

# 钢管井架稳定性能与承载力的有限元分析

陆国忠<sup>1,2</sup> 焦群英<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学理学院, 北京 100083; 2. 北京京西北房地产开发有限公司, 北京 100083)

**摘要** 对钢管井架的稳定性能和承载力进行有限元分析。建立了以非线性梁单元为基础的钢管井架有限元计算模型,采用有限元分析软件对其稳定性能进行计算,分析几种主要工程加强措施对井架整体稳定性的作用效果。计算结果表明:井架整体稳定系数约为单杆稳定系数的 65%;井架高度、立杆根数(间距)和拉墙杆间距对井架极限承载力的影响很大,工程中可通过增加拉墙杆数量,减小横杆间距等措施提高井架的稳定性和承载力,进而增加井架的工作高度。

**关键词** 井架;承载力;有限元计算模型;非线性分析;稳定系数

**中图分类号** TU 311.2

**文章编号** 1007-4333(2007)02-0088-04

**文献标识码** A

## Finite element analysis on stability and load-carrying capability of steel tube derrick

Lu Guozhong<sup>1,2</sup>, Jiao Qunying<sup>1</sup>

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China,

2. Beijing jingnorthwest real estate develop Co. Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract** The stability and load-carrying ability of a tubular steel derrick are the main parameters determining the safety of a steel derrick. A finite element computing model based on the non-linear beam element was built. The stability of the tubular steel derrick was computed by computer. Furthermore, some methods for strengthening the stability of a derrick were analyzed. Results indicated that the stability factor of whole derrick is only 65% as that of the single pole; the height of the derrick, amount of the poling and the distance between the tie wall rods have significant effect on load-carrying ability of a tubular steel derrick. In practice, by increasing the number of tie wall rod and decreasing the distance between rails will strengthen the stability and load-carrying ability of a tubular steel derrick, thus the working height of a derrick will be increased.

**Key words** derrick; load-carrying capability; finite element computing model; nonlinear analysis; stability factor

钢管井架具有结构搭设方便、使用经济等优点,分析研究钢管井架的稳定性能和承载力,从而保证其在建筑工程上的安全使用具有重要意义。目前国内对钢管井架的研究只是停留在某一具体工程井架的设计和使用,而没有整体、系统的研究<sup>[1-10]</sup>;研究方法大都采用理论计算和工程实践相结合的方法,具有一定的局限性。本研究采用有限元方法,着重研究超高度、复杂支撑下钢管井架的稳定性能,通过计算、分析得到井架的稳定系数,探讨不同结构参数对井架稳定性能的影响并得出相关的数据,以期

为建筑工程中钢管井架的设计和使用提供可靠的参考依据。

### 1 井架结构及其受力特点

井架由钢管、扣件、钢丝绳、型钢梁、卷扬机、吊盆等组成,其中,井架主体结构由立柱、横杆、斜撑、拉墙杆通过扣件连接而成。扣件为铸钢形成,刚度很大,可简化为刚度无限大连接节点;其他杆件均为 48 × 3.5、材质为 Q235-A 的无缝钢管。由于连接的需要,立柱、横杆及其他杆件之间存在 26.5 mm

收稿日期: 2006-11-05

作者简介: 陆国忠, 硕士研究生; 焦群英, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事生物力学和固体力学领域的研究, E-mail: jiaoqy@cau.edu.cn

的偏心。

在工作状态下,其荷载主要有架体自重、吊盆上物体重力及卷扬机牵引引起的动荷载。在非工作状态下,其荷载主要有架体自重、吊盆上物体重力。井架实际上是个偏心受压构件,根据井架的结构特点和实际受力情况,顶端 2 根横杆上荷载的大小近似为倍数关系,一根为  $F$ ,另外一根为  $2F$ ,形成偏心荷载。各杆件通过扣件连接,通常把连接点简化为刚节点,这不影响井架的整体稳定和承载力的分析。另外,考虑到井架自身的搭设特点,实际分析时将井架与地面以及与墙体之间的连接设为铰接。

## 2 有限元模型

### 2.1 井架结构的非线性分析

对大多数的工程材料,当其应力低于比例极限时,应力-应变关系是线性的;另外,大多数材料在其应力低于屈服点时,表现为弹性行为,即在卸载时,应变随之消失。当应力超过屈服点时,材料进入塑性阶段,即使应力不再改变,应变也会增加,应力-应变关系变成了非线性。组成井架的立杆及横杆钢管即为此种材料。

