

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231027001

基于原位监测与数值模拟方法的斜坡稳定性与管道失效风险评估*

王兴鲁¹, 向斌¹, 胡益铭¹, 王仁超²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 斜坡移动对埋地油气管道的结构完整性产生威胁, 为了降低管道拉伸破坏发生灾害的概率, 需要对管道的安全性进行定量评估。尽管在管道斜坡灾害的调查和预防中取得有益的成果, 但只是对于斜坡灾害提出发生概率的大小, 并没有对灾害发生提出准确预测。本研究基于云南输油管道YC027-35边坡案例, 采用ABAQUS结合数字高程数据与现场勘察的岩土体信息, 建立管道和土壤非线性接触的三维有限元模型, 在降雨工况下分析管道的拉应力、应变响应, 并利用有限元强度折减法分析斜坡稳定性, 结合危险性判别因子对斜坡稳定性做出评价, 最后基于管道应变失效准则并结合现场原位监测对管道失效风险做出评估。结果表明, 在降雨荷载下, 斜坡稳定性系数为 $F_r=1.02$, 处于欠稳定状态, 与综合指标数值分析法结果一致; 当斜坡滑动位移0.4 m时, 管道拉应力达到屈服应力, 当斜坡滑动位移为0.75 m时, 管道应变值达到容许拉应变1%, 此时管道失效。管道在斜坡作用下的应力先到达极限值, 其次才发生应变屈服。本文所采用的原位监测结合有限元数值模拟的方法, 能够对斜坡稳定性和管道失效定量分析, 该研究为管道的防治提供科学依据。

关键词: 管道; 斜坡; 原位监测; 数值模拟; 强度折减法; 失效评估

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0652-12

Assessment of Slope Stability and Pipeline Failure Risk Based on In-situ Monitoring and Numerical Simulation Methods

WANG Xinglu¹, XIANG Bin¹, HU Yiming¹, WANG Renchao²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Slope movement poses a threat to the structural integrity of buried oil and gas pipelines. In order to reduce the probability of catastrophic failure due to pipeline tensile damage, it is necessary to conduct quantitative assessments of pipeline safety. Although useful progress has been made in the investigation and prevention of pipeline slope disasters, current studies mainly estimate the probability of occurrence without accurately predicting the actual failure. This study was based on the slope along the YC027-35 oil pipeline in Yunnan Province. A three-dimensional finite element model of nonlinear

* 收稿日期:2023-10-27;修回日期:2025-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A2008)、国家自然科学基金项目(42120104002)资助

作者简介:王兴鲁(1997—),男,硕士研究生。主要从事边坡稳定性分析研究。E-mail:wxl@my.swjtu.edu.cn

通信作者:王仁超(1989—),男,讲师,博士。主要从事山地灾害综合防治技术研究。

E-mail:SupermanWang@uestc.edu.cn

contact between pipeline and soil was established using ABAQUS, combined with digital elevation data and geotechnical information obtained from field investigation. Under rainfall conditions, the tensile stress and strain responses of the pipeline were analyzed. The strength reduction method was used to analyze slope stability, which was further assessed using a hazard identification factor. The pipeline failure risk was then evaluated based on the pipeline strain failure criterion combined with in-situ monitoring. The results indicated that under rainfall loading, the slope stability coefficient was $Fr = 1.02$, indicating an unstable state, which was consistent with the comprehensive index numerical analysis method. When the slope movement reached 0.4 m, the pipeline tensile stress reached the yield stress. When the slope movement increased to 0.75 m, the pipeline strain reached the allowable tensile strain of 1%, indicating the onset of failure. The pipeline stress reached its limit under slope movement, followed by strain yielding. The method of in-situ monitoring combined with finite element numerical simulation adopted in this paper can quantitatively analyze the slope stability and pipeline failure. This study provides a scientific basis for the prevention and mitigation of pipeline-related slope hazards.

