

大直径钢管在轴向压力作用下的极限承载能力分析

武宪功

(中国铁建股份有限公司,北京 100855)

摘要:鉴于大直径钢管在各种类型的建筑物或构筑物得到广泛应用,采用非线性有限元法研究大直径钢管构件在轴向压力作用下的受力性能,分析多种因素对钢管极限承载力的影响。通过对所选算例的计算分析,得出几种因素对构件承载力的影响趋势。

关键词:非线性有限元;极限承载力;大直径钢管;屈曲分析

中图分类号:TU3 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0126-04

0 引言

由于具有风载体型系数小、受力性能好等优点,圆形钢管在各种类型的建筑物或构筑物得到广泛应用,如桥梁施工工作平台的主要受力杆件、体育场结构中的桅杆或立柱、大跨结构中承受竖向力的柱等均采用大直径钢管。《钢结构设计规范》GB50017—2003第10.1.2条规定^[1],钢管的径厚比不超过,但在实际工程中,很多大直径钢管的径厚比均超过规范限值。根据板壳力学理论^[2],当径厚比 $D/t \geq 40$ 时,钢管构件就属于薄壁壳体结构。薄壁壳体钢结构与普通钢结构的主要不同是管壁容易发生局部变形,对缺陷比较敏感,极限承载力受径厚比影响较大。同时,大直径钢管一般均由钢板卷曲焊接而成,在制作过程中不可避免会产生制作误差,致使钢管在受力前就已变形,这种几何缺陷在规范所允许的制作误差范围内,但对构件的极限承载力有一定程度的影响,影响程度是工程人员较为关注的问题。因此,对大直径钢管在压弯荷载作用下的受力性能进行分析是非常必要的。

1 受力状态分析

大直径钢管构件由于制造过程中不可避免的缺陷影响,实际受力为压弯构件,在轴向压力作用下,截面边缘纤维开始屈服进入弹塑性受力状态。此时,随着外荷载的增加,弹性区逐渐减小,构件的抗弯刚度降低,变形加快,导致附加弯矩增加,致使构件抗弯能力的增加小于外力作用的增加,当内外力无法平衡时,构件达到极限状态,从而发生整体失稳破坏。但由于钢管的初始局部挠曲及受压弯后的局部凹凸,钢管构件的屈曲实际是局部屈曲和杆件屈曲的耦合,是局部与整体相关屈曲作用下的极值点失稳^[3]。

从钢材的材料性能来看,钢结构所用的钢材都是塑性性能比较好的材料,其应力-应变曲线在超过弹性后有明显的屈服点和一段屈服平台,然后进入强化阶段。因此,钢材的塑性性能在一定条件下是可以利用的,钢管构件在局部屈服后仍可以继续承载,因而钢管的极限承载力分析是一个材料非线性的问题。

对于大直径压弯钢管,由于残余应力、几何缺陷、端部约束以及荷载条件等多种因素对其极限承载力均有一定程度的影响,构件的极限承载力不能通过解析法来解,只能借助数值方法求解。文中采用通用有限元软件对大直径钢管的极限承载力进行了初步分析。

2 模型建立

采用ANSYS软件,定义两种不同材料的壳单元分别模拟钢管管壁和端部加载板,采用四节点壳体单元(shell181)对模型进行离散,主体部分弹性模量为 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,两端刚性板弹性模量定义为

收稿日期:2010-04-26

作者简介:武宪功,男,1965年出生,高级工程师。研究方向为结构工程、项目管理。

$E = 2.06 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$ 。材料应力应变关系假定为理想弹塑性双折线型模型(图1),屈服强度 $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$,泊松比取0.3。在实际应用中,为方便构件间的连接,钢管端部往往都焊接一块节点板(如法兰盘),这块节点板的刚度相对钢管构件来说很大,有效的阻止了钢管端部的环向变形。从上述角度出发,建立如图2所示模型,采用四节点壳单元对模型进行离散,定义两种壳单元对钢管进行模拟,对钢管构件进行较为贴近实际的模拟。为方便施加荷载和模拟较为真实的边界条件,在钢管两端部分别添加一块厚度为50 mm的钢板,以模拟实际工程中的节点板的作用。

