

DOI: 10.7672/sgjs2025020083

立面悬索-钢框架混合结构施工方法及 全过程模拟分析

狄增辉^{1,2}, 罗斌^{1,2}, 阮杨捷^{1,2}, 刘欣³

(1. 东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 东南大学国家预应力工程技术研究中心, 江苏 南京 211189; 3. 南京东大现代

预应力工程有限责任公司, 江苏 南京 210018)

[摘要] 宿迁学院新校区图书馆项目为新型立面悬索-钢框架混合结构,为实现其顺利施工,提出了一种采用少量临时支撑架周转连续施工的方法。采用SAP2000软件建立结构有限元模型,对比研究施工过程中模拟方法,并对周转所需临时支撑架层数、悬索张拉及其上部钢梁安装顺序等关键技术进行研究。对结构施工全过程进行模拟并分析结构响应,重点关注4个立面悬索结构,掌握结构状态,验算承载力和变形。结果表明,采用新安装单元两步激活法可更好地模拟实际施工过程;采用2层支撑架周转施工且悬索张拉先于其上部钢梁安装,可顺利实现结构施工并有效减少支撑架投入;施工过程中钢结构应力、索力、结构位移均在合理控制范围内;结构施工完成后与设计状态基本一致,验证了施工方法的合理性和可行性。

[关键词] 混合结构;悬索;张拉;钢框架;有限元分析;应力;变形

[中图分类号] TU393.3;TU745.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0083-08

Construction Methods and Simulation Analysis of the Whole Process for Facade Suspension Cable-steel Frame Hybrid Structures

DI Zenghui^{1,2}, LUO Bin^{1,2}, RUAN Yangjie^{1,2}, LIU Xin³

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University,

Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2. National Prestressed Engineering Research Center, Southeast University,

Nanjing, Jiangsu 211189, China; 3. Nanjing Dong-Da Modern Prestressed Engineering Co., Ltd.,

Nanjing, Jiangsu 210018, China)

Abstract: The library project of Suqian College new campus is a new type of facade suspension cable-steel frame hybrid structure. In order to achieve its smooth construction, a method of using a small number of temporary support frames for continuous construction was proposed. Using SAP2000 software to establish a finite element model of the structure, a comparative study was conducted on the simulation methods of the construction process, and key technologies such as the number of temporary support frames required for turnover, suspension tensioning and the installation sequence of its upper steel beams were studied. The entire construction process of the structure was simulated and the structural response was analyzed, with a focus on four facade suspension structures. The structural status was grasped, and the bearing capacity and deformation were verified. The results indicate that using the two-step activation method for new installation units can better simulate the actual construction process. The use of a 2-layer support frame for turnover construction and the installation of suspension cables before the upper steel beams can smoothly achieve structural construction and effectively reduce the investment in support frame equipment. During the construction process, the stress, cable tension, and structural displacement of the steel structure are all within a reasonable control range. After the completion of

[作者简介] 狄增辉,硕士研究生,E-mail: dizh@seu.edu.cn

[通信作者] 罗斌,教授,E-mail: seurobin@seu.edu.cn

[收稿日期] 2024-01-05

structural construction, it is basically consistent with the design status, which verifies the rationality and feasibility of the construction method.

Keywords: hybrid structures; suspension cables; tensioning; steel frames; finite element analysis; stress; deformation

0 引言

传统钢框架结构主要受力体系为梁板柱,结构形式简单,传力方式明显,施工过程中的结构状态容易掌握^[1]。在以往工程实践与科学研究中,大多考虑的是预应力柔性拉索作为支撑结构时,有利于提升钢框架抗震耗能能力^[2];另一种在民用建筑框架结构中应用柔性拉索是索支撑幕墙结构^[3]。综上,鲜有将柔性拉索作为主要竖向受力构件应用于钢框架结构中。新型立面悬索-钢框架混合结构体系具有显著优点,但在施工阶段,由于结构规模较大,结构体系较复杂,施工过程中结构受力复杂,其应力和位移状态尚不明确,导致施工难度增大,目前还未有针对此类结构施工的有关研究,因此对其在施工过程中的系列关键问题展开研究尤为重要。本文对其施工模拟方法、施工过程中关键问题进行分析研究,并对整体结构施工全过程进行分析,根据分析结果评价施工方案合理性与可行性,进而保证整个施工过程的安全^[4-9]。

