



深圳大运中心体育场空间钢结构杆件计算长度研究

张建军, 刘琼祥, 郭满良, 刘 臣, 杨德喜, 彭德昭
(深圳市建筑设计研究总院有限公司, 广东深圳 518031)

摘要:深圳大运中心体育场钢屋盖采用单层折面空间网格结构。由三角形平面以各种倾斜弯折组成,且该平面内设置小三角形网格,由焊接组合箱形断面的次杆件连接在面面交线的四分点。位于面面交线的主杆件稳定受到两端边界条件、面内次杆件、面面夹角的角度等诸多因素影响。目前规范还没有对该类复杂边界条件杆件计算长度的规定。根据变轴力两端铰接的稳定承载力计算式,以线性稳定分析杆件失稳模态为基础,进行几何非线性稳定整体分析,考虑了临界状态相邻杆件的变形及非线性变形影响,分析了杆件临界失稳模态以及杆件轴力变化,获得临界承载力。根据变轴力稳定计算式,得到该杆件的计算长度。分析表明:主杆件计算长度系数受三角形折面夹角和两端节点刚度影响较大;大部分主杆件计算长度系数小于或接近 1.0,立面铅直杆件受水平位移影响,其计算长度系数大于 1.0。主体结构卸荷和整体稳定分析验证了计算长度取值的合理性。

关键词:单层折面空间网格结构;非线性稳定分析;变轴力;计算长度;临界承载力

中图分类号:TU393.3 TU311.2 **文献标志码:**A

Research on effective length of bar of space steel structure of the Shenzhen Universiade Sports Center

ZHANG Jianjun, LIU Qionxiang, GUO Manliang, LIU Chen, YANG Dexi, PENG Dezhaoh
(Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Shenzhen 518031, China)

Abstract: A new type of structural system named as single-layer folded-plane latticed shell structure was adopted for the steel roof of the main stadium of the Shenzhen Universiade Sports Center. The whole structure was composed of numerous triangle grids bent in different angles with subordinate triangle grids inside. The subordinate triangle grids were connected to the quarter point of the intersecting line of two surfaces by the subordinate bar of the welded combined box section. The stability of the major bar in the intersecting line was affected by many factors, such as the border, the subordinate bar in the surface, and the angle between the two surfaces. Currently, there is no code specifying the calculation of the effective length of the major bar. In order to calculate the effective length of the major bar, the instability model of the structure by linear method was analyzed first. Second, based on the results from the linear analysis, the instability model of the structure was analyzed with geometric nonlinear method. Then the critical loading capacity of the major bar was obtained. At this step, the effect of nonlinear deformation of adjoining bars was considered. Third, the effective length of the major bar was calculated according to the formula of instability capacity of varied-axial-force bar with pinned joint. The research shows that: 1) the effective length of the major bar is greatly affected by the angle between two surfaces and the stiffness of the two ends; 2) the coefficient of the effective length of most major bars is less than 1.0 or close to 1.0; 3) the coefficient of the effective length of vertical bar is more than 1.0 due to the influence of horizontal displacement. Both the unloading test of the main stadium and the overall stability analysis justified the research results.

Keywords: single-layer folded-plane latticed shell structure; nonlinear analysis of stability; varied-axial-force; effective length; critical load carrying capacity

1 引言

深圳大运中心体育场采用了单层折面空间网格结构,位于三角形面面交线的主杆件,受面面夹角 $90^\circ \sim 150^\circ$ 不等、四分点处次杆件以及两端边界条件等影响,确定主杆件的计算长度是本工程结构设计的难点问题^[1-7]。

GB 50017—2003《钢结构设计规范》(以下简称“《钢规》”) 对结构体系的计算长度系数的规定,主要涉及以层变形为主的框架结构。计算方法主要有两种:一种是以多项假定为基础,分别对多层框架有侧移、无侧移情况等建立临界状态的平衡方程,求解框架柱的计算长度系数;另一种是对多层框架结构施加假想水平概念力的近似二阶分析方法。在楼层处施加该水平力,并参与荷载组合,假想水平概念力的大小是以传统解析方法获得的框架柱稳定承载力为基础验算得到,是解析解的另一种简化方法。本工程结构体型复杂,属非常规结构,《钢规》提供的两种计算方法并不适用。

对计算长度的求解,文献[8]依据整体屈曲分析方法进行求解,具体过程为:

