

# 天然气埋地管道沉降的有限元分析

李新慧

(中石化天然气分公司, 天津 300457)

**摘要:** 埋地管道由于铺设在土体中, 受力状态较地上管道复杂, 尤其是敷设在软土地基上的管道, 地基对管道承载能力差, 管道将随着时间发生沉降现象。对某铺设在软土地基上的管道沉降进行现场测试及理论研究, 运用 ANSYS 有限元分析软件进行模型建立, 分析了不同的土质和内压等条件下管道的初始应力, 得到了各影响因素对管道应力和位移的影响规律, 可作为防治管线沉降参考。

**关键词:** 埋地管道; 沉降; 应力分析

中图分类号: TE973; TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0259-05

作者简介: 李新慧(1975-), 男, 广东珠海人, 工程师, 主要从事天然气工程管理工作。E-mail: pyblackshark@163.com。

## Finite element analysis of settlement of buried natural gas pipelines

LI Xin-hui

(Sinopec Natural Gas Branch, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** The settlement of the buried natural gas pipelines is investigated. The load on the pipelines buried in ground, especially in soft and plastic soil ground, is much more complicated than that on the ground. Because of the poor load bearing capacity of the ground, the pipeline will settle with time. The settlement and stress of the buried pipelines are investigated based on the theories and experiments, and the FEM is used to analyze the stress distribution and displacement of the settled pipelines under different conditions such as soil properties and operation pressure. The results may be used as reference to protect the settlement of pipelines.

**Key word:** buried pipeline; settlement; stress analysis

## 0 引言

天然气作为一种环保性气体, 目前在国内外得到了广泛的应用, 天然气的输送、储存和输配是天然气工业的重要组成部分, 其主要的输送方式为管道输送, 且大部分为埋地管道。埋地管道由于地基的影响, 会存在管道的沉降, 不均匀沉降对管道的影响很大, 将会造成管道的弯曲变形, 甚至破裂, 其受力情况相对于地面普通管道更加复杂。埋地管道的施工条件比较恶劣, 在役检测困难, 再加上输送介质的特性, 一旦发生泄漏或断裂, 将有可能引起爆炸、燃烧、中毒等重大事故。因此, 如何在管道失效发生前进行测试和预测将越来越引起高度重视, 对埋地管道的沉降、应力进行研究可以预测管道的应力水平, 并预防事故发生。目前珠海某首站和阀室的管道由于管道铺设地的地质因素的影响, 管道和地面可以观测到不同程度的沉降, 本文针对此种现象采用有限元分析方法, 对不同的土质和内压等条件下管道的初始应力, 推出了各影响因素对管道应力和位移的影响规律, 为埋地管道

的安全性研究提供基础依据。

## 1 埋地管道有限元分析模型选取

### 1.1 土体有限元模型选取

研究天然气埋地管道沉降, 关键是选取合适的模型来反映土体实际的应力-应变变化情况。在ANSYS中, 用Drucker-Prager (DP) 模型来模拟土体材料。Drucker-Prager屈服准则近似于Mohr-Coulomb准则, 修正了Von Mises屈服准则, 即在Von Mises表达式中包含一个附加项。流动法则既可以使用相关流动法则, 也可以使用不相关流动法则。屈服面并不随着材料的逐渐屈服而改变, 因此不考虑材料强化, 然而其屈服强度随着侧限压力(静水压力)的增加而相应增加, 其塑性行为被假定为理想弹塑性。另外, 模型考虑了由于屈服而引起的体积膨胀, 但不考虑温度变化的影响。此模型适用于混凝土、岩石、土壤等颗粒状材料。

## 1.2 接触分析

管与土的接触是非线性的, 分为两种基本类型: 刚体-柔体的接触和柔体-柔体的接触, 对于敷设在土体中的管道来说, 应选择刚性-柔性接触, 其中管道为刚性面, 土体为柔性面。

