

引用本文:王秀丽,陶志山,赵海燕.整体顶升钢屋盖网壳结构卸载过程模拟分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):49-57.

WANG Xiu-li,TAO Zhi-shan,ZHAO Hai-yan. Simulation Analysis of Unloading Process of Integral Jacking Steel Roof Reticulated Shell Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 49-57.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01053

整体顶升钢屋盖网壳结构卸载过程模拟分析

王秀丽¹,陶志山¹,赵海燕²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃建投天水建设管理有限公司,甘肃 天水 741000)

摘要:针对大跨度钢屋盖网壳结构杆系众多、受力复杂,采用整体顶升施工方法时主体结构下方必须设置临时支撑,结构成型后拆除支撑会使结构体系发生重大转变及杆件内力重分布的问题,以天水市体育中心体育馆钢屋盖结构为例,建立精细化有限元模型,对所有节点和杆件按照不同规格分类分别赋予实际质量。利用 ANSYS 中的生死单元法跟踪模拟顶升施工全过程,以结构完全成型且未拆撑时的状态作为卸载过程的初始状态。采用约束方程法对整体分级同步和分区分步 2 种卸载方式进行模拟,对比不同卸载方式下所有千斤顶的内力值及应力值较大杆件的应力随卸载步的变化趋势。结果表明:受力复杂的大跨度网壳结构需制定合理的卸载方案并进行模拟分析,确保结构卸载过程的安全;卸载时支撑处的部分拉杆变为压杆,应引起足够重视;此类刚性大跨度结构的杆件应力在分区分步卸载过程中对位移变化较敏感,所以要严格控制每一步的卸载位移量;约束方程法能实现对主体结构和临时支撑脱离再接触过程的真实模拟,为类似工程提供了可靠的卸载分析方法。

关键词:整体顶升;生死单元法;约束方程法;整体分级同步卸载;分区分步卸载

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)01-0049-09

Simulation Analysis of Unloading Process of Integral Jacking Steel Roof Reticulated Shell Structure

WANG Xiu-li¹, TAO Zhi-shan¹, ZHAO Hai-yan²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. GCIGC Tianshui Construction Management Ltd., Tianshui 741000, Gansu, China)

Abstract: Aiming at the problems that the large-span steel roof reticulated shell structure had many rods and complicated forces, temporary support must be set under the main structure when the integral jacking construction method was adopted, and removal of support after the structure was formed would cause significant changes in the structure system and redistribution of internal forces of the rods, a refined finite element model was established for the steel roof structure of Tianshui Sports Center Gymnasium. The actual quality of all joints and rods was given according to different specifications. The life and death unit method in ANSYS was used to track and simulate the whole process of jacking-up construction. The initial state of unloading process was the state when the structure was fully formed and not dismantled. Constraint equation method

收稿日期:2019-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51778273);甘肃省住房和城乡建设厅科研项目(JK2018-17)

作者简介:王秀丽(1963-),女,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:1135739056@qq.com。

was used to simulate the two unloading modes, i. e. integrated hierarchical synchronous unloading and separate partition and step unloading. The variation trend of the internal forces of all jacks and the stress of rods with larger stress values under different unloading modes were compared with the unloading steps. The results show that the unloading process of large-span reticulated shell structure with complex loads needs to be reasonably formulated and simulated to ensure the safety of the unloading process; part of the tension rods at the supports become compression rods when unloading, and more attention should be paid to them. The rods stress of such rigid large-span structures is sensitive to the change of displacement in the process of step-by-step unloading, so the unloading displacement of each step should be strictly controlled. The constraint equation method can simulate the real process of disengagement and re-contact between the main structure and temporary support, which provides a reliable unloading analysis method for similar projects.

Key words: integral jacking; birth and death element method; constraint equation method; integrated hierarchical synchronous unloading; partition and step unloading

0 引言

随着中国经济和科技水平的飞速发展,中国涌现了大量著名的大跨度钢结构建筑^[1],如国家大剧院、广州歌剧院、上海世博中心等。由于这些建筑在施工过程中未成型结构受力复杂且不可控因素较多,所以不论这些建筑采用何种施工方法建造,施工过程中都必须设置临时支撑。建造完成需要拆除临时支撑,拆撑过程中临时支撑逐渐由负载状态转变为空载状态,对主体结构而言结构由部分受力转变为完全工作状态,涉及到结构体系转换和内力重分布问题,位移和内力变化均较复杂。如何真实地对拆撑过程进行跟踪模拟从而为实际工程提供指导,成为了大跨度空间结构施工力学亟待解决的问题。模拟主体结构和临时支撑的脱离和再接触过程以及临时支撑的回弹现象成为了问题的关键。

郭彦林等^[2]最早提出了支座位移法,通过给支座施加强制位移控制结构卸载量,但是这种方法存在缺陷。具体表现为当主体结构和部分临时支撑发生脱离时,本来上部结构传至脱离处支撑的力为 0,但是模拟结果表明脱离处支座对主体结构产生约束作用,这种约束作用造成未脱离支座的承载力增大与实际情况不符。后来的等效杆端位移法考虑了临时支撑刚度的影响,在支撑点下方的竖直方向上建立一个杆单元,将临时支撑的等效刚度赋予杆单元,杆单元上部节点和支撑点自由度耦合,控制杆单元下部节点的位移量实现卸载。此法能较好地模拟脱离和再接触现象,但是不能模拟联合临时支撑的情况及不能确保临时支撑构件的安全性。刘学武等^[3]