(1) 对给定的荷载组合,采用线性分析方法对结构进行分析,得到所有杆件的轴力;

(2) 以这一荷载工况的组合轴力 p_i 做为标准,乘以荷载因子 χ ;

(3) 形成有限元分析的刚度矩阵,进行特征值分析,得到临界荷载因子 χ_{cr} ;

(4) 求得临界荷载 $\chi_{cr} p_i$, 反算杆件的计算长度。

该方法存在的主要问题是: 对大跨度空间结构,某些杆件没有达到临界状态; 整体屈曲分析时,某一模态只能反映局部区域的失稳情况,并不是所有杆件同时失稳,得到的某些杆件的计算长度较大。本文提供的计算方法通过对每组杆件轴力-位移路径的跟踪,正确把握临界状态,能够克服整体屈曲分析方法的局限性。

本文根据杆件轴力变化特点,推导了变轴力两端铰接的杆件稳定计算式; 通过特征值分析确定了杆件初始弯曲缺陷的施加方式; 以线性稳定分析杆件失稳模态为基础,施加微小初始缺陷,进行几何非线性整体稳定分析,考虑了临界状态相邻杆件的变形及非线性变形影响,精确描述杆件临界失稳模态,分析杆件轴力变化,获得临界承载力。根据变轴力稳定计算式,得到该杆件的计算长度,并提出了简化考虑稳定附加应力的计算方法。

2 计算模型

将深圳大运中心体育场结构的下部混凝土看台作为钢屋盖的嵌固端,计算模型将钢屋盖单独取出。模型包括了主杆件、次杆件等结构构件。采用 ANSYS 软件进行结构分析。

钢屋盖由 20 个单元组成,平面呈双轴对称(图 1),最大悬挑长度 68.4m,每个单元根据杆件受力、空间位置等特点,将主杆件分为 16 组,第一组杆件编号 G1,以此类推,如图 2 所示。每个单元由 13 个折面组成,主杆件为直径 700 ~ 1400mm 圆管,材质 Q345GJ、Q390。次杆件为焊接组合箱形断面,其高度为 450 ~ 600mm,位于主杆件四分点的连线处,为主杆件提供侧向约束(图 3),材质 Q345。主次杆件之间、次杆件与次杆件之间采用刚接。内环点、冠峰点为焊接节点,其余节点均为铸钢节点。整个结构共 20 个支座,将 x, y, z 三个方向平动自由度约束,释放绕三个坐标轴转动自由度。主、次杆件采用 BEAM188 单元模拟。

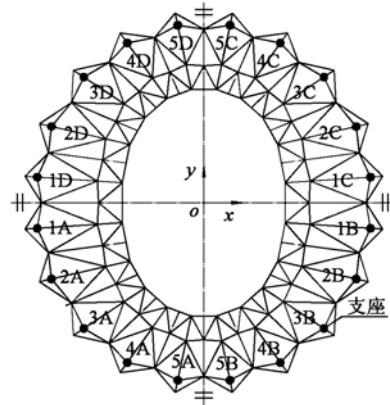


图 1 钢屋盖单元编号示意图

Fig. 1 Diagram of numbering for steel roof units

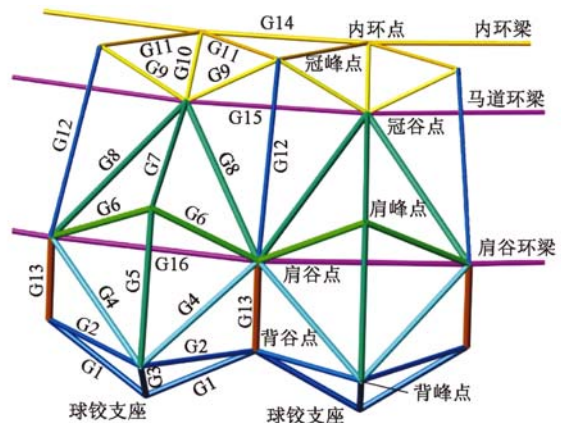


图 2 单元主杆件分组编号及节点命名示意

Fig. 2 Grouping and node naming of major bars

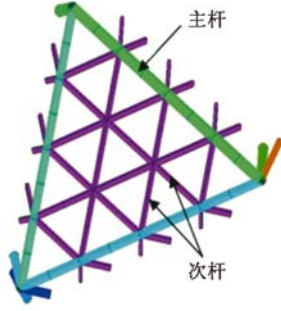


图3 主、次杆件布置图

Fig. 3 Layout of major bars and subordinate bars

3 理论研究

失稳是压杆特有的破坏形式,临界状态是压杆失稳破坏的控制点。轴压力 P 、挠度 δ 是影响临界状态的基本因素。影响临界状态挠度 δ 的因素较多,包括边界条件、荷载作用形式、初始缺陷、残余应力、几何非线性等。

