

基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析

陈利琼¹ 宋利强¹ 吴世娟² 邱星栋¹ 刘琦¹ 夏燕¹ 孙靖云¹

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院 2. 中国石化西南油气分公司广西采油厂

摘 要 为了保障天然气长输管道的安全运行, 需要探寻输气管道穿越滑坡地段的应力分布规律并采取应对措施, 为此, 采用 CAESAR II 软件和 ANSYS 软件对埋地输气管道纵向和横向穿越滑坡段进行了应力分析, 并研究了滑坡体的位移量、土壤性质, 管道外径、壁厚、内压和管材等对管道应力应变的影响。研究表明: ① CAESAR II 的应力与位移计算结果均趋于保守, 但对分析结果可以进行更为详尽的分析和考虑, 而 ANSYS 软件处理非线性问题更为准确; ②纵向滑坡作用下, 管线的最大等效应力应变和位移量均出现在弯管处, 说明弯管是应力危险截面; ③滑坡体位移量越大, 管道承受的应力越大, 失效的可能性也越大; ④径厚比越小, 管道安全稳定性越好; ⑤相对于纵向滑坡, 横向滑坡则要危险得多, 很可能造成管线的局部屈曲变形甚至拉伸断裂; ⑥处在滑坡区的管道屈曲变形程度很大, 因此建议使用浅埋方式穿越滑坡多发地段和古滑坡区。

关键词 滑坡地段 输气管道 应力分布规律 ANSYS CERSAR II 应力应变 位移量 管道屈曲变形程度

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.02.011

FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas

Chen Liqiong¹, Song Liqiang¹, Wu Shijuan², Qiu Xingdong¹, Liu Qi¹, Xia Yan¹ & Sun Jingyun¹

(1. School of Oil and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Guangxi Oil Production Plant, Sinopec Southwest Oil & Gas Field Company, Deyang, Sichuan 618100, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 2, pp.84-91, 2/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In order to guarantee the safe operation of long-distance gas pipelines, it is necessary to identify the stress distribution laws of gas pipelines running through landslide areas and take corresponding measures. In this paper, based on the finite element method, the stress of gas pipelines running through landslide areas longitudinally and transversally was analyzed by using CAESAR II and ANSYS. Then, the effects of the displacement and soil properties of landslides and the OD, wall thickness, internal pressure and material of pipes on the stress and strain of pipelines were analyzed. It is shown that the stress and displacement calculated in CAESAR II tend to be conservative, but this software can analyze the evaluation results more thoroughly, while ANSYS can handle nonlinear problems more accurately; that under the effect of longitudinal landslides, the maximum equivalent stress-strain and displacement of pipelines all appear at the bends, indicating that a bend is the dangerous stress section; that the larger the landslide displacement is, the greater the stress on the pipe and the higher the pipeline failure probability; that the lower the radius-thickness ratio is, the safer and more stable the pipeline; that compared with the longitudinal landslide, the transversal landslide is more dangerous, since it is likely to result in local buckling deformation of pipelines and even tensile fracturing; and that the buckling deformation degree of pipelines in landslide areas is very high, so it is recommended to bury pipelines in shallow layers while they run through landslide-prone areas and the ancient landslide areas.

Keywords: Landslide area; Gas pipeline; Stress distribution laws; ANSYS; CERSAR II; Stress and strain; Displacement; Buckling deformation degree of pipelines

基金项目: 2016 国家重点研发计划“油气长输管道及储运设施检验评价与安全保障技术”(编号: 2016YFC0802100)、中国工程院咨询研究项目“油气管网系统安全发展战略研究”(编号: 2015-XZ-37)。

作者简介: 陈利琼, 女, 1976 年生, 教授, 博士; 主要从事油气储运及安全技术与管理工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道 8 号西南石油大学。电话: 13550370744。ORCID:0000-0003-4260-5465。E-mail: alice_clq@163.com

通信作者: 宋利强, 1991 年生, 硕士研究生; 主要从事油气储运与安全方面的科研工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道 8 号西南石油大学。ORCID:0000-0003-4039-8618。E-mail: songliqianghl@163.com

自然边坡受气候变化、人类活动、地质活动等多方面因素的影响,经常出现失稳变形,进而发展成滑坡。一些古滑坡也会在特定条件下复活。据美国交通运输部的统计,截至 2012 年底,由于滑坡导致的油气管道事故占事故总数的 1.8%,并已造成了大量的经济损失。

1980 年勃洛达夫金给出了淤泥质土壤长期蠕变滑坡对管道推力的确定公式,但局限性较大。1991 年梁政^[1]获得了滑坡地区管道的变形及应力的解,较详细地分析了土壤横向下塌时管道的受力与变形。2011 年 Liu Bing 等^[2]使用 ABAQUS 软件模拟了中石油兰成渝成品油管线穿越四川省二郎庙地区的埋地管线部分,分别探究了横坡和纵坡状态下,滑坡体位移量与管线最大拉伸应变和压缩应变之间的关系。2012 年 Han Bing 等^[3]同样使用 ABAQUS 软件模拟研究滑坡地段埋地管道应变分布,得到不同径厚比下的应变分布曲线。同年,李华等人^[4]使用 ANSYS 软件模拟分析滑坡作用下的埋地管道强度失效,由计算结果拟合得到的公式可用于工程实际中判别管道是否会发生强度失效。