井架结构在经受大变形之后,其变化的几何形状可能引起结构的非线性响应。几何非线性的特点就是“大”位移或“大”转动,产生大变形效应和  $P$ - $\delta$  效应(二阶弯矩效应),从而导致出现非线性问题。

随着变形位移的增大,1 个有限单元的已移动坐标可以多种方式改变结构的刚度,这就是几何非线性,需要进行多次迭代获得 1 个有效的解。对于大多数实体单元(包括所有的大应变单元和超弹性单元以及大部分的壳和梁单元)ANSYS 的大应变选项特性都是可用的。

大应变效应即结构的总刚度依赖于其组成单元的方向和单元刚度<sup>[6]</sup>。当一个单元的节点经历位移后,则该单元以 2 种方式改变总体结构刚度。单元发生大应变后,则单元刚度转换到整体刚度后会随之发生变化<sup>[11]</sup>。

### 2.2 单元模型

考虑到钢管井架的非线性特性,建模时需要选取一些比较特殊的单元类型和定义一些特定的材料属性。利用 ANSYS 软件进行非线性求解时,单元类型是否合适直接影响求解过程。

在模拟井架中的钢管时,要考虑钢管的几何非线性即大变形的影响。在 ANSYS 应用程序中,选

取 BEAM188 单元进行模拟。BEAM188 单元是线性的(2 节点)或者二次方程式的三维梁单元。每个节点上有 6 或 7 个自由度,自由度的个数取决于选项 KEYOPT(1) 的值。当 KEYOPT(1) 为 0(默认值)时,每个节点有 6 个自由度。当 KEYOPT(1) 为 1 时,则要考虑 7 个(扭转)。这种单元能很好的满足线性的、大转动的、大应变非线性的需要<sup>[12]</sup>。

单杆模型的建立及极限承载力的分析计算如下:1 根立杆上下两端铰支,上端加约束  $U_x$  和  $U_z$ , 下端加约束  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_z$ , 中间给一初始扰动。采用 spline 模拟计算立杆承载力与高度的关系(图 1), 其中,材料破坏极限荷载  $P_u = fA$ ,  $f$  为钢管材料的抗压强度设计值,  $A$  为钢管截面面积。

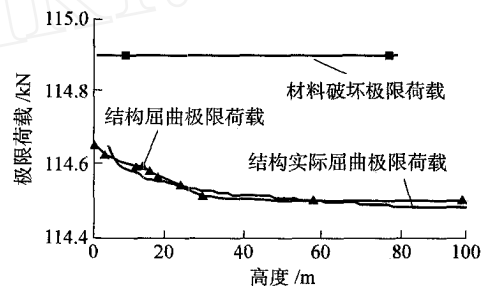


图 1 单杆承载力与其高度的关系

Fig. 1 The relationship between height and load-carrying capacity of horizontal bar

空间单体模型结构的建立及其稳定系数的分析计算如下:单体模型长 4 m,宽 2 m,每层高 3 m。改变层数观察承载力变化。先对单体模型进行模态分析,得到模型的第 1 振型,再将第 1 振型作为初始扰动(最大偏心按井架总高的 1/1 000 取值)加入模型。在建模时用 spline 命令连接各输入点。2 根横杆上加同样大小的载荷。在不同层数下用 spline 模拟计算出的稳定系数见图 2。理论稳定系数指组成井架的单根立杆(Q235-A 钢)的稳定系数,其值由

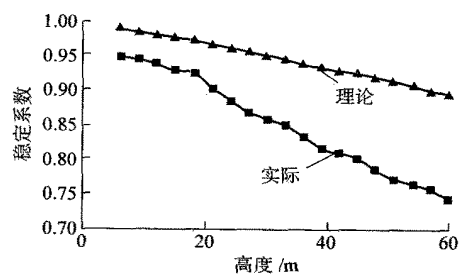


图 2 单根立杆的理论稳定系数和单体模型的实际稳定系数

Fig. 2 The academic stability factor of horizontal bar and actual stability factor of model

《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》<sup>[12][13]</sup>查得(文中理论稳定系数均为此意)。

### 2.3 节点处理

应用 ANSYS 进行井架极限承载力分析时,将井架模型中的所有钢管分成 9 大类,在定义截面类型时定义 9 类截面,定义截面的同时就定义了偏心状态,这样就可以近似地模拟实际过程中每个节点处由于扣件造成的偏心。

