

纵向滑坡作用对管道应力应变的影响研究

胡镁林

云南中石油昆仑燃气有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2023年5月6日; 录用日期: 2023年6月15日; 发布日期: 2023年6月26日

摘要

滑坡地质灾害易造成油气长输管道变形失效, 严重威胁管道的安全运营。为明确纵向滑坡作用对管道应力应变的影响, 通过实际地质勘测建立了管道分析模型, 进行了纵向滑坡作用下管道应力应变的数值模拟, 利用解析法进行检验, 确定了不同土壤剪切角时管道临界应力下纵向滑坡的长度与位移。分析发现: 管道轴向受压时两端均会出现一个褶皱, 应力集中在两端; 数值模拟与解析法计算出的垂直管道临界应力分别为481.7 MPa、446 MPa, 误差仅7.4%, 能够作为管段应力预警阈值的参考; 针对实际长输管道选取的5个危险点, 获得不同土壤剪切角下纵向滑坡长度和位移, 与分析结果一致, 可作为纵向滑坡预警阈值的科学参考。研究结果对纵向滑坡地质特征数据监测时滑坡长度与位移、管道应力阈值的设定具有重要意义。

关键词

纵向滑坡, 数值模拟, 解析法, 临界应力, 滑坡位移

Study on the Effect of Longitudinal Landslide on the Stress and Strain of Pipeline

Meilin Hu

Yunnan PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: May 6th, 2023; accepted: Jun. 15th, 2023; published: Jun. 26th, 2023

Abstract

Long-distance oil and gas pipelines are frequently deformed and break as a result of landslide geological disasters, gravely jeopardizing their ability to operate safely. An analytical model of the pipeline was developed by actual geological survey in order to better understand the impact of longitudinal landslides on the stress-strain of the pipeline. Numerical simulation of the pipeline's

stress-strain under the influence of longitudinal landslides was then performed, and the length and displacement of the longitudinal landslide under the critical stress of the pipeline at various soil shear angles were calculated using the analytical method. The analysis revealed that: when the pipe is axially stressed, a fold will form at both ends because the stress is concentrated at both ends; the critical stresses of the vertical pipe calculated by numerical simulation and analytical method are 481.7 MPa and 446 MPa, respectively, with an error of only 7.4%, which can be used as a benchmark for the stress warning threshold of the pipe section; Five risk points chosen for the actual long-distance pipeline were measured for the length and displacement of longitudinal landslides under various soil shear angles. These measurements are consistent with the analysis results and can be used as a scientific benchmark for the warning threshold of longitudinal landslides. The study's findings are crucial for determining the duration and displacement of landslides as well as pipeline stress thresholds during the ongoing monitoring of longitudinal landslide geological feature data.

Keywords

Longitudinal Landslide, Numerical Simulation, Analytical Method, Critical Stress, Landslide Displacement

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济发展对能源需求的不断提升,长距离管道成本低且效率高的特点,广泛应用于石油与天然气的输送[1] [2] [3]。受复杂地质条件的影响,敷设于地下的管道易受自然灾害的威胁,而滑坡作为主要的地质灾害之一,发生滑坡会导致管道的弯曲、变形,严重时会造成泄漏、爆炸,因此,滑坡成为管道安全运营的重大隐患,研究滑坡作用下管道的应力应变规律,对管道安全穿越滑坡地带具有重大意义[4] [5] [6]。