Keywords: pipeline; slope; in-situ monitoring; numerical simulation; strength reduction method; failure assessment

0 引言

随着全球能源需求增长,全球管道总长 202 万公里,中国长距离油气管道 18 万公里,成为油气输送的主渠道。中国 70% 以上油气管道位于山区,管道不可避免的穿越复杂地质区域,如地质复杂的西南部^[1-3]。滑坡是我国西南省份山区常见的地质灾害,由于地质条件、自然环境等常导致岩土体失稳破坏^[4-5]。滑坡通常与会引起管道过度塑性变形,管道上的高应力与应变最终导致局部屈曲或褶皱,从而发生油气泄漏^[6]。2016 年川气东送宜昌段,由于强降雨冲刷导致滑坡发生,2018 年中石油天然气管道贵州段发生山体滑坡,两者都导致管道断裂泄露引发爆炸,造成经济财产损失^[7]。近年来管道遭受滑坡灾害的风险逐渐增大,为了降低管道灾害发生的概率,需要做出边坡危害的预测以及管道的失效评估^[8]。

目前对于管道地质灾害的风险分析评估大多依赖于现场调查与监测。通过沉降位移监测、对斜坡运动速度、水平位移速率的监测能够确定山坡移动幅度^[9-11]。杨晓蔚等^[12]采用光频域分布式光纤传感技术监测管道竖向应变与变形量,解释不连续管道的变形规律;刘绪都等^[13]提出分布式应变监测,实时监测悬空管道的应力。近年来利用无人机摄影技术对地面监测的方法逐渐发展,可以快速准确的获取输油管道的多相位高分辨率、高精度数字正

射影像图和地形图,识别出地形的变化特征^[14]。原位监测虽然能够实时记录坡体位移、倾角变化等滑坡发生时的相关参数,有助于管道周围地质灾害监测预警与风险评估,但是无法识别诱发坡体位移的相关因素,如坡体下滑力、管内油压的影响,仅通过现场监测不能全面预测管道的行为,尤其是局部屈曲和横截面变形^[15-17]。

随着数值模拟的发展,采用有限元可以更好的对埋地管道力学响应进一步分析,通过建立数值模型考虑在管-土三相作用力的作用下,提出管道基于应力应变强度设计准则的方式,并且能够基于管道的极限应力破坏标准提出管道的破坏临界值^[18-19]。徐建等^[20]基于极限分析设计准则,采用有限元法分析了滑坡荷载对管道裂纹的影响;王涛等^[21]利用 SPH-FEM 耦合算法建立管-土和桩-土耦合模型,得出管道受力特征并以此确定设置抗滑桩的抗滑方案;P. Xu 等^[22]根据提出的失效标准,使用弹塑性有限元分析计算了有缺陷管道的破坏压力。丁鸿超等^[23]基于有限单元法与光滑粒子流体动力学多场耦合模型,研究了管道的压应力和整体位移分布。A. Vasseghi 等^[24]对穿越滑坡管道破裂风险研究表明,管道弯曲区域的局部高剪应力导致管道断裂。当前许多研究对管道受压破坏进行分析,而忽略了管道的拉伸破坏与剪切破坏。

因此亟需通过对斜坡稳定性状态的分析做出对管道受拉破坏的安全性评估。本文基于云南昆东管道监测区,通过有限元数值模拟,采用管-土

作用的非线性接触模型同时结合原位监测数据,对坡体的稳定性进行评估,并基于管道应变失效准则定量分析管道失效时临界参数。研究结果可为输油管道滑坡区域的管道失效风险评估和危害预防提供科学支持。