但是,目前国内外针对滑坡段输气管道只是进行了简单应力分析比较,并未得出规律性认识。为此,笔者采用 ANSYS 和 CEASERII 分析滑坡段输管道应力作用,比较了两种软件的适应性,并对纵向和横向穿越滑坡体管道在有滑坡作用和无滑坡作用下进行应力分析,以期得出认识为管道安全穿越滑坡地段提供建议。

1 滑坡地段埋地管道计算模型建立

1.1 物理模型

在实际情况下,滑坡体处于半无限空间中,而埋地管道在轴向上是处于无限空间状态的。由圣维南原理可知,如果作用在弹性体某一小块体积上的荷载的合力和合力矩都等于零,则在远离荷载作用区的地方,应力就小得几乎等于 0^[5-8]。即荷载的具体分布只影响荷载作用区域附近的应力分布,而对远处的影响可以忽略不计。因此,只选取真实模型的一部分,对土体和管道选取有限的长度进行计算模拟。计算物理模型如图 1 所示。

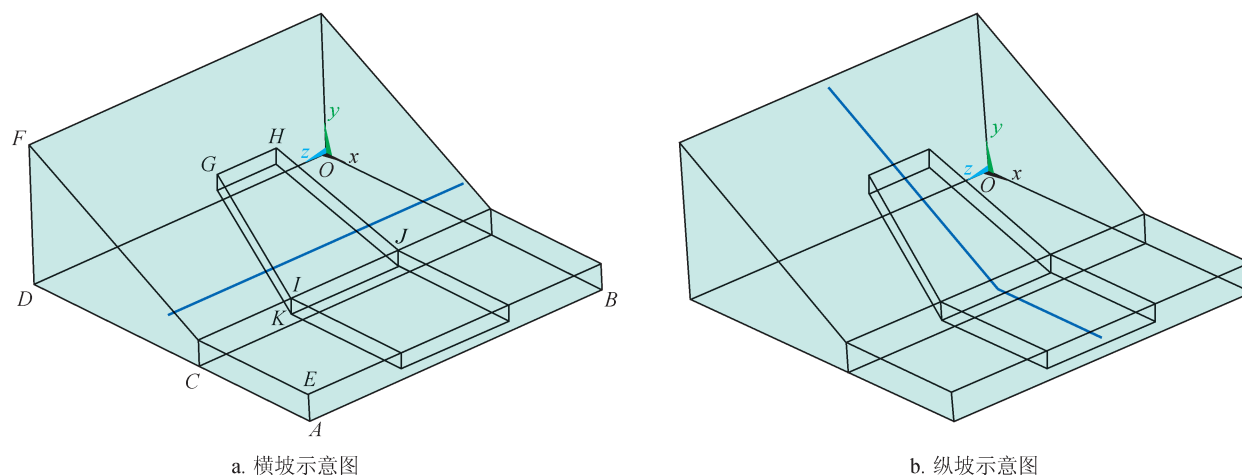


图 1 滑坡地段埋地管道计算物理模型图

在 z 轴方向上,山体长 $AB=60$ m。在 y 轴方向上,山体前后高度分别为 $AE=5$ m 和 $DF=26.5$ m。在 x 轴方向上,山体斜坡部分前后距离为 $DC=37.5$ m,平坦部分前后距离为 $AC=25$ m。斜坡倾角约为 30° 。滑坡体上沿宽度 $GH=12$ m,下沿宽度 $IJ=22$ m,高度 $IK=3$ m,滑坡体沿斜坡长 25 m。整个计算物理模型底面在 xz 平面,侧面都垂直于 xz 平面。

1.2 管道梁单元模型

滑坡段管道无论是横向穿越、纵向穿越还是悬

空,均处于受拉伸状态,管道的常见变形为挠曲。因此采用梁单元模型进行模拟是非常适用。3D 梁单元有 6 个方向的自由度,具有拉压、扭转和弯曲的能力。长期的实践和工程应用证明,对于管道直径与壁厚之比小于 100 的管道而言,采用梁单元分析的精度已经足够^[9-10]。对于梁单元而言,弯曲是其主要的变形模式。梁弯曲段的挠度曲线平衡微分方程为:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EZ} \quad (1)$$

式中 y 表示梁单元的挠度; x 表示梁单元的长度;

$M_{(x)}$ 表示单位长度上的弯矩； E 表示梁单元材料的弹性模量； Z 表示梁单元截面的抗弯截面系数。

1.3 管道壳单元模型

利用 ANSYS 10.0 软件建立穿越滑坡区管线的有限元模型，采用 SOLID45 单元模拟管道和土体。该单元是一个三维六面体单元，可用于建立各向同行固体力学问题的模型，其拥有 8 个节点，每个节点上有 3 个自由度：可沿 x 、 y 、 z 这 3 个方向平动^[11-14]。

2 滑坡地段输气管道应力校核

2.1 一次应力校核

一次应力是由自重和外载引起的弯曲应力。对于持续荷载作用下一次应力的校核条件，GB 50316 做了如下的规定：管道组成件的厚度及补强计算满足要求时，则由于内压所产生的应力认为是安全的；管道组成件的厚度及稳定性满足要求时，则由于外压所产生的应力认为是安全的；管道中由于压力、重力和其他持续荷载所产生的纵向应力之和 σ_L 不应超过材料在预计温度下的许用应力 $[\sigma]$ ^[15-16]。