3.1 轴力分布特点及计算方法

在1.35恒载+0.98活载的工况下(荷载具体取值详文献[9]),1A单元主杆件轴力分布云图如图4所示,从图中可以看出,主杆件的轴力呈梯形分布,这是由于主杆件四分点处次杆件内力影响。基于能量法推导了主杆件两端铰接轴力呈梯形分布的临界承载力计算式,计算简图如图5所示,图中 N_1 和 N_2 分别为杆件两端的最大、最小压力, R_1 和 R_2 为临界状态时的支座反力, q 为沿杆轴分布的线荷载(近似考虑次杆件对主杆件轴力的影响), ds 为杆轴变形的微分长度。

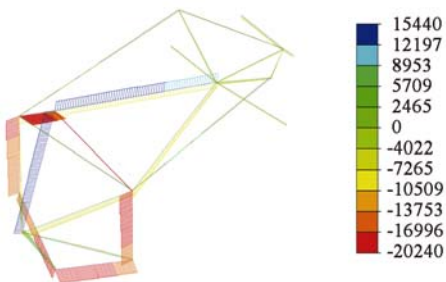


图4 1A单元主杆件轴力梯形分布云图(单位:kN)

Fig. 4 Contour of axial force of major bar in unit 1A

满足边界条件的杆件变形方程为^[1,10]:

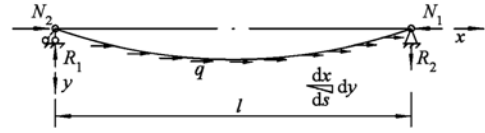
$$y = v \sin \frac{\pi x}{l} \quad (1)$$

式中, v 为压弯杆件的最大挠度。

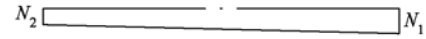
分布线荷载为:

$$q = \frac{N_1 - N_2}{l} \quad (2)$$

支座反力为:



(a) 主杆件受压屈曲



(b) 轴力变化

图5 压杆屈曲及轴力分布

Fig. 5 Buckling and axial force distribution of axial forced bar

$$R_1 \times l = \int_0^l qy dx = q \cdot \int_0^l v \sin \frac{\pi x}{l} dx \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{2qv}{\pi} \quad (4)$$

基于能量法建立平衡方程,荷载势能的减少 δU 等于应变能的增加 δV ,即 $\delta U = \delta V$ 。

$$\begin{aligned} \delta U &= N_2 \times \int_0^l (ds - dx) + \int_0^l \left(\int_x^l (ds - dx) \right) q dx \\ &= N_2 \times \frac{\pi^2 v^2}{4l} + \frac{\pi^2 q v^2}{8} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \int_x^l (ds - dx) &= \frac{\pi^2 v^2}{4l^2} \left(l - x - \frac{l}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{l} \right) \\ \delta V &= \int_0^l \frac{M^2 dx}{2EI} = \frac{v^2}{2EI} \left(\frac{N_2^2 l}{2} + \frac{N_2 q l^2}{2} + \frac{q^2 l^3}{5} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$M = N_2 y + R_1 x + \int_0^x (v \sin \frac{\pi \alpha}{l} - v \sin \frac{\pi \alpha}{l}) q d\alpha$$

$$\text{令 } \frac{N_2}{N_1} = m, \text{ 则: } N_2 = mN_1, q = \frac{1-m}{l} N_1$$

根据 $\delta U = \delta V$,则有:

$$N_1 = \frac{5(m+1)}{4m^2 + 2m + 4} \times \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (7)$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{4m^2 + 2m + 4}{5m + 5}} \quad (8)$$

由于杆件较长,尽管杆件外径相同,但壁厚不同,图6为主杆件刚度等效示意图, $EI_1 \sim EI_3$ 为简化前主杆件各段的抗弯刚度。根据简化前后竖向变形 w 相等原则,可得在荷载 q_1 作用下主杆件等效抗弯刚度 EI_{eq} 。