1 工程概况

宿迁学院新校区图书馆项目坐落于宿迁市湖滨新区北部片区,迎宾大道以北,环湖大道以东,黑松路以南。图书馆上部主体结构采用悬索-吊索-撑杆-钢框架混合结构形式,地下1层,地上10层(含隔震层)。建筑高度为53.2m(女儿墙顶),结构高度为49.2m(主屋面),图书馆建筑效果如图1所示。结合图书馆建筑室内外效果和大跨度楼盖结构布置要求,4个外立面大跨度楼盖采用悬索+吊索+钢梁结构体系,如图2所示。如图3所示,南北立面悬索最大跨度为50.4m,东西立面悬索最大跨度为33.6m。最上层悬索规格为 $\phi 140$,其余层跨度为50.4m的悬索规格为 $\phi 130$,跨度为33.6m的悬索规格为 $\phi 120$,均为抗拉强度为1570MPa的密封索。结构主要抗侧力体系为内、外8个钢框架筒。楼面采用钢筋桁架混凝土楼承板。

2 结构总体施工方法及有限元模拟

2.1 结构总体施工方法

如图4所示,采用临时支撑架周转施工外立面悬索结构,即下层支撑架所支承的钢梁上悬索张拉完成后,拆除下层支撑架并将其周转至上一层,依次连续周转施工。



图1 图书馆建筑效果

Fig. 1 Effect of the library building

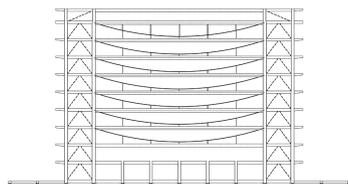


图2 立面悬索布置

Fig. 2 Layout of facade suspension cables

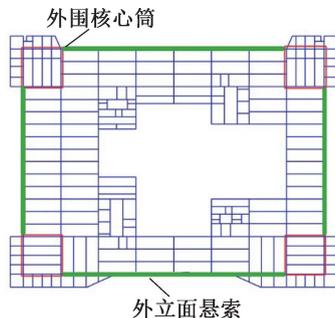


图3 外围核心筒位置

Fig. 3 Location of peripheral cores

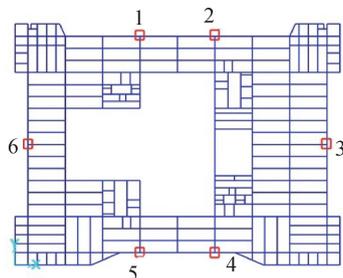


图4 支撑架布置及编号

Fig. 4 Layout and numbering of support frames

混凝土楼板分区浇筑如图5所示,将同一层楼板分为先浇楼板1和后浇楼板2(图中蓝色方框内),其中后浇楼板2为大跨度楼面的混凝土楼板,

先浇混凝土楼板随本层楼面钢梁一并施工,后浇混凝土楼板待本层悬索张拉完成且上层钢梁支撑架卸载后浇筑。

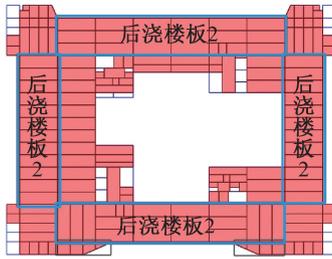


图5 楼板分区示意

Fig. 5 Zoning of floor

2.2 有限元模型建立

采用SAP2000软件建立整体有限元计算模型,包括核心筒、钢框架、混凝土楼面、悬索、吊索、撑杆、支撑架等构件。其中,钢构件采用框架单元模拟,混凝土楼板采用壳单元模拟,悬索和吊索采用索单元模拟,撑杆、临时支撑架采用两端铰接且仅受压的框架单元模拟;除悬索、吊索、撑杆、支撑架为两端铰接外,其余构件两端均为刚接;整体有限元模型底端为固定铰支座。最终建立的有限元模型如图6,7所示,构件材料力学参数如表1所示,荷载及荷载组合如表2所示。