2.2 二次应力校核

二次应力是由于相邻材料的约束或者由于结构本身的约束而引起的法向应力或者剪应力。二次应力在 GB 50316 中，要求计算的最大位移应力范围 σ_E 不应超过许用位移范围 $[\sigma]_A$ ，其中 $[\sigma]_A$ 的计算公式如下：

$$[\sigma]_A = f(1.25[\sigma]^c + 0.25[\sigma]^h) \quad (2)$$

若 $[\sigma]^h$ 与 σ_L 间存在差值，则其差值可以加到上式中的 $1.25[\sigma]^c$ 项上，则许用应力：

$$[\sigma]_A = f(1.25[\sigma]^c + [\sigma]^h - \sigma_L) \quad (3)$$

式中 $[\sigma]^c$ 表示在分析中的位移循环内，金属材料在冷态（预计最低温度下）的许用应力，MPa； $[\sigma]^h$ 表示在分析中的位移循环内，金属材料在热态（预计最高温度下）的许用应力，MPa； σ_L 表示管道中由于压力、重力和其他持续荷载所产生的纵向应力之和，MPa； $[\sigma]_A$ 表示许用的位移范围，MPa； f 表示管道位移应力范围减小系数。

2.3 Mises 应力校核

Mises 应力（米塞斯应力）为第四强度相当应力，它遵循材料力学形状改变比能理论，材料的单位体积形状改变的弹性能（又称弹性形变能）达到这一值时，材料就屈服。笔者采用 Mises 等效应力值对管道进行强度校核，其计算公式为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

式中 σ_1 表示第一主应力，MPa； σ_2 表示第二主应力，MPa； σ_3 表示第三主应力，MPa； σ 表示 Mises 等效应力，MPa。

3 某输气管道穿越滑坡地段基础参数

滑坡的形成需要一定的地层岩性和地质构造等内在条件，并非所有管道穿越山体的区段都会发生滑坡地质灾害。管线采用 X70 钢，纵坡敷设的管道在转角处，采用现场制作的冷弯弯管联结。管线分析参数和未滑坡土体材料参数分别如表 1、2 所示，X70 钢的材料性能如表 3 所示。

4 纵向穿越滑坡地段输气管道应力分析

4.1 无滑坡作用

4.1.1 ANSYS 软件分析结果

根据表 1、2 建立模型求解得到未滑坡时埋地管道的 Mises 应力云图（图 2）。由图 2 可以看出，未

表 1 管线分析参数表

管材	管径 /mm	壁厚 /mm	弯管半径 /m	内压 /MPa	埋深 /m
X70 钢	355.6	7	8	6	1.5

表 2 未发生滑坡时土体材料参数表

土体类型	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
基岩	45 650	0.23	2 920	43.95	22 750
土体	3 250	0.40	2 010	22.50	350

表 3 X70 钢材料性能和容许拉伸应变表

钢号	弹性区			弹塑性区			密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
	应变 ε_1	弹性模量 E_1 /MPa	应力 σ_1 /MPa	应变 ε_2	弹性模量 E_2 /MPa	应力 σ_2 /MPa		
X70	0.002 4	2.1×10^5	537	0.03	1 522	579	7 850	0.3

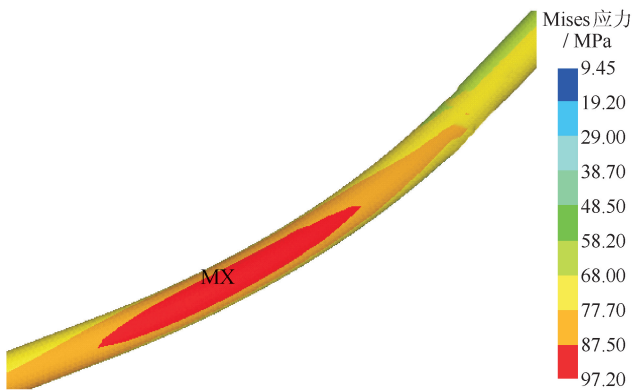


图 2 管道 Mises 应力云图

发生滑坡时，管线的最大等效应力发生在弯管处，其值为 97.2 MPa，远小于 X70 钢的最小屈服强度 485 MPa。与应力分布类似，最大应变同样发生在管道弯管处，其值为 0.000 442，同样远小于 X70 钢塑性变形开始点的应变值 ε_1 (0.002 3)。分析可知，未发生滑坡作用时，管线的最大应力应变均出现在弯管处，说明弯管是应力危险截面处，但远未达到危险工况。

4.1.2 CAESAR II 软件分析结果

从 CAESAR II 软件输出的最大应力结果可以看出，最大 Mises 应力同样出现在弯管处，应力值为 106.6 MPa，远小于 X70 钢的最小屈服强度 485 MPa。可以看出在未滑坡情况下管道并未发生屈曲，属于弹性变形范围内，CAESAR II 软件无法输出应变，则在弹性范围内需根据公式进行计算：

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}$$

(5)

式中 ε 表示应变； E 表示弹性模量，MPa； σ 表示应力，MPa。

计算结果为： $\varepsilon=\frac{\sigma}{E}=\frac{106.6}{2.1\times10^5}=0.000\ 5$ ，同样远小于 X70 钢塑性变形开始点的应变值 ε_1 (0.002 3)。

