

文章编号:1673-2049(2007)01-0052-07

大跨度钢结构屋盖落架分析方法

郭彦林, 郭宇飞, 刘学武

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:首先对大跨度钢结构屋盖的落架过程进行了简单分析,给出了落架应遵循的基本原则,并提出了“同步协调”和“分组分步”2种落架方式;其次,介绍了落架过程数值模拟的3种计算方法:支座位移法、等效杆端位移法和千斤顶单元法,并详细论述了各自的计算原理及特点;最后,基于ANSYS有限元软件,应用3种落架计算方法对3点支撑悬臂梁及国家体育场进行了落架过程模拟。结果表明,等效杆端位移法和千斤顶单元法是2种合理有效的方法,并可以方便地应用于工程实际中。

关键词:钢结构屋盖;落架;支座位移法;等效杆端位移法;千斤顶单元法

中图分类号:TU393.3 **文献标志码:**A

Analysis Methods of Removing Temporary Supports to Large-span Steel Structural Roof

GUO Yan-lin, GUO Yu-fei, LIU Xue-wu

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Firstly, some basic rules of removing temporary supports from steel structural roof were presented and two basic procedures of removing temporary supports, one is supports lowering simultaneously and the other is group by group and step by step, were also discussed in detail. Secondly, three calculation methods for numerical simulation analysis of removing temporary supports which are support displacement method, equivalent rod bottom-end displacement method and jack element method were introduced. Finally, the process of removing temporary supports was simulated by ANSYS finite element software package for two examples, namely three points support cantilever beam and national stadium. The comparisons of calculation results obtained by using three points support analysis methods mentioned above indicate that equivalent rod bottom-end displacement method and jack element method are rational and effective for an accurate simulation analysis of removing temporary supports to steel structural roof.

Key words: steel structural roof; removing temporary support; support displacement method; equivalent rod bottom-end displacement method; jack element method

0 引言

近10 a来,随着中国建筑业的不断发展,各种新方法、新技术被应用到大型钢结构的施工中。其中

通过搭设临时支撑结构,采用分段拼装、高空组装或直接高空散装的施工方法更是在一些大跨度复杂空间结构中得到了广泛的应用,如广州新体育馆^[1]、深圳会议展览中心^[2]、国家大剧院^[3-4]等。与此同时,

人们对大跨度结构在施工过程中表现出的诸多力学及技术问题愈来愈重视^[5],其中一个重要的问题就是落架(拆撑)过程中主体结构和临时结构的相互作用及其安全问题^[6-7]。

1 落架的定义

钢结构落架(拆撑)的准确定义为:通过下沉临时支撑结构顶部的千斤顶,使主体结构逐渐脱离支撑结构,最终进入设计受力状态的一个过程。简单来讲,落架就是使结构由被外力(临时结构提供)支撑的状态变为完全靠其自身支撑的状态,所以在有些文献中又把落架称为卸载,含义就是对临时支撑结构的卸载,而对主体结构来说是一个加载的过程。工程中常采用的临时支撑的结构形式可以大致分为独立式支撑结构和联合式支撑结构,如图1所示。广州新体育馆的施工中采用的是独立式临时支撑,而国家大剧院的施工中2种支撑形式都有。落架过程是主体结构和临时支撑相互作用的一个复杂过程,是结构受力逐渐转移和内力重分布的过程。临时支撑是由承载状态变为无载状态,而主体结构则是由安装状态过渡到设计受力状态。该过程中,影响结构安全的因素很多,如支撑塔架的设计、落架方案的选取、落架过程的有效控制等均会对结构本身产生很大影响,因此,落架是大型钢结构体系施工过程中的一个关键环节,是施工力学中的一个重要内容^[8-9],所以对落架过程实施精确合理的数值模拟是至关重要的。

