

# 大跨单层折面空间网格结构施工全过程分析

周臻, 吴京, 孟少平, 于琦

(东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:**以深圳大运会体育场大跨屋盖为工程背景,分析了新型“单层折面空间网格结构”的受力特点;基于大跨空间网格结构的矩阵力学模型,考虑结构在施工过程中几何时变、约束时变、荷载时变等特征的基础上,建立了考虑时变效应的施工状态非线性求解分析方法及其步骤,并利用ANSYS的APDL语言编制了单层折面空间网格结构的施工全过程分析程序。分析结果表明:结构在施工过程中的最大位移、最大应力均随之出现一定程度的波动;支撑内力在卸载过程中均有较大波动,其波动幅度最大接近于初始值的2倍;施工完成时结构中的应力与设计状态存在差异,位移分布也出现了不对称的现象。分析结果可为临时支撑的设计与施工过程的控制提供指导和依据。

**关键词:**空间网格结构;深圳大运会体育场;施工全过程;时变效应

**中图分类号:**TU393.3    **文献标志码:**A    **文章编号:**1674-4764(2012)05-0085-07

## Construction Process Analysis of the Single-Layer Folded Space Grid Structure

ZHOU Zhen, WU Jing, MENG Shaoping, YU Qi

(Southeast University, Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures  
of the Ministry of Education, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** Taking Shenzhen universiade stadium as engineering background, the mechanical character of a new style ‘single-layer folded space grid structure’ was analyzed. Based on the matrix mechanical model and considering the time-dependent effects of geometry, constraint, and load in construction process, the state-nonlinear construction process analysis method was established. And the analysis program was formed by the APDL platform of finite element software ANSYS to analyze the single-layer folded space grid structure. It is shown that both the maximum displacement and stress wave in construction. The bracing forces wave strongly in the unloading process and the maximum amplitude approximates 2 times of the initial value. The stress state differs from the design state when construction process is finished, and the displacement distribution is not completely symmetrical. The analytical results can guide the temporary supports design and construction process control.

**Key words:** space grid structure; Shenzhen universiade stadium; construction process; time-dependent effect

近年来随着中国社会不断进步与经济快速增长,公共建筑的规模亦日益扩大。大跨空间网格结构体系以其优美的建筑造型、强大的跨越能力和良好的受力性能等优点,在各地兴建的诸多大型体育

场馆、会展中心、候车室(厅)等大型公共建筑中得到了广泛应用,其工程数量与建设规模在近10年来得到了急剧发展<sup>[1]</sup>。

深圳大运会体育场(如图1(a)所示)采用了1种

收稿日期:2012-03-10

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2010428);教育部博士点新教师基金(20090092120017)

作者简介:周臻(1981-),男,副教授,博士,主要从事大跨空间结构研究,(E-mail)seuhj@163.com。

新型的大跨空间网格结构体系:“单层折面空间网格”结构,其平面尺寸达 $285\text{ m}\times 270\text{ m}$ ,周长接近 $1\,000\text{ m}$ <sup>[2-3]</sup>。对于如此大规模的空间结构体系,其施工过程必然是分阶段进行,一般包括:分阶段安装的过程与安装完成后的卸载过程。这样不同的结构部分将依据其施工顺序先后参与工作,导致其几何形态、刚度分布、荷载大小和支座约束等方面都处于不断的变化过程中,结构受力呈现出较强的时变特征。但在结构设计过程中,则往往假定结构一次成型、所有杆件同步受力,这样的计算假定与实际的施工过程存在差异<sup>[4-10]</sup>。

为此,笔者基于大跨空间网格结构的矩阵力学模型,采用考虑时变效应的施工全过程分析方法,并利用模拟支撑特性的组合千斤顶单元,对深圳大运会体育场单层折面空间网格结构的合拢拼装与支撑卸载全过程进行仿真分析,从而能准确确定该复杂空间结构在实际施工过程中的受力状态,并为工程施工方案的制定与施工过程的控制提供依据。

