计一次性加载状态最大组合应力大 20.5%。

4.2 结构弹性变形分析

结构使用阶段侧向变形由 1.0 恒荷载+1.0 y 向风荷载控制,竖向变形由 1.0 恒荷载+1.0 活荷载控制,计算结果如图 16,17 所示。考虑施工成型过程影响的结构使用阶段最大侧向变形为 52.9mm,层间位移角为 1/410,较设计一次性加载状态略小,满足层间位移角≤1/250 的限值要求。考虑施工成型过程影响的结构使用阶段跨中竖向变形为 52mm,为结构跨度的 1/270,较设计一次性加载状态下竖向变形大 20.6%,可见考虑单层平板网格结构施工成型过程会对结构使用阶段应力及竖向变形产生影响,但仍满足结构使用阶段要求。



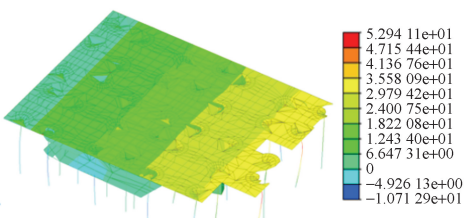
a 考虑施工成型过程



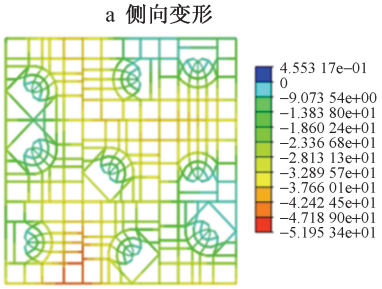
b 一次性加载

图 15　考虑施工成型过程对设计阶段应力的影响(单位:MPa)

Fig. 15　Influence of the construction molding process on the stress of design stage(unit:MPa)



a 侧向变形



b 竖向变形

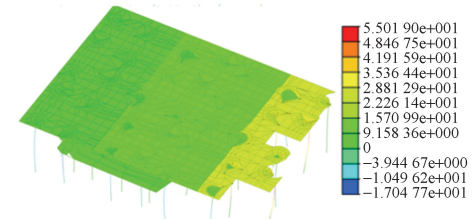
图 16　考虑施工成型过程对使用阶段变形的影响(单位:mm)

Fig. 16　Influence of the construction molding process on the deformation of use stage(unit:mm)

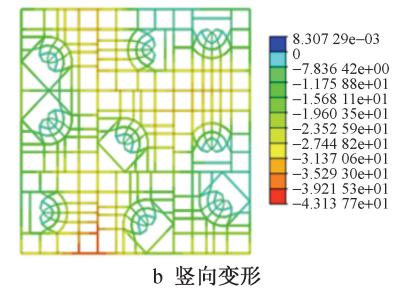
4.3　关键节点的罕遇地震分析

结构柱顶铸钢件节点造型复杂,承担上部屋面荷载,支撑上部单层平板网格屋盖,并与下部结构柱连接,是结构设计的关键节点。采用多尺度模型分析建立复杂铸钢件节点与结构整体计算模型,铸钢件节点及连接梁柱构件一定范围采用三维实体单元模拟,其余结构构件采用一维梁单元模拟,同时对梁柱节点与铸钢件实体面接触位置施加 MPC 主从约束。

在考虑结构施工全过程仿真计算模型的基础上,施加结构设计使用阶段的恒荷载与活荷载,进行 8 度设防地震下关键节点的应力分析,如图 18 所示。铸钢件节点在设防地震下最大应力为 263.32MPa,节点仍处于弹性。因此考虑单层平板网格施工成型的影响后,关键铸钢件节点仍可满足设计使用阶段要求。



a 侧向变形



b 竖向变形

图 17　设计一次性加载状态下的结构变形(单位:mm)

Fig. 17　Design of structural deformation under one-time loading(unit:mm)

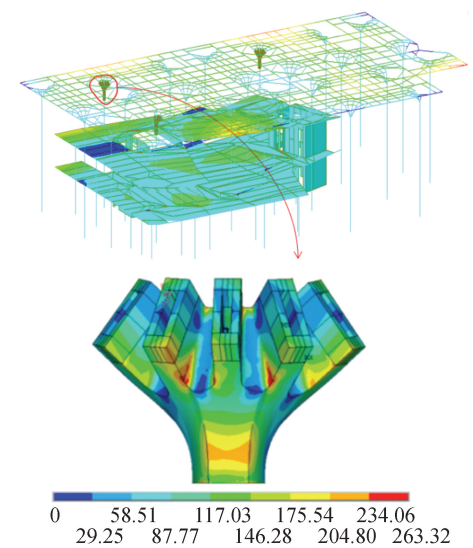


图 18　罕遇地震下关键节点应力(单位:MPa)

Fig. 18　Stress of key node under rare earthquake(unit:MPa)

5　结语

1)单层平板网格结构对整体提升过程各吊点间竖向变形差不敏感,单点超提时,竖向变形差为 60.8~787mm;多点超提时,随着超提吊点个数的增加,竖向超提变形限值先减小后增大,最小超提变形限值出现在 12 个吊点同时超提 47.87mm 时,因此控制各提升吊点超提竖向变形差≤40mm。

(下转第 150 页)

模量算法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(3):1-6.
JIANG Y J, DAI J L, CHEN Z D. Calculation method of equivalent modulus of elasticity of foundation under principles of different equivalence[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition),2005,25(3):1-6.

