

文章编号:1673-2049(2016)06-0113-07

曲杆单元铰接单层网壳弹塑性后屈曲分析

刘树堂,朱文正

(广州大学 土木工程学院,广东 广州 510006)

摘要:基于曲杆单元应力-弦长关系和矩阵微分理论,推导出曲杆单元在弹性与弹塑性状态下的切线刚度矩阵精确公式。研究构件取理想弹塑性材料,结构支座取固定铰支座和可动铰支座 2 种约束情况,考虑构件具有初弯曲,采用曲杆单元切线刚度矩阵和广义位移控制法,取结构自重为参考荷载,对节点铰接的 K8 大跨单层网壳结构进行弹塑性后屈曲分析。结果表明:曲杆单元切线刚度矩阵公式精确性很高,可有效用于大型铰接单层网壳弹塑性后屈曲分析。

关键词:曲杆单元;切线刚度矩阵;单层网壳;后屈曲分析;弹塑性屈曲;广义位移控制法

中图分类号:TU393.3

文献标志码:A

Elastic-plastic Post-buckling Analysis on Articulated Single-layer Reticulated Shells with Curved Lever Unit

LIU Shu-tang, ZHU Wen-zheng

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The accurate tangent stiffness matrix formula of curved lever unit at elastic and elastic-plastic states was derived based on stress-chord length relation and matrix differential theory. The research component was ideal elastic plastic material. The structure support included 2 kinds of constraint conditions of the fixed hinge support and the movable hinge support. The initial bending of the component was considered, the tangent stiffness matrix of curved lever unit and the generalized displacement control method were adopted, and the structure weight was taken as the reference load. The elastic and plastic post-buckling analysis of K8 large-span single layer reticulated shell structures was carried out. The results show that the tangent stiffness matrix of curved lever unit is accurate, and can be used to the elastic-plastic post-buckling analysis of large hinged single layer reticulated shells.

Key words: curved lever unit; tangent stiffness matrix; single-layer reticulated shell; post-buckling analysis; elastic-plastic buckling; generalized displacement control method

0 引言

单层网壳结构力学性能好、重量轻、造型优美,在大型体育场馆屋盖结构中得到广泛应用。从 20 世纪 60 年代以来,关于单层网壳结构稳定性及极限荷载的研究一直备受关注,已开展了大量理论与试

验研究。单层网壳结构矢跨比较小,构件长细比较大,在垂直荷载作用下结构几何非线性特别显著,往往在构件还没有屈服时结构就发生失稳破坏。目前在单层网壳结构极限荷载分析中,构件力学特性常用直杆单元来模拟,因为直杆单元的应力-应变关系简单,易于完成结构极限荷载分析。然而,实际构件

收稿日期:2016-05-14

基金项目:广州市科技计划项目(201604020071)

作者简介:刘树堂(1959-),男,辽宁锦州人,教授,工学硕士,E-mail:lquuth@163.com。

并非直杆,其在轧制、加工制作、运输和安装等机械作用过程中已产生微小初弯曲,基于直杆单元的结构极限荷载分析忽略了构件初弯曲对极限荷载降低的影响。研究表明,构件初弯曲虽小,但对构件的受压刚度及极限压应力影响较大,特别是对于长细比较大的构件。