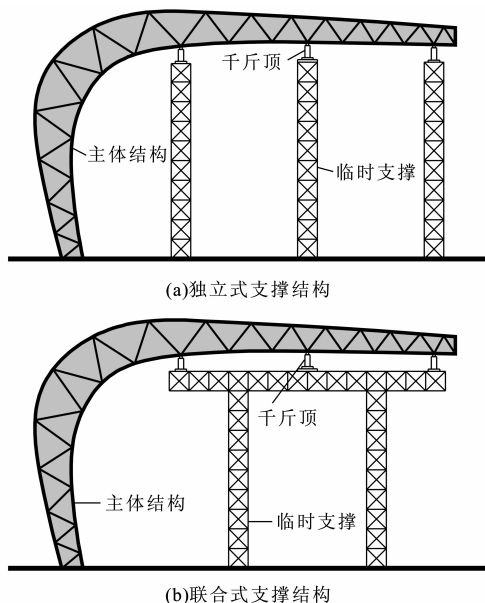


图1 临时支撑结构形式

Fig. 1 Temporary Support Structure Shape

2 落架基本原则与落架方式

2.1 落架基本原则

(1)制定合理的落架方案,包括落架方式、落架顺序及各支撑点下降的位移步长(每步落架千斤顶的位移下沉量)。如第1节所述,临时支撑的拆除是结构受力体系转变的过程。在落架过程中,下降其中一些支撑点,相应的支撑结构受力会明显变小,但同时相邻支撑点处的受力会变大,主体结构的变形和内力也伴随着这种变化而不断改变。如果落架方案不合理,势必造成临时支撑局部受力过大或主体结构的内力分布不合理。落架方案的制定必须考虑结构的受力特性(对称性),保证各个支撑点每步的下沉量与主体结构的变形相协调。另外,落架方案应考虑实际的技术条件,使落架过程易于控制且安全可靠。

(2)落架过程中应保证主体结构和临时支撑结构的内力和位移的变化是缓慢的。落架过程伴随着主体结构和临时支撑内力和变形的不断改变,缓慢的意义就是保证结构受力状态平稳过渡。如果支撑点下降太快,由此引入的动力因素会造成结构局部受力的不合理甚至破坏。

(3)落架过程中应保证主体结构和临时支撑结构的应力控制在弹性范围内,同时保证内力和位移的变化幅值控制在合理的范围内,使它们不引发结构强度破坏或失稳。

落架过程中,某些临时支撑点的受力会较大,应根据所制定的落架方案设计安全可靠的临时支撑,同时针对所制定的落架方案进行全过程跟踪模拟分析,监控主体结构和临时支撑结构的内力和位移变化,验算是否满足上述落架基本原则。

2.2 落架方式

落架方案的选择应遵循上述落架基本原则。理论上讲,如果按照主体结构在各个支撑点处实际竖向位移的比例,同时下降所有临时支撑点,并保证下降过程缓慢进行,则这种落架方式对于主体结构和临时支撑来讲都是最合理的,本文中称之为“同步协调”的落架方式。所谓同步即指所有支撑点同时下降,协调的含义则是各个支撑点的下降位移比例与主体结构落架完成后在各支撑点处的竖向位移比例相同。

在实际工程中,临时支撑点的数目往往很多(国家大剧院的临时支撑点达446个),即使采用先进的计算机同步控制技术,也很难实现所有支撑点同时

按比例下降。在这种情况下,为满足落架的基本原则及要求,应采用“分组分步”的落架方式。通过分组,总的临时支撑点被分为几个部分,从而可以实现计算机对每组支撑点的同步控制,而分步则是为了实现落架过程的缓慢进行,同时也保证支撑点在下降过程中不引起过大的不均匀内力。采用分组分步的落架方式时,落架顺序(各组支撑点的下降顺序)的选择就变得极为重要。落架顺序的选择主要依据结构形式及其支撑的布置方案视具体工程而定。

3 落架计算方法

选择合理的数值计算方法是保证落架顺利进行的前提,传统的做法是采用支座下移来模拟临时支撑的卸载作用,在此基础上发展出来的一种方法称为等效杆端位移法。此外,一种新的方法是采用一种特殊的单元来模拟千斤顶的作用,称之为千斤顶单元法。现详述各种计算方法的原理和特点。