通过几何非线性分析获得杆件临界轴力 P_{cr} , P_{cr} 与 N_1 关系式为:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eq}}{(\mu_1 \mu_2 l)^2} = \frac{N_1}{(\mu_2)^2} \quad (9)$$

则计算长度系数为:

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{N_1}{P_{cr}}} \quad (10)$$

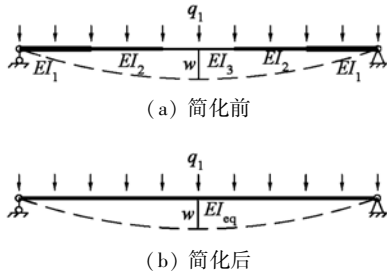


图6 主杆件刚度等效示意图
Fig. 6 Equivalent schematic diagram of major bar stiffness

3.2 基本计算长度的确定

由特征值屈曲分析得到由低阶到高阶排列的各阶模态,反映了结构各部位杆件稳定承载力由弱到强的排序。在1.35恒载+0.98活载的工况下,特征值屈曲分析的杆件失稳模态如图7所示,为清楚起见略去次杆件。从图7可知,支座G1斜杆、立面G4杆表现为沿杆件全长的单波失稳;立面上部的肩谷环梁G6杆、屋盖前端的内环梁G14杆均出现单波或双波失稳;总体上表现为以主杆件全长为基础的单波或双波失稳;各失稳模态反映了杆件在整体结构中的变形情况。