1 研究区概况

1.1 工程地质条件

研究涉及管段为西南成品油管道工程昆东站,研究区位于云南省昆明市五华区的昆东支线YC027-35。云南成品油管道“三千一支”于2017年成功建成投产,2021年由于强降雨的原因以及人类活动,该区域开始出现裂缝,存在蠕滑迹象。场地整体上为南高北低的单斜坡,地层主要为第四系全新统人工填土(Q4^{ml})、残坡积土(Q4^{el+dl}),下伏基岩为三叠系上统~侏罗系下统禄丰群(T3-J1^l)泥岩^[25-26]。地面高程为2 018~2 060 m,斜坡区整体坡度约20°~30°,长约50 m,宽约40 m,斜坡滑动方向为由南向北345°。斜坡体主要为粘土,为土质斜坡,强度较低,遇水极易软化,厚度约5 m。管道YC027-35点位于坡体中前部,输油管道在场地内由东向西敷设横向穿过坡体,监测区域内管道埋深1.8 m。

1.2 水文地质条件

该地区属北纬低纬度亚热带—高原山地季风气候,夏季雨量集中,且多大雨、暴雨,故易受洪涝灾害,全年降水量在时间分布上,明显分为干、湿两季。5~10月为雨季,降水量占全年的85%左右;11月至次年4月为干季,降水量仅占全年的15%左右。因此场地内及附近无其它地表水,主要的地表水为降雨时坡脚冲沟的汇水^[27-28]。

研究区地下水主要为第四系松散岩类孔隙水,岩类孔隙水主要储存于粉质粘土,受大气降雨补给,滑坡体物质以粘土为主要的,具有隔水性能,易饱水软化,增重滑坡体。滑坡体内地下水位动态变化差异大,水位高低悬殊,无统一完整有规律的地下水位线。滑坡地下水有其独特的运动规律,一般与区域地下水没有水力联系或联系较小,其原因主要是由滑坡的组成物质决定的^[29]。从地形分析,场地为南高北低的单面坡状,有一定的汇水面积,坡面汇水沿斜坡向场地北侧坡脚径流排泄,并沿粉质

粘土中的透水体(角砾)下渗,在坡体内形成临时性地下水,有一定的地下水储存条件。

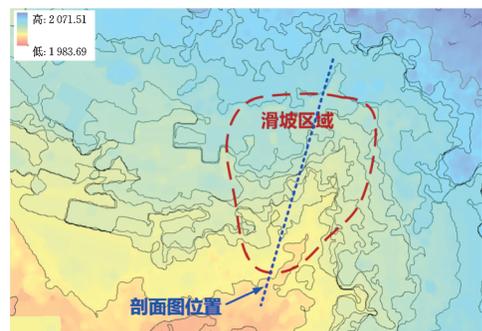
2 研究方法

2.1 原位监测

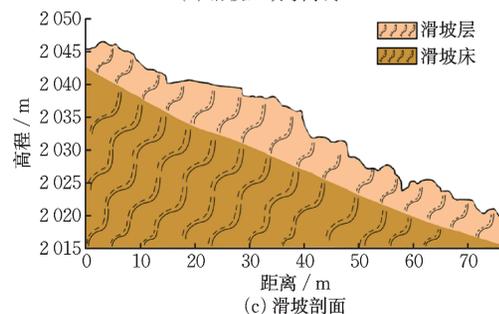
昆东滑坡监测系统包括雨量监测、位移监测以及孔压监测。如图1所示,监测场地为坡度约20°~30°不稳定滑坡,由于斜坡在降雨的影响下存在滑动的可能,在斜坡面上纵向布设拉线位移监测,位移计的一端安装在坡体上,另一端固定在滑坡顶部之外的稳定区;在滑坡体周边的稳定区安装翻斗式雨量计与孔隙水压传感器,分别对降雨量和孔隙水压力进行实时监测。各仪器参数如表1所示。



(a) 滑坡监测仪器布设



(b) 滑坡区域等高线



(c) 滑坡剖面

图1 滑坡位置及地形示意

Fig.1 Landslide location and topographic map

表1 监测仪器参数

Table 1 Parameters of monitoring instruments

| | 精度 | 分辨率 | 测量范围 | 工作温度/°C |
|----------|---------|----------------|--------------|---------|
| 雨量传感器 | ≤±0.3% | 0.2 mm | 0.1~4 mm/min | -20~75 |
| 位移传感器 | ±1 mm | 0.1 mm | 0~1 m | 0~70 |
| 孔隙水压力传感器 | 0.1%F.S | ≤0.05 kPa | 0.2 MPa | -25~60 |
| 测斜仪 | ±0.01° | 0.02 mm/500 mm | ±90° | -45~85 |