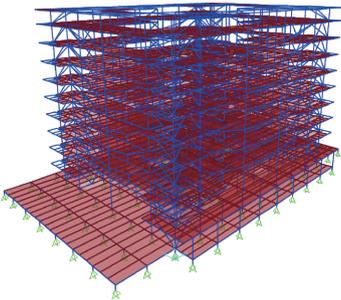


图6 模型轴测图

Fig. 6 Axonometric drawing of model

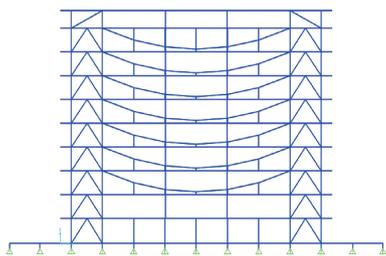


图7 模型南立面

Fig. 7 South elevation of model

3 有限元模拟方法对比

施工模拟本质上是一种分阶段变刚度变荷载的分析方法,对结构进行求解分析的难点在于结构

表1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	线膨胀系数
钢筋混凝土	2 600	3.00×10^5	1.0×10^{-5}
悬索	7 850	1.65×10^5	1.2×10^{-5}
钢构件	7 850	2.06×10^5	1.2×10^{-5}

表2 荷载及荷载组合

Table 2 Loads and load combinations

荷载类型	荷载描述
结构自重(D)	构件自重根据材料密度由软件自动计算
预应力荷载(P)	采用等效温差法模拟预应力,不同部位悬索等效温差分别为 $-180, -120, -60^\circ\text{C}$
结构恒荷载(SD)	楼面装饰层恒载和幕墙恒载
施工阶段变形 验算荷载	$1.0D+1.0P+1.0SD$
施工阶段承载力 验算荷载	$1.3D+1.3P+1.3SD$

时变、材料时变、边界条件时变及伴随的结构几何变形、材料、边界条件的几何非线性^[9]。

采用基于有限元分析软件SAP2000的阶段建模技术,模拟结构施工过程中刚度、质量、荷载的不断变化过程。传统的分析方法均以竣工后的整体结构作为分析对象,将结构荷载一次性施加于结构进行计算,计算所得结果往往与实际不符^[10]。SAP2000阶段施工是一个特殊类型的非线性静力分析,通过定义多个阶段施工序列,增加和去除部分结构,选择性地施加荷载以模拟整个施工过程^[11]。

传统有限元施工模拟方法为新安装单元一步激活法,即在某一施工步激活所要添加的结构,并同时激活的结构上施加相应荷载,此时其刚度和自重被同时激活,如图8所示。以第3层悬索张拉后第4层钢梁安装为例,将其刚度和自重分开表示,红色部分代表新激活的第4层钢梁(仅表示其刚度),箭头表示第4层钢梁自重。理论上,支架①,②轴力应为上部钢梁自重所产生的反力。但对于本工程,下层悬索的张拉会导致下层钢梁产生一定程度的上挠,因此在安装上层钢梁后,上层钢梁与下部悬索及下层钢梁形成整体协同受力变形,共同承担了上层新安装钢梁自重,其受力体系如图9所示。因新激活钢梁自身刚度参与了受力,承担了部分荷载,导致在施工模拟时所得到的支撑架轴力偏小。而在实际安装上层钢梁时,其自身尚不具备刚度,不能承担荷载,其自重应完全由下层钢梁及悬索承担,因此采用新安装单元一步激活法模拟施工与实际施工情况有所差别。

鉴于上述情况,提出一种新安装单元两步激活法,如图10所示。在激活上层钢梁前,首先将上层

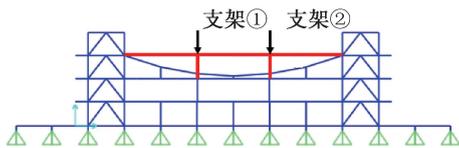


图 8 一步激活法示意

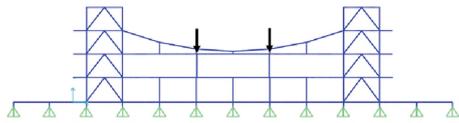
Fig. 8 One-step activation method



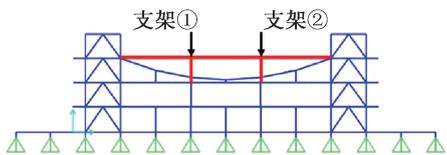
图 9 一步激活法受力体系

Fig. 9 Force system with one-step activation method

钢梁自重以集中荷载方式施加于下层钢梁,然后在下一施工步激活上层钢梁,并杀死前一步所施加的集中荷载,如图 10b 所示,可看作将上层钢梁自重和刚度分 2 步激活,其受力体系如图 11 所示,即新激活结构自重完全由下层悬索及钢梁承担。



a 第 1 步



b 第 2 步

图 10 两步激活法示意

Fig. 10 Two-step activation method



图 11 两步激活法受力体系

Fig. 11 Force system with two-step activation method

以第 3 层悬索张拉后安装上部楼面钢梁所得到的结构响应为研究对象,对上述方法进行验证。①通过将第 3 层所有悬索、吊索杀死,在临时支撑架位置施加竖向约束,进行阶段施工,得到第 4 层钢梁安装后支撑架约束反力,此约束反力与实际施工时支撑架轴力最接近;②分别采用一步激活法与两步激活法进行施工模拟,得到对比结果如表 3、4 所示。