结合 ANSYS 中杆单元和梁单元的特性形成了组合千斤顶单元,但是千斤顶单元的伸缩量是通过施加温度荷载实现的,由于上部结构和千斤顶单元的耦联作用,并不能实现预定的卸载位移量。郭彦林等^[4]在千斤顶单元法的基础上提出了千斤顶-间隙单元法,GAP 单元建立在千斤顶单元上端节点和主体结构支撑节点间,此方法用 FORTRAN 语言编制分析程序使得应用范围受限,不能广泛适用于通用软件。郭小农等^[5]针对以上方法的不足提出了约束方程法,但是此方法的方便性和可靠性要结合实际工程进一步验证。此外还有很多学者结合实际工程对大跨度空间结构拆撑过程做了一定研究^[6-28]。

本文以天水市体育中心体育馆项目的钢屋盖网壳结构施工过程为依托,运用有限元软件 ANSYS 的生死单元功能对网架整体顶升阶段进行模拟,将拼装完成的结果作为卸载阶段的初始状态,再用约束方程法模拟体育馆钢屋盖网壳结构采用不同卸载方案时主体结构和临时支撑的力学性能表现,为实际卸载工作提供理论依据和计算数据,从而确保卸载顺利安全进行。

1 施工方案

天水市体育中心体育馆屋顶为空间钢网壳结构体系,体育馆分为比赛馆和训练馆 2 个区域。屋盖为球面形状,上弦中心线最高点标高约为 29.4 m,网壳为焊接球节点斜放四角锥结构形式,支承形式为下弦多点支承,网壳平面呈椭圆形,长、短轴分别为 124.39,103.5 m,覆盖面积约为 10 438 m²。

体育馆采用整体顶升的方法进行施工,悬挑部

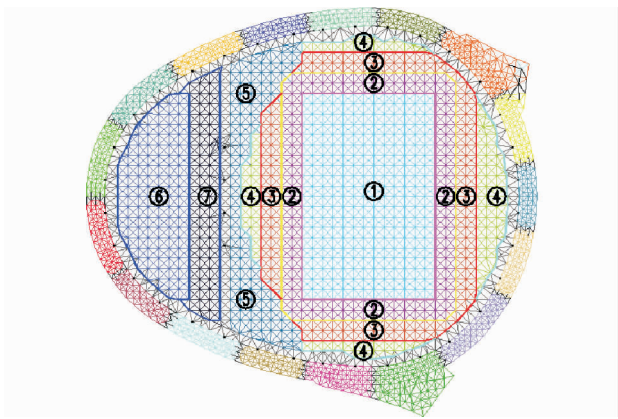


图 1 网壳安装区域划分

Fig. 1 Installation Area Partition of Reticulated Shell

位则采用分块吊装的方法进行施工。网壳整体顶升安装区域划分为 7 块,如图 1 所示,其中区域①~⑤位于比赛馆上方,区域⑥,⑦位于训练馆上方。整体顶升时分 2 个区域顶升:一区是比赛馆上空屋面区域,分 4 次顶升;二区是训练馆上空屋面区域,分 2 次顶升。图 2 为网壳顶点支撑布置图。

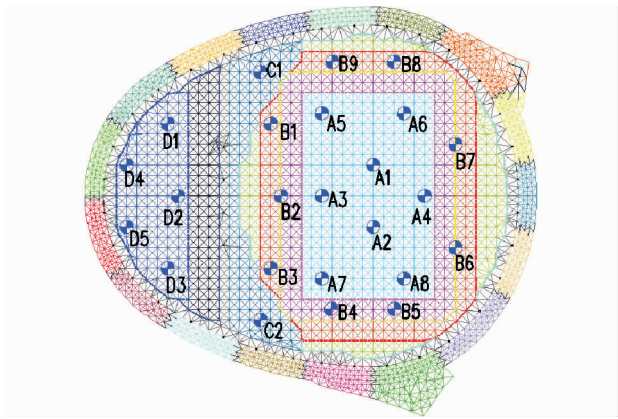


图 2 网壳临时支撑布置

Fig. 2 Temporary Support Layout of Reticulated Shell

体育馆总体施工流程如下:

第 1 步:在±0.000 m 标高地面拼装①区域网架,拼装完成后在计算机的控制下,比赛馆第 1 次顶升 92 t。

第 2 步:当顶升至离地 8.61 m 时,暂停顶升,搭设操作架进行补装网壳,对应区域②,补装完成后比赛馆第 1 次扩展顶升 145 t。

第 3 步:当顶升至离地 10.30 m 时,暂停顶升,搭设操作架进行补装网壳,对应区域③,拼装完成并经验收后比赛馆第 2 次扩展顶升 194 t。

第 4 步:当顶升至离地 12.90 m 时,暂停顶升,补装比赛馆区域④的网壳,补装完成后第 3 次扩展顶升 240 t。

第 5 步:当顶升至支座标高时,暂停顶升,搭设操作架补装区域⑤网壳。

第 6 步:在地面标高处安装训练馆区域⑥的网壳,拼装完成后第 1 次顶升 39 t。

第 7 步:顶升至一定高度后补装区域⑦网壳,完成后顶升至支座标高。

第 8 步:比赛馆和训练馆两侧杆件对接。

第 9 步:分块吊装周边悬挑网壳。

第 10 步:所有网壳结构安装完成后,卸载拆除顶升支撑。

2 顶升过程仿真分析

2.1 建立有限元模型

网壳结构由无缝钢管和空心球高频焊接制作而成,材质均为 Q235B,钢管有 12 种规格,空心球有 11 种规格,钢管和球节点的规格参数见表 1。所有的杆件和空心球在有限元软件中按照不同规格分组,然后赋予其指定的几何属性,从而精确地体现网架的质量分布。钢管采用 Beam188 单元模拟,它是一个有 2 个节点的三维线性梁,在每个节点上默认有 6 个自由度,分别是 x, y, z 方向的位移及绕各方向的转动。球节点采用 Mass21 单元,它是一个有 6 个自由度的点元素,即 x, y, z 方向的平动和分别绕各方向的转动,每个方向可以有不同的转动惯量和质量。球节点和杆件之间为铰接连接方式。在模拟顶升过程和卸载过程前,须建立完整的结构模型和全部边界条件,然后在不同的施工步用生死单元法杀死和激活相关区域的单元以及对应的边界条件。上部网壳结构和下部混凝土柱通过 38 个支座相连接,由于钢结构和混凝土柱刚度差异较大,所以模型周边支承仅约束 x, y, z 方向的平动,释放转动自由度。24 个临时支撑的上端顶点在网壳上弦球节点上,首先约束对应球节点 x, y 两个水平方向自由度,释放转动自由度, z 方向自由度在模拟顶升过程时将其固定,在模拟卸载过程时需根据约束方程法建立约束方程,设定卸载位移量。模型采用理想的线弹性本构关系,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。网壳上弦静载为 0.5 kPa,活载为 0.5 kPa,下弦静载为 0.5 kPa。由于网壳处于施工阶段,除了考虑自重外,还须考虑施工荷载,取上弦静载的 30% 作为施工荷载^[19]。建立的网壳有限元模型如图 3 所示。

2.2 生死单元法模拟整体顶升

对于计算过程中出现局部结构、材料的增加或

表 1 钢管和空心球规格参数

Tab. 1 Specification Parameters of Steel Tubes and Hollow Spheres

球节点					钢管杆件				
外径/mm	壁厚/mm	数量	单个质量/kg	总质量/kg	外径/mm	壁厚/mm	数量	总长度/m	总质量/kg
280	10	793	17.99	14 266.1	75.5	3.75	4 183	13 014.1	86 356
300	12	3	31.56	94.7	88.5	4.00	1 791	8 678.5	72 341
300	12	226	24.56	5 550.6	114.0	4.00	1 523	7 615.0	82 630
350	14	458	39.00	17 862.0	140.0	4.00	656	3 116.3	41 808
400	18	364	64.82	23 594.5	159.0	6.00	612	2 825.2	63 960
450	20	140	91.26	12 777.0	159.0	8.00	197	906.7	27 011
500	25	48	178.23	8 555.0	159.0	10.00	79	348.8	12 818
600	25	73	258.97	18 904.8	219.0	10.00	38	184.9	9 529
700	25	32	357.04	11 425.3	219.0	12.00	12	50.3	3 080
700	30	4	423.34	1 693.4	219.0	16.00	4	19.3	1 543
800	40	58	728.31	42 242.0	245.0	20.00	36	154.1	17 096

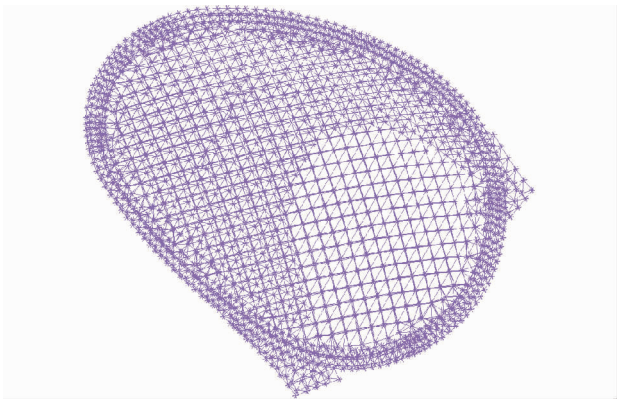


图 3 网壳有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Reticulated Shell

减少情况,若要在一个计算模型中完整展现整个变化过程,并给出所有的力学信息,就可以采用单元的“激活”与“杀死”技术^[18]。在一个完整的计算模型中,每个单元都有相应的刚度、质量矩阵,若单元处于杀死状态,则它的单元刚度矩阵将乘上一个很小的数,以使得它的作用很小,默认值为 1.0×10^{-6} ,也可赋为其他数值。死单元的荷载也将设定为0,使得它不对总荷载产生影响。当一个单元被激活时,则它的刚度、质量矩阵将重新恢复,并加到整体矩阵中。因此,首先必须构建整体模型,并生成所有单元,包括后面要被激活的单元。一般来说,对于一个后面将要被激活的单元,需要先杀死它,然后在合适的荷载步中重新激活。

对于包含有“激活”与“杀死”单元的结构系统,结构分析方程为

$$u \sum_{e=1}^N \eta^e \mathbf{K}^e = \mathbf{F}$$

$$\eta^e = \begin{cases} 1 & \text{单元 } e \text{ 处于激活状态} \\ 1 \times 10^{-6} & \text{单元 } e \text{ 处于杀死状态} \end{cases}$$

(1)