## 1 单层折面空间网格结构的受力特点

大运会体育场的钢屋盖结构是基于建筑师水晶石造型的设计构思发展起来的,结构体系为一系列的空间折面结构(图1)<sup>[11]</sup>。每个结构单元的轴线是基于体育场看台的轴线而布置的。屋盖结构的外侧为整个体育场的幕墙。体育场的平面为椭圆形,屋盖结构由20个形状相近的结构单元构成(单元分区如图1(b)所示),屋盖的悬挑长度在不同的区域分别为 $51.90\sim 68.40\text{ m}$ 。屋盖结构包括马鞍形的外圈和内圈。外圈的高差为 $13.00\text{ m}$ ,内圈的高差为 $8.56\text{ m}$ 。

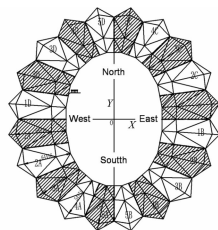
整体结构体系具有悬臂折板的受力特征。杆件体系分为2级,第1级为骨架杆件(主受力杆件);第2级则为次级杆件(次受力杆件)。结构受力时,荷载主要通过悬臂折板的骨架杆件进行传递,而次级杆件则连接各骨架杆件,一方面为骨架杆件提供稳定支撑,另一方面使各骨架杆件之间形成更为紧密的空间整体受力体系,增强结构的受力性能。

图2为结构承受竖向均布荷载作用下主杆杆件的受力特征示意,折面空间网格结构主要通过屋面结构的脊杆、谷杆及斜腹杆将外力传递给背部墙面结构,再传递给支座和基础。结构承受竖向荷载时,“脊杆”受拉,“谷杆”受压,“脊杆”与“谷杆”之间形成一对力矩,从而抵抗外荷载产生的弯矩。而外荷载在屋面结构中产生的剪力以及在背部墙面结构中产生的轴力则由斜腹杆以及背部墙面结构的谷杆承

担;悬挑折板结构的倾覆弯矩则通过圆形平面的环向力来承担,表现为由于各标准单元之间的相互作用而产生的空间效应。



(a)结构效果图



(b)结构单元分区

图1 深圳大运会体育场的“单层折面空间网格”结构体系

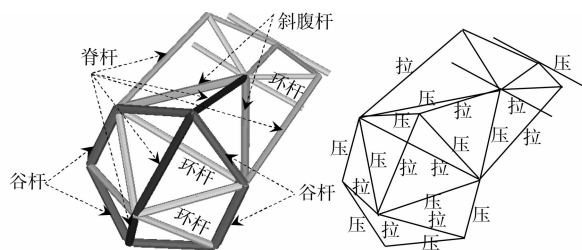


图2 结构各主杆杆件的受力特征示意

为分析在对称竖向荷载作用下的结构各单元之间相互作用,截取 $1/4$ 的结构模型,在截断边缘上依据结构对称和荷载对称的性质,在截断节点处施加竖向滑动约束,如图3所示。计算得到的截断边缘的侧向反力与侧向弯矩分布如图4所示,图中侧向反力为正代表截断边缘受压。由图可知,在骨架杆件交界处的截断边缘节点,支座呈现较大的反力,而在次级杆件交汇的截断边缘节点则反力相比而言较小,表明各标准结构单元之间的相互作用以骨架杆件之间的相互挤压为主,这也符合折板结构的特性。此外,在截断边缘处,除背部墙面结构的节点的侧向弯矩较大外,其余节点的侧向弯矩都相对较小,表明各标准结构单元之间的相互转动约束主要表现在背部墙面结构,而在屋面结构则相对不明显。综合来看,结构各标准单元间的相互作用很强,表明结构具有很强的空间整体效应。但在结构的分段拼装施工过程中,由于结构整体尚未成型,结构的环向约束刚度相对于使用阶段较小,由此导致结构施工期间整体刚度的削弱。因此,有必要对该结构进行精确的施工全过程分析,以准确评估结构在施工期间的安全性能,为施工过程控制方案的制定提供依据。