研究滑坡对管道的力学破坏主要从解析法与数值模拟法两个方面进行。Rajani 等[7]首次针对横向、纵向滑坡作用管道受力情况进行解析计算,求解了组合荷载对管道的力学响应,确定了荷载的每个分量引起的管道中的近似应力,但是在分析过程中未考虑管道与土的相互作用,导致计算误差较大。丛凯[8]对滑坡开展三维稳定分析,对确定的滑裂面计算其危险滑动方向,并用于确定最危险滑裂面与滑动方向,但与其他计算结果的比较上仍存在一定差异。吕泓霖等[9]讨论了关于滑坡稳定性的变形机制与影响因素,针对如何提高评价准确性、减少物理实验参数进行了分析,但对各个模型间的误差考虑较少。Cocchetti 等[10]采用非线性接触理论,考虑滑坡的几何形状、土壤和管道的机械特性以及施加的土壤位移剖面,研究了横向滑坡作用下不同滑坡位移量时管道的应力应变分布。尚玉杰[11]基于 Winkler 假设,建立了埋地管道在横向滑坡作用下管-土相互作用的力学模型,推导了滑坡作用下埋地管道的挠度、转角、弯矩和剪力的解析解。Zhang 等[12]推导了滑坡下管道行为的弹塑性模型,并提出了一种基于平面应力条件、考虑内压和温度变化的管道变形弹塑性半解析方法。另外,数值模拟也是研究滑坡作用下管道应力应变的重要方法。王健霖等[13]利用 FLAC-3D 软件,开展了三维整体滑坡稳定性分析,可以直观地判断滑坡位移变化状态,并准确掌握整体破坏模式及最大剪应变出现位置,但是并未对管道失效时的临界压力与弯矩荷载进行研究。张欣等[14]探讨得出应力场和渗流场相互作用机理,借助有限元软件 Abaqus 进行了滑

坡管道的流固耦合计算,对滑坡稳定性作了定量评价。韦垚飞等[15]模拟分析不同高度下滑坡的塑性区,探讨了应力-渗流耦合作用下滑坡体的稳定性。吴佳伦[16]基于 Geo-CA 和 GIS 着重研究滑坡滑动面从稳定到滑移这一微观动态变化过程。唐雅婷[17]针对岩质滑坡,在不平衡推力传递法中应用有限元的应力结果,计算出滑坡的稳定性系数及变形场、应力场,但是研究中并未对管道滑坡危险分析。Yi 等[18]利用极限平衡方法,研究天然状态及不利组合条件下滑坡安全系数和破坏概率。朱良峰等[19]在地理信息系统的基础上研究了不同地域下地质灾害风险分析系统,危险分析、易损分析和最终的风险评估被使用在全国范围内的滑坡灾害。然而,以上研究滑坡作用下的管道变形破坏特征都是基于简单的理想滑坡模型,而对真实滑坡作用下管道的变形破坏规律研究较少。

本文主要针对纵向滑坡作用对管道应力的数值模拟分析,并利用 Ramberg-Osgood 方程(以下简称 R-O)求解轴向应力应变的解析解,对比了纵向滑坡对垂直、倾斜管道的作用效果,明确了不同土壤剪切角下管道应力与应变和纵向滑坡位移的对应关系。模拟分析结果为实际管道应力预警阈值的设定提供参考。

2. 区域滑坡特征

通常情况下,管道安全运营重点关注管道本体所受应力情况,但由于管道沿线地质灾害的发生具有不确定及偶然性,仅仅监测管道本体应力状况不能够有效起到预警作用。根据目标危险点的实际勘测及地质灾害特征环境资料,本文针对常见的滑坡地质进行分析研究,开展特定类型滑坡作用对管道应力的数值模拟分析,并分析其对天然气管道应力的影响,明确管道临界应力状态下纵向滑坡长度与位移量,研究结果可为地质灾害监测预警系统的设计提供一定科学参考。

选取云南某支线输气管道的一处易发生滑坡的危险山体,管道沿顺坡敷设,如图 1 所示。自然灾害会造成滑坡体滑动,导致管道应力集中而发生断裂,根据滑坡体与管道走向一般将滑坡分为横向滑坡与纵向滑坡,横向滑坡时管道与滑坡方向垂直,管道主要受弯曲应力作用;纵向滑坡时管道与滑坡方向平行,管道两端会产生应力集中,管道一端受到压应力,另一端则受拉应力。通过对本管段所处位置的地形特点进行分析,发现此处山体滑坡方向与天然气管道的走向是平行的,确定区域的滑坡形式为纵向滑坡,因此本文主要研究纵向滑坡作用对管道应力应变的影响。