式中: η^e 为激活系数; \mathbf{K}^e 为单元刚度矩阵; u 为位移; \mathbf{F} 为单元荷载矩阵; N 为总节点数。

网壳顶升过程属于慢速时变力学,故考虑动力效应,将荷载乘以放大系数 1.1 等效为静力计算。网壳划分区域安装顶升的施工过程可用生死单元法进行模拟,按照总体施工流程建立多荷载步进行求解。比赛馆①区域网架安装完成后顶升过程中杆件出现的最大拉应力为 28.4 MPa,最大压应力为 24.7 MPa。①区域第 1 次扩展后形成①+②区域,杆件的最大拉应力为 57.3 MPa,最大压应力为 51.5 MPa。①+②区域继续扩展形成①+②+③区域,杆件的最大拉应力为 57.1 MPa,最大压应力为 51.6 MPa。比赛馆第 3 次扩展后形成①+②+③+④区域,杆件的最大拉应力为 54.5 MPa,最大压应力为 61.5 MPa。比赛馆 5 块区域全部安装完成后顶升过程中杆件的最大拉应力为 48.7 MPa,最大压应力为 61.8 MPa。所有杆件拼装顶升完成后杆件的应力云图如图 4 所示,杆件的最大拉应力为 29.7 MPa,最大压应力为 22.7 MPa。网壳顶升阶段杆件的最大拉、压应力均出现在比赛馆支撑顶点附近的杆件,且最大拉应力为 57.3 MPa,大约是屈服强度的 24.4%,最大压应力为 61.8 MPa,大约是屈服强度的 26.3%。部分支撑点处的部分杆件受力性质发生改变,即由拉杆变为压杆或由压杆变为拉杆。顶升结束后的单元应力状态可作为拆撑阶段的初始状态。

3 卸载过程模拟分析

3.1 约束方程法

一个约束方程可以是任意数量的节点和自由度

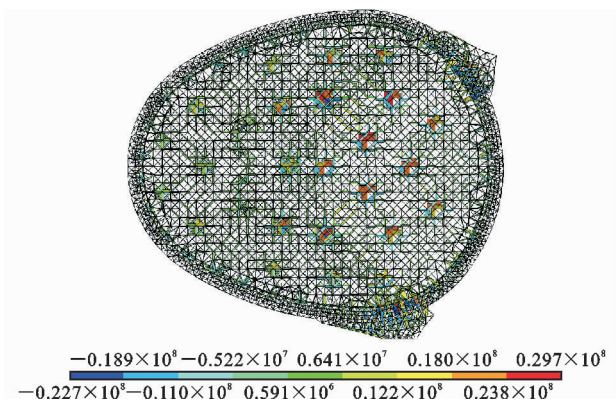


图 4 顶升结束后单元应力云图(单位:MPa)

Fig. 4 Element Stress Nephogram After Jacking Up (Unit: MPa)

的集合,线性约束方程的一般形式为

$$C_1 D_1 + C_2 D_2 + \dots + C_n D_n = D \quad (2)$$

式中: D_1, D_2, \dots, D_n 为相关节点的自由度在某方向上的位移值; C_1, C_2, \dots, C_n 为位移值对应的系数值; D 为 n 个自由度对应的总位移值。

约束方程法^[5]和支座位移法有相似之处,2种方法都是通过节点的位移控制主体结构的卸载量,但是支座位移法仅能控制1个节点的位移,即模拟主体结构被支撑点的位移,这样就无法模拟主体结构和千斤顶脱离和再接触的状态。设置约束方程可以控制多个节点的相对位移,图5为约束方程法的原理示意图,其中 NODE1 是主体结构的被支撑点,然后在此节点竖向位移方向上再建立第2个节点 NODE2,通过约束方程控制 NODE1 和 NODE2 之间的相对位移,从而控制主体结构的卸载量。为了能真实地模拟千斤顶的工作状态及主体结构和千斤顶脱离和再接触状态,需在 NODE2 和 NODE3 之间建立刚度无限大的只压不拉杆单元。这样整个卸载模型除了主体结构和千斤顶单元外还包括下部支撑结构,千斤顶单元是连接主体结构和下部支撑的桥梁。