## 2 基于时变力学的施工全过程分析方法

### 2.1 大跨空间网格结构的矩阵力学模型

大跨空间网格结构在外部节点荷载作用下的矩

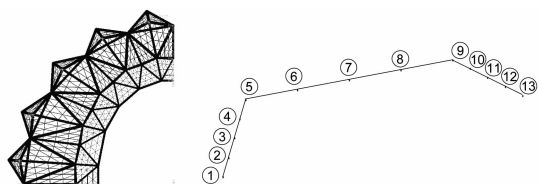


图3 1/4结构模型和截面边缘支座节点编号

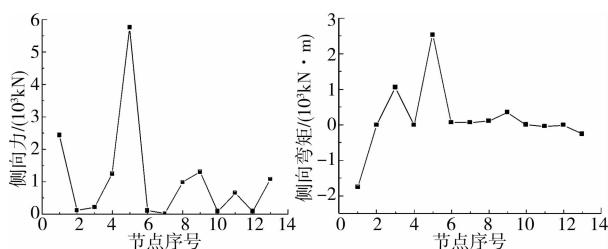


图4 截面边缘的侧向反力与侧向弯矩分布

阵力学模型可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\text{平衡方程: } T^T F = P \quad (1)$$

$$\text{物理方程: } F = K_e D \quad (2)$$

$$\text{几何方程: } D = T d \quad (3)$$

式中:  $T$  为几何矩阵;  $T^T$  为  $T$  转置, 即平衡矩阵;  $P$  为节点力向量;  $F$  为杆件内力向量;  $D$  为杆件伸长量向量;  $d$  为节点位移向量;  $K_e$  为单元刚度矩阵。将物理方程式(2)和几何方程式(3)代入平衡方程(1)即可得到大跨空间钢结构的刚度法方程如式(4)。

$$K d = P \quad (4)$$

其中:  $K = T^T K_e T$  为结构整体刚度矩阵。

## 2.2 考虑时变效应的施工全过程分析方法

结构在拼装合拢与支撑卸载的施工过程中, 其几何形态、刚度大小、支座约束与外部荷载均处于不断变化的过程, 需经历若干个中间过渡状态才能达到最终施工完成的结构状态。因此, 结构在施工过程中的受力状态随着施工阶段的进行亦在不断变化, 体现出与时间(施工阶段)在一定程度上的相关性, 即通常所说的状态非线性。而为了模拟施工过程中这种结构力学状态的变化, 则必须采用考虑时变效应的施工全过程状态非线性分析方法<sup>[13-14]</sup>。笔者以上述大跨空间网格结构的矩阵力学模型为基础, 将施工全过程非线性分析方法的求解过程描述如下:

1) 依据拟定的施工方案, 可将施工过程划分为  $n$  个阶段(步骤), 从而得到施工全过程计算的  $n$  个时间点构成的时间序列, 即:  $s_0 = 0 < s_1 < s_2 < \dots < s_i < \dots < s_n = S$ 。其中时间点具有明确的物理含义:  $s_0 = 0$  代表结构施工的初始零状态,  $s_i$  代表施工过程的第  $i$  个阶段,  $s_n = S$  代表结构施工过程的完成

状态(本文中即为结构支撑卸载完成的状态)。

2) 在结构的拼装合拢与支撑卸载过程中, 结构构件被不断地安装或临时支撑被不断地拆除, 这可以通过不断地修改单元和结构的刚度矩阵来实现。假设在  $s_i$  时刻结构的受力状态已知, 则可确定此刻已有结构的整体刚度矩阵  $K^i$ 。若在此时刻基础上下一阶段施工时将会安装和拆除的构件(支撑)单元的刚度矩阵分别为  $K_{ea}^{i+1}$  和  $K_{es}^{i+1}$ , 则  $s_{i+1}$  时刻分析时结构的刚度矩阵为:

$$K^{i+1} = K^i + \sum T^T K_{ea}^{i+1} T - \sum T^T K_{es}^{i+1} T \quad (5)$$

3) 随着施工过程的进行, 结构所承受的外部荷载有可能也在不断改变, 因此可对  $\Delta P^i$  进行修改来模拟。同时边界条件的变化则可通过修改  $\Delta d^i$  及控制方程或施加约束方程来引入。由于此时  $s_i$  时刻结构的受力和变形状态已通过式(4)求解得到, 即:  $d$ 、 $S^i$ 、 $D^i$  已知, 由此可推出  $s_i$  到  $s_{i+1}$  时刻结构分析的刚度法方程式(6)。

$$K^{i+1} \Delta \delta^i = \Delta P_0^i \quad (6)$$

求解式(6)即可获得  $\Delta d^i$ , 进而通过式求得  $s_{i+1}$  时刻施工完成时的节点位移、杆件内力:

$$\delta^{i+1} = \delta^i + \Delta \delta^i, S^{i+1} = S^i + \Delta S^i \quad (7)$$

4) 按照预定的施工顺序依次扩大施工阶段的结构求解区域, 修正结构的边界条件、荷载条件和材料特性等参数, 直至施工过程全部完成, 即可对施工全过程受力的时变效应进行准确模拟。在上述求解过程中, 可考虑几何、材料和边界非线性等因素的影响, 其方法同一般的非线性增量有限元法, 在此不再赘述。

## 2.3 支撑单元的模拟

笔者基于前述的施工全过程分析方法, 以有限元分析软件 ANSYS 的 APDL 语言为平台<sup>[15]</sup>, 利用“生死单元”功能, 编制了深圳大运会体育场考虑施工时变效应的全过程分析程序。在施工过程的仿真分析中, 临时支撑单元的模拟是较为关键的问题。在结构卸载过程中, 由于临时支撑主要在受压时对结构提供竖向支撑, 而当其受拉时则不对结构提供支撑作用, 因此支撑单元的模拟应当具备只压不拉的特性。

ANSYS 软件中的 LINK10 单元在每个节点上有 3 个平动自由度, 没有弯曲刚度。该单元刚度矩阵具有双线性特性, 是一个轴向仅受拉或仅受压的杆单元。使用受拉选项时, 如果单元受压, 则表示其处于松弛状态, 刚度矩阵置零, 以此来模拟索或链条的松弛; 如果单元受拉则以其初始刚度参与整体结构刚度矩阵的集成。使用受压选项时, 在单元中设置

GAP,如果单元受拉,则表示单元中的 GAP 处于裂开状态,此时 GAP 打开,单元刚度矩阵置零;如果单元受压则 GAP 闭合,单元以初始刚度参与整体刚度矩阵的集成,即可模拟构件的只压不拉。但由于临时支撑不仅在受压时具有轴向刚度,同时具有一定的抗弯刚度,而 LINK 单元为不具备任何抗弯刚度的铰接杆单元,因此如单纯采用 LINK10 单元模拟临时支撑,可能导致结构在施工过程中的不稳定状态,使结构施工位移的计算较实际情况存在较大差异。为此,可在 LINK10 单元的基础上,并联 1 个 BEAM4 梁单元,由梁单元提供相应的抗弯刚度,从而形成组合支撑单元。

BEAM4 单元是一种可用于承受拉、压、弯和扭

的经典梁单元。单元在每个节点上有 3 个平动和 3 个转动共 6 个自由度,位移函数采用三次插值函数。截面特性以面积、惯性矩和轮廓尺寸等实常数的形式输入,使得组合支撑单元参数的输入非常简便。通过对组合支撑单元的参数进行合理设置于调节,能够精确模拟临时支撑的真实特征。例如:组合支撑单元的轴向刚度全部由 LINK10 单元提供,因此可对 LINK10 单元的刚度矩阵乘以刚化系数  $\alpha$ ,可模拟支撑轴向刚度无穷大;由于 BEAM4 单元仅提供抗弯刚度,因此给其刚度矩阵中的轴向刚度乘以软化系数  $\beta$ 。由此可得组合支撑单元的刚度矩阵如式(8)所示。一般  $\alpha$  取  $10^3$ ,  $\beta$  取  $10^{-3}$  可满足工程精度要求。

$$\mathbf{K}_s^e = \frac{EA_1}{L} \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta \frac{EA_2}{L} & 0 & 0 & -\beta \frac{EA_2}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\beta \frac{EA_2}{L} & 0 & 0 & \beta \frac{EA_2}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3 深圳大运会体育场的施工全过程分析