图 2 所示纵向滑坡模型,滑坡体在管线上部产生压应力,在管线下部产生拉应力,管道主要受到周围土壤摩擦力作用,拖拽管道向下移动,在坡顶处管道受拉伸作用明显,易形成拉应力集中区,当拉应力集中到一定程度上,管道将被拉断,在坡脚处管道受压缩作用明显,易形成压应力集中区,易发生管道屈曲破坏。



Figure 1. Panoramic view of the landslide area
图 1. 滑坡区域山体全貌

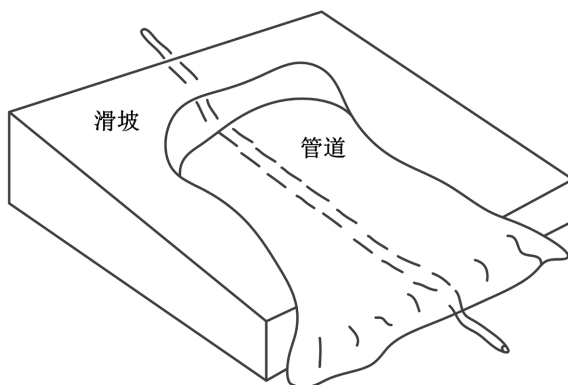


Figure 2. Longitudinal landslide model
图 2. 纵向滑坡模型

3. 纵向滑坡作用下管道应力响应

3.1. 垂直管道轴向压缩有限元数值模拟

3.1.1. 管道模型的建立

利用有限元软件对管道仿真轴向压缩模拟。根据现场管道为 L415 钢管，建立了单根管道模型，长度为 12 m，管径取 406.4 mm，形成一个空心状的圆柱壳体，管道详细参数如表 1 所示。另外，在管道两端创建了 2 个相同的方形平板，平板选用三维离散刚体，需要指定一个平板中心的参考点，所有的边界条件和载荷都施加在这个参考点上，建模单根管道如图 3 所示。