[12] 张献民,刘小兰. 基于路表应变和基频的基顶当量回弹模量研究[J]. 振动·测试与诊断,2021,41(6):1182-1189,1241-1242.
ZHANG X M,LIU X L. Equivalent modulus of elasticity based on surface strain and fundamental frequency [J]. Journal of vibration,measurement & diagnosis,2021,41(6):1182-1189,1241-1242.

[13] 马士宾,孙敬福,袁文瑞,等. 石灰处理软土路基深度与土基当量回弹模量关系研究[J]. 河北工业大学学报,2015,44(5):97-101.
MA S B,SUN J F,YUAN W R,et al. The relation between the depth of lime treating soft soil subgrade and the soil base equivalent resilience modulus[J]. Journal of Hebei University of Technology,2015,44(5):97-101.

[14] 吴德华,王选仓,姚爱玲. 陕西关中地区土基回弹模量研究[J]. 公路交通科技,2005,22(2):28-30.
WU D H,WANG X C,YAO A L. Research on rebound modulus of embankment in Shaanxi Guanzhong area [J]. Journal of highway and transportation research and development,2005,22(2):28-30.

[15] 王国胜. 浅谈土基的承载能力[J]. 黑龙江交通科技,2011,34(8):81,83.
WANG G S. Talking about the bearing capacity of soil foundation [J]. Communications science and technology Heilongjiang,2011,34(8):81,83.

[16] 刘涛,刘焕存,孙凤玲,等. 干湿循环对道基材料中粗砂的性能影响研究[J]. 山西建筑,2021,47(6):115-117.
LIU T,LIU H C,SUN F L,et al. Research on the influence of drying and wetting cycle on mechanical properties of coarse sand in road base materials[J]. Shanxi architecture,2021,47(6):115-117.

[17] 蒋应军,侯传岭,秦宪峰,等. 基层顶面当量回弹模量换算新方法[J]. 公路交通科技,2005,22(5):38-42.
JIANG Y J,HOU C L,QIN X F,et al. Calculation method of composite resilient modulus of foundation under cement concrete pavement[J]. Journal of highway and transportation research and development,2005,22(5):38-42.

[18] 陈雅贞. 水泥混凝土路面板下地基的综合模量问题[J]. 南京工学院学报,1988,18(1):88-93.
CHEN Y Z. The problem of the composite modulus of foundation under concrete pavement slab[J]. Journal of Southeast University (natural science edition),1988,18(1):88-93.

[19] 赵云. 飞机荷载作用下高填方机场道基动力响应及累积沉降研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
ZHAO Y. Dynamic responses and accumulative settlement of subgrade under aircraft load in high-filled airport[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2018.

(上接第 117 页)

2)随着风荷载的增加,结构侧移及应力比增加;随着提升高度的增加,提升结构组合应力与侧向变形均减小。提升过程中,结构抗风性能满足要求。

3)提升区监测杆件应力较小,变形可控,略小于计算值,满足施工安全及安装精度要求,验证了施工提升和卸载方案的合理性。

4)单层平板网格结构施工成型过程会对结构使用阶段应力及竖向变形产生影响,但仍满足结构设计要求,且关键铸钢件节点应力可满足罕遇地震要求。

参考文献:

[1] 李颖. 广州新白云国际机场 10 号维修机库钢屋架整体提升技术及计算[D]. 北京:清华大学,2004.
LI Y. Integral lifting technology and calculation of steel roof truss of No. 10 maintenance hangar of Guangzhou New Baiyun International Airport[D]. Beijing:Tsinghua University,2004.

[2] 卢福生,蒋国平,杨林,等. 温州永强机场新建航站楼项目主楼钢屋盖施工技术[J]. 施工技术,2015,44(11):5-9.
LU F S,JIANG G P,YANG L,et al. Steel roof construction technology of main building of the new terminal for Wenzhou Yongqiang airport[J]. Construction technology,2015,44(11):5-9.

[3] 陈适才,闫维明,周海洋,等. 首都机场大跨网架结构累积提升施工技术的相关问题分析[J]. 工业建筑,2010,40(11):105-110.
CHEN S C,YAN W M,ZHOU H Y,et al. Related issues of accumulation hoisting technology of long-span lattice framed structure at Beijing international airport [J]. Industrial construction,2010,40(11):105-110.

[4] 刘彪,刘航,李晨光,等. 首都机场 A380 机库屋盖整体提升施工过程分析[J]. 施工技术,2008,37(4):50-52.
LIU B,LIU H,LI C G,et al. Analysis on integral lifting process of A380 air craft hangar roof at capital international airport[J]. Construction technology,2008,37(4):50-52.

[5] 郭彦林,王永海,刘学武,等. 首都国际机场 A380 机库屋盖整体提升一体化建模分析[J]. 工业建筑,2007,37(9):35-40,15.
GUO Y L,WANG Y H,LIU X W,et al. Integrated model analyses of the whole lift of steel roof for A380 air craft hangar in Beijing capital international airport[J]. Industrial construction,2007,37(9):35-40,15.