3.1 支座位移法

建立计算模型时,将临时支撑直接替换为相应的支座,即竖向约束,如图2所示。计算时通过给各支座施加竖直向下的位移荷载来模拟实际中支撑结构下降脱离主体结构的过程。该方法特点是计算模型简单,无需在模型中建立临时支撑结构。计算中要跟踪每步落架后临时支撑对应的支座反力方向的压力或拉力。因为实际中临时支撑不能承受拉力,当计算的支座反力为拉力时,该支撑应退出工作并人为地改变主体结构的支座位移条件重新迭代计算。当所有临时支撑对应的支座都去除时,代表落架过程分析完成,但是采用支座位移法不能模拟落架过程中临时支撑与主体结构暂时脱离的现象。该方法另外一个很大的缺点就是无法模拟临时支撑在落架过程中由于竖向压力的变化引起的压缩及回弹,因此,对于支座位移法的计算结果需要深入判断分析,若无法得到合理结果应选择其他计算方法。

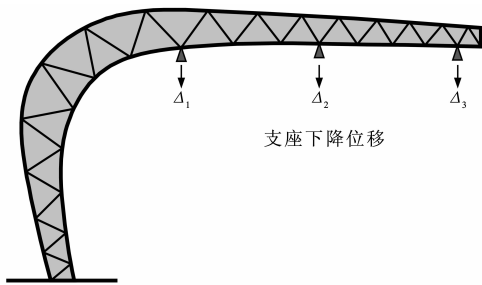
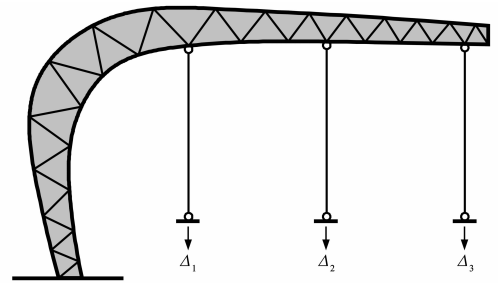


图2 支座位移法

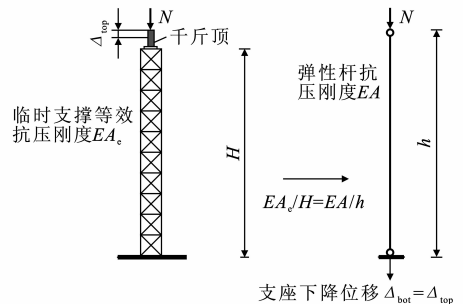
Fig. 2 Support Displacement Method

3.2 等效杆端位移法

该方法采用的是一种等效的思路,将各个独立的临时支撑塔架等效为具有相同轴向线刚度的弹性杆,同时该弹性杆采用只能受压不能受拉的单元来模拟,通过弹性杆端支座的下降的位移模拟支撑塔架顶端的下降,如图3所示。该方法的特点是可以很好地考虑落架过程中支撑塔架由于轴向压力的变化引起的压缩和回弹,同时只压不拉的单元特性可以准确地模拟塔架在落架过程中可能与主体结构脱离的现象。当落架过程进行到某一步时,若所有弹性杆的轴向压力变为0,说明整个落架过程完成。



(a)计算方法



(b)等效原理

图3 等效杆端位移法

Fig. 3 Equivalent Rod Bottom-end Displacement Method

3.3 千斤顶单元法

以上2种方法都是对实际情况的一种简化模拟,在某些特殊情况下,需要采用更为精确的方法来模拟落架过程中主体结构与临时支撑结构的变化(内力、变形),则一种合理的选择就是采用千斤顶单元法,来实现对落架过程的高精确度模拟。所谓千斤顶单元法,就是在建立计算模型时,将主体结构与临时结构同时建立,在二者之间采用一种特殊的单元来模拟真实的千斤顶,本文中称之为千斤顶单元。该单元具有如下特性:与普通的空间梁单元类似,千斤顶每个节点有3个平动自由度和3个转动自由度。与梁单元不同的是千斤顶单元独有的轴向特性:轴向抗压刚度 $EA^- = \infty$; 轴向抗拉刚度 $EA^+ = 0$; 抗弯刚度 EI 为有限值,因此,千斤顶单元轴向特