每个支撑处只需控制2个节点之间的相对位移就可控制卸载过程的进行,故本文采用的约束方程法可更加直观地表示为只涉及2个节点位移关系的表达式,即

$$C_1 D_1 + C_2 D_2 = D_r \quad (3)$$

式中: $C_1 = -1$; $C_2 = 1$; D_r 为2个节点之间的竖向相对位移值。

式(3)表示的物理意义是, NODE1 相对于 NODE2 的竖向位移下降了 D_r 值。因此,在卸载模拟过程中输入 D_r 值可真实精确地控制千斤顶的竖

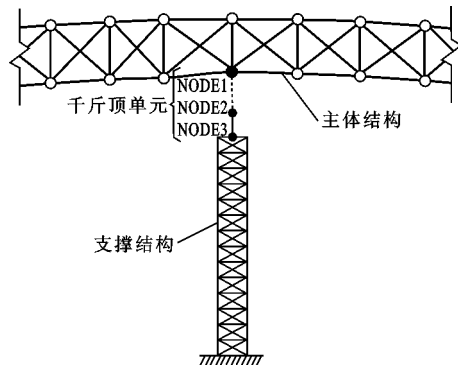


图 5 约束方程法原理

Fig. 5 Principle of Constraint Equation Method

向位移下降量。

3.2 卸载方案

卸载过程中为保证拆撑顺利和主体结构的安全,确定合理的卸载方案十分重要。卸载方案应包括落架方式、拆撑顺序和各临时支撑的卸载位移量。整个卸载过程中要确保结构体系实现安全平稳有序地转换,主体结构和临时支撑的内力和位移状态平稳地过渡,内力和位移变化的幅值尽可能小,以免发生强度和失稳破坏。落架方式一般包括整体分级同步和分区分步卸载2种方式,整体分级同步卸载是所有临时支撑分级同时进行卸载,每个支撑的每一级位移卸载量按相同比例取各自总卸载量。分区分步卸载是将所有临时支撑划分区域,各区支撑再分步进行卸载。整体分级同步卸载是一种较理想的方式,由于受主体结构刚度、支撑刚度以及施工阶段荷载的随机性等因素影响,实际工程中并不利于实施。针对本结构临时支撑的布置(图2),将采用整体分级同步和分区分步卸载2种落架方式对网壳结构进行卸载。

如图2所示将结构划分为4个区,依次为一区(A1~A8)、二区(B1~B9)、三区(C1, C2)、四区(D1~D5)。结构整体刚度较大,计算得到支撑点处的最终卸载位移最大为18 mm,一、二区分3级进行卸载,三、四区采用1级卸载。约束方程法卸载位移控制量如表2所示,2种卸载方式的分级位移卸载量均按表2取用。整体分级同步卸载步骤为:所有支撑点(A1~A8, B1~B9, C1, C2, D1~D5)首先按第1级卸载位移进行卸载;然后在第1级卸载量的基础上开始第2级卸载;最后再按第3级卸载量进行卸载。分区分步卸载步骤为:第1步将位于一区的8个临时支撑上的千斤顶同步卸载第1级位移;第2步将位于二区的9个临时支撑上的千斤顶同步卸载第1级位移;第3步将位于三区的2个临

表 2 约束方程法卸载位移控制量

Tab.2 Unloading Displacement Control of
Constrained Equation Method

卸载区域	千斤顶编号	卸载位移控制量/mm		
		1 级	2 级	3 级
一区	A1	6	6	6
	A2	6	6	6
	A3	5	5	5
	A4	5	5	5
	A5	4	4	4
	A6	4	4	4
	A7	4	4	3
	A8	4	4	4
二区	B1	2	2	2
	B2	3	3	2
	B3	2	2	2
	B4	2	2	1
	B5	2	2	1
	B6	3	3	2
	B7	3	3	2
	B8	2	2	1
三区	C1	2	1	
	C2	2	1	
四区	D1	2		
	D2	2		
	D3	2		
	D4	2		
	D5	2		

时支撑上的千斤顶同步卸载第 1 级位移;第 4 步将位于四区的 5 个临时支撑上的千斤顶同步卸载第 1 级位移,至此完成第 1 级卸载。第 2,3 级卸载重复此过程,直至卸载全部完成。

3.3 数值模拟结果

3.3.1 千斤顶内力分析

整体分级同步卸载过程分 3 步依次卸载,共有 24 个临时支撑,千斤顶的受力^[10]情况如图 6 所示,其中 INITIAL 表示结构拼装完成至开始卸载前千斤顶的受力状态,STEP1,STEP2,STEP3 分别表示第 1,2,3 级卸载。可以看出,卸载开始前一区的 A7 处千斤顶内力最大,为 282.2 kN。由于每级卸载时所有千斤顶的位移卸载量按总位移的 1/3 进行卸载,所以第 1,2 级卸载后千斤顶的内力图轮廓和开始卸载时的内力图基本一致,整个卸载过程千斤顶内力变化较稳定,是一种理想的卸载方式。

分区分步卸载时千斤顶的内力变化情况可以从

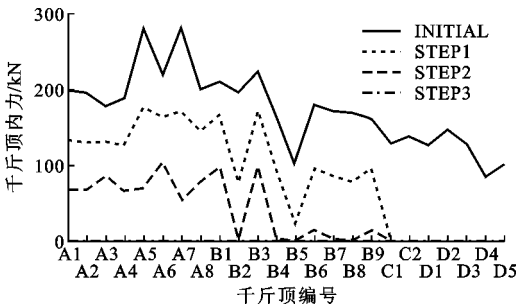
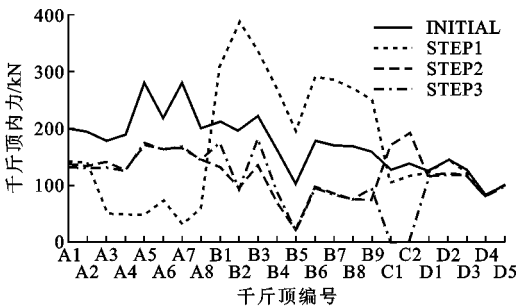
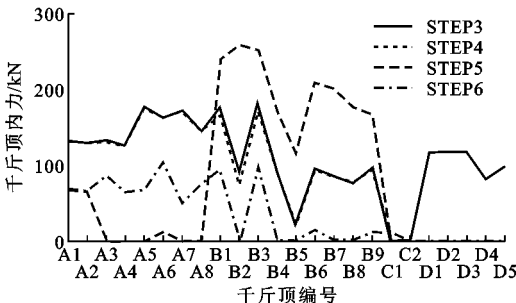