表 3 两种模拟方法下支撑架轴力

Table 3 Support frame axial force under two simulation methods kN

模拟方法	支架①	支架②
支撑架位置施加竖向约束	-161.5	-163.1
一步激活法	-89.3	-90.1
两步激活法	-161.1	-162.8

表 4 两种模拟方法下其他结构响应

Table 4 Other structural responses under two simulation methods

模拟方法	z 向最大竖向位移/mm	索力/kN	钢结构组合应力/MPa
一步激活法	42.0	2107.8	50.6
两步激活法	34.5	2220.9	43.9

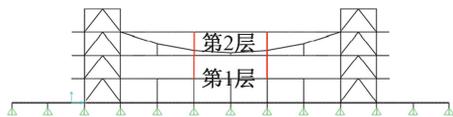
如表 3 所示,采用一步激活法所得到的支撑架轴力较支撑架位置施加竖向约束所得到的节点反力偏小很多,而采用两步激活法所得到的支撑架轴力则较接近。此外,如表 4 所示,采用两步激活法时,将上层钢梁自重全部以集中荷载形式施加于下层钢梁,其上挠值相对减小,索力相对增大,钢结构最大应力出现在下层钢梁端部,钢梁上挠值越小,端部应力越小,固采用两步激活法得到的钢结构应力更小。因此,采用新安装单元两步激活法可更好地模拟实际施工过程。

4 施工关键问题研究

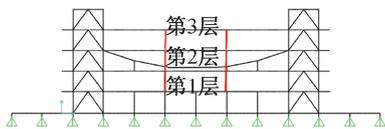
4.1 临时支撑架层数

施工 4 个外立面悬索时,在悬索张拉前,下部钢梁安装需依靠临时支撑架,从传统施工概念考虑,支撑架越多,施工过程中的结构响应可能越小,越安全。但由于本工程中结构有悬索张拉,会造成钢梁有一定程度上挠,上挠的钢梁对结构造成显著响应,因此并非是支撑架层数越多越安全。考虑到施工效率及节约成本问题,对一次性采用的临时支撑架层数进行研究分析。

如图 12 所示,方案 1、2 分别为采用 2、3 层临时支撑架进行周转施工,分别对两种方案进行模拟分析,得到两种方案在最不利工况下的结构竖向位移、钢梁应力、临时支撑架轴力等关键结构响应。



a 方案 1



b 方案 2

图 12 方案示意

Fig. 12 Schemes

方案 1 最不利工况为 2 层悬索承担 3 层楼面钢梁自重,此时,最大竖向位移为 47.5mm(见图 13a),最大钢结构应力为 60.5 MPa,方案 2 最不利工况为

3层悬索承担4层楼面钢梁自重,最大竖向位移为58.5mm(见图13b),最大钢结构应力为72.0MPa。方案2位移和应力较方案1均有所增大,位移增大了约23.2%,钢结构应力增大了19.0%。这是由于更多支撑架的存在,使更多悬索协同作用,造成钢梁竖向位移增大,进而导致钢梁应力增大。

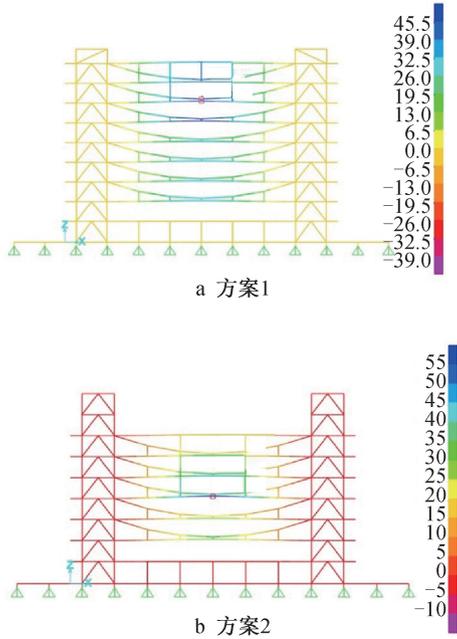


图13 两种方案在最不利工况下竖向位移(单位:mm)
Fig. 13 Vertical displacement for two schemes under the most unfavorable condition(unit:mm)