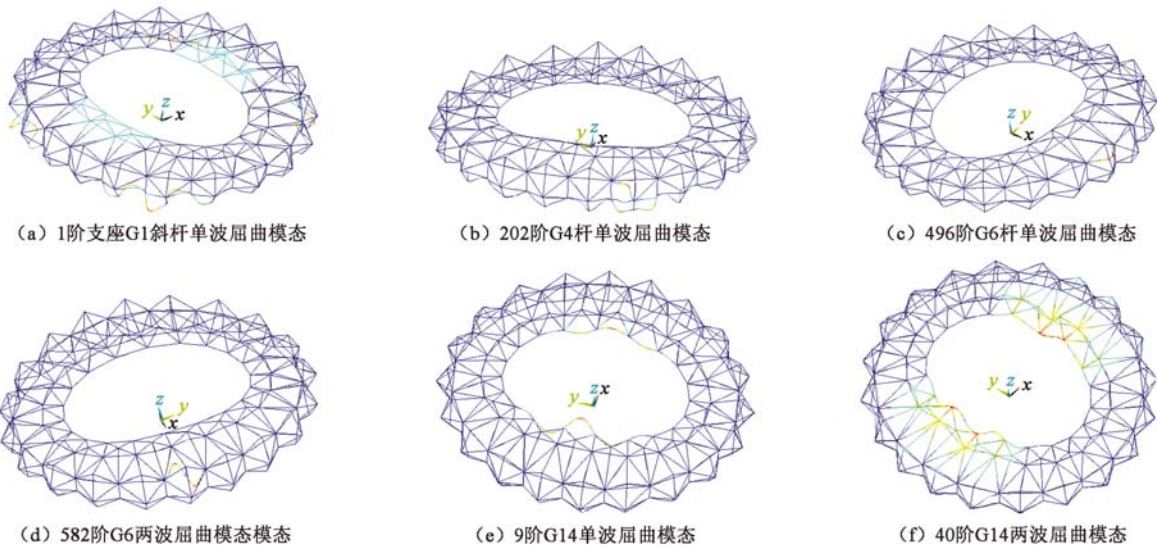


图7 主杆件屈曲模态
Fig. 7 Instability models of major bars

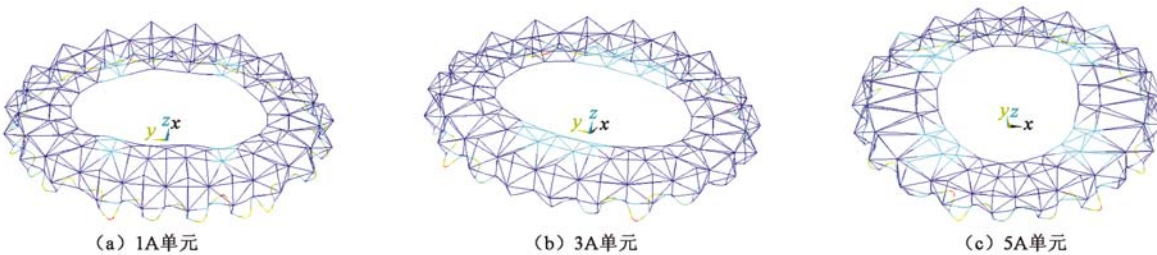


图8 不同单元的失稳模态
Fig. 8 Instable models of G1 bar in different units

3.3 求解过程

为保证工程安全可靠并考虑方便计算,计算1A~5A单元(图1)相同位置杆件的计算长度系数,取其最大值作为该组杆件的分析结果。

对1A~5A单元中的G1杆,在1.35恒载+0.98活载组合工况下,每根杆件分别进行仅考虑几何非线性整体稳定过程分析,初始模态为特征值屈曲分析时表现为该杆件失稳时的模态(图8),缺陷值取该杆件几何长度的1/5000~1/10000,仅起到变形诱导的作用。在整体结构失去承载能力的过程当中,监测杆件的轴力变化情况。图9给出了3A单元G1杆的屈曲状态,图10给出了杆端轴力-位移曲线。从图8和图9可以看出,杆件的屈曲状态与初始缺陷形状一致,没有发生形状跳跃。G1杆失稳时,G2杆和相邻的G1杆弯曲,降低了G1杆两端边界约束。

从图10可得到该杆件的临界轴力 P_{cr} ,按式(10)计算可得到该杆件的计算长度系数。类似可得到其它单元的G1杆的临界力及计算长度系数,具体见表1。从表中可知:不同单元同一组杆件具有相近计算长度系数,这是因为这20个单元形状相似,而且每一组杆件方位、边界约束、侧向约束都较为相近。

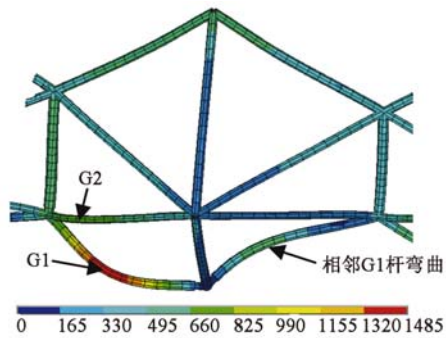


图9 3A单元G1杆屈曲(单位:mm)
Fig.9 Critical buckling of G1 in unit 3A

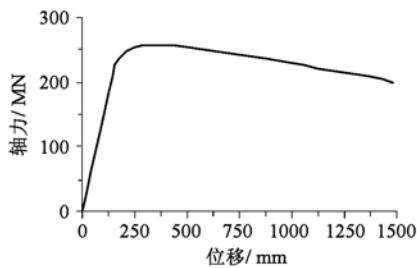


图10 3A单元G1杆轴力-位移曲线
Fig.10 Axial force-displacement curve of G1 in unit 3A

表1 G1杆计算长度系数

Table 1 Coefficiency of effective length of bars in G1

单元编号	杆件长度/ m	临界荷载/ kN	等效刚度 $EI_{eq}/kN \cdot m^2$	计算长度系数
1A	23.417	210190	9145004	0.90
2A	26.757	196963	9173111	0.81
3A	24.342	257764	9153940	0.79
4A	23.337	247775	8123666	0.78
5A	23.232	205169	8115814	0.86

3.4 计算结果分析

按上述方法对各组杆件进行计算长度系数求解,结果见表2。

表2 各组主杆件计算长度系数

Table 2 Coefficiency of effective length of major bar in all groups

杆件编号	计算长度系数	杆件编号	计算长度系数	杆件编号	计算长度系数
G1	0.90	G6	0.70	G11	0.90
G2	0.95	G7	1.00	G12	0.85
G3	1.00	G8	0.75	G13	1.15
G4	1.00	G9	1.00	G14	0.90
G5	1.00	G10	0.90	G15	0.70

从表2可知:G1杆由于是单向约束作用,呈现平面外失稳,计算长度系数0.90;G2~G5杆处于立面区域,与其相连的三角形面面夹角约150°左右,表现为平面外约束较弱;与G6杆相连的三角形面面夹角接近90°,其双向约束最好,计算长度系数最小;屋面

前端区域G9、G10、G11、G12、G14杆,由于内环边界约束作用,表现出较好的稳定性;G8、G15杆两端节点约束较强,对稳定有利;只有立面G13铅直杆由于侧移的影响,计算长度系数1.15略大于1.00,其余杆件计算长度系数小于或接近1.00。