Table 1. Physical and mechanical parameters of pipeline steel

表 1. 管道钢材物理力学参数

管材	密度/kg/m ³	管径/mm	壁厚/mm	弹性模量/GPa	泊松比	最低屈服强度/MPa
L415	7.85	406.4	6.3	210	0.3	415

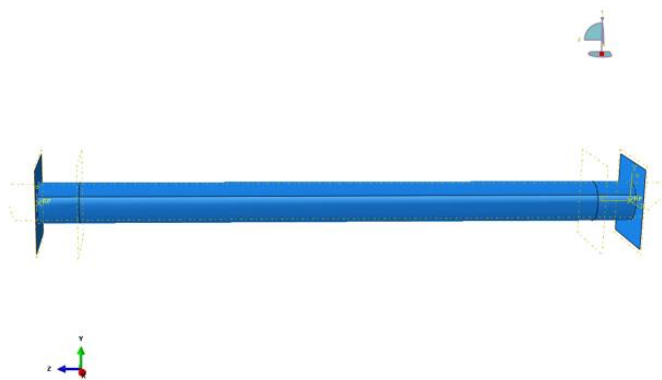


Figure 3. Pipeline model
图 3. 管道建模

3.1.2. 模型网格划分与无关性验证

对建立的 L415 管道模型进行结构化网格划分，设置全局网格尺寸为 80，并对两端受力集中点进行局部网格加密，网格划分结果如图 4 所示。

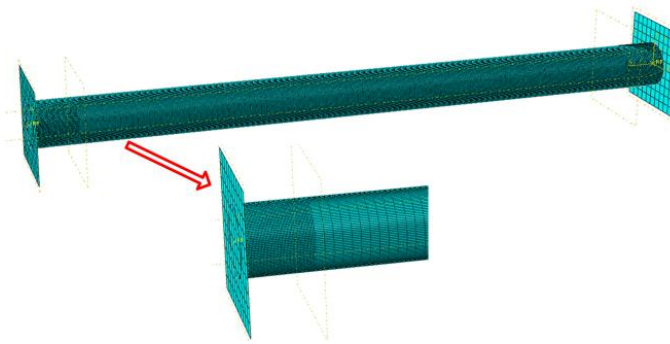


Figure 4. Pipeline model meshing
图 4. 管道模型网格划分

为了平衡网格数量对计算量与计算精度的影响，开展网格无关性检验，3种划分结果网格数分别为4343个、6120个、8210个，分别进行管道受轴向应力压缩数值模拟，统计了不同网格数下最大Mises应力值，如表2所示。模拟结果表明：划分不同网格数，最大Mises应力值基本相同，因此选用两端网格加密尺寸为8210、6120个网格数进行下一步研究。

Table 2. Physical and mechanical parameters of pipeline steel
表 2. 管道钢材物理力学参数

网格数	最大Mises应力/MPa
8210	485.01
6120	485.02
4343	485.01

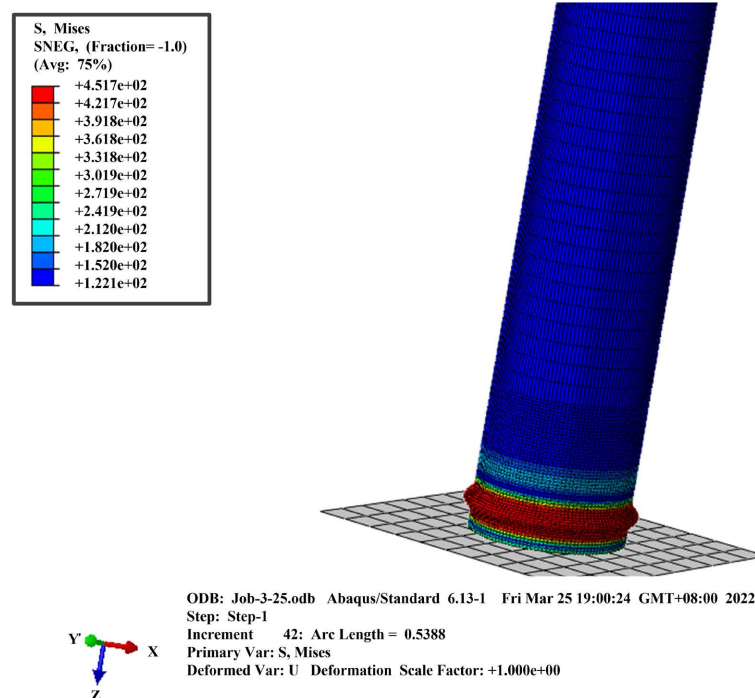


Figure 5. Mises stress contour of vertical pipe
图 5. 垂直管道 Mises 应力云图

3.1.3. 垂直管道应力响应模拟结果

垂直管道轴向压缩数值模拟，管道 Mises 应力云图如图 5 所示，设置 Z 轴正方向的轴向应力，管道两端均出现了两个褶皱，得到了临界压应力为 481.7 MPa。

3.2. 解析法管道应力计算

研究纵向滑坡地质对管道的应力作用，可利用适用于筒形件应力应变关系的 R-O 模型[20]方程进行分析，R-O 方程一般表达式为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\alpha\sigma_o}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^N \quad (1)$$

临界压应力：

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_o} = -\frac{1}{2\alpha} \left(1 + \frac{1}{N} \right) + \frac{4}{3\alpha\sqrt{N}} \frac{E}{\sigma_o} \frac{t}{D} \quad (2)$$

临界压应变：

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{E} + \frac{\alpha\sigma_o}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_o} \right)^N = \frac{\sigma_o}{E} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_o} + \frac{\alpha\sigma_o}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_o} \right)^N \quad (3)$$

式中： E 是杨氏模量，MPa； σ_{cr} 是临界压缩应力，MPa； ε_{cr} 是临界压缩应变，%； t 为管道壁厚，mm； D 为管道直径，mm； α 、 σ_o 、 N 为 R-O 模型参数。