方案1,2的最大支撑架轴力分别为-416.2,-469.7kN,方案1相比方案2减小了11.4%。按轴力值与支撑架用钢量成正比的原则,方案1支撑架用钢量比方案2至少可减少17.1%。究其原因,两种方案的最大支撑架轴力均出现在安装第10层楼面钢梁后,但方案1中支撑架只需承担其上2层楼面钢梁自重,而方案2中支撑架需承担其上3层楼面钢梁自重,因此方案1支撑架轴力更小。

如表5所示,两种方案最终施工成型态与一步设计成型结果均接近。误差几乎为0,但采用方案1时,施工过程中钢梁竖向位移和应力更小,支撑架轴力也更小,即方案1采用更少的支撑架,既实现了高效、安全施工,又节约了施工成本。

表5 两种方案对比

Table 5 Comparison of two schemes

施工方案	最大竖向位移/mm	最大组合应力/MPa
方案1	-123.8	227.5
方案2	-123.8	227.5
一步设计成型	-127.9	227.5

4.2 悬索张拉及其上部钢梁安装顺序

基于方案1,对悬索张拉及其上部钢梁安装的施工先后顺序展开研究。方案a:首先安装悬索上部钢梁再进行本层悬索张拉,如图14a所示;方案b:首先进行本层悬索张拉再安装悬索上部钢梁,如图14b所示。

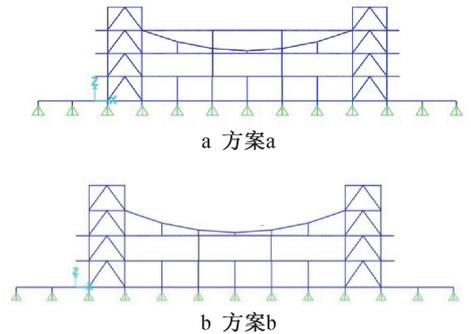


图14 两种方案示意

Fig. 14 Two schemes

对两种方案进行对比模拟分析,得到两种方案在各工况下结构竖向位移、钢构件组合应力、临时支撑架轴力等关键结构响应。

方案a最不利工况为2层悬索承担3层楼面钢梁自重,方案b最不利工况为1层悬索承担1层楼面钢梁自重。方案a,b下结构最大竖向位移分别为47.5(挠跨比为1/1061),53.6mm(挠跨比为1/940),如图15所示,对应钢梁应力分别为60.5,62.8MPa,方案b较方案a位移、应力均有所增大,但挠跨比均在控制范围内,钢梁应力也在弹性范围内。

方案a,b下最大支撑架轴力分别为-416.2,-314.6kN,方案b较方案a减小了24.4%,两种方案支撑架轴力均出现在安装第9层楼面钢梁后,相差较大的原因是方案a首先安装第8层钢梁再张拉第8层悬索,悬索张拉会使下部钢梁上挠,进而使支撑架轴力增大。因此,方案a支撑架轴力除来自于上部钢梁自重外,还有下部悬索张拉传来的力;而方案b是在张拉第8层悬索后才安装第8,9层钢梁,因此方案b支撑架轴力仅来自于上部钢梁自重。按轴力值与支撑架用钢量成正比原则,方案b支撑架用钢量比方案a也可同步减少24.4%。

如表6所示,两种方案最终施工成型态与一次设计成型结果均接近。采用方案b施工时,钢梁上挠值及应力相比采用方案a会略有增大,但均在合理范围内;从支撑架轴力来看,方案b采用更合理的施工顺序,避免了悬索张拉对支撑架轴力增大的不