为了考虑构件弯曲效应对结构稳定性及极限荷载的影响,研究者们对于构件弯曲效应提出了各种应力-应变本构关系模型。Yang 等^[1]基于矩形截面构件,假设构件两端铰接和构件受压时的轴线方程为正弦半波函数,根据构件中点截面轴向应力及应变与横向挠度的关系得到了矩形截面构件受压弯曲时轴向应力-变形关系,并基于构件纯弯受力状态,建立了构件卸压再拉状态的轴向应力-变形关系。Liew 等^[2]基于曲杆轴线为正弦半波函数,建立了弹性状态曲杆轴向变形 Δ 与杆中点挠度 δ 的关系,得到了弹性状态曲杆轴压力 P 与 Δ 的关系式。在塑性受压状态,假设曲杆中点突然弯折而形成塑性铰,得到塑性状态曲杆轴压力 P 与 Δ 的关系式。Hill 等^[3]基于应力-应变关系的经验方程提出了曲杆单元经验本构关系,弹性状态为斜直线,弹塑性状态为水平线,屈曲后状态为曲线,该模型可用于结构后屈曲分析,通过调整参数可考虑各种长细比构件的弯曲效应。Chan 等^[4]假设构件轴线初弯曲形状为正弦半波函数,由截面力矩平衡微分方程推导出了梁-柱单元杆端力-杆端位移本构关系模型,按照结构总势能函数二阶变分导出了初弯曲梁-柱单元的切线刚度矩阵。李国强等^[5]对于梁单元假设轴线为正弦半波函数,并考虑轴力、剪切变形、初弯曲和弓形效应的影响,建立了梁单元应力-应变本构关系。吴香国等^[6]基于对 Shanley 模型的改进,推导了不完善轴心受压构件轴压力-中点挠度的函数关系。范峰等^[7-8]基于多段梁法模拟曲杆单元,通过一致缺陷模态法引入构件初弯曲,采用 ANSYS 软件研究网壳结构的弹塑性与稳定性。周臻等^[9]假设曲杆轴线为正弦半波函数和基于杆件截面力矩平衡微分方程,建立了曲杆单元轴向应力-应变本构关系,并采用轴力对轴向位移的导数建立了曲杆单元的切线刚度矩阵。同时对于梁单元考虑弯矩扭矩一阶效应、轴力二阶效应及梁单元大变形小应变,忽略剪切变形和翘曲影响,建立了梁单元杆端力-杆端位移本构关系,并通过矩阵微分方法建立了梁单元切线刚度矩阵。刘树堂等^[10]基于曲杆轴线为正弦半波函数和零态弧长不变原理,得到了曲杆中点挠度-弦长关

系,根据曲杆中点截面力矩平衡微分方程和塑性铰方程,建立了曲杆弹性受压、弹塑性受压、塑性铰受压、受压卸载、弹性受拉、塑性铰受拉及受拉卸载等受力状态的应力-弦长本构关系。

在结构弹塑性屈曲分析中,荷载-位移平衡路径需要由单元切线刚度矩阵来预测,单元切线刚度矩阵的精确与否对于有效完成结构弹塑性屈曲分析起着关键性作用,特别是对于非线性很强的结构系统^[11]。目前,建立单元切线刚度矩阵的方法主要有势能变分法和矩阵微分法,势能变分法应用较多^[12-13],矩阵微分法应用较少。尽管势能变分法应用较多,但却存在着明显不足,采用势能变分法建立单元切线刚度矩阵需要略去式中一些高阶项,导致切线刚度矩阵精确度降低,以至于不能完成强非线性的屈曲后阶段预测。然而,采用矩阵微分法建立单元切线刚度矩阵无需忽略任何高阶项,所得到的单元切线刚度矩阵公式即是精确的,它能够有效完成强非线性的屈曲后阶段预测任务^[14-15]。对于直杆单元,基于矩阵微分法已成功建立了单元切线刚度矩阵公式^[14],并应用于直杆单元结构弹塑性后屈曲分析。对于曲杆单元,其单元切线刚度矩阵建立方法还未见报道。

为了有效完成曲杆单元铰接单层网壳弹塑性后屈曲分析,本文基于文献[10]曲杆单元应力-应变本构关系模型,采用矩阵微分法建立曲杆单元各种受力状态下的单元切线刚度矩阵。利用本文曲杆单元切线刚度矩阵,基于广义位移控制法(GDC)^[11],对跨度为 64.866 m 的 K8 铰接单层网壳结构进行弹塑性后屈曲分析。

1 曲杆单元受力阶段及其应力-应变曲线

当曲杆经历受压→卸压→受拉→卸拉受力过程时,曲杆平均应力-弦线应变曲线如图 1 所示,其中,OA 为弹性受压阶段,AB 为弹塑性受压阶段,BC 为塑性铰受压阶段,CD 为卸压再拉阶段,DE 为塑性铰受拉阶段,EF 为屈服受拉阶段,FG 为卸拉阶段。对于曲杆单元,当曲杆经历受拉→卸拉→受压→卸压受力过程时,曲杆平均应力-弦线应变曲线如图 2 所示,其中,op 为弹性受拉阶段,pq 为塑性铰受拉阶段,qr 为屈服受拉阶段,rs 为卸拉再压阶段,st 为弹塑性受压阶段,tu 为塑性铰受压阶段,uv 为卸压阶段。