埋地管道由于土体的因素发生沉降时, 整体上管道和土体一起运动, 在管土交界面, 管道和土体产生接触变形, 随着位移增加, 管土两种材料各自材料性质的影响, 使管道和土体接触部位和接触力不断变化, 这种变化是非线性的, 是复杂的力学现象, 运用有限元分析软件进行接触分析, 选用 target170 和 contac173 接触对模拟管土的接触问题。

## 1.3 管道有限元模拟

管道的模型建立可以分为平面问题和三维问题。

### (1) 平面问题

管道简化为二维梁模型, 采用二次减缩积分梁单元对管道进行模拟。管道截面用 pipe 截面, 定义其截面形状、尺寸、弹性模量、泊松比以及材料密度, 视为线弹性模型。

### (2) 三维问题

管道简化为三维实体模型, 采用八节点线性减缩积分三维应力单元对管道进行模拟。管道材料也视为线弹性模型。

## 2 埋地管道有限元模型建立

### 2.1 埋地管道材料特性

埋地管道材料为 L360MB, 弹性模量  $E=2\times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu=0.3$ , 密度  $\rho=7850$  kg/m<sup>3</sup>。

土体的材料参数: 弹性模量  $E=2\sim 30$  MPa 泊松比  $\nu=0.29\sim 0.49$ , 密度  $\rho=1876$  kg/m<sup>3</sup>, 黏聚力  $c=19$ , 摩擦角为  $32^\circ$ , 膨胀角为  $30^\circ$ 。

### 2.2 埋地管道有限元模型及初始状态确定

根据现场管道分布图, 进行首站贴片管道部分的模型建立, 并进行网格划分, 如图 1。计算工作压力为 6 MPa 作用下, 管道的应力分布情况, 并用现场应力测试数据对模型进行验证, 得到应力测量时的初始应力状态。

土的底部为固支, 土的四边为轴向约束。埋地管道的直管部分都为轴向约束。阀座支撑部位给一定的初始约束。

将各点现场应力测试初始数据与有限元分析值进行对比分析, 如图 2, 大部分误差小于 10%, 因此该有限元模型可以准确地模拟现场应力测试管道的初始应力和位移情况。下面采用该模型对现场管道进行进一步的沉降分析, 以分析目前管道的状态。