#### 3.1 施工方案的制定

结构的施工方案包括拼装合拢方案与支撑卸载方案。图 5 给出了结构的拼装合拢方案示意,由于结构由 20 个标准单元组成,因此以每一个标准单元为 1 个施工阶段,结构的拼装合拢过程共由 20 个施工阶段组成。

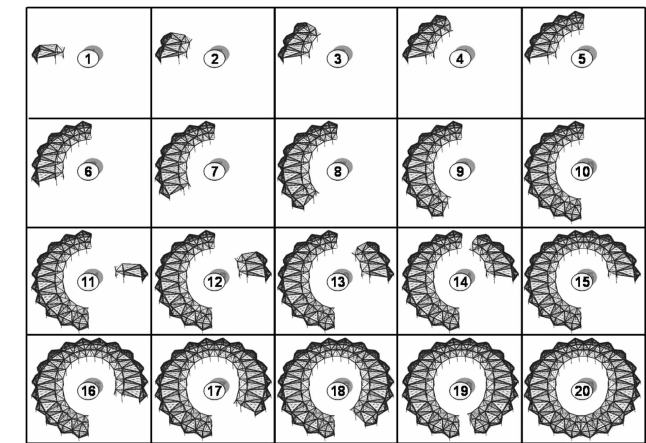


图 5 结构的拼装合拢方案示意

图 6 为结构的临时支撑编号示意,结构共有 120 个临时支撑,按照其径向位置共分为 6 圈,ZJ1(编号 1~20)、ZJ2(编号 21~40)、ZJ3(编号 41~60)、ZJ4(编号 61~80)、ZJ5(编号 81~100)、ZJ6(编号 101~120)。支撑卸载方案采用拆除支撑与分级卸载相结合的方式,具体实施过程为:

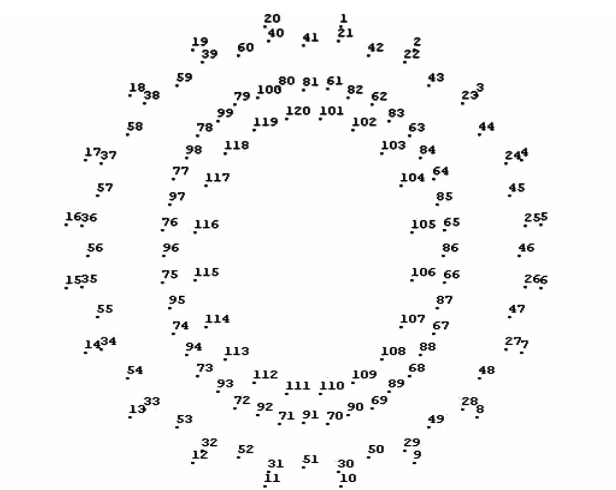


图 6 结构的临时支撑编号示意

直接拆除 ZJ1→直接拆除 ZJ2→直接拆除 ZJ3→



直接拆除 ZJ5→直接拆除 ZJ6→分 4 级卸载 ZJ4。

在拆除或卸载各圈支架时,遵循十字交叉的原则,每一步拆除或卸载 4 根;分级卸载时 7 以位移为控制标准,各级的位移控制量分别为目标位移的 20%、20%、25%和 35%。这样结构的支撑卸载过程共由 45 个施工阶段组成。

3.2 施工过程中的最大位移与应力

施工全过程的最大位移与应力分析结果如图 7 所示。由图 7 可知,结构在施工顺序中的 45 步之前,最大位移变化很小,基本在 50 mm 左右。从第 45 步开始一直到最后,结构位移开始均匀增加,直到最终达到结构的设计位移状态,这主要是拆除 ZJ5、ZJ6 和卸载 ZJ4 对结构的位移影响较大。最大拉应力与压应力在结构拼装阶段存在一定的台阶现象,这主要是由于结构单元的不断增加,使得结构杆件中的应力分布不断变化。而在支撑卸载阶段,结构最大拉应力的变化幅度较小,结构的最大压应力则出现较大波动,最终达到 95 MPa。依据应力分析结果,可确定应力突变较为剧烈的工况为施工过程的