在弹性受拉和弹性受压阶段,曲杆材料处于弹

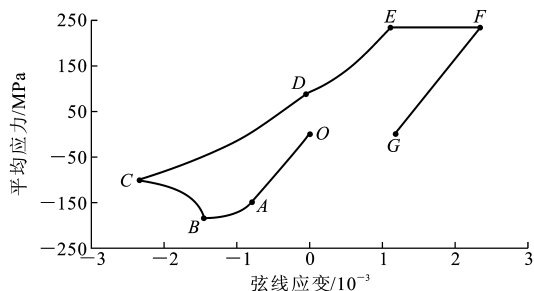


图 1 曲杆平均应力-弦线应变曲线(从受压开始加载)

Fig. 1 Average Stress-chord Strain Curve for Curved Lever (Loading from Compression)

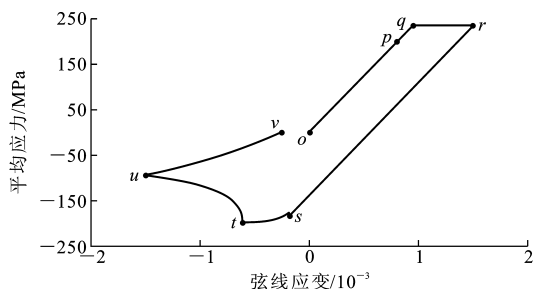


图 2 曲杆平均应力-弦线应变曲线(从受拉开始加载)

Fig. 2 Average Stress-chord Strain Curve for Curved Lever (Loading from Tension)

性状态,该阶段的极限状态为曲杆中点截面较大受拉边缘或较大受压边缘达到屈服应力。在塑性铰受拉、塑性铰受压阶段,曲杆中点截面形成了塑性铰,该截面弯矩始终等于塑性铰弯矩。卸压再拉阶段是指曲杆从弹塑性受压或塑性铰受压状态卸载到零态,再从零态受拉达到曲杆中点截面较大受拉边缘屈服的受力阶段。卸拉再压阶段是指曲杆从塑性铰受拉或屈服受拉状态卸载到零态,再从零态受压达到曲杆中点截面较大受压边缘屈服的受力阶段。在卸压再拉和卸拉再压阶段,曲杆材料处于弹性状态。曲杆经历弹塑性受压阶段、塑性铰受拉、受压阶段时,曲杆零态弦长 l_0 和中点挠度 δ_0 均发生很大改变,但零态弧长 s_0 不变。在屈服受拉阶段,曲杆应力始终等于材料屈服应力,但其零态弧长 s_0 产生塑性伸长。

2 曲杆单元应力-弦长关系式

曲杆单元在各受力阶段的应力-弦长关系式推导过程详见文献[10]。为分析过程的完备性,下面给出曲杆单元应力-弦长关系式。

2.1 弹性受拉和弹性受压阶段的曲杆单元应力-弦长关系式

在弹性受拉和弹性受压阶段,曲杆单元应力-弦

长关系式为

$$\left. \begin{aligned} &\sigma^3 + (2f_E - E + \frac{Es_0}{l})\sigma^2 + (f_E^2 - 2Ef_E + \frac{2Es_0f_E}{l})\sigma + Ef_E^2(\frac{s_0}{l} - 1 - \frac{\delta_0^2}{\alpha} \frac{1}{l^2}) = 0 \\ &f_E = \pi^2 EI / (l_0^2 A) \\ &\alpha = 4 / \pi^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为曲杆轴向平均应力(拉为正,压为负); l 为曲杆受力状态下的弦长; E 为弹性模量; A, I 分别为单元截面面积和惯性矩。

2.2 弹塑性受压阶段的曲杆单元应力-弦长关系式

在弹塑性受压阶段,曲杆单元压应力-弦长关系式为

$$\left. \begin{aligned} &\sigma^3 + (E - 2\beta - \frac{Es_0}{l} + \frac{E\delta_0^2}{\alpha l^2})\sigma^2 + (\beta^2 - 2E\beta + \frac{2Es_0\beta}{l} - \frac{2Ef_y\delta_0^2}{\alpha l^2})\sigma + E\beta^2 - \frac{Es_0\beta^2}{l} + \frac{Ef_y^2\delta_0^2}{\alpha l^2} = 0 \\ &\beta = f_y - \frac{\sigma_A(f_y - \sigma_A)}{\pi^2 EI / (Al_0^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: f_y 为单元屈服应力; σ_A 为弹性受压极限状态下的压应力。

2.3 塑性铰受拉和塑性铰受压阶段的曲杆单元应力-弦长关系式

在塑性铰受拉和塑性铰受压阶段,曲杆单元应力-弦长关系式为

$$\sigma^3 + E(\frac{s_0}{l} - 1)\sigma^2 - \frac{E}{\alpha l^2}(\frac{M}{A})^2 = 0 \quad (3)$$