2.1.1 激发因素监测

(1) 降雨量监测

降雨对滑坡的作用影响大,雨水的大量下渗,导致斜坡上的土石层饱和,甚至在斜坡下部的隔水层上积水,从而增加了滑体的重量,降低土石层的抗剪强度,导致滑坡产生。采用一体化智能雨量监测站,能够对降雨进行实时监测,监测传感器每5 min上传一次雨量数据。

(2) 孔隙水压监测

孔隙水压力对岩土体变形和稳定性有很大影响,因此在饱和土层中进行地基处理和基础施工过程中以及研究斜坡稳定性等问题时,需要进行孔隙水压力的监测。孔隙水压计采用电压式的总线型孔隙水压计,为了减小对管道和边坡的影响,将孔压计埋深约为0.5 m。

2.1.2 坡体表面特征监测

(1) 地表位移监测

地表位移是斜坡稳定性的最直观的体现,对于降雨型滑坡需要对其位移进行实时监测,确保能够及时做出准确应急措施,因此滑坡位移精准预测对于灾害风险预警十分重要。位移监测传感器分别安装在滑坡三个不同方位,对滑坡的绝对位移以及相对位移进行监测。

(2) 倾角监测

坡体通常由多层土壤组成,其性质及物理结构有所不同,运动过程中速度也会不同,因此通过安装在不同深度的倾角可以监测坡体的运动特征。在无线网络获取各个传感器的数据后进行数据融合,可判断出滑坡的运动趋势。

2.2 管材本构关系

管道应力应变关系采用 Ramberg-Osgood 本构模型^[30],其本构方程的表达式为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

式中,ε为应变;σ为应力;σ₀为屈服应力;E为弹性模

量;α为材料参数;n为应变强化指数,根据SY/T7403-2018《油气输送管道应变设计规范》^[31],X52钢管α和n的取值分别为1.699和14.14。

研究区域为残坡积粉质黏土,根据现场取样调查与经验取值,天然原状土体参数如表2所示,管道材料参数根据标准《石油天然气工业管线输送系统用钢管》^[32]进行取值,如表3所示。管材为X52管线钢,应力—应变曲线如图2所示,其屈服极限为360 MPa。

表2 天然原状土体参数

Table 2 Natural undisturbed soil parameters

| 土体类型 | 弹性模量/MPa | 粘聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 泊松比 | 密度/(kg·m ⁻³) |
|------|----------|---------|----------|-----|--------------------------|
| 滑坡体 | 13 | 28.8 | 17.7 | 0.3 | 1 880 |
| 滑坡床 | 18 | 27.6 | 18.1 | 0.3 | 1 990 |

表3 管材参数

Table 3 Pipe parameters

| 管材 | 弹性模量/GPa | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 泊松比 | 密度/(kg·m ⁻³) |
|------|----------|----------|----------|-----|--------------------------|
| X52钢 | 210 | 360 | 460 | 0.3 | 7 850 |

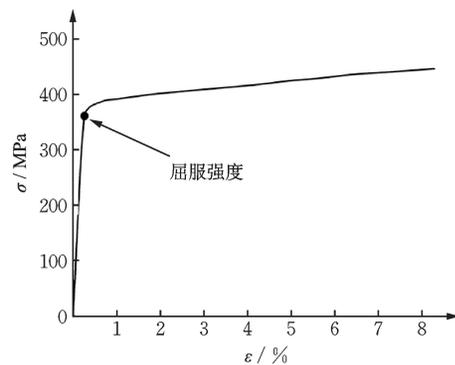


图2 X52管道应力—应变关系
Fig.2 Stress-strain relationship of X52 pipeline

2.3 有限元模拟法

2.3.1 数值模型建立

管土相互作用模型采用非线性接触模型,由于

实际工程中管道和土壤之间的耦合作用不仅表现为土体向管道横截面施加的正压力,还存在管道与土体之间的轴向摩擦力。因此非线性接触模型可以真实的反映出土体的接触非线性和非线性摩擦,充分考虑到管道在地质灾害发生过程中应力应变的动态变化过程^[33-35]。本文利用ABAQUS中的非线性接触模型进行管土相互作用的模拟。