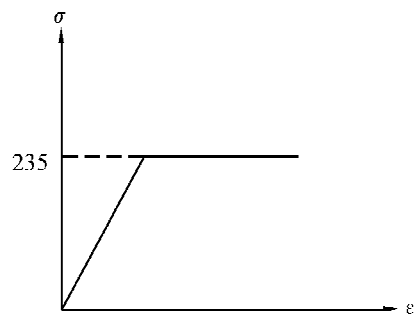


图1 应力-应变关系

经过分析可知,钢管的极限承载力受构件的长细比、构件的径厚比以及端部约束等多种因素的影响,这些因素对钢管极限承载力的影响是很复杂的。为对压弯钢管的极限承载力进行较为全面的分析,考虑了两种主要因素对钢管极限承载力的影响:①假定长细比基本保持不变,分析钢管的径厚比和钢管极限承载力的关系;②假定径厚比(截面)不变,分析构件的长度(即构件的长细比)对钢管极限承载力的影响。

3 非线性屈曲分析

大直径钢管在制作过程中产生的几何缺陷可分为整体几何缺陷和局部几何缺陷^[4]。整体几何缺陷是指沿杆长方向由于弯曲、扭转等原因引起的整体变形,局部几何缺陷则是由钢板的不平整引起的管壁局部凹凸。按《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205—2001规定,管壁的凹凸误差应在 $d/1\ 000$,构件的初始弯曲不应大于 $L/1\ 000$ (L 为构件长度)。有限元分析中,管壁的局部缺陷则通过对模型进行屈曲分析,提取一阶模态的变形并按比例施加在模型上作为初始局部缺陷(图3(a)),通过在构件跨中施加一微小侧向力使得构件挠度达到 $L/1\ 000$ 来模拟初始整体弯曲(图3(b))。

钢管构件的极限承载力能力受局部失稳和整体失稳两种因素的共同影响。当大直径钢管的长细比较大时,钢管的失稳表现为整体失稳先于局部失稳;当大直径钢管的长细比较小,而径厚比相对较大时,钢管的失稳表现为局部失稳先于整体失稳。文中所研究的大直径钢管主要针对实际工程中应用较多的薄壁构件,因此钢管的径厚比对钢管极限承载力有很大的影响。

3.1 径厚比对钢管极限承载能力的影响

选取了6个算例分析径厚比对钢管极限承载能力的影响,6个算例具有相同的直径($D = 2\ 000 \text{ mm}$),但壁厚不同,因此回转半径有细微差异。通过微调构件的长度保证构件长细比($\lambda = 42.7$)相同,研究构件极限承载力和径厚比的相对关系。计算结果见表1。

从表1看,随着径厚比的减小,构件的极限承载能力逐渐增大,当径厚比接近100时,构件的承载能力得到充分发挥,构件既不会整体失稳,也不会因局部屈曲而失效,构件破坏形式表现为全截面进入塑

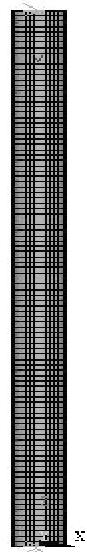


图2 计算模型



(a)局部缺陷



(b)整体缺陷

图3 初始缺陷

性;随着构件径厚比的增大,构件破坏的临界应力越低,因此构件的承载能力降低。计算结果同样表明,采用大直径钢管可以以牺牲构件强度为代价获得径厚比的增大。但若想获得径厚比和钢管极限承载能力的相关关系式,还需大量算例进行回归分析。

表 1 不同径厚比构件参数及计算结果

算例编号	截面规格	径厚比	截面面积/mm ²	回转半径/mm	长度/mm	长细比	极限载荷/kN	应力/MPa
1	Φ2000/12	167	74 946	702.8	30 000	42.7	22 334	298
2	Φ2000/14	143	87 349	702.2	29 984	42.7	26 641	305
3	Φ2000/16	125	99 727	701.5	29 954	42.7	31 314	314
4	Φ2000/18	111	112 079	700.8	29 924	42.7	36 426	325
5	Φ2000/20	100	124 407	700.1	29 894	42.7	41 179	331
6	Φ2000/25	80	155 116	698.3	29 817	42.7	52 584	339

3.2 构件长细比对钢管极限承载力的影响

选取六根同规格钢管 Φ2000/16 进行比较非线性屈曲分析,通过变化构件长度达到改变长细比的目的,计算结果详见表 2。从表 2 所列数据可以看出,钢管的承载能力随构件长细比的增大呈逐渐减小的趋势。本文所选算例基本源于工程实际中常用的钢管直径和壁厚,构件最大长度不会超过实际使用长度,因此算例的长细比不大,整体失稳对构件承载能力的影响较小,构件的失效表现为局部屈曲破坏。图 4 为表 2 中算例 4 在极限承载力下的应力分布,考虑了初始弯曲何管壁凹凸的影响。