式中: M 为塑性铰受拉或受压状态下曲杆中点截面的塑性铰弯矩。

2.4 屈服受拉阶段的曲杆单元应力-弦长关系式

在屈服受拉阶段,当曲杆轴向拉应力达到材料屈服应力 f_y 后保持不变,但应变继续增加,曲杆零态弧长产生塑性伸长。此阶段曲杆单元拉应力-弦长关系式为

$$\sigma = f_y \quad (4)$$

2.5 卸压再拉和卸拉再压阶段的曲杆单元应力-弦长关系式

在卸压再拉阶段或卸拉再压阶段,材料为弹性,曲杆单元应力-弦长关系遵循式(1),但式(1)中曲杆零态参数 δ_0 与 l_0 应采用卸压再拉阶段或卸拉再压阶段的相应值,因为在此前阶段曲杆发生弯曲塑性变形导致零态参数 δ_0 与 l_0 发生变化,但在进入卸压再拉阶段或卸拉再压阶段之后,曲杆零态弧长 s_0 没有变化。卸压再拉阶段或卸拉再压阶段的零态参数 δ_0 与 l_0 确定方法如下:设在卸压或卸拉的开始点曲

杆的应力与弦长分别为 σ_c 与 l_c (二者为已知), 将 σ_c 和 l_c 代入弹性受拉与受压阶段的应力-弦长关系式(1)中, 整理后得到以 δ_0 与 l_0 为未知量的方程式 $f(\delta_0, l_0) = 0$; 通过对正弦半波函数积分可求得曲杆零态弧长公式为 $l_0 + \alpha \delta_0^2 / l_0 = s_0$; 联立求解这 2 个方程即可求出该卸载阶段的零态参数 δ_0 与 l_0 。

3 曲杆单元切线刚度矩阵

曲杆单元在不同受力阶段的应力-应变关系为式(1)~(4), 其单元切线刚度矩阵则应基于这些关系式来导出。对于直杆单元, 文献[14]基于矩阵微分法建立了单元切线刚度矩阵。与直杆单元不同, 曲杆单元的应力-应变关系不能写出应力-位移的简单关系式, 需要利用矩阵微分复合求导运算法则。

3.1 曲杆杆端力对杆端位移的导数

结构受力前后杆端位移如图 3 所示, 曲杆单元杆端产生的微小位移 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)^T$ 。图 3 中, 虚线为单元产生位移前的弦线位置, 实线为单元产生位移后的弦线位置, $F_1 \sim F_6$ 为杆端力。

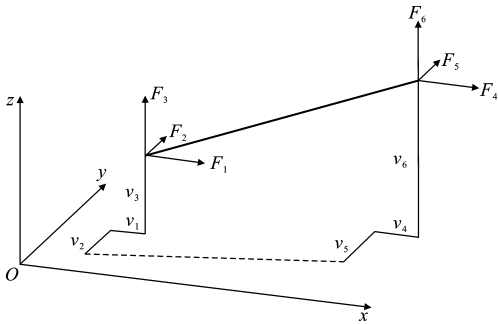


图 3 结构受力前后杆端位移

Fig. 3 Displacements of Rod End Before and After Structure Stress

设曲杆单元在产生杆端位移 \mathbf{v} 之前其弦线方向向量为 l_0 , 在产生杆端位移 \mathbf{v} 后, 其弦线方向向量 $l(\mathbf{v})$ 可写为

$$l(\mathbf{v}) = l_0 + [-I \quad I] \mathbf{v} \quad (5)$$

式中: I 为 3 阶单位矩阵。

曲杆单元产生杆端位移 \mathbf{v} 后, 其弦线长度 $l(\mathbf{v})$ 可由方向向量 $l(\mathbf{v})$ 的点积求出, 即

$$l(\mathbf{v}) = \sqrt{l(\mathbf{v})^T l(\mathbf{v})} \quad (6)$$

设在当前荷载增量步上曲杆单元的轴向应力为 $\sigma(\mathbf{v})$, 则曲杆单元在结构坐标系下的杆端力向量 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 为

$$\mathbf{F}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -l(\mathbf{v}) \\ l(\mathbf{v}) \end{bmatrix} \frac{A\sigma(\mathbf{v})}{l(\mathbf{v})} \quad (7)$$