3.5 计算结果验证

表3给出了不考虑地震作用时的荷载组合工况, γ_0 取1.1,风荷载均包括0°~90°的风向角,与风荷载相比,地震作用为非控制因素,略去与地震作用组合工况。依据表2结果进行整体结构1阶弹性分析即杆件稳定验算。计算结果表明^[9],主杆件最大应力比均小于0.85。

表3 不考虑地震作用时荷载组合工况

Table 3 Conditions of load combination in non-seismic design

工况	荷载组合
1	$\gamma_0 \times (1.35 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载})$
2	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \text{ 活载})$
3	$(1/\gamma_0) \times \text{恒载} + \gamma_0 \times 1.4 \text{ 风载}^*$
4	$\gamma_0 \times (1.35 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载} + 1.4 \times 0.6 \text{ 风载})$
5	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \text{ 活载} + 1.4 \times 0.6 \text{ 风载})$
6	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载} + 1.4 \text{ 风载})$
7	$\gamma_0 \times (1.35 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载}) + 1.2 \text{ 温度作用(升温 } 45^\circ\text{C)}$
8	$\gamma_0 \times (1.35 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载}) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
9	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \text{ 活载}) + 1.2 \text{ 温度作用(升温 } 45^\circ\text{C)}$
10	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \text{ 活载}) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
11	$((1/\gamma_0) \times \text{恒载} + \gamma_0 \times 1.4 \text{ 风载}^*) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
12	$\gamma_0 \times (1.35 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载} + 1.4 \times 0.6 \text{ 风载}) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
13	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \text{ 活载} + 1.4 \times 0.6 \text{ 风载}) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
14	$\gamma_0 \times (1.20 \text{ 恒载} + 1.4 \times 0.7 \text{ 活载} + 1.4 \text{ 风载}) + 1.2 \text{ 温度作用(降温 } 25^\circ\text{C)}$
15	$\gamma_0 \times 1.35 \text{ 恒载} + 1.2 \text{ 温度作用(升温 } 45^\circ\text{C)}$

注: *表示向上的风吸力,其他风载为向下的风压力。

在主体结构拆除胎架过程中,对主要杆件进行了应力监测。分别在距离端节点约1.5m杆端和杆件中部截面,沿圆周均匀布置4个应变花。在主、次杆件自重作用下,杆件应力见表4^[11]。表中最大应力为同一断面4个应变花中沿轴向应力绝对值的最大主应力;其平均值为轴向应力;“-”表示压应力、其余为拉应力。表4表明:实测最大应力、轴向应力符号与理论分析一致,传力路径明确;实测应力峰值较低,应力较大的G5、G6、G7、G14杆实测应力大于50MPa,与理论分析比较,误差在16%以内,其它杆件实测应力均小于50MPa;杆端应力受弯矩影响较大,中部应力受弯矩影响较小。

表 4 主体结构卸荷后 1A 单元主杆件应力

Table 4 Stress of major bars in unit 1A after unloading

杆件 编号	位置	最大应力/MPa			轴向应力/MPa		
		理论	实测	误差	理论	实测	误差
G1	端部	-45.6	-38.4	15.8%	-38.9	-21.2	45.5%
G3	中部	18.6	11.3	39.2%	7.8	4.2	46.2%
G5	中部	71.8	60.2	16.2%	61.2	55.3	9.6%
G6	端部	-66.1	-74.1	12.0%	-32.7	-33.4	2.1%
G7	中部	58.6	62.2	6.1%	54.0	53.6	0.7%
G8	端部	-46.8	-29.0	38.0%	-13.7	-9.3	32.1%
G14	端部	-49.6	-56.5	13.9%	-18.0	-22.5	25.0%
G16	端部	-32.7	-41.1	25.7%	-8.2	-10.5	28.0%

在 1.0 恒载 + 1.0 活载 + 1.0 风载(90°风向角)组合工况下,考虑初始缺陷、几何非线性、材料非线性的条件下,结构整体稳定安全系数接近 3,即使局部失稳,也不会发生连续倒塌^[12]。主体结构卸荷和整体稳定分析表明:理论与实测数据基本吻合,合理控制应力比,利用获得计算长度通过截面验算的结构安全可靠,且有一定的安全冗余度。