关键工况,包括:结构拼装阶段的第 4、9、12、14 步和拆除支架阶段的第 42、47、55、57、59、62 步,在实际施工过程中应对这些关键工况进行重点控制,以确保结构在施工期间的安全性能。

3.3 支撑卸载过程中的支撑轴力变化

在临时支撑的卸载过程中,某一部分的支撑拆除或分级卸载必然引起主体结构和其他支撑结构的内力重分布,尤其可能导致其他支撑的受力显著增大。因此,为了对临时支撑进行合理设计以确保结构在施工期间的安全性能,必须掌握支撑受力在施工过程中的变化规律,确定出各临时支撑的最不利内力分布,从而为支撑设计提供依据。图 8 给出了支撑卸载过程中的支撑轴力变化结果。由图中数据可知,ZJ3、ZJ4、ZJ5 的支撑内力较大,而 ZJ1、ZJ2 和 ZJ6 则相对较小。在支撑卸载过程中,各支撑的内力均有较大波动,尤其 ZJ3、ZJ4、ZJ5 的内力最大值与其初始值的比值较大,最大接近于 2 倍。图 9 给出了施工过程中支撑反力的最大值分布,可作为支撑结构设计的依据。

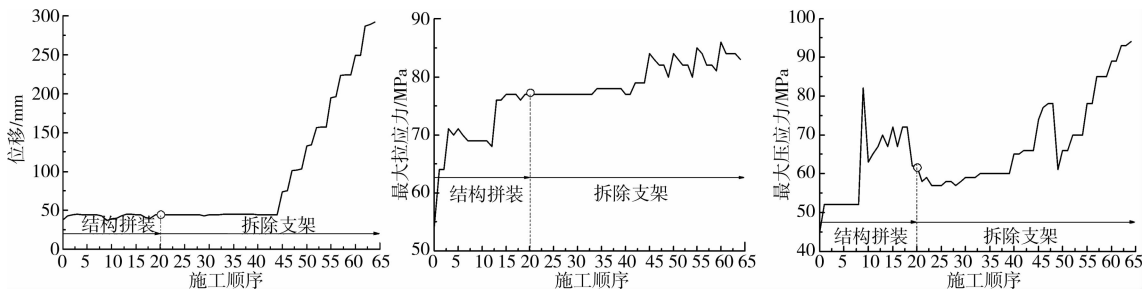


图 7 施工全过程仿真分析的最大位移与应力

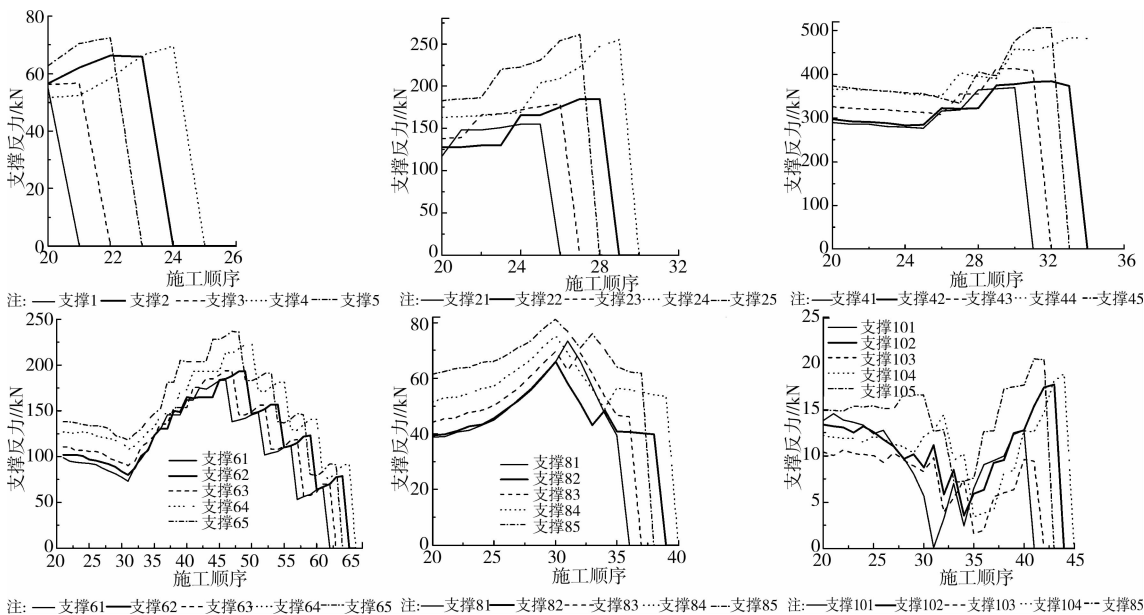


图 8 临时支撑卸载过程中的支撑轴力变化