按照矩阵微分原理, 由式(7)求杆端力向量 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 关于杆端位移向量 \mathbf{v} 的导数, 即

$$\frac{d\mathbf{F}(\mathbf{v})}{d\mathbf{v}} = A \frac{d}{d\mathbf{v}} \begin{bmatrix} -l(\mathbf{v}) \\ l(\mathbf{v}) \end{bmatrix} \frac{\sigma(\mathbf{v})}{l(\mathbf{v})} + A \begin{bmatrix} -l(\mathbf{v}) \\ l(\mathbf{v}) \end{bmatrix} \cdot \left[\sigma(\mathbf{v}) \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l(\mathbf{v})} \right) + \frac{1}{l(\mathbf{v})} \frac{d\sigma(\mathbf{v})}{d\mathbf{v}} \right] \quad (8)$$

与直杆单元不同, 曲杆单元的应力-应变关系是由多段应力-弦长非线性方程构成, 应力 $\sigma(\mathbf{v})$ 与杆端位移 \mathbf{v} 的关系不是显函数, 因此需要根据 $\sigma(\mathbf{v})$ 具体关系式通过矩阵微分复合求导法则求出 $\frac{d\sigma(\mathbf{v})}{d\mathbf{v}}$ 。

3.2 曲杆应力对杆端位移的导数

在弹性受拉与弹性受压阶段, 曲杆单元应力-弦长关系式相同[式(1)], σ 与 l 为 \mathbf{v} 的函数, 即 $\sigma = \sigma(\mathbf{v})$, $l = l(\mathbf{v})$ 。由式(1)求 σ 关于 \mathbf{v} 的导数, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\mathbf{v}} &= \frac{1}{B} \left[-E s_0 (\sigma + f_E)^2 \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{f_E^2 E \delta_0^2}{\alpha} \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l^2} \right) \right] \\ B &= (\sigma + f_E) [3\sigma + f_E - 2E(1 - \frac{s_0}{l})] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在弹塑性受压阶段, 曲杆应力-弦长关系式为式(2), σ 与 l 为 \mathbf{v} 的函数, 即 $\sigma = \sigma(\mathbf{v})$, $l = l(\mathbf{v})$ 。由式(2)求 σ 关于 \mathbf{v} 的导数, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\mathbf{v}} &= \frac{1}{B} \left[E s_0 (\sigma - \beta)^2 \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l} \right) - \right. \\ &\quad \left. \frac{E \delta_0^2 (\sigma - f_y)^2}{\alpha} \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l^2} \right) \right] \\ B &= (2E + 3\sigma - \beta - \frac{2E s_0}{l})(\sigma - \beta) + \\ &\quad \frac{2E(\sigma - f_y) \delta_0^2}{\alpha l^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在塑性铰受拉与塑性铰受压阶段, 曲杆单元应力-弦长关系式相同[式(3)], σ 与 l 为 \mathbf{v} 的函数, 即 $\sigma = \sigma(\mathbf{v})$, $l = l(\mathbf{v})$ 。同理, 由式(3)求 σ 关于 \mathbf{v} 的导数, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\mathbf{v}} &= \frac{1}{B} \left[-\sigma^2 E s_0 \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l} \right) + \frac{E}{\alpha} \left(\frac{M}{A} \right)^2 \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l^2} \right) \right] \\ B &= 3\sigma^2 + 2\sigma E \left(\frac{s_0}{l} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在屈服受拉阶段, 曲杆单元应力-弦长关系式为式(4)。由式(4)求 σ 关于 \mathbf{v} 的导数, 即

$$\frac{d\sigma}{d\mathbf{v}} = 0 \quad (12)$$

在卸压再拉和卸拉再压阶段, 材料为弹性状态, 曲杆单元应力-弦长关系式遵循式(1), 故单元应力对杆端位移的导数表达式与式(9)相同。

3.3 其他项对杆端位移的导数

在式(8)~(11)中,涉及到与曲杆方向向量及长度相关项对杆端位移的求导。这些项求导结果如下

$$\frac{d}{d\mathbf{v}} \begin{bmatrix} -\mathbf{l}(\mathbf{v}) \\ \mathbf{l}(\mathbf{v}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l(\mathbf{v})} \right) = \frac{-1}{l^3(\mathbf{v})} \mathbf{l}(\mathbf{v})^T [-\mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \quad (14)$$

$$\frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l^2(\mathbf{v})} \right) = \frac{-2}{l^4(\mathbf{v})} \mathbf{l}(\mathbf{v})^T [-\mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \quad (15)$$