参照《油气输送管道线路工程抗震技术规范》可得 L415 钢管， $E = 210,000$ MPa、 $\alpha = 1.403$ 、 $\sigma_o = 437$ 、 $N = 15.85$ 、 $t = 6.3$ mm、 $D = 406.4$ mm，代入临界压应力方程(2)中，计算得到临界压应力 $\sigma_{cr} = 446$ MPa。

对比有限元数值模拟方法与解析法计算得到的轴向压缩临界应力大小分别为 481.7 MPa、446 MPa，两种方法的误差仅为 7.4%，表明有限元数值模拟方法结果可靠，能够有效预测管道临界压应力。

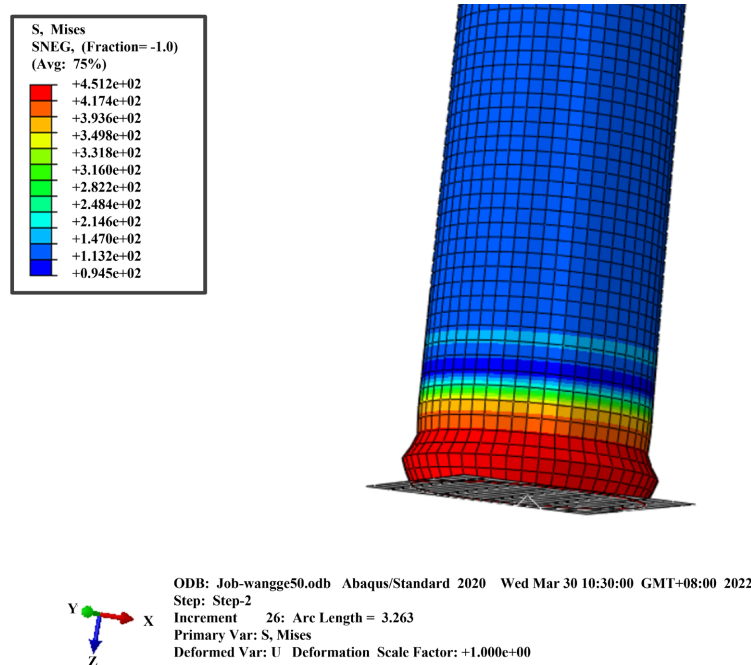


Figure 6. Mises stress contour of inclined pipe (30°)
图 6. 倾斜管道 Mises 应力云图(30°)

3.3. 倾斜管道轴向压缩有限元数值模拟

基于垂直管道有限元数值模拟结果与解析法结果的可靠性,进一步建立纵向滑坡倾斜管道模型,开展了模拟坡度为 30° 时管道受轴向压缩数值模拟,值得注意的是,管道以 30° 倾斜放置时,需要考虑重力分量的作用,模拟结果如图6所示。

从倾斜管道的数值模拟结果可以看出,管道 Mises 应力云图与垂直管道相似,同样在管道的端部有1个褶皱,得到临界应力大小为485 MPa,与垂直管道数值模拟结果接近。

利用解析法对临界压应力和应变进行验证,证明了解析法能准确的预测管道的临界压缩应力。

4. 基于 R-O 模型的管道应力 - 应变分析

4.1. 管道轴向失效标准理论

4.1.1. 管道轴向压缩应力分析

管道轴向压缩应力分析参照 GB 50251-2015《输气管道工程设计规范》:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2\delta} \quad (4)$$

$$\sigma_L = \mu\sigma_H + E\alpha(t_1 - t_2) \quad (5)$$

式中, P 为管道设计内压力,MPa; D 为管道外径,mm; δ 为管道壁厚,mm; μ 为泊松比,0.3; E 是钢管弹性模量,MPa(可取 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa); α 为钢材的线膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; σ_H 为内压产生的管道环向应力,MPa; σ_L 为管道的轴向应力,拉应力为正,压应力为负,MPa; t_1 为管道敷设时的温度, $^\circ\text{C}$; t_2 为管道的工作温度, $^\circ\text{C}$;由于输气管道运行一段时间,此处按照 $t_1 = t_2$ 计算。