图 6 整体分级同步卸载时千斤顶内力

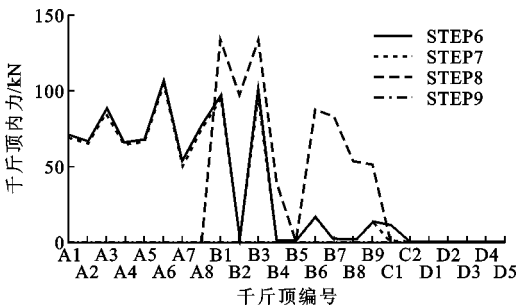
Fig.6 Internal Force of Jack During Integrated
Hierarchical Synchronous Unloading



(a) 第 1~3 级卸载



(b) 第 3~6 级卸载



(c) 第 6~9 级卸载

图 7 分区分步卸载时千斤顶内力

Fig.7 Internal Force of Jack During Unloading with
Sub-regions Method

图 7(a)~(c)直观地得到,STEP1~STEP9 对应分区分步卸载的 9 个步骤。第 1 步一区千斤顶按第 1 级位移卸载后二区千斤顶内力大约为原来的 2 倍,三区和四区的千斤顶不受影响。第 2 步二区千斤顶卸载后一区千斤顶内力较上一步有所增加,内力值

接近初始状态的2/3,三区也略微增加,但是四区千斤顶内力并无变化。第3,4步三、四区千斤顶内力的下降对其余千斤顶内力几乎无影响。第5步为一区千斤顶第2次卸载,一区千斤顶A3,A4,A5,A7,A8内力变为0,在第6步卸载后千斤顶内力又增大,说明第5步卸载过程中一区部分千斤顶和主体结构发生脱离,到第6步卸载过程中又重新和主体结构接触。第6步二区千斤顶卸载时千斤顶B2,B4,B5,B7,B8内力变为0,直到第8步卸载时千斤顶又重新负荷,说明二区千斤顶也有和主体结构发生脱离再接触的现象。总体来说,三区的2个千斤顶卸载对其他千斤顶几乎无影响。位于训练馆的四区千斤顶卸载对比赛馆的千斤顶内力不产生影响,反之,比赛馆千斤顶卸载对训练馆的千斤顶内力也不产生影响。整个卸载过程中千斤顶的内力变化比较复杂,部分千斤顶内力发生突变,对位移变化比较敏感。整个卸载过程中千斤顶的内力最大值出现在第1步卸载时的B2千斤顶处,内力值达到389.0 kN,接近其初始值的2倍。随着卸载的进行,千斤顶内力总体是降低的,每一步千斤顶出现的内力最大值都低于之前一步出现的最大值,直至卸载完成所有千斤顶内力均为0。

3.3.2 网壳单元应力分析

选取网壳结构初始状态即未卸载时3个拉应力最大的杆件和3个压应力最大的杆件单元作为研究对象,研究杆件单元应力随着卸载步的变化规律,其中3个拉应力单元分别为Elem5108,Elem5173,Elem5615,3个压应力单元分别为Elem1550,Elem1857,Elem1858,发现6个单元均位于临时支撑的顶点处。整体分级同步卸载时的单元应力见图8,卸载过程中应力变化比较平稳。其中Elem1857和Elem1858正常工作时为拉杆,卸载过程中为压杆,杆件受力性质发生改变,施工阶段的受力和结构设计不相符,对结构而言是极其危险的,而且说明施工阶段结构受力比较复杂。6个单元在卸载初始时的应力值较大,卸载完成后应力水平较低。图9为单元应力在分区分步卸载时随卸载步的变化情况,卸载过程中受压杆件应力变化最大幅度为20.6 MPa,受拉杆件应力变化最大幅度为23.0 MPa,卸载过程中杆件的应力波动较大。

4 结 语

(1)大跨度钢结构在卸载过程中受力复杂,不可控因素较多,需制定合理的卸载方案,并且依据卸载

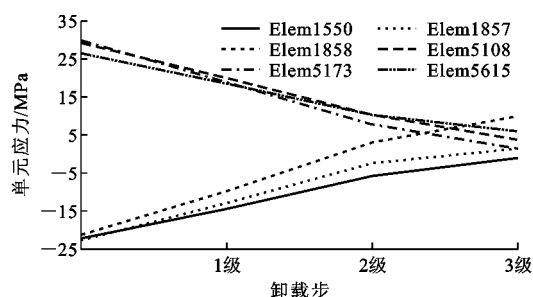


图8 整体分级同步卸载时单元应力

Fig. 8 Element Stress During Integrated Hierarchical Synchronous Unloading

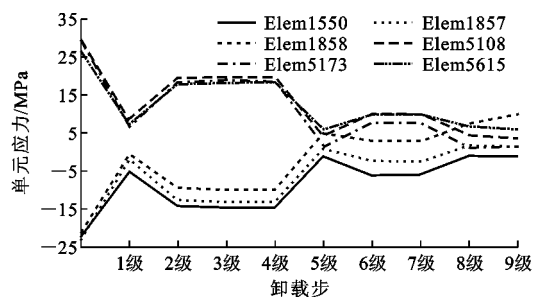


图9 分区分步卸载时单元应力

Fig. 9 Element Stress During Unloading with Sub-regions Method

方案做出模拟分析,确保卸载过程顺利安全地进行。

(2)支撑点处部分杆件的受力性质在卸载过程中发生改变,尤其设计受拉杆件在施工过程中变为压杆应引起足够重视,防止杆件受压发生失稳破坏。

(3)此结构属刚性大跨度钢网壳结构,对比2种落架方式发现,分区分步卸载时的结构杆件和临时支撑对位移变化较敏感,微小的位移变化就可引起应力和内力较大幅度的波动,因此卸载时要严格控制位移卸载量。