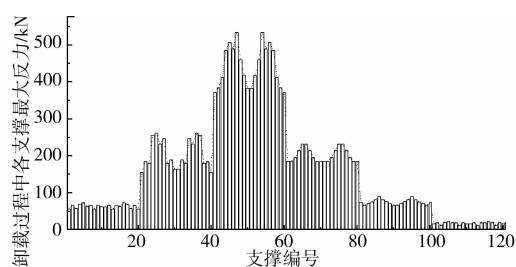


图9 施工过程中支撑反力的最大值

### 3.4 结构施工最终状态与设计状态的对比

结构施工最终状态与设计状态的正应力和位移分布对比结果如图10和图11所示。由图中数据可

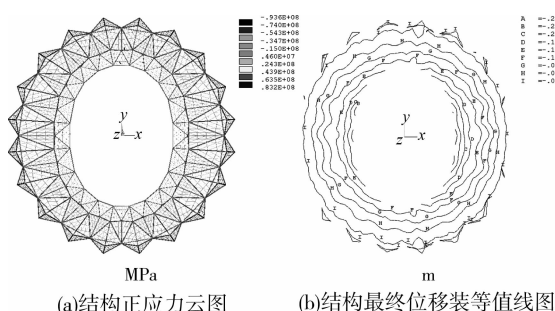


图10 施工全过程仿真计算最终状态(卸载完成)

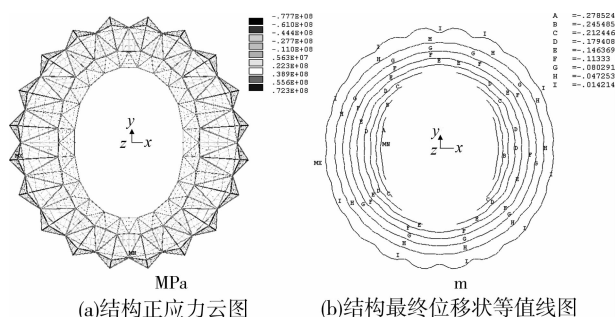


图11 自重作用下的结构设计状态(卸载完成)

知,施工全过程仿真计算最终状态时的结构最大挠度为272 mm,最大压应力为77.7 MPa,最大拉应力为72.3 MPa。结构设计状态自重作用下的最大挠度为279 mm,最大压应力为93.6 MPa,最大拉应力为83.2 MPa。可见,挠度数值相差很小,而应力最大则相差15.9 MPa。从图中可以看出,施工全过程仿真计算最终状态的结构位移并不完全对称,东面的B区和C区的位移比西面的A区和D区大。实际上,应力差异与位移不对称的原因都是由于施工过程的状态非线性影响所引起。由于西面结构先施工,东面结构后施工。因此,在施工过程中,东面结构和西面结构参与受力的顺序并不相同,这使得在卸载完成后,结构中的应力与实际状态存在差异,位移分布也出现了不对称的现象。但应力相差的数值