埋地管道的轴向应力失效标准为:轴向应力应小于管材最小屈服强度的90%,即 $\sigma_H - \sigma_L \leq 0.9\sigma_s$,由于管道的总轴向应力是内压产生的轴向应力和滑坡产生的轴向应力,即:

$$\sigma_L = \mu\sigma_H + E\alpha(t_1 - t_2) + \sigma_{C_{\max}} \quad (6)$$

$$\sigma_H - \sigma_L = \sigma_H - (\mu\sigma_H + \sigma_{C_{\max}}) \leq 0.9\sigma_s \quad (7)$$

式中, σ_s 为管材标准规定的最小屈服强度,MPa; $\sigma_{C_{\max}}$ 为滑坡发生后,滑坡对管道产生的压缩应力,MPa。

$$\sigma_{C_{\max}} = 0.7\sigma_H - 0.9\sigma_s \quad (8)$$

4.1.2. 管道轴向拉伸应力分析

管道轴向拉伸应力分析同样依据 GB 50251-2015《输气管道工程设计规范》:

$$\sigma_{\text{拉}} = 0.9\sigma_s - 0.3\sigma_H \quad (9)$$

根据 GB 50470-2017《油气输送管道线路工程抗震技术规范》Ramberg-Osgood 方程,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{n_1 - 1} \quad (10)$$

式中, α 为屈服偏移量,L415 钢材可取 1.403; n_1 为强化指数,L415 钢材取 15.85。

在土壤作用下,应力可用土壤参数表示为:

$$\sigma = \frac{f_m L}{2\pi D \delta} = \frac{\beta_p L}{2} \quad (11)$$

可用滑坡面的位移和长度来表示应力应变，一般分为两种情况：第一种为滑坡位移 δ_{cr} 不可控，管道应变由滑坡长度 L 控制；第二种为滑坡长度 L 不可控或较大，管道应变由 δ_{cr} 控制。

第一种：

$$\varepsilon = \frac{\beta_p L_{cr}}{2E} + \left[1 + \left(\frac{n}{1+r} \right) \left(\frac{\beta_p L_e}{\sigma_s} \right)^r \right] \tag{12}$$

第二种：

$$\varepsilon = \frac{\beta_p L_e}{E} + \left[1 + \left(\frac{n}{1+r} \right) \left(\frac{\beta_p L_e}{\sigma_s} \right)^r \right] \tag{13}$$

$$\delta_{cr} = \frac{\beta_p L_e}{E} + \left[\left[1 + \left(\frac{n}{1+r} \right) \left(\frac{2}{r+2} \right) \left(\frac{\beta_p L_e}{\sigma_s} \right)^r \right] \right] \tag{14}$$

式中， r 为强化指数，L415 钢材取 14.85。 β_p 是土壤参数； L_{cr} 是允许的最大滑坡长度，m，当滑坡位移不受控制或无法监测时，一般认为是连续滑坡； L_e 是允许的滑坡长度，m； δ_{cr} 是允许的最大滑坡位移，m，当滑坡长度不受控制或无法监测时，可以视为无限长。

β_p 由以下公式决定：

$$\beta_p = \frac{\mu\gamma H}{\delta} \tag{15}$$

对于回填土来说， $\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^3$ ； μ 是土壤剪切角，°； H 是管道埋深，m。

4.2. 管道失效特征判断

选取研究区域一段管道进行分析，总共包括 5 个危险点，如图 7 所示。5 个危险点中，位于管道顶端 (2、5) 和底端 (1、3、4) 容易形成应力集中区，应力集中会导致管道出现塑性变形，进而发生屈曲破坏。