3.4 曲杆单元切线刚度矩阵

在各项求导结果中包含曲杆的方向向量 $\mathbf{l}(\mathbf{v})$ 、弦长 $l(\mathbf{v})$ 和应力 $\sigma(\mathbf{v})$, 它们是曲杆杆端产生位移 \mathbf{v} 后的方向向量、弦长和应力。令 $\mathbf{v}=\mathbf{0}$, 这些量将成为杆端产生位移前的相应值, 即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{l}(\mathbf{v}) &= \mathbf{l}_0 \\ l(\mathbf{v}) &= L_0 \\ \sigma(\mathbf{v}) &= \sigma_0 \\ \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l(\mathbf{v})} \right) &= \frac{-1}{L_0^3} \mathbf{l}_0^T [-\mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \\ \frac{d}{d\mathbf{v}} \left(\frac{1}{l^2(\mathbf{v})} \right) &= \frac{-2}{L_0^4} \mathbf{l}_0^T [-\mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: L_0 为在荷载增量步开始点处曲杆的弦长。

将式(16)代入式(9)~(15), 然后再代入式(8), 则可得到曲杆单元各受力阶段的单元切线刚度矩阵。

4 算例分析

本文算例为一 K8 单层网壳结构, 如图 4 所示, 图 4(a)中数字为节点编号, 跨度为 64.866 m, 矢高为 9.916 m, 节点数为 169, 单元数为 456。结构相邻环向构件水平投影间距相等。构件为无缝热轧钢管, 钢材为 Q345, 弹性模量为 2.06×10^8 MPa。构件截面规格按实际荷载工况通过结构尺寸优化设计确定。1~6 环(从中心向外编号)的径向构件为 $\phi 245 \times 7$, 1~5 环的环向构件为 $\phi 180 \times 6$, 第 6 环(最外环)环向构件为 $\phi 282 \times 7.5$ 。构件最大和最小长细比分别为 87.836 和 43.679。网壳曲面受均布垂直荷载作用, 分布荷载幅值取 1 350 Pa。考虑杆件连接点为铰节点, 网壳周边支座节点分别为固定铰支座和可动铰支座 2 种情况, 网壳构件具有初弯曲。采用本文曲杆单元切线刚度矩阵, 基于广义位移控制法(GDC)^[11], 对该 K8 单层网壳进行弹塑性后屈曲分析。

结构支座为固定铰支座时, 对构件初弯曲为 1/1 000~1/100 各种情况进行分析, 绘制出荷载因

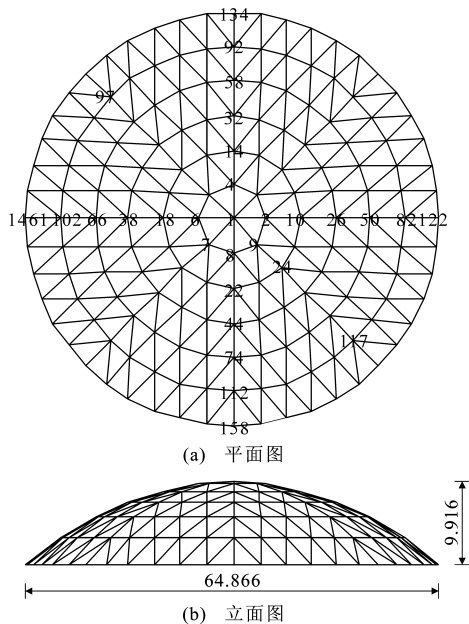


图 4 K8 单层网壳(单位:m)

Fig. 4 K8 Single-layer Shell (Unit:m)

子-节点垂直位移曲线, 如图 5 所示。为了进行对比, 将直杆情况(无初弯曲)下的荷载因子-节点垂直位移曲线也绘于图 5 中。由图 5 可以看出, 构件初弯曲越大, 结构极限荷载越小, 结构达到极限荷载时节点(97 号)垂直位移约为 100 mm。

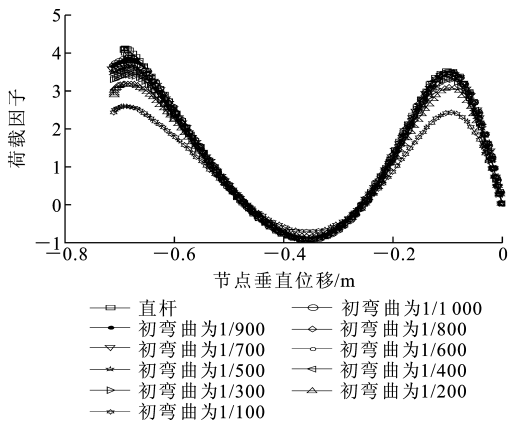


图 5 荷载因子-节点垂直位移曲线(支座为固定铰)