4.1.3 两种软件分析结果对比

将 ANSYS 软件计算得出的应力、应变结果与 CAESAR II 软件进行对比，可以看出 CAESAR II 软件计算得出的应力、应变值均大于 ANSYS 软件的计算值，由此可见，CAESAR II 的应力与位移计算结果均趋于保守，在实际的管道应力分析中可以使用，但对分析结果可以进行更为详尽的分析和考虑，而 ANSYS 软件处理非线性问题更准确。因此，后续的应力影响因素分析中均采用 ANSYS 软件进行计算。

4.2 滑坡作用下应力分析

边坡部分岩、土体沿着先前存在的地质界面，

或新形成的剪切破坏面向下滑动的过程，称为滑坡。在油气管道工程中，滑坡通常由降雨诱发，随着土体含水率的增加，土壤的黏聚力显著下降，同时土壤密度或容重又增大，滑坡体和非滑坡段土体之间的摩擦系数因雨水的润滑作用而降低。纵向滑坡作用下，管线上部受拉伸作用，下部受挤压作用，这可能会造成管道的局部屈曲变形，也有可能摩擦应力和覆土压力的综合作用下使管发生拉断或压裂。使用 ANSYS 软件模拟纵向滑坡作用下埋地管道的响应，分析不同变量因素对管道应力的影响，主要参数包括：①滑坡体的位移量；②管道外径；③管道壁厚；④滑坡体土壤性质。

4.2.1 滑坡体位移量的影响

由于发生了滑坡作用，土体材料发生了本质改变，滑坡段土体材料参数如表 4 所示。使用 ANSYS 软件建立有限元模型进行非线性求解后，滑坡体位移量与管线等效应力和应变峰值之间的关系曲线如图 3 所示。可以看出，随着滑坡体位移量的增加，管道最大 Mises 应力应变都呈近似线性上升趋势。这说明滑坡越剧烈，土体对管道施加的组合载荷越大，所以管道的应力应变随之增大。

表 4 滑坡地段土体材料参数表

土体类型	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 / $(^\circ)$	黏聚力 /kPa
细砂岩	45 000	0.15	2 581	35	13 000
黏土	13	0.35	2 110	22	20

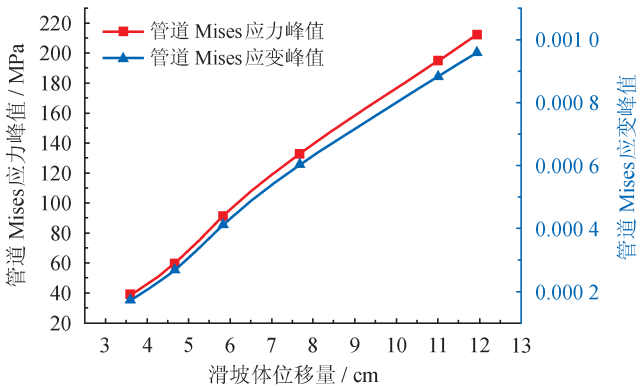


图 3 管道最大 Mises 应力应变随滑坡体位移量的变化图

4.2.2 管径的影响

为分析不同管径对纵向滑坡作用下埋地管道应力应变的影响，改变表 1 中管道的管径和弯管半径，选取管径分别为 355.6 mm、457.0 mm 和 559.0 mm，弯管半径分别为 8 m、13 m 和 17 m 的 3 种不同的管

道建模型求解, 得到管道最大 Mises 应力应变和位移与管道外径的关系曲线分别如图 4、5 所示。从图 4 可以看出, 管道的等效应力与应变随管径上升而近似线性增加。从图 5 可以看出, 管道的最大位移量同样随管径增大而上升。因为管径增大后, 管道的外表面面积增大, 即管土之间的接触面面积增大, 所以管道承受滑坡体的作用力更大。查看结果文件, 这 3 种工况虽然管径不同, 但管道应力、应变云图和位移云图没有明显差异, 最大应力应变和位移均产生在管道弯管处, 且在弯管内弧侧。综上所述, 在纵向滑坡地段, 宜敷设小口径的管道, 并且应特别注意弯管处应力集中的现象。