性为只能受压,不能受拉,且受压时表现为理想刚体,无压缩变形。采用温度控制千斤顶的轴向变形(冷冻法):设千斤顶初始长度为 l_0 ,并设定千斤顶单元材料的线膨胀系数 $\alpha=1/l_0$,则千斤顶的膨胀特性为 $\Delta l=\alpha\Delta T l_0=\Delta T$,即通过施加降温荷载 ΔT ,可以使千斤顶降低相同量值的高度。千斤顶单元与主体结构的连接:千斤顶的下部节点与临时支撑结构的顶部刚性连接,上部节点与主体结构中的相应节点仅耦合竖向自由度,允许主体结构在千斤顶顶面的水平面滑动。千斤顶的顶升力即单元的轴向压力。

以上 3 种落架计算方法的适用范围及计算精度见表 1。

表 1 3 种计算方法的适用范围与计算精度

Tab. 1 Fitting Ranges and Calculation Precisions of Three Calculation Methods

适用范围	支座位移法	等效杆端位移法	千斤顶单元法
独立式	适用精度较差	适用精度较高	适用精度较高
联合式	适用精度较差	不适用	适用精度较高

落架过程中一般采用位移控制的方法,包括主体结构的竖向位移和千斤顶的行程。由于落架过程中临时支撑结构随着支撑力的变化会出现压缩和回弹现象,每一步结构在支撑点处的实际竖向位移增量和千斤顶的行程增量都有一定差别,所以在实际施工中,为了操作简便,往往将千斤顶的行程作为落架过程的位移控制指标;但是在某些特殊情况下,需要根据主体结构的竖向位移来控制落架的进行,数值模拟时需要进行迭代计算。以等效杆端位移法为例,具体的迭代算法流程如图 4 所示。

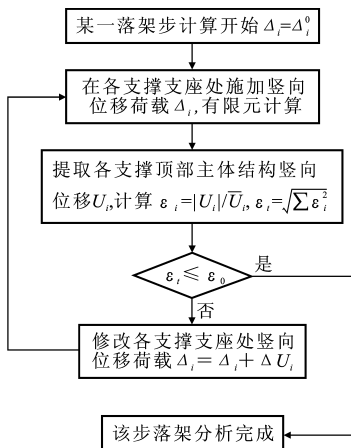


图 4 落架迭代算法

Fig. 4 Removing Temporary Support Iteration Method

图 4 中变量说明如下:

Δ_i^0 为某一落架步第 i 个支撑支座处竖向位移荷载初始值; Δ_i 为第 k 步迭代时,第 i 个支撑支座处

竖向位移荷载修正值; \bar{U}_i 为某一落架步第 i 个支撑顶部主体结构竖向位移控制值; U_i 为第 k 步迭代时,第 i 个支撑顶部主体结构竖向位移计算值; ε_i 为第 k 步迭代时,第 i 个支撑顶部主体结构竖向位移相对差值; ε_i 为第 k 步迭代时,主体结构竖向位移整体相对差值; ε_0 为主体结构竖向位移整体相对差容许值。

4 算例分析

4.1 3 点支撑悬臂梁的落架分析

如图 5 所示的 3 点临时支撑悬臂梁,截面为 H 型钢,长度 $L=15$ m。支撑塔架采用四肢钢管格构柱,截面尺寸为 0.3 m \times 0.3 m,柱高为 2.7 m。

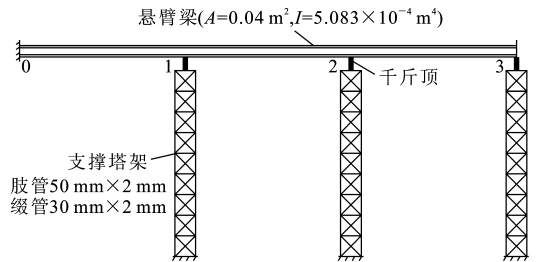


图 5 3 点临时支撑悬臂梁

Fig. 5 Three Points Temporary Support Cantilever Beam

3 个支撑塔架分别位于悬臂梁 $L/3$ 、 $2L/3$ 和 L 处。采用“分组分步”的落架方式,千斤顶的下降顺序为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$,分 10 大步 5 小步完成,其中每个大步的 5 个小步分别为:千斤顶 1 下降 $U_1/10 \rightarrow$ 千斤顶 2 下降 $U_2/20 \rightarrow$ 千斤顶 3 下降 $U_3/20 \rightarrow$ 千斤顶 2 下降 $U_2/20 \rightarrow$ 千斤顶 3 下降 $U_3/20$ 。