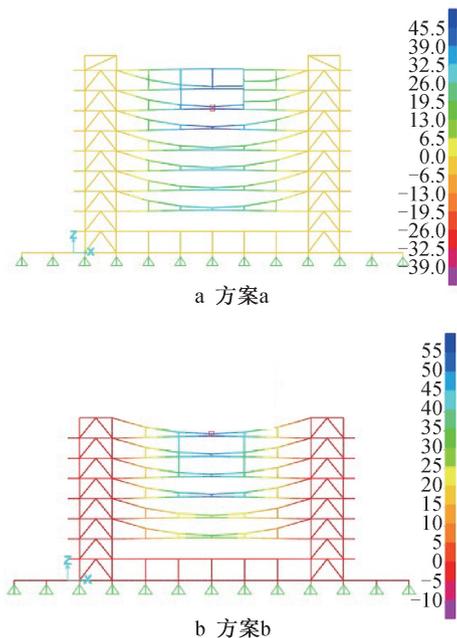


图 15 最不利工况下竖向位移(单位:mm)

Fig. 15 Vertical displacement under the most unfavorable condition (unit:mm)

利影响,使支撑架最大轴力有所减小。

表 6 两种方案施工成型对比

Table 6 Comparison of construction forming for two schemes

施工方案	最大竖向位移/mm	最大组合应力/MPa
方案 a	-123.8	227.5
方案 b	-123.6	227.6
一步设计成型	-127.9	227.5

5 施工全过程有限元分析

5.1 施工模拟工况

根据确定的施工方案,采用 2 层临时支撑架且悬索张拉先于其上部钢梁安装施工,将整个施工过程分为 33 个计算工况:工况 1,前 3 层结构施工,包括 1,2 层支撑架和第 3 层楼面混凝土先浇楼板 1,不包含第 3 层的悬索、吊索及第 3 层后浇楼板 2;工况 2,安装并张拉第 3 层悬索;工况 3,安装第 3 层支撑架、第 4 层楼面钢梁,浇筑第 4 层先浇楼板 1;工况 4,安装并张拉第 4 层悬索;工况 5,卸载第 2 层支撑架;工况 6,安装第 4 层支撑架、第 5 层楼面钢梁,浇筑第 5 层先浇楼板 1;工况 7,安装并张拉第 5 层悬索;工况 8,卸载第 3 层支撑架;工况 9,安装第 5 层支撑架、第 6 层楼面钢梁,浇筑第 6 层先浇楼板 1;工况 10,安装并张拉第 6 层悬索;工况 11,浇筑第 3 层后浇楼板 2;工况 12,卸载第 4 层支撑架;工况 13,安装第 6 层支撑架、第 7 层楼面钢梁,浇筑第 7 层先浇楼板 1;工况 14,安装并张拉第 7 层悬索;工

况 15,浇筑第 4 层后浇楼板 2;工况 16,卸载第 5 层支撑架;工况 17,安装第 7 层支撑架、第 8 层楼面钢梁,浇筑第 8 层先浇楼板 1;工况 18,安装并张拉第 8 层悬索;工况 19,浇筑第 5 层后浇楼板 2;工况 20,卸载第 6 层支撑架;工况 21,安装第 8 层支撑架、第 9 层楼面钢梁,浇筑第 9 层先浇楼板 1;工况 22,浇筑第 6 层后浇楼板 2;工况 23,卸载第 7 层支撑架;工况 24,安装第 9 层支撑架、第 10 层楼面钢梁,浇筑第 10 层先浇楼板 1;工况 25,安装并张拉第 9 层悬索;工况 26,浇筑第 7 层后浇楼板 2;工况 27,卸载第 8 层支撑架;工况 28,安装第 10 层支撑架、第 11 层楼面钢梁,浇筑第 11 层先浇楼板 1;工况 29,卸载第 9 层支撑架;工况 30,浇筑第 8 层后浇楼板 2;工况 31,卸载第 10 层支撑架;工况 32,浇筑第 9,10 层后浇楼板 2;工况 33,施加恒荷载(楼面装饰层等恒荷载)。

5.2 有限元模拟分析结果

5.2.1 结构竖向位移

各施工工况下结构最大竖向位移如图 16 所示。由图 16 可知,结构-z 向最大位移出现在工况 33,最大竖向位移为-123.6mm,出现在屋顶北侧悬挂幕墙的梁跨中部位,挠跨比为 1/408;在工况 32 时,结构最大竖向位移为-43.8mm,位于屋顶北侧悬挂幕墙的梁跨中位置,原因是该位置有较大幕墙恒荷载,但挠跨比均小于位移最大容许值 1/400;z 向结构最大位移出现在工况 18,最大竖向位移为 53.5mm,挠跨比为 1/942,小于最大容许值 1/400。