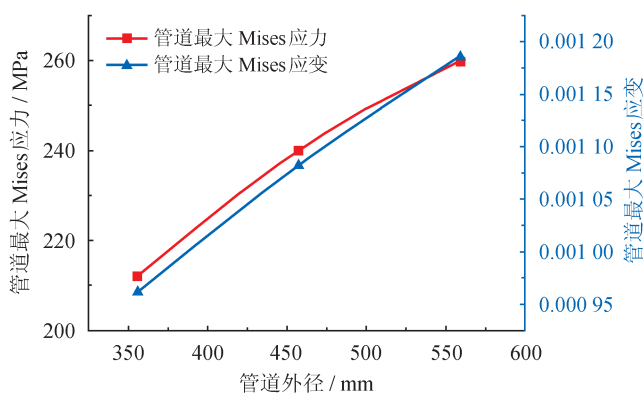


图 4 管道最大 Mises 应力应变随管径变化图

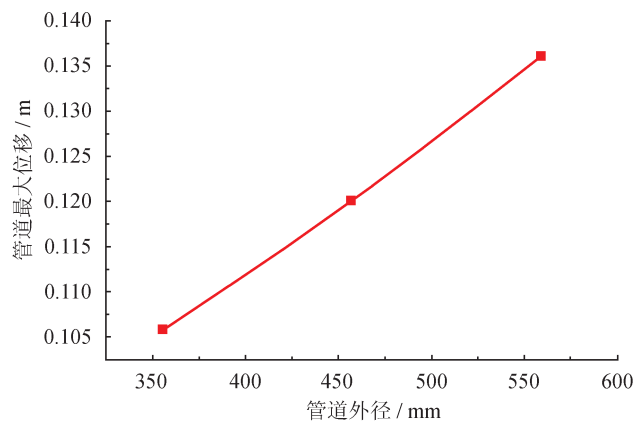


图 5 管道最大位移随管径变化图

4.2.3 管壁厚度的影响

改变表 1 中管道壁厚, 选取壁厚为 7.0 mm ($D/t=50.8$)、4.4 mm ($D/t=80.8$) 和 12.0 mm ($D/t=29.6$) 3 种管道建立有限元模型求解后得到管道最大 Mises 应力应变与壁厚的关系曲线如图 6 所示, 管道最大位移量与壁厚的关系曲线如图 7 所示。由图 6、7 可以看出, 随着管壁厚度的增加, 管道最大等效应力和应变显著下降, 但管道最大位移量却几乎没有改

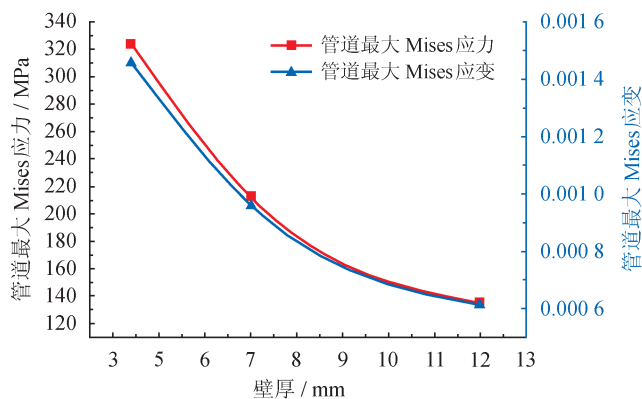


图 6 管道最大 Mises 应力应变随壁厚变化图

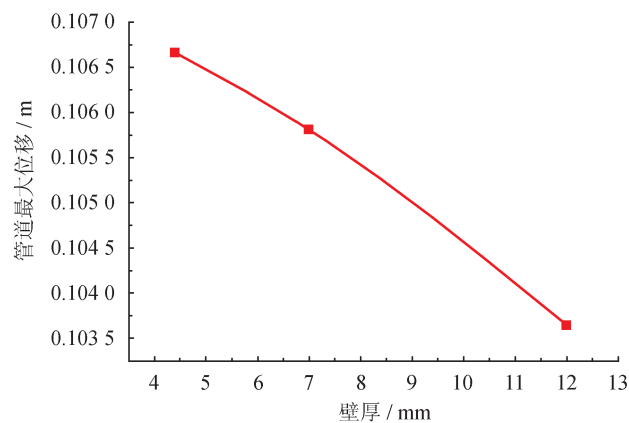


图 7 管道最大位移量随壁厚变化图

变, 仅下降几个毫米。究其原因, 当管壁厚度增加后, 在相同外径的条件下, 无论在管道环向还是轴向, 承受相同载荷的面积更大。因此管道所受的应力更小。对比 3 种工况的管道 Mises 应力云图, 其分布情况皆趋于一致, 即越靠近管道弯管处, 等效应力越大, 说明弯管处为应力危险截面处。综上所述, 增加壁厚可显著纵向滑坡地段降低管道失效的风险。

4.2.4 滑坡体土壤性质的影响

同样使用表 1 中的管道参数, 通过在 Drucker-Prager 模型中输入不同参数以模拟不同类型土壤的性质, 建立有限元模型进行非线性求解后, 土体参数和模拟结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 滑坡体土壤性质对于管道最大等效应力和应变的影响微乎其微, 这是因为管道与粉土和管道与黏土之间的摩擦系数相差不大。而管道最大位移量的差异, 则是由滑坡体土壤的密度差异造成的。黏土密度 ($2\ 110\text{ kg/m}^3$) 比粉土密度 ($1\ 900\text{ kg/m}^3$) 更大。因此管道覆土压力越大, 下沉的量也越大。

表 5 滑坡体土壤材料参数对管道应力应变及位移量的影响表

类型	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 /($^{\circ}$)	黏聚力 /kPa	管道最大 Mises 应力 /MPa	管道最大 Mises 应变	管道最大位移量 /m
粉土	11	0.42	1 900	32	10	213	0.000 964	0.094 877
黏土	13	0.35	2 110	22	20	212	0.000 961	0.119 395