对 5 个危险点进行定性分析：点 1、3、4 为轴向压缩失效，2、5 为轴向拉伸失效。5 个危险点的埋深如表 3 所示。

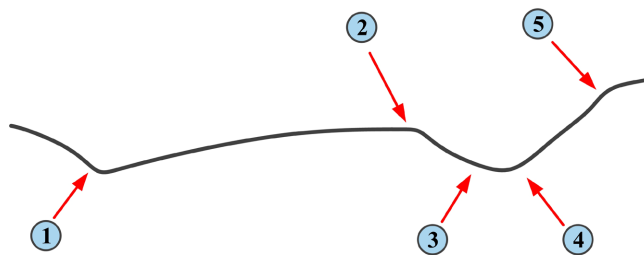


Figure 7. Selection of hazard points
图 7. 危险点的选取

Table 3. Physical and mechanical parameters of pipeline steel
表 3. 危险点埋深

危险点	1	2	3	4	5
埋深/m	4.59	4.47	4.47	4.75	4.75

计算 5 个危险点应力 - 应变与滑坡位移的对应关系，考虑最高管道内压 6.3 MPa、实际管道内压 4.0

MPa, 进行考虑对比 2 个不同的土壤剪切角(0.5、0.9), 最后判断了危险点的管道失效特征, 结果如表 4 所示。

将管道各物理力学参数、土壤剪切参数以及 R-O 模型参数代入公式(4)~(15), 计算允许最大滑坡长度 L_{cr} 与滑坡位移 δ_{cr} , 计算结果表明: 允许最大滑坡长度 L_{cr} 、滑坡位移 δ_{cr} 与土壤的剪切角度、管道内压力均成反比, 在土壤剪切角度较大时, 适当降低管道运行压力, 能够降低滑坡作用对管道安全性的威胁; 另外, 解析法计算判断了 5 个危险点的滑坡特征, 与定性分析结果一致。通过计算得到了一定管道运行压力下不同土壤剪切角下管道应力与应变和滑坡位移的量化对应数据, 为管道滑坡预警阈值的设定提供科学的数据参考。

Table 4. Pipeline failure feature judgment

表 4. 管道失效特征判断

剪切角度 $\mu/^\circ$	危险点	6.3 MPa		4.0 MPa		分析结果
		L_{cr}/m	δ_{cr}/m	L_{cr}/m	δ_{cr}/m	
0.5	1	73.65340	0.0405375	90.22523	0.0608644	压缩失效
	2	88.855798	0.0575381	100.96215	0.0744162	拉伸失效
	3	75.54293	0.0415765	92.53991	0.0624244	压缩失效
	4	71.27448	0.0392284	87.31106	0.0588988	压缩失效
	5	83.833746	0.0542867	95.25586	0.0702110	拉伸失效
0.9	1	51.506009	0.0283481	63.094735	0.0425627	压缩失效
	2	62.137426	0.0402371	70.603475	0.0520402	拉伸失效
	3	52.828518	0.0290759	64.714805	0.0436556	压缩失效
	4	49.841803	0.0274319	61.056086	0.0411871	压缩失效
	5	58.624420	0.0379620	66.611834	0.0490977	拉伸失效

5. 结论与建议

目前关于地质灾害建模的研究成果很多, 但是地质灾害发生并不一定会引起管道本体应力超载, 地质灾害对管道本体的力学响应特征须结合实际地质灾害地形地貌特点、管道展布形态等才能有效指导实际应用。本文结合云南某支线管道纵向滑坡特征开展研究, 得到如下结论与建议:

结论:

1) 通过数值模拟垂直管道临界应力是 481.7 MPa, 解析法计算得到临界应力为 446 MPa, 结果误差仅 7.4%, 证明数值模拟方法得到的临界应力可靠, 可用于实际纵向滑坡地质灾害作用下管道应力的分析。

2) 管道在轴向受压时, 无论管材是垂直还是倾斜, 管道两端均会出现应力集中点, 底端为压缩损伤, 顶端为拉伸损伤, Mises 应力云图表现为两端均出现褶皱。

3) 纵向滑坡作用时, 土壤剪切角、管道实际运行压力越小, 允许最大滑坡长度与滑坡位移越大。对 5 个危险点进行滑坡失效特征判断结果与定性分析结果一致, 可为纵向滑坡长度与位移预警阈值的设定提供参考。