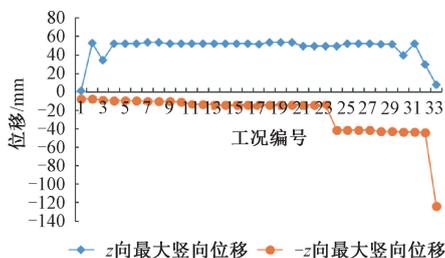


图 16 各施工工况下结构最大竖向位移

Fig. 16 The maximum vertical displacement of structure under each construction condition

5.2.2 钢结构组合应力

如图 17 所示,施加恒荷载前,在工况 20 时,钢结构最大组合应力最大,达 134.5MPa;施加恒荷载后,最大钢结构组合应力增大到 227.6MPa,但始终处于弹性范围内,施工过程安全。

5.2.3 索力

各施工工况下最大和最小索力变化如图 18 所示。由图 18 可知,施工过程中最小索力基本不

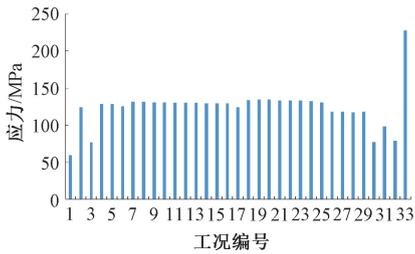


图 17 各施工工况下钢结构最大组合应力

Fig. 17 The maximum combined stress of steel structure under each construction condition

变,维持在 1 000kN 左右,最大索力在工况 25 有较大突变,原因是顶层拉索预应力荷载均大于其他层。

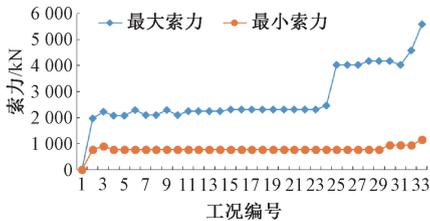


图 18 各施工工况下索力

Fig. 18 Cable force under each construction condition

5.2.4 支撑架轴力

各施工工况下支撑架最大轴力如图 19 所示。最大轴力为-314.6kN,出现在工况 24,可根据支撑架最大轴力进行支架构件设计。

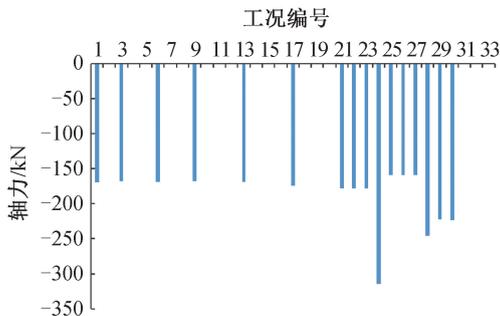


图 19 各施工工况下支撑架最大轴力

Fig. 19 The maximum support frame axial force under each construction condition

5.2.5 施工阶段包络应力比验算

如图 20 所示,施工阶段钢构件应力比最大值为 0.4,因此施工过程中钢构件始终处于弹性状态。

5.2.6 多步施工成型与结构一次设计成型对比

结构一次设计成型模拟结果如表 7 所示,多步施工成型的结构-z 向最大竖向位移较一次设计成型减小 4.3mm,而最大组合应力增大 0.1MPa,因此,多步施工成型计算模型更合理。此外,索力范围误差也很小,验证了采用上述施工方案进行分阶

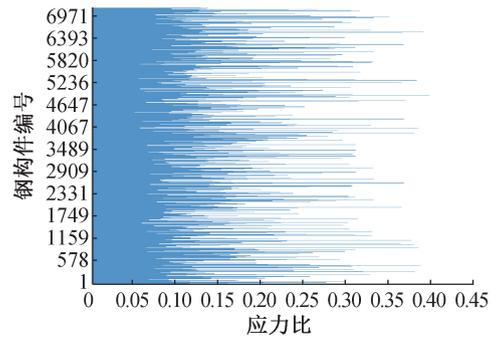


图 20 钢构件应力比

Fig. 20 Stress ratios of steel components

段多步施工的可行性与合理性。

表 7 多步施工成型与一次设计成型对比

Table 7 Comparison of multi-step construction forming and one-step design forming

施工工况	-z 向最大竖向位移/mm	最大组合应力/MPa	索力/kN
多步施工成型	-123.6	227.6	1 154.3~5 485.3
一次设计成型	-127.9	227.5	1 179.3~5 692.2