5 横向穿越滑坡地段输气管道应力分析

5.1 无滑坡作用

5.1.1 ANSYS 软件分析结果

根据表 1、2，建立有限元模型进行非线性求解后得到其最大值为 150 MPa，出现在管壁内处，尚未达到管材屈服强度。

5.1.2 CAESAR II 软件分析结果

由软件输出的最大应力结果可以看出，最大 Mises 应力同样出现在弯管处，应力值为 171.2 MPa，远小于 X70 钢的最小屈服强度 485 MPa。

5.1.3 两种软件分析结果对比

CAESAR II 计算得出的应力、应变值均大于 ANSYS 的计算值，与输气管道纵向穿越滑坡地段一致。因此，后续的应力影响因素分析中也采用 ANSYS 进行计算。

5.2 滑坡作用下应力分析

与纵向滑坡相比较，管线在横向滑坡作用下受到土体的作用力更大。因为当滑坡方向垂直于管道轴向时，管道主要承受滑坡体对其施加的巨大推力和滑坡体侧端面对其施加的剪力。倘若滑坡较为剧烈，管线则很有可能发生局部屈曲变形甚至断裂。使用 ANSYS 软件模拟纵向滑坡作用下埋地管道的响应，考察不同变量因素对管道应力的影响，主要参数包括：①滑坡体的位移量；②内压；③管材；④埋深。

5.2.1 滑坡体位移量的影响

选择表 1 中的管道横向敷设，滑坡地段土体材料参数同表 4，求解后得到滑坡体位移量与管线等效应力和应变峰值之间的关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出，随着滑坡体位移量的增加，管道最大 Mises 应力应变都呈近似线性上升趋势。但这说明滑坡越剧烈，土体对管道施加组合载荷越大，所以管道的应力应变随之增大。但当滑坡体位移量达到一定程度后，管道最大等效应力不再增加，甚至有下降

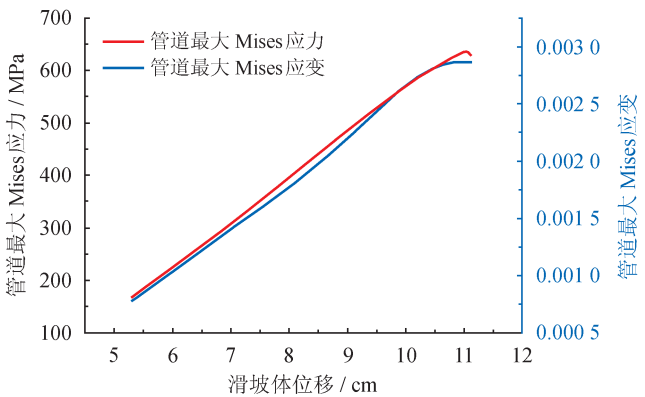


图 8 管道最大 Mises 应力应变随滑坡体位移量变化图

的趋势；最大等效应变同样不再增加，保持平稳水平，几乎不变。此现象说明滑坡作用时管道所受的载荷并不一定是持续增加的，有可能因产生临空面等原因，导致管道一部分与滑坡体之间没有接触，所以载荷反而下降。至于应变，当管道发生塑性变形后，即使载荷撤去，但总应变波动范围很小。

5.2.2 内压的影响

同样选择表 1 中的管道，改变管道内压，设定管道内压分别为 6 MPa、8 MPa 和 10 MPa，土体材料参数同表 4。求解后得到管道最大 Mises 应力应变和位移与内压的关系曲线分别如图 9、10 所示。由图 9、10 可以看出，管道最大等效应力应变随内压的增加呈起伏变化趋势。当内压小于 8 MPa 时，管道承受的等效应力逐渐增大；当内压大于 8 MPa 时，等效