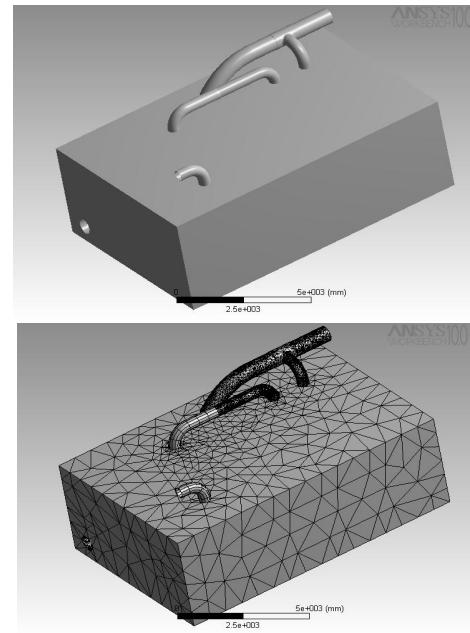


图 1 模型及网格划分图

Fig. 1 Model and mesh

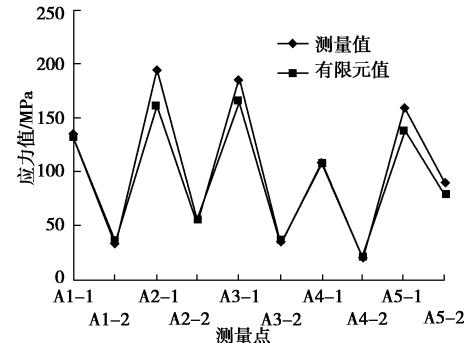


图 2 测量点的应力试验值与有限元值对比曲线

Fig. 2 Comparison of stress between measured by tests and computed by FEA

## 3 初始应力有限元结果分析

通过有限元软件的分析, 可以模拟出首次测量时管道的应力状态。首次测量时, 管内压力为 6 MPa, 得到了管道和土的应力云图和位移云图, 见图 3~4。

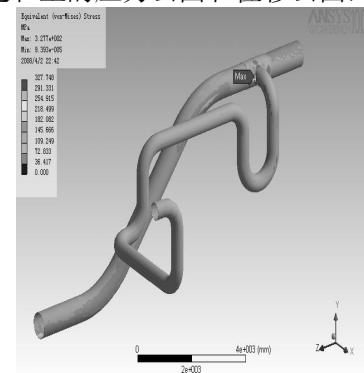


图 3 埋地管道 Von-Mises 应力分布云图

Fig. 3 Von-Mises stress of buried pipe

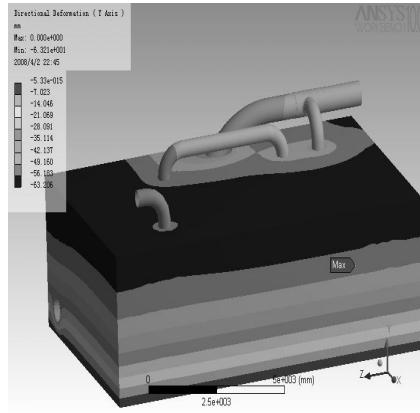


图 4 埋地管道和土的 Y 方向位移分布云图

Fig. 4 Displacement in Y-direction

管道的最大 Von-Mises 应力在管道的三通内壁 (见图 3), 大小为 327.7 MPa; 管道的最大径向应力在管道埋地最深处内壁, 为 192.6 MPa; 管道的最大环向应力在管道的三通的内壁, 为 318.9 MPa; 管道的最大轴向应力在管道埋地最深处内壁, 为 129.6 MPa。

管道覆土的最大 Y 向 (即管道沉降方向) 的位移在地面, 大小为 63.21 mm (见图 4); 管道的最大 Y 向 (即管道沉降方向) 的位移在埋地最深的管道的弯头处, 为 53.63 mm (见图 4)。

由管道的应力大小分布曲线以及应力分布概率图 (图 5、图 6) 可知, 整个管道的应力水平在 150 MPa。在有限元分析过程中, 将管道分成了 65535 个节点, 在这些节点中, 只有 2 个节点 (占总节点数的 0.003%) 超过了 300 MPa (非常小的范围)。整个管内的等效应力小于 160 MPa 的节点数为 62850, 占总节点数的 95.9%, 即大部分的节点应力都落在 100~150 MPa。