6 结语

1) 本文提出的新安装单元两步激活法相比于传统的一步激活法可更好地模拟实际施工过程,模拟结果更接近实际施工状态。

2) 采用 2 层临时支撑架周转施工并将悬索张拉先于其上部钢梁安装,可顺利实现结构施工并有效减少支撑架投入。

3) 在全过程施工模拟过程中,结构整体位移始终处于规范限定的可控范围内,钢构件和拉索处于弹性应力状态,包络钢结构应力比最大值为 0.4,结构始终处于安全状态。

4) 多步施工成型与一步设计成型模拟结果基本一致,进一步验证了施工方案的可行性。

5) 对于类似大跨度复杂结构而言,采用有限元分析软件 SAP2000 阶段施工分析可对其进行施工全过程模拟,模拟结果验证了施工方案的可行性和合理性。

6) 在现场施工时,若悬索上部钢梁安装先于悬索张拉,则悬索、吊索安装需穿过搭设的临时支撑架,给施工带来一定困难。因此,悬索张拉先于其上部钢梁安装可避免临时支撑架搭设对悬索、吊索安装及张拉的影响,有效提高施工效率。

参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,黄远,等. 钢-混凝土组合结构体系研究新进展[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):71-80.
NIE J G, TAO M X, HUANG Y, et al. New research progress of steel-concrete composite structure system [J]. Journal of building

- structures, 2010,31(6):71-80.
- [2] 刘学春,林娜,张爱林,等.多高层预应力钢结构索支撑-框架静力性能研究[J].工业建筑,2015,45(6):137-144.
LIU X C, LIN N, ZHANG A L, et al. Study on static performance of multi-story and high-rise prestressed steel structure cable brace-frame [J]. Industrial construction, 2015, 45(6): 137-144.
- [3] 朱奕锋,冯健.点支承玻璃幕墙的柔性支撑体系——索桁架[J].工业建筑,2002(5):1-4,37.
ZHU Y F, FENG J. Flexible support system of point-supported glass curtain wall-cable truss [J]. Industrial construction, 2002(5):1-4,37.
- [4] 江志远.某大跨V形柱高空散拼施工过程模拟分析[J].钢结构(中英文),2022,37(3):35-42.
JIANG Z Y. Simulation analysis of high-altitude scattered construction process of a large-span V-shaped column [J]. Steel construction, 2022,37(3):35-42.
- [5] 刘劲松,盛春陵,周毅雷,等.空腹桁架连体结构施工全过程模拟分析及监测[J].建筑结构,2017,47(9):20-22.
LIU J S, SHENG C L, ZHOU Y L, et al. Simulation analysis and monitoring of the whole construction process of vierendeel truss connected structure [J]. Building construction, 2017, 47(9):20-22.
- [6] 王秀丽,冯竹君,任根立,等.大型复杂体育馆钢结构施工过程模拟分析[J].北京交通大学学报,2020,44(6):17-24.
WANG X L, FENG Z J, REN G L, et al. Simulation analysis of steel structure construction process of large complex gymnasium [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6):17-24.
- [7] 王宇安,孙守吉,黄乐洋.某会展中心登录厅大跨度钢屋盖施工技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(2):32-37.
WANG Y A, SUN S J, HUANG L Y. Research on construction technology of large-span steel roof of an exhibition center login hall [J]. Construction technology, 2024,53(2):32-37.
- [8] 佟克龙.高层塔楼超大跨度超高空间连体钢结构设计与施工关键技术[J].施工技术(中英文),2023,52(8):45-50,67.
TONG K L. Key technologies for design and construction of super large span and super high space connected steel structure of high-rise tower [J]. Construction technology, 2023,52(8):45-50,67.
- [9] 刘学武,郭彦林.考虑几何非线性钢结构施工力学分析方法[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008(2):161-169.
LIU X W, GUO Y L. Construction mechanics analysis method of geometric nonlinear steel structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition), 2008(2):161-169.
- [10] 北京金土木软件技术有限公司,中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M]. 2版.北京:人民交通出版社,2012.
Beijing Jintumu Software Technology Co., Ltd., China Building Standards Design and Research Institute. SAP2000 Chinese version of the use guide [M]. 2nd edition. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [11] 李楚舒. SAP2000 中文版技术指南及工程应用[M].北京:人民交通出版社,2018.
LI C S. SAP2000 Chinese Technical Guide and Engineering Application [M]. Beijing: China Communications Press, 2018.