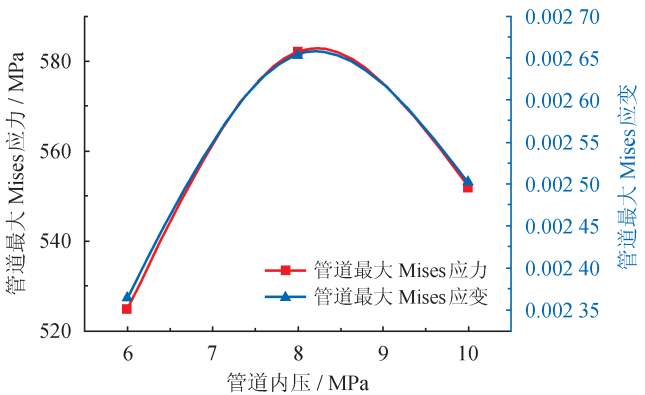


图 9 管道最大 Mises 应力应变随内压变化图

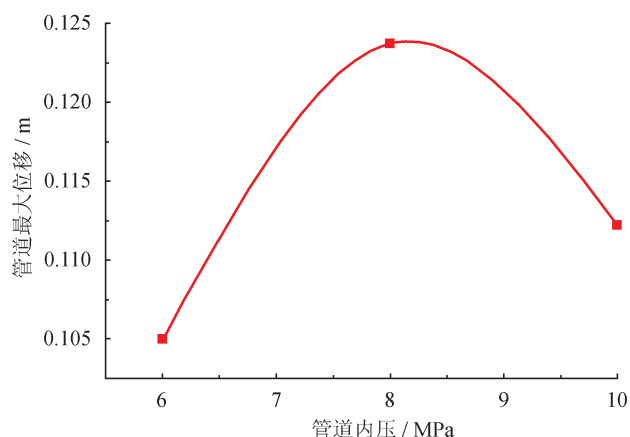


图 10 管道最大位移随内压变化图

应力又有明显的下降趋势。这说明管道的内压有可能会影响滑坡体对管道施加的载荷的大小, 内压载荷和土体对管道施加的载荷构成的组合载荷并非简单叠加。

5.2.3 管材的影响

在计算滑坡作用下埋地钢管的反应时, 管道的应力应变状态分成弹性状态、弹塑性状态和塑性状态。改变表 1 中的钢号, 选用 X65、X60 两种钢材型号的管道, 管道材料参数如表 6 所示, 土体材料参数同表 4。求解后得到管道最大 Mises 总应变与钢材的关系如图 11 所示。由图 11 可以看出, 当滑坡体位移量相同时, X60 钢的 Mises 总应变峰值始终大于 X65 钢。虽然《输油(气)埋地钢质管道抗震设计规范》所给出的 X60 钢和 X65 钢的弹性段弹性模量 E_1 值为 210 GPa, 但是在 ANSYS 建模过程中, 管材采用多线性塑性材料模型, 软件要求输入的弹性模量值必须为 $E_1 = \sigma_1 / \varepsilon_1$, 否则无法求解。X65 钢比 X60 钢的 E_1 值稍大。因此管道应变峰值更小。综上所述, 为防止管道在滑坡的作用下发生塑性变形, 应当使用最小屈服强度较大的钢材, 如 X70 钢。

表 6 钢材性能和容许拉伸应变表

钢号	弹性区			弹塑性区			密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
	应变 ε_1	弹性模量 E_1/MPa	应力 σ_1/MPa	应变 ε_2	弹性模量 E_2/MPa	应力 σ_2/MPa		
X65	0.002 4	2.1×10^5	496	0.04	1 808	564	7 850	0.3
X60	0.002 4	2.1×10^5	465	0.04	1 356	516	7 850	0.3

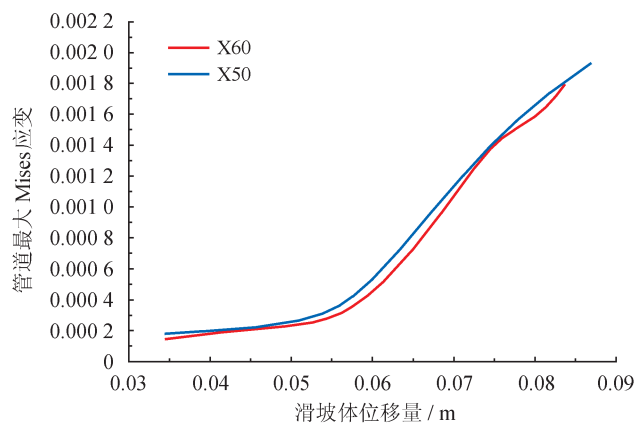


图 11 管材对最大 Mises 应变的影响图

5.2.4 埋深的影响

为分析不同管道埋深对横向滑坡作用下埋地管道反应的影响, 改变表 1 中管道埋深, 管道埋深分别为 1.0 m、1.5 m 和 1.8 m (至管道中心处), 土体材料参数同表 4。建立有限元模型进行求解后, 绘制的管道最大 Mises 应力应变与埋深的关系曲线如图 12 所示。由图 12 可以看出, 随着埋深的增加, 埋地管道的等效应力和应变呈现一种逐渐增大的现象。究

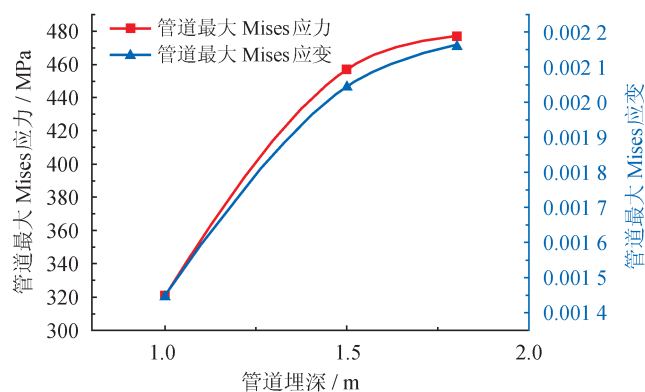


图 12 管道最大 Mises 应力应变随埋深变化图

其原因, 埋深越大, 作用在管道上的覆土压力和摩擦力越大, 因而管道受到的应力更大。故工程中建议使用浅埋方式穿越滑坡多发地段和古滑坡区。

6 结论

1) 在滑坡地段输气管道应力计算中, CAESAR II 的计算结果趋于保守, 而 ANSYS 软件处理非线性问题更准确。

2) 纵向滑坡作用下, 管线的最大等效应力应变和位移量均出现在弯管处, 说明弯管是应力危险截面, 但一般尚未达到屈服应力, 没有发生塑性变形; 滑坡体位移量越大, 即滑坡越剧烈, 管道承受的应力越大, 失效的可能性增加; 纵向滑坡地段宜敷设小口径的管道, 且增加壁厚可显著降低管道应力应变峰值, 所以径厚比 D/t 偏小时, 管道安全稳定性越好; 滑坡体土壤与管道之间的摩擦系数对管道受力起决定性作用, 覆土压力越大, 管道下沉的量也越大。