(4)卸载结果表明,约束方程法能真实地模拟千斤顶的工作原理,即主体结构和临时支撑之间的脱离再接触过程,为以后类似工程提供了可靠的模拟分析方法。

参考文献:

References:

- [1] 董石麟. 中国空间结构的发展与展望[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 38-51.
DONG Shi-lin. Development and Expectation of Spatial Structures in China[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 38-51.
- [2] 郭彦林, 郭宇飞, 刘学武. 大跨度钢结构屋盖落架分析方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(1): 52-58.
GUO Yan-lin, GUO Yu-fei, LIU Xue-wu. Analysis

- Methods of Removing Temporary Supports to Large-span Steel Structural Roof[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 52-58.
- [3] 刘学武, 郭彦林, 郭宇飞. 千斤顶单元法在大跨度屋盖拆撑过程数值模拟中的应用[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 24-28, 33.
- LIU Xue-wu, GUO Yan-lin, GUO Yu-fei. Application of Jack Element Model for Numerical Simulation of Removing Temporary Supports of Large-span Steel Roof[J]. Construction Technique, 2010, 39(8): 24-28, 33.
- [4] 郭彦林, 刘学武. 大跨度钢结构屋盖拆撑过程数值模拟的千斤顶-间隙单元法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1): 1-7.
- GUO Yan-lin, LIU Xue-wu. Jack-gap Element Model for Numerical Simulation of Removing Temporary Supports of Large-span Steel Structural Roof[J]. Journal of Xi'an University of Architectural & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1): 1-7.
- [5] 郭小农, 邱丽秋, 罗永峰, 等. 大跨度屋盖钢结构拆撑过程模拟分析的约束方程法[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(9): 986-994.
- GUO Xiao-nong, QIU Li-qiu, LUO Yong-feng, et al. Constraint Equation Method for Analysis of Removing Temporary Supports from Long-span Steel Roof[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(9): 986-994.
- [6] 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. Dynamic Analysis of Roof Hoisting and Supporting Process of Guangzhou New Stadium[J]. Building Structure, 2002, 32(1): 53-57.
- [7] 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 Structures, 2005, 26(5): 40-45.
- [8] 郭彦林, 郭宇飞, 高巍, 等. 国家体育场钢结构屋盖落架过程模拟分析[J]. 施工技术, 2006, 35(12): 36-40, 73.
- GUO Yan-lin, GUO Yu-fei, GAO Wei, et al. Simulated Analysis of Removing Temporary Supports for Steel Structural Roof in National Stadium[J]. Construction Technology, 2006, 35(12): 36-40, 73.
- [9] 高颖, 傅学怡, 杨想兵. 济南奥体中心体育场钢结构支撑卸载全过程模拟[J]. 空间结构, 2009, 15(1): 20-26, 34.
- GAO Ying, FU Xue-yi, YANG Xiang-bing. Whole Removal Process Simulation of Temporary Support of Jinan Olympic Stadium[J]. Spatial Structures, 2009, 15(1): 20-26, 34.
- [10] 范重, 刘先明, 范学伟, 等. 大跨度空间结构卸载过程仿真计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 19-25.
- FAN Zhong, LIU Xian-ming, FAN Xue-wei, et al. Simulation and Calculation Method of Unloading Process of Long-span Spatial Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 19-25.
- [11] 欧阳超, 严小霞, 陈韬, 等. 深圳大运中心主体育场单层折面空间网格结构临时支撑卸载技术[J]. 施工技术, 2011, 40(14): 5-8.
- OUYANG Chao, YAN Xiao-xia, CHEN Tao, et al. Unloading Technology of Temporary Support System for Single Triangular Gridding Structure by Folding Method in Main Stadium of Shenzhen Universiade Sports Center[J]. Construction Technology, 2011, 40(14): 5-8.
- [12] 梁存之, 于滨, 欧阳超, 等. 深圳大运中心主体育场钢结构支撑胎架同步卸载关键问题分析[J]. 施工技术, 2012, 41(2): 5-8.
- LIANG Cun-zhi, YU Bin, OUYANG Chao, et al. Analysis on Key Problems of Synchronous Unloading of Support Jigs for Steel Structures of Main Stadium in Shenzhen Universiade Sports Center[J]. Construction Technology, 2012, 41(2): 5-8.
- [13] 郭小农, 杨商飞, 罗永峰, 等. 某刚性大跨度钢屋盖结构拆撑过程分析[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(4): 58-64.
- GUO Xiao-nong, YANG Shang-fei, LUO Yong-feng, et al. Analysis of Unloading Process on a Steel Structure Roof[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(4): 58-64.
- [14] 张亮泉, 张树岗, 郭峦川, 等. 哈尔滨大剧院钢结构屋盖卸载模拟及应力监测[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 174-182.
- ZHANG Liang-quan, ZHANG Shu-gang, GUO Luan-chuan, et al. Unloading Simulation and Stress Monitoring of Steel Roof of the Harbin Grand Theater[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 174-182.
- [15] 陈晓阳. 某大悬挑结构支撑胎架卸载过程分析[J]. 施工技术, 2014, 43(14): 115-119.