基于 ANSYS 有限元软件,分别采用支座位移法、等效杆端位移法和千斤顶单元法对该悬臂梁的落架过程进行模拟分析。分析过程仅考虑梁的自重作用,采用千斤顶的行程作为落架过程的位移控制指标。3 种计算方法得到的千斤顶轴心力(临时结构的支撑力)和悬臂梁弯矩的变化见图 6、7。图 6、7 中落架进度为落架步骤与总落架步数的比值,0 代表落架初始状态,1.0 代表落架完成状态。

由图 6 可以看出,3 种分析方法得到的千斤顶轴力均是振荡变化的。对于等效杆端位移法和千斤顶单元法,振荡的幅值随着落架过程的进行不断减小,直至落架完成,3 个千斤顶的轴力变为 0,且二者的计算结果非常一致。支座位移法的计算结果与前两者有很大差别,千斤顶轴力出现为正的情况。这是因为采用“分组分步”的落架方式时,会出现某些临时支撑与主体结构暂时脱离的现象,体现在数值

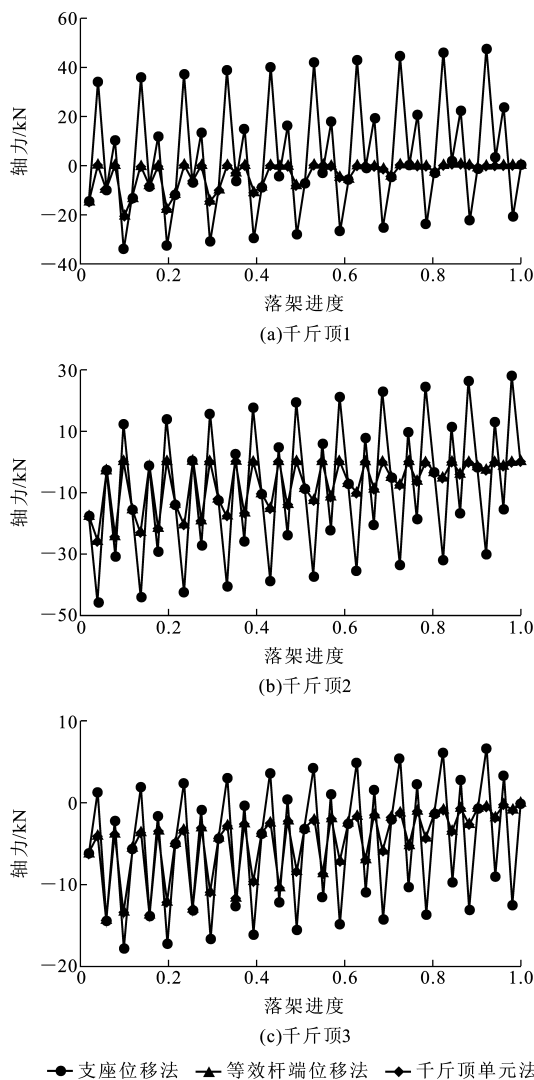


图6 千斤顶各轴力

Fig. 6 Axial Forces of Jacks

上就是某些千斤顶的轴力在落架完成前会出现为0的情况,如图6(a)、(b)所示。等效杆端位移法和千斤顶单元法能够模拟支撑塔架不能受拉这一特性,而支座位移法则无法模拟,从而导致不合理的结果。

落架过程中悬臂梁弯矩的变化如图7所示。由图7可以看出,梁各点的弯矩也表现出振荡变化的特征,这与千斤顶轴力的变化是对应的。其中等效杆端位移法和千斤顶单元法的计算结果非常吻合,而支座位移法由于无法模拟支撑塔架与悬臂梁的暂时脱离,弯矩的振荡幅值比前二者要大很多。