3) 相对于纵向滑坡, 横向滑坡则要危险得多, 很可能造成管线的局部屈曲变形甚至拉伸断裂; 横向滑坡作用时管道所受的载荷并不一定是持续增加的, 有可能因产生临空面等原因, 导致管道一部分与滑坡体之间没有接触, 所以载荷反而下降; 内压对管道应力的影响呈近似抛物线型, 在 8 MPa 时达到峰值, 并有可能影响滑坡体对管道施加的载荷大小; 管道埋深越大, 作用在管道上的覆土压力和摩擦力越大, 因而管道所受应力更大, 工程中建议使用浅埋方式穿越滑坡多发地段和古滑坡区。

参 考 文 献

- [1] 梁政. 滑坡地区管线应力和位移的分析[J]. 天然气工业, 1991, 11(3): 55-59.
Liang Zheng. Analyses of pipeline stress and displacement at landslide-prone areas[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(3): 55-59.
- [2] Liu Bing, Wu Zhangzhong, Liu JX & Zhang Hong. The strain-based design of buried pipeline subjected to landslides[C]//Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 25-28 May 2011, Corfu, Greece.
- [3] Han Bing, Wang Zhiyin, Zhao Honglin, Jing Hong & Wu Zhangzhong. Strain-based design for buried pipelines subjected to landslides[J]. Petroleum Science, 2012, 9(2): 236-241.
- [4] 李华, 徐震, 杨永和, 陈小辉, 陈旭. 滑坡作用下的埋地管道强度失效分析[J]. 化工设备与管道, 2012, 49(6): 54-57.
Li Hua, Xu Zhen, Yang Yonghe, Chen Xiaohui & Chen Xu. Strength failure analysis of buried piping loaded with landslide[J]. Process Equipment & Piping, 2012, 49(6): 54-57.
- [5] 林冬, 雷宇, 许可方, 黄润秋, 朱勇, 罗敏, 等. 横向滑坡对管道的影响试验[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 728-732.
Lin Dong, Lei Yu, Xu Kefang, Huang Runqiu, Zhu Yong, Luo Min, et al. An experiment on the effect of a transverse landslide on pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 728-732.
- [6] He Lihong, Fujisawa N & Swain MV. Elastic modulus and stress-strain response of human enamel by nano-indentation[J]. Biomaterials, 2006, 27(24): 4388-4398.
- [7] 邓道明, 周新海, 申玉平. 横向滑坡过程中管道的内力和变形计算[J]. 油气储运, 1998, 17(7): 18-22.
Deng Daoming, Zhou Xinhai & Shen Yuping. Calculation of pipeline inner force and distortion during transverse landslide body[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(7): 18-22.
- [8] 谢强, 王雄, 张建华, 向鹏. 不同滑坡形式下埋地管的纵向受力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 505-510.
Xie Qiang, Wang Xiong, Zhang Jianhua & Xiang Peng. Longitudinal stress analysis of pipeline buried in two different forms of landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 505-510.
- [9] 郝建斌, 刘建平, 荆宏远, 张合印, 沈飞军, 佟昊林, 等. 横穿状态下滑坡对管道推力的计算[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1096-1097.
Hao Jianbin, Liu Jianping, Jing Hongyuan, Zhang Heyin, Shen Feijun, Tong Haolin, et al. A calculation of landslide thrust force to transverse pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1096-1097.
- [10] 郝婷玥, 陈贵清. 管道与土的相互作用[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(4): 237-239.
Hao Tingyue & Chen Guiqing. Interaction between pipe and soil[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, 13(4): 237-239.
- [11] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3282.
Kong Weixue, Rui Yongqin & Dong Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3278-3282.
- [12] 黄坤, 卢泓方, 吴世娟, 韩晓瑜, 蒋艺. 穿越滑坡体埋地输气管道应力分析[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 689-693.
Huang Kun, Lu Hongfang, Wu Shijuan, Han Xiaoyu & Jiang Yi. The stress analysis of buried gas pipeline crossing the landslide[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 689-693.
- [13] 吴晓南, 卢泓方, 黄坤, 汤晓勇, 吴世娟, 谌贵宇, 等. 基于频谱分析的地震带输气管道应力分析方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 152-157.
Wu Xiaonan, Lu Hongfang, Huang Kun, Tang Xiaoyong, Wu Shijuan, Chen Guiyu, et al. Stress analysis of gas pipelines at seismic belts based on the spectrum analysis[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 152-157.
- [14] 刘成清, 彭强, 赵世春. 膨胀弯管在管道柔性设计中的定性分析[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(1): 55-59.
Liu Chengqing, Peng Qiang & Zhao Shichun. Qualitative analysis of expansion bend in pipeline flexibility design[J]. Computer Aided Engineering, 2012, 21(1): 55-59.
- [15] 隋之锋. 输气管道特殊管段应力分析及安全性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
Sui Zhifeng. The stress analysis of special pipe section and safety study of the gas pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [16] 吴晓南, 舒浩纹, 咎林峰, 蒋喜, 胡道华, 谢箴. 试压工况下盾构隧道内输气管道应力分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(3): 73-77.
Wu Xiaonan, Shu Haowen, Zan Linfeng, Jiang Xi, Hu Daohua & Xie Zhen. Stress analysis of a gas pipeline through shield tunnels under pressure testing conditions[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3): 73-77.

(修改回稿日期 2016-11-01 编辑 何明)