另外,根据实际要求和结构受力状态,立柱底端采用铰接约束,拉墙杆与墙体之间也采用铰接约束。根据井架的结构特点和实际受力情况,顶端 2 根横杆上荷载的大小近似成倍数关系,一根加  $F$ ,另外一根加  $2F$ ,形成偏心荷载。架设天轮梁的横杆在加荷载过程中不允许破坏,实际施工中,要设置 2 根横杆来承载天轮梁,故在 ANSYS 的建模过程中近似的将其截面放大成实心梁。其余横杆和立杆截面均相同,都是空心钢管,内径 41 mm,外径 48 mm<sup>[14]</sup>。

## 3 井架承载力分析

### 3.1 失稳形式

井架失稳有 3 种形式:1)整体失稳,拉墙杆发生较大的位移,底层拉墙杆变形最小,顶层拉墙杆变形最大;2)拉墙杆之间的节间局部失稳,即拉墙杆与拉墙杆之间的井架发生局部失稳;3)横杆之间的立杆局部失稳。计算结果表明,起控制作用的是第 3 种失稳形式<sup>[15]</sup>。

为提高井架抵抗整体失稳的能力,很重要的措施是加强拉墙杆的刚度;而横杆发生的变形是影响拉墙杆刚度的主要因素。为防止横杆之间的立杆局部失稳,应控制横杆间距。

### 3.2 层数对井架极限承载力的影响

假定建筑层高为 2.7 m,采用 12 柱井架结构。井架中用到的钢管的几何尺寸<sup>[14]</sup>为:外径 48 mm、壁厚 3.5 mm、内径 41 mm、截面面积 489.3 mm<sup>2</sup>、截面惯性矩 12.19 cm<sup>4</sup>、回转半径 15.78 mm。井架模型分析中用到的基本参数见表 1。

由图 3 可见:1)随着井架层数的增加,整体稳定系数呈下降趋势。2)计算出的实际井架整体稳定系数比规范中查出的单管稳定系数低很多。稳定系数下降的主要原因是井架层数越多,空间内的约束相对减少,整体的纵向和横向刚度降低,从而导致井架整体的稳定性变差。井架的整体稳定系数之所以低于单钢管,是因为单钢管不考虑初始缺陷,而井架是

一个空间的整体,要考虑井架的初始缺陷以及井架的整体失稳,等等。

表 1 井架几何参数

参数	值	参数	值
井架截面尺寸	3.6 × 2	立杆间距	(1.3 + 1.0 + 1.3)
层高	2.7	横杆间距	1.35
进料口高度	2.7	拉墙杆	长 1.2 间距 2.7
出料口高度	2.7		

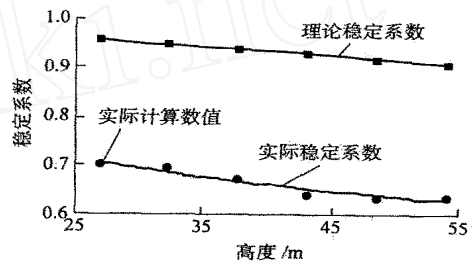


图 3 不同层数井架实际与理论稳定系数的比较

Fig. 3 Comparison of actual stability factor and academic stability factor at different floor of derrick

### 3.3 立杆根数对井架极限承载力的影响

高度为 30 ~ 50 m 的扣件式钢管井架应采用四角和天轮梁下双杆的 12 柱结构;高度 > 50 m 时应采用 16 柱结构<sup>[15]</sup>。拉墙杆间距为 2.7 m,斜撑间距为 4.0 m。根据井架的结构和偏心受力特点,井架的加载按照一根横杆加  $F$ 、另外一根横杆加  $2F$  的方式进行。用 ANSYS 软件分析和计算高层井架的稳定系数(图 4)。

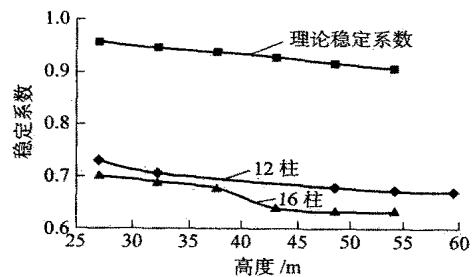


图 4 12 柱井架与 16 柱井架稳定系数的比较

Fig. 4 Comparison of stability factor between derricks 12 and 16

可以看出:1)井架高度相同时,16 柱井架的稳定系数始终高于 12 柱井架。16 柱井架的稳定系数的下降趋势要比 12 柱平缓。2)12 柱和 16 柱实际计算出的极限承载力均低于理论的井架整体极限承