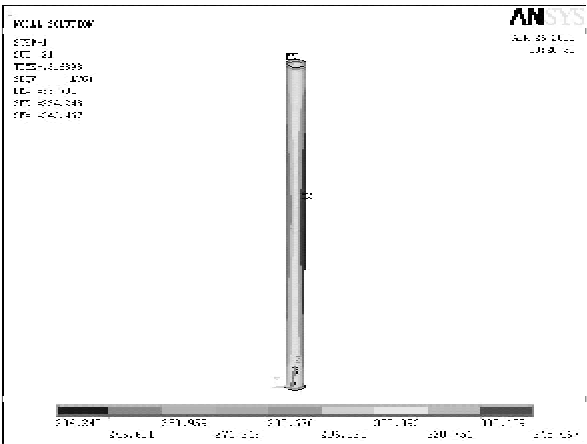


图 4 管壁 Von-mises 应力分布

表 2 不同长细比构件参数及计算结果

算例编号	截面规格	径厚比	截面面积/mm ²	回转半径/mm	长度/mm	长细比	极限载荷/kN	应力/MPa
1	Φ2000/16	125	99 727	701.5	20 000	28.5	33 681	337
2	Φ2000/16	125	99 727	701.5	25 000	35.6	33 147	332
3	Φ2000/16	125	99 727	701.5	30 000	42.7	32 479	325
4	Φ2000/16	125	99 727	701.5	35 000	49.9	31 702	317
5	Φ2000/16	125	99 727	701.5	40 000	57.0	30 469	305
6	Φ2000/16	125	99 727	701.5	45 000	64.1	29 373	294

4 结论

通过对大直径钢管的非线性屈曲分析,得知大直径钢管的极限承载力受径厚比、长细比等多种因素影响。当构件长细比一定时,其极限承载力随径厚比的增大而降低;当径厚比一定时,钢管的极限承载力随长细比的增加而降低。由分析结果可知,实际工程中需要采用大直径钢管时,构件的极限承载能力由局部屈曲和整体失稳两方面决定。构件的局部屈曲临界应力直接和径厚比相关,设计时可通过降低临界应力加大直径或减小壁厚;构件的整体稳定主要取决于长细比,在目前常用的大直径钢管中,由于构件的长细比不大,构件的极限承载力多由局部屈曲决定。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [2] 刘人怀. 板壳力学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [4] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50205—2001 钢结构工程施工质量验收规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

Analysis of Bearing Capacity of Large-diameter Steel Tube Under Axis Pressure

Wu Xiangong

(China Railway Construction Corporation Ltd., Beijing 100855, China)

Abstract: In view of the wide application of large sized steel tubes in various structures, the performance of steel tube under the axial force is analyzed by nonlinear finite element in this paper. The influence of several factors on carrying capacity is taken into account. The influenced direction of these factors on ultimate carrying capacity is acquired and the basis is provided for the future analysis by the selected example.

Key words: nonlinear finite element; carrying capacity; large-diameter steel tube; buckling analyses

~~~~~  
(上接第121页)

## Practical Calculation for Temperature Effect on PC Box Girder Bridge

Ge Junying<sup>1</sup>, Zhao Guojun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. The 2nd Institute of Surveying and Mapping of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The effect of abrupt drop in temperature and thermal difference due to the sun light on box girder will cause uneven temperature differences to the section of bridges, and then temperature stresses arise. While the design codes of different country on thermal gradient model in concrete bridges cannot convey the actual situation of a special bridge accurately. This paper recounts in detail how to calculate the temperature stress based on ANSYS. The offered method can calculate the actual temperature of bridges accurately any time in a day, which takes into account the effects of the season, location, orientation, structural size, material properties and the sunshade effect on the web by the flange plate of the box girder bridge, etc. With the method of thermal-structural coupling analysis, using the super-beam-element, the temperature effect can be calculated quickly, and this method can be used for variable cross-section and curved bridges.

**Key words:** bridge engineering; PC box girder; temperature effect; abrupt drop in temperature; solar radiation; practical method; ANSYS