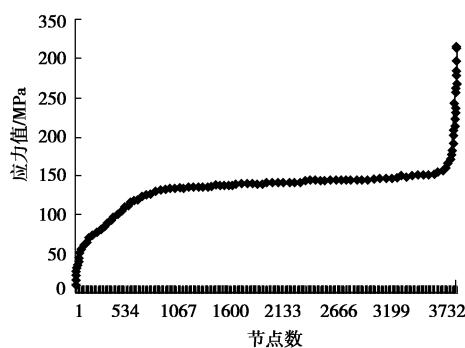


图 5 Von-Mises 应力大小曲线

Fig. 5 Von-Mises stress

## 4 埋地管道沉降影响因素分析

### 4.1 影响因素理论分析

埋地管道的主要特点是埋设在地面下, 管道应力

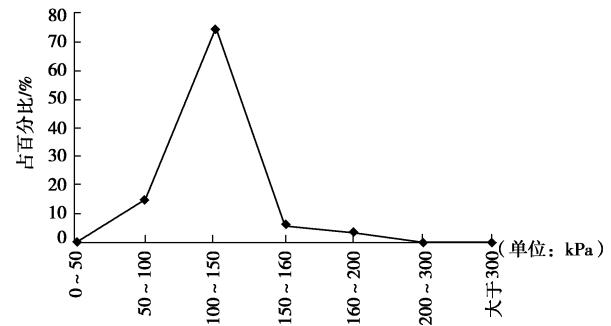


图 6 应力分布概率曲线图

Fig. 6 Probability of stress

的变化与土有很大的联系, 故埋地管道沉降的影响因素有地基土的性质和管内压力。

#### (1) 地基变形模量 $E$

土的变形模量  $E_0$  是土体的应力与应变的比值, 而土的压缩模量  $E_s$  则是土体在完全侧限条件下的应力与应变的比值,  $E_0$  和  $E_s$  关系为

$$E_0 = \beta E_s \quad (1)$$

实际上, 由于现场荷载试验测定  $E$  和室内压缩试验测定  $E$  时, 均有一些无法考虑到的因素, 使得上式不能准确反映  $E_0$  与  $E_s$  之间的实际关系。这些因素主要包括: 压缩试验的土样容易受到较大的扰动, 荷载试验与压缩试验的加载速率、压缩稳定标准都不一样; 泊松比的值不易精确确定等。

由于本文所建地基模型符合无侧限条件, 因此采用地基的变形模量  $E_0$ , 土体的  $E_0$  一般介于 2 MPa (极柔软的土体) 至 60 MPa (较坚实的土体) 之间, 因为研究的是软土地基, 其变形模量较小, 因此为了对比不同的土的承载能力下管道的应力情况, 选取土的变形模量  $E$  分别为 0.5, 1, 2, 4, 10 MPa。

#### (2) 地基泊松比

土的泊松比定义为土的横向应变与竖向应变之比, 泊松比与土的性质有关。目前国内的某些地基基础专著及设计规范中, 在推导临界荷载的计算公式时, 假定土的泊松比  $\nu=0.5$ , 即假定土的静止侧压力系数为 1, 实际上是假定地基土受力时体积应变不变, 这与土的实际状况不符。因此, 土的泊松比最多取 0.49。密实砂土  $\nu$  为 0.3~0.4, 湿黏土为 0.1~0.3, 淤泥为 0.3~0.42。因此, 本文将软土泊松比的范围设定为 0.2~0.49 之间, 其值分别为 0.2、0.3、0.4、0.45、0.49。

#### (3) 埋地管道的内压

埋地管道的内压是影响管道应力的主要方面, 故为了对比不同的管内压力情况下管道的位移和应力情

况, 现选取内压分别为 0, 1, 3, 6 MPa。

#### 4.2 影响因素模拟分析

干线管道选取现场管道分布中弯管部分为例来分析, 管道的基本情况如下: 管道尺寸  $\phi 419 \times 10$  mm, 埋深为 1.8 m, 建立的模型如图 7 所示, 约束条件为管道为轴向约束, 土的底部为固支, 土体的四边为轴向约束, 管道埋深为 1.9 m。

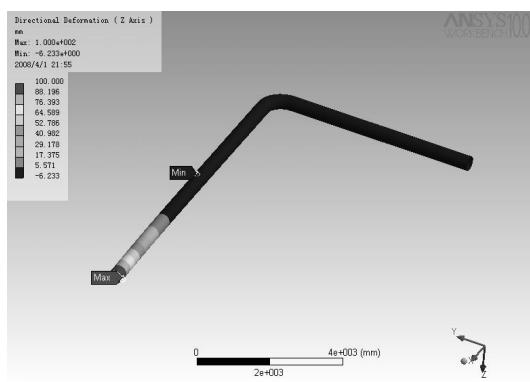


图 7 地面管道模型和位移分布云图

Fig. 7 Model and displacement of pipe on ground

首先是对比两种极端情况, 埋地管道与地上管道两种情况, 也就是有无土体作用的情况下管道的变形情况, 从而得到土体对管道变形影响的大小。

从下面的变形图(图 8)可知, 在没有土体的情况下, 当管段有一个沉降量时, 管段的变形没有受到土的约束, 故变形量沿着管线缓慢变化。埋地管道由于土的约束作用, 管道的变形量迅速变化, 也就是在更短的管距内出现的不均匀沉降。而这种不均匀沉降量的增大, 使得埋地管道较之地上管道最大 Von-Mises 应力要大, 也就是埋地管道比地面管道的危险要大得多。