4.2 国家体育场的落架分析

综合考虑结构特点、施工技术、经济成本等各种因素,国家体育场^[10]采用设置临时支撑、分段吊装、高空拼接的施工方案。为此在施工区域内分内、中、外3圈布置78个支撑塔架,作为主桁架分段高空安装的主要受力支点。支撑塔架设置在主桁架下弦交

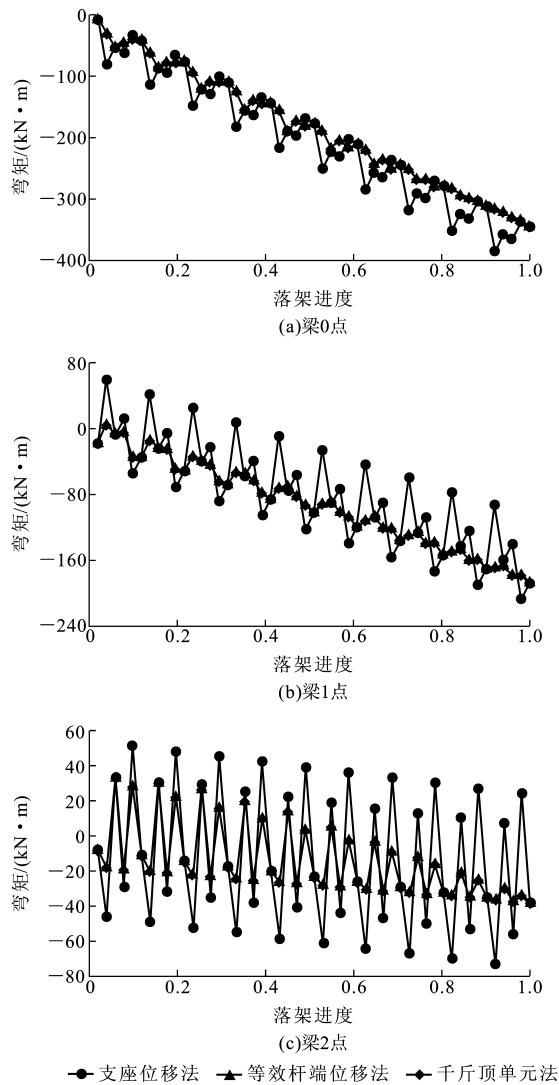


图7 梁各点处弯矩

Fig. 7 Bending Moments of Points at Beam

叉节点的位置,其中外圈和中圈各布置24个节点,内圈布置30个节点,如图8所示。

具体安装方案为分步安装方案^[11],即在临时支撑落架前安装主结构(桁架柱、桁架梁)、立面次结构和楼梯,落架完成后安装肩部和顶面次结构。本文中亦是基于此方案进行国家体育场的落架分析,其落架前的结构模型如图9所示。

采用“同步协调”和“分组分步”2种落架方式来比较前述3种落架计算方法。其中“分组分步”的落架方式采用如下的落架顺序:外圈下降1/10→中圈下降1/10→内圈下降1/10,以此循环10次,共30步完成落架。采用千斤顶的行程作为落架过程的位移控制量,计算结果如图10~12所示。