- CHEN Xiao-yang. Analysis on Support Frame Unloading Process of a Large Cantilever Structure[J]. Construction Technology, 2014, 43(14): 115-119.
- [16] 刘 奔, 尤德清, 喻 馨, 等. 福州海峡奥体中心体育场卸载过程分析及监测[J]. 建筑结构, 2015, 45(5): 49-53.
- LIU Ben, YOU De-qing, YU Xin, et al. Analysis and Monitoring of Unloading Process for Fuzhou Strait Olympic Sports Center[J]. Building Structure, 2015, 45(5): 49-53.
- [17] 于 江, 陈国庆, 刘雨婷. 刚性大跨度空间结构卸载技术研究进展[J]. 结构工程师, 2016, 32(6): 185-193.
- YU Jiang, CHEN Guo-qing, LIU Yu-ting. Progress in Research on Unloading Technology of Rigid Structure with Large Spans[J]. Structural Engineers, 2016, 32(6): 185-193.
- [18] 王秀丽, 荣子豪, 杨本学, 等. 空间管桁架结构体育馆施工全过程模拟分析与健康监测[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 18-25.
- WANG Xiu-li, RONG Zi-hao, YANG Ben-xue, et al. Whole Process Simulation Analysis and Health Monitoring of Spatial Pipe Truss Structure Gymnasium[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(2): 18-25.
- [19] 王秀丽, 杨本学. 大跨度空间桁架结构卸载过程模拟分析与监测[J]. 建筑科学, 2018, 34(3): 105-110.
- WANG Xiu-li, YANG Ben-xue. Simulation and Monitoring of Unloading Process of Long Span Space Spatial Truss Structure[J]. Building Science, 2018, 34(3): 105-110.
- [20] 陈 博, 冉旭勇, 曹 植, 等. 空间曲面不对称钢屋盖桁架结构整体卸载施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(增1): 351-354.
- CHEN Bo, RAN Xu-yong, CAO Zhi, et al. Unloading Technology of Steel Roof of Zunyi Olympic Sports Center Stadium[J]. Construction Technology, 2017, 46(S1): 351-354.
- [21] 王泽曦, 罗 杰, 肖建春, 等. 安顺市体育中心体育场大跨度悬挑结构卸载方案研究[J]. 施工技术, 2017, 46(18): 26-29.
- WANG Ze-xi, LUO Jie, XIAO Jian-chun, et al. Research on Unloading Scheme for the Large Span Cantilever Structure of Anshun Sports Center Stadium[J]. Construction Technology, 2017, 46(18): 26-29.
- [22] 孙学根, 牛忠荣, 李兆峰, 等. 大跨度空间结构卸载过程模拟分析与监测[J]. 建筑结构, 2018, 48(11): 70-77.
- SUN Xue-gen, NIU Zhong-rong, LI Zhao-feng, et al. Simulating Analysis and Monitoring of Unloading Process of Large-span Spatial Structure[J]. Building Structure, 2018, 48(11): 70-77.
- [23] 钱稼茹, 张微敬, 赵作周, 等. 北京大学体育馆钢屋盖施工模拟监测[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 13-20.
- QIAN Jia-ru, ZHANG Wei-jing, ZHAO Zuo-zhou, et al. Simulation and Monitoring for the Construction of the Steel Roof of the Peking University Gymnasium[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 13-20.
- [24] 叶芳芳, 余志武, 袁俊杰. 重庆大剧院大悬挑结构卸载分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 122-126.
- YE Fang-fang, YU Zhi-wu, YUAN Jun-jie. Unloading Analysis for Large Cantilever Structure of Chongqing Grand Theatre[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 122-126.
- [25] 赵长军, 范 重, 彭 翼, 等. 苏州火车站大跨钢屋盖施工过程仿真分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(1): 37-40.
- ZHAO Chang-jun, FAN Zhong, PENG Yi, et al. Construction Simulation Analysis on Large-span Roof Structure of Suzhou Railway Station[J]. Building Structure, 2012, 42(1): 37-40.
- [26] 孟祥冲, 魏丹阳, 梁 锐, 等. 大跨度预应力空间钢结构分区分级阶梯式落架技术[J]. 施工技术, 2015, 30(9): 78-82.
- MENG Xiang-chong, WEI Dan-yang, LIANG Rui, et al. Temporary Support Stepped Removing Technology with Divisions and Classifications for Long-span Prestressed Spatial Steel Structure[J]. Construction Technology, 2015, 30(9): 78-82.
- [27] 韩 杰, 黄 浩, 赵 超. 某超高层建筑悬挑钢结构施工模拟分析及现场监测[J]. 施工技术, 2013, 42(8): 40-42.
- HAN Jie, HUANG Hao, ZHAO Chao. Construction Simulation and Monitoring of the Cantilever Steel Structure of a High-rise Building[J]. Construction Technology, 2013, 42(8): 40-42.
- [28] 何 荣, 陈以一, 王剑非, 等. 曲靖体育场钢屋盖支撑卸载过程及模拟分析[J]. 施工技术, 2014, 43(2): 58-61.
- HE Rong, CHEN Yi-yi, WANG Jian-fei, et al. Temporary Support Removal Process and Simulation of Qujing Stadium[J]. Construction Technology, 2014, 43(2): 58-61.