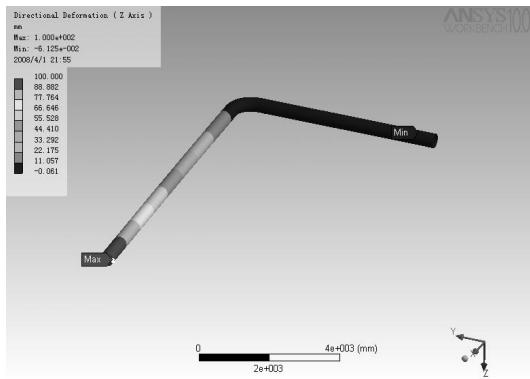


图 8 地面管道位移分布云图

Fig. 8 Displacement of pipe on ground

埋地干线管道在不同工作状态下的应力和管道位移情况比较分析如下。

(1) 排除其他因素的影响, 研究土的弹性模量  $E$  和土的泊松比  $\nu$  与沉降量和埋地管道应力的关系。在分析模型中只考虑干线埋地管道在纯重力作用下管道沉降及管道的最大 Von-Mises 应力变化情况。

(2) 为了综合分析比较在各种影响因素共同作用下, 埋地管道的应力和位移情况, 更准确地模拟现场管道, 现考虑在不同管道压力下, 应力和位移随土的性质(不同的土的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  的变化情况)。试验采集数据结果如图 9~12 所示。