较小,而位移分布的不对称性也不大。因此,施工全过程仿真计算得到的结果与设计状态基本吻合,这也为施工方案的顺利实施提供了理论保证,而获得的施工全过程计算数据则可为施工过程控制提供指导依据。

## 4 结 语

1) 大跨复杂空间钢网格结构的施工全过程一般均包括拼装合拢和支撑卸载两大阶段。其中,结构的拼装合拢阶段一般要依据结构的几何和受力特征划分为若干个步骤,而支撑卸载也要依据施工条件与结构受力等方面的考虑分若干个步骤进行。因此,整个施工过程是由多个相互联系的施工步骤所组成,必须采取适合的分析方法对其进行精确的全过程跟踪分析,以确保结构在施工期间的安全性能及在施工完成时能够实现结构设计的预期状态。

2) 结构在拼装合拢与支撑卸载的施工过程中,其几何形态、刚度大小、支座约束与外部荷载均处于不断变化的过程,因此结构在施工过程中的受力状态亦随之不断变化,体现出与时间(施工阶段)在一定程度上的相关性。为了模拟施工过程中结构的这种力学时变特征,应采用考虑时变效应的施工全过程状态非线性分析方法,针对结构的施工全过程进行仿真分析,为科学确定结构的合拢施工方案提供理论依据。

3) 基于大跨空间网格结构的矩阵力学模型,采用考虑时变效应的施工全过程分析方法,并利用模拟支撑特性的组合千斤顶单元,对深圳大运会体育场单层折面空间网格结构的施工合拢拼装与支撑卸载全过程进行仿真分析,得到了结构在施工期间的全过程应力、位移、支撑内力等变化规律,以及结构施工完成时的最终状态与设计状态的对比结果,从而为临时支撑的设计与施工过程的控制提供指导和依据。

### 参考文献:

- [1] 范重,王喆,唐杰. 国家体育场大跨度钢结构温度场分析与合拢温度研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(2):32-40.  
FAN Zhong, WANG Zhe, TANG Jie. Analysis on temperature field and determination of temperature upon healing of large-span steel structure of the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 32-40.
- [2] 郭彦林,窦超,王永海,等. 深圳大运会体育中心体育场整体模型承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31

- (4):1-9.
- GUO Yanlin, DOU Chao, WANG Yonghai, et al. Experimental investigation of integral scaled model on load-carrying capacity of main stadium of Shenzhen Universiade Sport Center [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4):19-30.
- [3] 郭彦林, 窦超. 单层折面空间网格结构性能研究及设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4):19-30.
- GUO Yanlin, DOU Chao. Study on structural performance and design of single-layer folded-plane spatial reticulated structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4):19-30.
- [4] 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 Zhiyuan. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3):41-46.
- [5] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6):105-108.
- WANG Guangyuan. On mechanics of time-varying structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6):105-108.
- [6] Kwak H G, Kim J K. Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences [J]. Building and Environment, 2006, 41(10): 1423-1434.
- [7] Cruz P J S, Mari A R, Roca P. Nonlinear time-dependent analysis of segmentally constructed structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(3): 278-287.
- [8] Mari A R. Numerical simulation of the segmental construction of three dimensional concrete frames [J]. Engineering Structures, 2000, 22:585-596.
- [9] Choi C K, Kim E D. Multistory frames under sequential gravity loads [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(11):2373-2384.
- [10] Choi C K, Chung H K, Lee D G, et al. Simplified building analysis with sequential dead loads-CFM [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(4):944-954.
- [11] GMP 建筑事务所. 深圳大运会体育中心主体育场屋盖钢结构超限设计可行性论证报告[R]. 深圳: 深圳市建筑工务署, 2007.
- [12] 董石麟. 空间网格结构分析理论与计算方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [13] 刘学武. 大型复杂钢结构施工力学分析及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [14] 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 Xiaoqiang, GUO Yanlin, YE Keming. Research on the construction mechanic method of long-span steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5):83-88.
- [15] Swanson J A. Ansys user's manual [M]. 6th ed. Analysis systems, Inc., Canonsburg, Pa, 2002.
- (编辑 王秀玲)