载力。3) 12 柱和 16 柱井架的整体稳定系数均低于单杆的稳定系数。16 柱井架的立柱数量增加了, 立杆间距减小了, 井架整体的横向刚度和纵向刚度随之增加, 井架的约束性能提高了, 从而导致井架的整体稳定系数高于 12 柱井架。理论上, 12 柱和 16 柱井架的极限承载力分别为  $P_u = A f_y = 12 \times 4.89 \times 10^{-4} \times 2.05 \times 10^8 = 1.197 \times 10^6 \text{ N}$  和  $P_u = A f_y = 16 \times 4.89 \times 10^{-4} \times 2.05 \times 10^8 = 1.596 \times 10^6 \text{ N}$ 。图 4 中曲线上的最大值分别低于这 2 个值。在井架的实际使用中, 还可以通过采用双立管结构提高其承载力。

### 3.4 拉墙杆对井架极限承载力的影响

拉墙杆的设置也会影响井架的整体稳定性和极限承载力。设置拉墙杆后用 ANSYS 软件进行分析和计算, 高层井架的稳定系数计算结果见图 5, 其中井架的立杆根数为 12 根, 加载方式同 3.3。

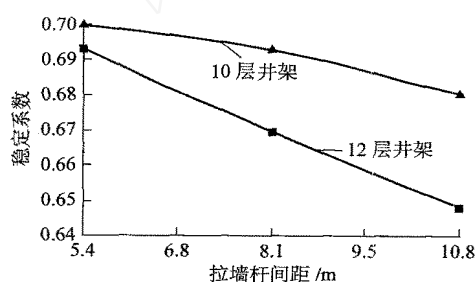


图 5 10 层和 12 层井架拉墙杆的间距-稳定系数的变化规律

Fig. 5 Variety disciplinarian between stability factor and space between of rail at the 10<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> floors of derrick

由图 5 可知: 1) 随着拉墙杆步数的增加, 井架整体稳定系数呈下降趋势。10 层下降的比较平缓。2) 10 层井架的稳定系数高于 12 层的。拉墙杆主要起到稳定井架的作用, 使得井架与建筑物有很好连接, 保证井架不会发生倾倒。拉墙杆数量越多, 井架约束性能越高。所以设置合适的拉墙杆数量是提高井架整体稳定性的很好措施。

## 4 结 论

1) 采用考虑几何和材料非线性的有限元方法, 用 ANSYS 软件能很好地分析井架结构的极限承载力。

2) 井架高度、立杆根数(间距)和拉墙杆间距对

井架极限承载力的影响很大, 其中拉墙杆的间距对井架承载力及其稳定系数的影响最为明显。

3) 计算结果表明, 井架整体稳定系数约为单杆稳定系数的 65%, 由井架各柱的极限承载力简单推算井架整体承载力将会带来较大的误差, 且偏于不安全。

4) 工程中可以通过增加立杆和拉墙杆数量、减小横杆间距提高井架的稳定性, 进而增加井架的工作高度。

## 参 考 文 献

- [1] 连跃兴. 对井架现状的调查与对策[J]. 建筑安全, 1996, 9(11): 12~13
- [2] 李亚明, 胡云昌, 项忠权. 井架在风荷载作用下的可靠性分析[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 116~122
- [3] 郭奕珊, 周国强. 井架临界荷载与振动参数的关系[J]. 石油机械, 1995, 23(12): 18~21
- [4] 吴金本. 钢管架支模的设计计算[J]. 建筑安全, 2005(10): 29~31
- [5] 黄凯旋. 55 米跨局部三角形钢架结构设计[J]. 化工设计, 1997(3): 36~39
- [6] 张俊, 夏立新, 毕勇. 二维调节架支撑钢架的有限元计算分析[J]. 机械设计与制造, 2005(9): 1~2
- [7] 郑隆, 张涛. 门式钢架在工程应用中的一些体会[J]. 建筑工程, 2002, 26(11): 40
- [8] 甘良绪, 陈恭才, 周立运. 单层刚架结构失稳临界力的试验推算法[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4): 89~91
- [9] 李良, 李增亮, 颜廷俊. 基于 ANSYS514 的 A 形井架结构综合分析[J]. 石油机械, 2002, 30(4): 22~27
- [10] 李静, 全兴华, 俞然刚. 钻采井架钢结构的力学分析[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(4): 17~19
- [11] 胡红宇. 斜撑式钢井架设计浅谈[J]. 江西煤炭科技, 2003(4): 48~49
- [12] 中国建筑科学研究院, 哈尔滨工业大学. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [13] 杜荣军. 建筑施工脚手架使用手册[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1997
- [14] 宋勇, 艾宴清, 梁波, 等. 精通 ANSYS 7.0 有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [15] 袁驷. 程序结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001