4 附加应力对杆件承载力影响

在《钢规》中,利用式(11)验算杆件稳定性。

$$\frac{P}{A} \leq \varphi f \quad (11)$$

其中,稳定系数 $\varphi \leq 1$ 。

式(11)可写成:

$$\frac{P}{A} + \Delta\sigma \leq f \quad (12)$$

其中, $\Delta\sigma$ 为附加稳定应力,考虑残余应力、初始弯曲和荷载的初始偏心、几何非线性及材料塑性的影响。

表 5 给出了部分杆件的控制应力比,表中组合应力包含了附加稳定应力。分析表明:与仅考虑强度的应力相比较,附加稳定应力增幅平均 19.4%,附加稳定应力均值 34MPa。因此建议荷载增大系数取 1.1 ~ 1.3。并进行附加稳定应力的复核,附加稳定应力最小值取 20MPa,最大值取 70MPa,可控制杆件稳定。

表 5 部分杆件的控制应力比

Table 5 Stress ratio of bars

杆件编号	强度应力比	组合应力比	增幅	$\Delta\sigma$ /MPa
G1	0.638	0.798	25.1%	48
G2	0.651	0.689	5.8%	11
G4	0.495	0.715	44.4%	66
G6	0.628	0.756	20.4%	38
G9	0.591	0.705	19.3%	34
G10	0.579	0.658	13.6%	24
G13	0.736	0.788	7.1%	16

5 结论

(1)利用几何非线性分析临界状态变形,分析杆件轴力变化,得到真实的临界承载力。

(2)体育场钢屋盖主杆件中,立面铅直杆件受水平位移的影响,计算长度系数略大于 1.00,其余均小于或接近 1.00。处于面面交线的主杆件稳定性,受三角形折面夹角和两端节点刚度影响较大,夹角接近 90°的主杆件稳定性较好。

(3)体育场钢屋盖主杆件稳定附加应力取最小值 20MPa、最大值 70MPa,可控制杆件稳定。

参 考 文 献

- [1] 钟善桐. 钢结构稳定设计[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,1991. (ZHONG Shantong. Design of stability of steel structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,1991. (in Chinese))
- [2] 童根树. 钢结构设计方法[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,2007. (TONG Genshu. Methods of steel structure design[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007. (in Chinese))
- [3] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2001. (CHEN Shaofan. Principles of steel structure design[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 张耀春. 钢结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社,2004. (ZHANG Yaochun. Principles of steel structure design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))
- [5] 张耀春,刘玉妹,张福海. 三角形空间格构式刚架平面外稳定的实用算法[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2002,35(3):5-8. (ZHANG Yaochun, LIU Yushu, ZHANG Fuhai. Practical checking computation for out-plane stability of spatial latticed frame with triangular section [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 2002,35(3):5-8. (in Chinese))
- [6] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003. (Wang Xucheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [7] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [8] 郑竹,尧国皇,黄用军. 屈曲分析确定跨层柱计算长度方法的应用[J]. 四川建筑,2009,29(2):152-154. (ZHENG Zhu, YAO Guohuang, HUANG Yongjun. The use of instability analysis in defining effective length of column crossing over floors [J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(2):152-154. (in Chinese))

- Chinese))
- [9] 刘琼祥,张建军,郭满良,等. 深圳大运中心体育场钢屋盖设计难点与分析[J]. 建筑结构学报,2011, 32(5):39-47. (LIU Qiongxiang,ZHANG Jianjun, GUO Manliang, et al. Analysis and design challenge of steel roof of the Shenzhen Universiade Sports Centre [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (5): 39-47. (in Chinese))
- [10] 张如三. 弹性力学[M]. 北京:中国宇航出版社, 1992. (ZHANG Rusan. Elasticity mechanics [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [11] 北京市建筑工程研究院. 深圳大运中心主体育场卸载过程监测报告[R]. 北京:北京市建筑工程研究院,2010. (Beijing Building Construction Research Institute. Monitoring report of the unloading test of Main Stadium of Shenzhen Universiade Sports Center [R]. Beijing: Beijing Building Construction Research Institute,2010. (in Chinese))
- [12] 张建军,刘琼祥,刘臣,等. 深圳大运中心体育场钢屋盖整体稳定性能研究[J]. 建筑结构学报,2011, 32(5):56-62. (ZHANG Jianjun, LIU Qiongxiang, LIU Chen, et al. Research on overall stability of the Shenzhen Universiade Sports Centre [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (5): 56-62. (in Chinese))