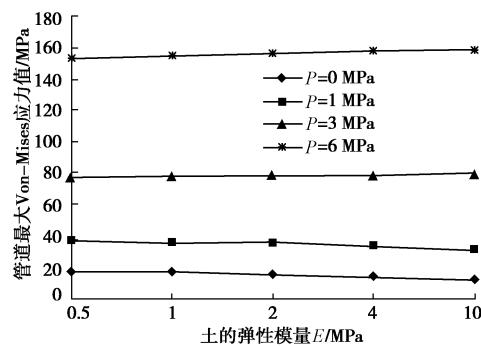


图 9 不同内压和不同弹性模量下管的最大 Von-Mises 应力曲线

Fig. 9 Von-Mises stresses with different pressures and  $E$

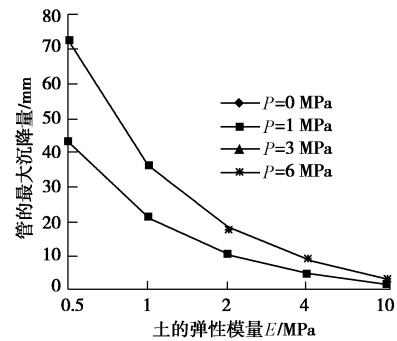


图 10 不同内压和不同弹性模量下管的最大 Y 方向位移

Fig. 10 Max displacements in  $Y$ -direction with different pressures and  $E$

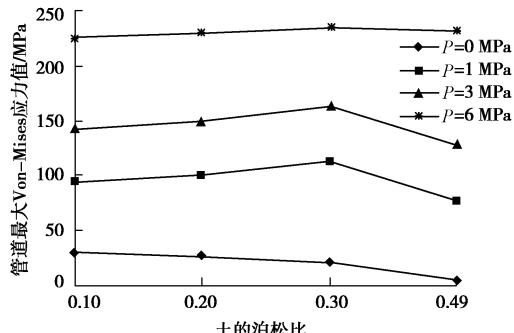


图 11 不同内压和不同  $\nu$  下管的最大 Von-Mises 应力

Fig. 11 Max Von-Mises stresses with different pressures and  $\nu$

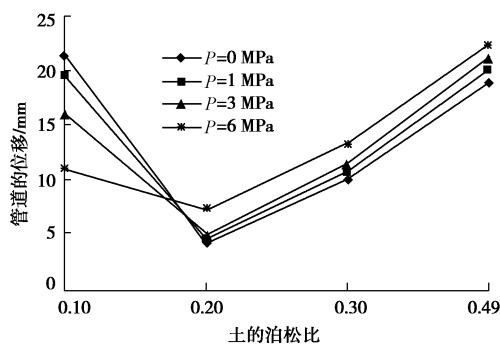


图 12 不同内压和不同  $\nu$  下管的最大  $Y$  方向位移

Fig. 12 Max displacements in  $Y$ -direction with different pressures and  $\nu$

从图 9~12 分析可得各影响因素对埋地管道应力和位移的影响规律: 覆土对于管道应力的影响非常大, 主要是因为覆土对管道的约束作用, 因此造成了管道的应力变大, 从而导致埋地管道比地上管道危险。

在纯重力作用下, 埋地管道的最大 Von-Mises 应力在直管段处, 大小随  $E$  的变大而变大, 随着泊松比  $\nu$  的变小而变大。埋地管道的最大沉降量随着  $E$  的变大而变小, 随着泊松比  $\nu$  的变大而变小, 也就是土越软, 管道的沉降将越大。

随着管内压力的增大, 管道的应力随土的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  变化越来越小, 当管道压力为 6 MPa 时, 土的弹性模量  $E$  由 0.5 MPa 增大到 10 MPa 时, 管道的最大 Von-Mises 应力由 153.5 MPa 变化到 159.2 MPa, 当土的泊松比由 0.1 增大到 0.49 时, 管道的最大 Von-Mises 应力由 225.8 MPa 变化为 231.8 MPa。也就是在管道正常运行的条件下, 土的性质并不影响到管内的最大应力分布情况。

## 5 结 论

本文通过 ANSYS 有限元模拟分析, 得到了初始应力状态下管道的应力分布及管道沉降的影响因素:

(1) 管道的最大应力发生在弯头和三通阀处, 并且远远大于管道的基本应力水平。因此应在这些部位进行加强处理, 可选择长径弯头来缓和地上和地下管道的过渡, 以降低管道失效的可能性。

(2) 埋地管道沉降的主要影响因素有: 管内压力  $p$ 、土体的弹性模量  $E$ 、土体的泊松比  $\nu$ , 通过对这 3 个因素进行对比分析, 得到以下的规律: 管道的最大 Von-Mises 应力大小的主导影响因素是管内压力, 管道的沉降大小的主导影响因素是土体的性质。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵瑞宝, 李金陆. 天然气长输管线弹性沉降的理论研究与应用 [J]. 煤气与热力, 2000, 20(5): 369~371. (ZHAO Rui-bao, LI Jing-lu. Research and application on theory of elastic subsidence of natural gas long distance transmission pipeline[J]. Gas & Heat, 2000, 20(5): 369~371. (in Chinese))
- [2] 龚爱民, 傅蜀燕, 黄海燕. ANSYS 软件在分析地下埋管工程中的应用 [J]. 安徽建筑工业学院学报, 2004, 12(5): 52~54. (GONG Ai-min, FU Shu-yan, HUANG Hai-yan. The application of ANSYS in filled conduit analysis[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture, 2004, 12(5): 52~54. (in Chinese))
- [3] 刘全林, 杨敏. 埋地管与土相互作用分析模型及其参数确定 [J]. 岩土力学, 2004, 26(5): 728~731. (LIU Quan-lin, YANG Min. Analytical model and parameters determination of interaction between buried pile and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 26(5): 728~731. (in Chinese))
- [4] 郝文化. ANSYS 在土木工程应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 218~224. (HAO Wen-hua. ANSYS civil engineering application[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005: 218~224. (in Chinese))

(本文责编 明经平)