建议:

本文通过数值模拟法与解析法确定管道应力、应变的阈值, 但由于实际地质条件复杂, 在实际工程应用中会产生一定的误差, 因此, 还需要进行大量的现场实践, 提高实际应用中的准确性。

支持项目

校企合作项目《燃气支线管道重点监测段的管道应力分析和监测研究》(KKX0201905023)。

参考文献

- [1] 刘汉强. 油气长输管道事故风险研判与应急响应机制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- [2] Hong, B.Y., Shao, B.W., Guo, J., *et al.* (2023) Dynamic Bayesian Network Risk Probability Evolution for Third-Party Damage of Natural Gas Pipelines. *Applied Energy*, **333**, Article ID: 120620. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120620>
- [3] Kraidi, L., Shah, R., Matipa, W. and Borthwick, F. (2021) An Investigation of Mitigating the Safety and Security Risks Allied with Oil and Gas Pipeline Projects. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, **1**, 349-359. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.08.002>
- [4] 唐俊杰, 樊晓一, 姜元俊. 滑坡对纵向埋地管道的变形特征与减灾对策[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4307-4312.
- [5] 王东源, 杨建, 谭秋霞. EPS 块用于缓解滑坡区油气管道应变效果研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 76-82.
- [6] Taiwo, R., Shaban, I.A. and Zayed, T. (2023) Development of Sustainable Water Infrastructure: A Proper Understanding of Water Pipe Failure. *Journal of Cleaner Production*, **398**, Article ID: 136653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136653>
- [7] Rajani, B.B., Robertson, P.K. and Morgenstern, N.R. (1995) Simplified Design Methods for Pipelines Subject to Transverse and Longitudinal Soil Movements. *Canadian Geotechnical Journal*, **32**, 309-323. <https://doi.org/10.1139/t95-032>
- [8] 丛凯, 马宗源, 李瑞冬. 立节北山滑坡地震稳定性及破坏过程三维有限元分析[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 283-291.
- [9] 吕泓霖, 宋琨, 董志鸿, 等. 强降雨诱发平缓滑坡复活变形与稳定性演化分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 32-36.
- [10] Cocchetti, G., di Prisco, C., Galli, A. and Nova, R. (2009) Soil—Pipeline Interaction along Unstable Slopes: A Coupled Three-Dimensional Approach. Part 1: Theoretical Formulation. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**, 1289-1304. <https://doi.org/10.1139/T09-028>
- [11] 尚玉杰, 王殿龙, 闫生栋, 等. 横向滑坡作用下埋地管道力学响应分析[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(1): 155-161.
- [12] Zhang, L.S., Xie, Y., Yan, X.Z. and Yang, X.J. (2016) An Elastoplastic Semi-Analytical Method to Analyze the Plastic Mechanical Behavior of Buried Pipelines under Landslides Considering Operating Loads. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **28**, 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.040>
- [13] 王健霖. 高密度电法与FLAC3D数值模拟在滑坡稳定性分析中应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [14] 张欣. 小江断裂中北段活动性及其致灾效应研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [15] 韦壺飞. 地下水对滑坡稳定性的影响分析[J]. 低碳世界, 2017(12): 74-75.
- [16] 吴佳伦. 基于 Geo-Studio 对防洪堤的边坡稳定性分析[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(4): 77-80.
- [17] 唐雅婷, 谭杰, 李长冬, 等. 基于模型试验的动水驱动型顺层岩质滑坡启滑机制初探[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 137-148.
- [18] Tang, Y., Xie, L.L., Chen, Y.F., *et al.* (2023) Automatic Recognition of Slide Mass and Inversion Analysis of Landslide Based on Discrete Element Method. *Computers & Geosciences*, **176**, Article ID: 105338. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105338>
- [19] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. GIS 支持下的地质灾害风险分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(5): 42-45.
- [20] 梁玉秀, 樊文欣, 李涛. 基于 R-O 模型的强力旋压成形本构关系研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 181-183.