Fig. 5 Load Factor-node Vertical Displacement Curves (Fixed Hinge Support)

结构支座为可动铰支座时, 对构件初弯曲为 1/1 000~1/100 各种情况进行分析, 绘制出荷载因子-节点垂直位移曲线, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 构件初弯曲越大, 结构极限荷载越低, 结构达到极限荷载时节点(97 号)垂直位移约为 170 mm。

由图 5, 6 还可以看出, 荷载-位移平衡路径具有很长后屈曲段。这说明本文曲杆单元切线刚度矩阵具有较高精度, 这对于有效完成大型铰接单层网壳

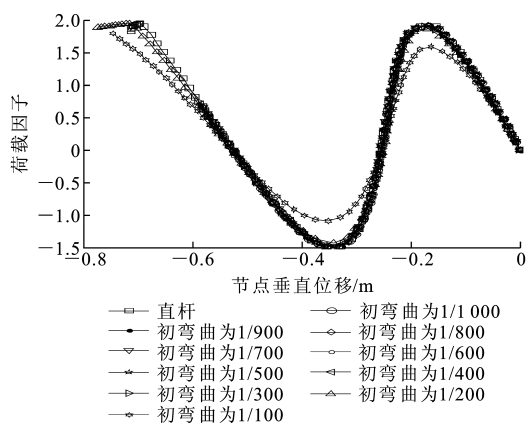


图6 荷载因子-节点垂直位移曲线(支座为可动铰)

Fig. 6 Load Factor-node Vertical Displacement Curves (Movable Hinge Support)

弹塑性后屈曲分析具有重要意义。

为了考察构件初弯曲对结构极限荷载的影响程度,绘制出结构极限荷载因子-构件初弯曲曲线,如图7所示。由图7可以看出,当结构支座为可动铰支座时,结构极限荷载显著降低,比固定铰支座情况降低约46%。这说明结构支座刚度变化对单层网壳结构极限荷载的影响比较大。为提高单层网壳结构极限荷载,可从两方面采取措施:①提高单层网壳结构的支座刚度和下部支承结构的水平刚度;②提高最外环环向构件的抗拉刚度。

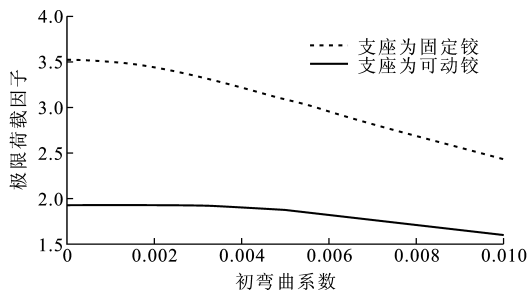


图7 极限荷载因子-初弯曲系数曲线

Fig. 7 Ultimate Load Factor-initial Bending Coefficient Curves

由图7还可以看出:构件初弯曲越大,结构极限荷载越低;构件初弯曲对固定铰支座结构极限荷载影响较大,对可动铰支座结构极限荷载影响较小。

本文算例分析耗时为207 s,说明本文方法求解速度比较快。

5 结语

(1)基于矩阵微分法建立曲杆单元切线刚度矩阵无需忽略任何高阶项,本文曲杆单元切线刚度矩阵公式是精确的。

(2)铰接单层网壳构件初弯曲越大,结构极限荷载越小。

(3)支座刚度对铰接单层网壳结构极限荷载影响很大。构件初弯曲对固定铰支座结构极限荷载影响较大,对可动铰支座结构极限荷载影响较小。

(4)本文曲杆单元切线刚度矩阵可有效完成大型铰接单层网壳弹塑性后屈曲分析。

参考文献:

References:

- [1] YANG Y B, YANG C T, CHANG T P, et al. Effects of Member Buckling and Yielding on Ultimate Strengths of Space Trusses[J]. Engineering Structures, 1997, 19(2): 179-191.
- [2] LIEW J Y R, PUNNIYAKOTTY N M, SHANMUGAM N E. Advanced Analysis and Design of Spatial Structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 42(1): 21-48.
- [3] HILL C D, BLANDFORD G E, WANG S T. Post-buckling Analysis of Steel Space Trusses[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 117(4): 3829-3830.
- [4] CHAN S L, GU J X. Exact Tangent Stiffness for Imperfect Beam-column Members[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(9): 1094-1102.
- [5] 李国强, 刘玉姝. 一种考虑初始缺陷影响的非线性梁单元[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 69-72.
LI Guo-qiang, LIU Yu-shu. A Nonlinear Beam Element Considering Initial Imperfection[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(1): 69-72.
- [6] 吴香国, 安伟光, 李宏亮. 具有初弯曲的轴心受压构件弹塑性屈曲荷载研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(6): 821-824.
WU Xiang-guo, AN Wei-guang, LI Hong-liang. The Solution to Elastic-plastic Buckling Load of Central Compression Strut with Initial Bending Imperfection[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(6): 821-824.
- [7] 范峰, 严佳川, 曹正罡. 考虑杆件初弯曲的单层球面网壳稳定性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(增2): 158-164.
FAN Feng, YAN Jia-chuan, CAO Zheng-gang. Stability of Single-layer Reticulated Domes with Initial Imperfection to Members[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(S2): 158-164.
- [8] 严佳川, 范峰, 曹正罡. 杆件初弯曲对网壳结构弹塑性稳定性能影响研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33

- (12):63-71.
- YAN Jia-chuan, FAN Feng, CAO Zheng-gang. Research on Influence of Initial Curvature of Members on Elasto-plastic Stability of Reticulated Shells[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12):63-71.
- [9] 周 臻, 吴 京, 孟少平. 基于初弯曲单元的某弦支穹顶非线性稳定承载力分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(4):721-726.
- ZHOU Zhen, WU Jing, MENG Shao-ping. Nonlinear Stability Bearing Capacity Analysis for a Suspended Dome Based on the Initial Curvature Elements[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(4):721-726.
- [10] 刘树堂, 陈 原, 朱文正. 端部铰接初弯曲构件弹塑性本构关系研究[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(2):6-12.
- LIU Shu-tang, CHEN Yuan, ZHU Wen-zheng. Study on the Elasto-plastic Constitutive Relationship of End-pinned Initially Curved Members[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(2):6-12.
- [11] YANG Y B, LIN S P, LEU L J. Solution Strategy and Rigid Element for Nonlinear Analysis of Elastically Structures Based on Updated Lagrangian Formulation[J]. Engineering Structures, 2007, 29(6):1189-1200.
- [12] 王天英, 邓长根. 结构切线刚度矩阵与割线刚度矩阵之间的关系[J]. 强度与环境, 2008, 35(2):31-35.
- WANG Tian-ying, DENG Chang-gen. General Relationship Between Structural Secant and Tangent Stiffness Matrices[J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(2):31-35.
- [13] 陈常松, 陈政清, 颜东煌. 势能增量驻值原理与切线刚度矩阵的解构规则[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2005, 36(5):892-898.
- CHEN Chang-song, CHEN Zheng-qing, YAN Dong-huang. Principle of Stationary Incremental Potential Energy and Formation Rules of Tangent Stiffness Matrix[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(5):892-898.
- [14] 刘树堂. 等直杆单元切线刚度矩阵的精确分析方法[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1):48-53.
- LIU Shu-tang. Accurate Analysis Method on the Tangential Stiffness Matrix of Pinned Straight Rod Element[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(1):48-53.
- [15] 刘树堂. 空间梁单元切线刚度矩阵的精确分析方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4):135-142.
- LIU Shu-tang. Accurate Analysis Method on Tangent Stiffness Matrix for Space Beam Element[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4):135-142.

《空间结构》2017 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊, 1994 年创刊, 面向国内外公开发刊, 目前是《中文核心期刊要目总览》核心期刊, 中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊。《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报道及有特色的空间结构工程照片等方面的内容。读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为季刊, 大 16 开本, 96 页, 每期定价 15 元, 全年共 60 元; 兼营广告, 10 月起征订下一年度广告。《空间结构》自办发行, 请直接汇款至本编辑部订阅, 发行组收到汇款后即寄发票并按期寄给订户。订购款按以下方式汇寄:

银行汇款:

账 户: 浙江大学《空间结构》杂志编辑部

开户行: 工商银行杭州市浙大分理处

账 号: 1202024619914482876

(务请在汇款用途栏内注明订购《空间结构》份数及年限)

邮局汇款:

地 址: 杭州玉泉浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部

邮 编: 310027

(务请在附言栏内注明订购《空间结构》份数及年限)

电 话: (0571)87952414(带传真)

E-mail: kjjgzz@163.com