图10为落架过程中支撑点P处(图8)的临时结构支撑力的变化(以压为负)。由图10可以看出,当采用“同步协调”的落架方式时,3种计算方法得

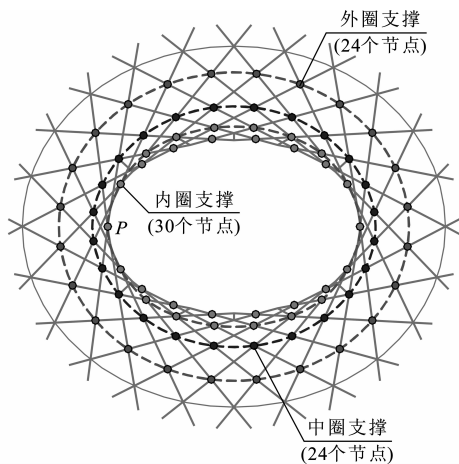


图 8 临时支撑平面布置

Fig. 8 Arrangement of Temporary Support Plane

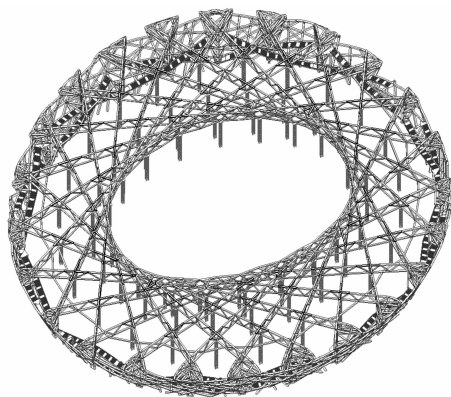


图 9 国家体育场落架前结构模型

Fig. 9 Structure Model of National Stadium Before

Removing Temporary Support

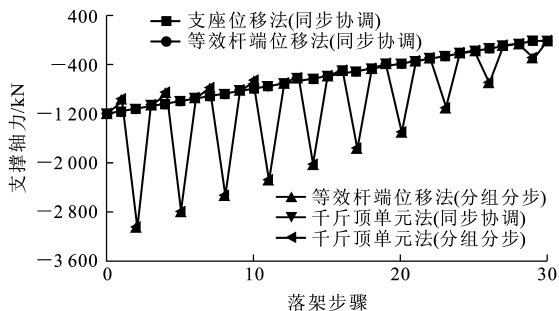


图 10 支撑点 P 处的临时支撑轴力

Fig. 10 Temporary Support Axial Force at Support Point P

到的结果相同,即支撑力均是随着落架的进行线性减小直至落架过程完成时变为 0;而采用“分组分步”的落架方式时,等效杆端位移法和千斤顶单元法计算得到的结果相同,支撑力均呈现振荡变化的特征,振荡的峰值随着落架的进行不断减小。另外,在这种落架方式下,一些临时支撑会出现与主体结构暂时脱离的现象,而支座位移法由于无法模拟这一

情况而失效。

支撑点 P 处主体结构竖向位移的变化如图 11 所示。由于采用千斤顶的行程作为落架位移步长的控制指标,所以图 11 中所示位移已包含临时支撑由于轴力变化引起的压缩和回弹。

图 12 为主桁架上某一点的等效应力在落架过程中的变化。由图 12 可以看出,在“同步协调”的落架方式下,应力基本呈线性变化,只是在落架开始的几步有所不同,这是因为对于复杂结构来说,即使临时支撑是同步协调下降的,主体结构内部也存在一个内力重分布的过程。在“分组分步”的落架方式下,内力的变化趋势与前者基本相同,只是出现小幅度的不规则变化。

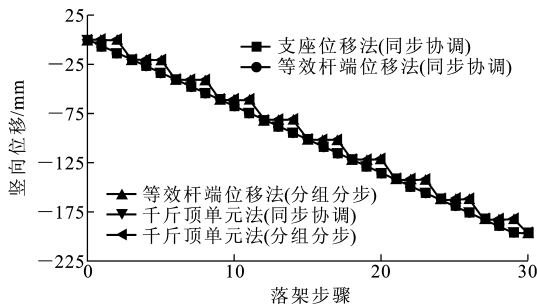


图 11 支撑点 P 处的主体结构竖向位移

Fig. 11 Vertical Displacement of Main Structure at Support Point P

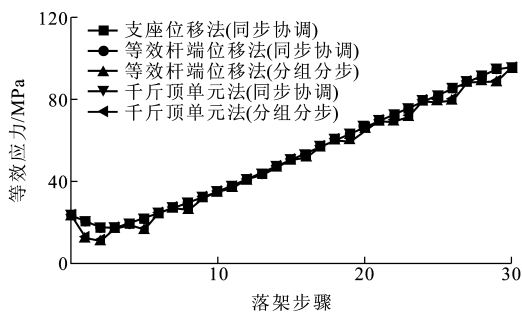


图 12 主桁架某点处的等效应力

Fig. 12 Equivalent Stress at Some Point of Main Truss

5 结 语

本文中详细阐述了落架过程中主体结构与临时支撑结构之间的相互作用,并给出了落架需要遵循的 3 条基本原则。针对大跨度钢结构的落架,提出了“同步协调”和“分组分步”2 种落架方式。实际施工中由于支撑点过多,难以实现同步控制,往往采用“分组分步”的落架方式。

针对落架计算的 3 种分析方法(支座位移法、等效杆端位移法、千斤顶单元法),详细论述了各方法

的计算原理及特点,并给出了采用主体结构竖向位移控制落架过程时的迭代算法,可方便地应用于钢结构落架过程的数值模拟。

基于 ANSYS 有限元软件,通过悬臂梁和国家体育场的落架分析,对比了 3 种落架计算方法的异同。结果表明,采用“同步协调”的落架方式时,3 种方法均具有很高的精度;而采用“分组分步”的落架方式时,等效杆端位移法和千斤顶单元法具有很高的模拟精度;而支座位移法则由于无法模拟临时支撑与主体结构的暂时脱离而失效。

参考文献:

References:

- [1] 陈国栋,郭彦林,叶浩文,等.广州市新体育馆屋盖吊装及拆撑过程动态分析[J].建筑结构,2002,32(1):53-57.
CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin, YE Hao-wen, et al. Tracing Analysis of Truss Roof Structure for Guangzhou Gymnasium from Hoisting State into Designing State[J]. Building Structure, 2002, 32(1): 53-57.
- [2] 张晓燕,郭彦林,黄李骥,等.深圳会展中心钢结构屋盖起拱方案及施工技术[J].工业建筑,2004,34(12):15-18.
ZHANG Xiao-yan, GUO Yan-lin, HUANG Li-ji, et al. Pre-arched and Construction Technology for Steel Roof in Shenzhen Convention and Exhibition Centre[J]. Industrial Construction, 2004, 34(12): 15-18.
- [3] 伍小平,高振锋,李子旭.国家大剧院钢壳体施工全过程模拟分析[J].建筑结构学报,2005,26(5):40-45.
WU Xiao-ping, GAO Zhen-feng, LI Zi-xu. The Analysis of Whole Erection Process for Steel Shell of National Grand Theatre[J]. Journal of Building Structure, 2005, 26(5): 40-45.
- [4] 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.
WU Xiao-ping, GAO Zhen-feng, LI Zi-xu, et al. Analysis of Load-relieving Proposal for Installation of Steel Structured Shell of the National Grand Theatre [J]. Building Construction, 2005, 27(6): 6-8.
- [5] 武岳,陈波,沈世钊.大跨度层盖结构等效静风荷载研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):27-31.
WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shi-zhao. Research on Equivalent Static Wind Loadings of Large-span Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 27-31.
- [6] 郭彦林,崔晓强.大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨[J].工业建筑,2004,32(12):1-5.
GUO Yan-lin, CUI Xiao-qiang. Key Technical Problems and Discussion in Construction Process of Larger Span Steels Structures [J]. Industrial Construction, 2004, 32(12): 1-5.
- [7] 崔晓强,郭彦林,叶可明.大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J].工程力学,2006,23(5):83-88.
CUI Xiao-qiang, GUO Yan-lin, YE Ke-ming. Research on the Construction Mechanic Method of Long-span Steel Structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 83-88.
- [8] 王光远.论时变结构力学[J].土木工程学报,2000,33(6):105-108.
WANG Guang-yuan. On Mechanics of Time-varying Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 105-108.
- [9] 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.
CAO Zhi-yuan. Construction Mechanics and Time-varying Mechanics in Civil Engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 41-46.
- [10] 范重,刘先明,范学伟,等.国家体育场钢结构设计中的优化技术[J].建筑科学与工程学报,2006,23(2):20-29.
FAN Zhong, LIU Xian-ming, FAN Xue-wei, et al. Optimization Techniques of Steel Structure Design for National Stadium [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 20-29.
- [11] 郭彦林,刘学武,赵瑛,等.国家体育场钢结构安装方案研究[J].施工技术,2006,35(12):36-40.
GUO Yan-lin, LIU Xue-wu, ZHAO Ying, et al. Installation Project Research of National Stadium Steel Structure [J]. Construction Technology, 2006, 35(12): 36-40.