如图3所示,将管道模拟为可承受大变形的壳单元,将土壤模拟为可用于分析弹塑性力学行为的实体单元,在其单元的角点处布置节点,计算(积分点)时采用线性插值;管道土壤相互作用采用接触模型,使用接触算法模拟管道外表面与周围土壤之间的界面,在管道与土体的接触表面,采用主-从面接触对的法向接触属性,在施加的载荷条件下计算接触面之间的相互作用力,该算法允许管道与土壤分离,并通过施加适当的摩擦系数($\mu=0.3$)考虑接触面摩擦。

降雨工况中,结合该地区的降雨特点,选取全年降雨量最大一天的值为89.2 mm/d作为日降雨量,分析坡体在极端降雨条件下变形和稳定性的变化过程,且日降雨量小于滑体土的饱和和渗透系数。降雨持续时间设定为10 d可达全年总降雨量,每60 h作为一个检测节点。

降雨过程模拟采用饱和-非饱和渗流理论,在对非饱和土进行渗流分析时,采用Van Genuchten^[36]模型进行回归分析获得土-水特征曲线,VG模型中土-水特征曲线的表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (2)$$

式中, θ 为体积含水率; h 负压,取正直; θ_s 、 θ_r 分别为饱和含水率和残余含水率; α 、 m 、 n 为模型参数。

管道末端的采用固定约束。其他边界条件主要集中在土壤模型的不同表面上,包括土壤模型底

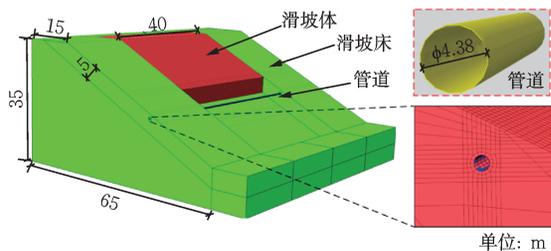


图3 滑坡-管道有限元模型

Fig.3 Finite element model of landslide-pipeline

表面完全固定、土壤模型前后端面与左右端面分别将该面的法线方向位移进行约束。坡体单元采用八结点线性六面体单元(C3D8R)进行网格划分,钢管采用四节点简化积分壳单元(S4R)进行建模,管道处进行加密。模型整体施加重力荷载与降雨荷载,管道内部施加输油压强。计算模型采用Mohr-Coulomb破坏准则,通过强度折减法进行计算,管道的屈服采用Mises屈服准则,考虑管道的塑性变形与应力的偏张量第二不变量有关。

整个模型的宽度为200 m,滑坡宽度为40 m,水平长度50 m,坡度50%,管道距离坡顶的水平距离为30 m,管道埋深为1.8 m,埋地管道直径438 mm,壁厚5.6 mm,管内油压3 MPa。

2.3.2 有限元强度折减法

其基本原理为边坡在外荷载作用下所产生的剪应力等于边坡在折减后抵抗外部荷载的抗剪强度。有限元强度折减法在计算时,将土体的 c 值和 φ 值除以折减系数得到一组新的 c' 、 φ' 值,当边坡计算不收敛时折减系数即为该边坡的稳定性系数。其强度参数计算公式为^[37]:

$$c' = \frac{c}{F_r} \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_r}\right) \quad (4)$$

式中, c 、 φ 分别为土体的粘聚力与内摩擦角; c' 、 φ' 分别为折减后的土体强度参数; F_r 为强度折减系数。

根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)^[38]对滑坡稳定状态的划分见表4。

表4 滑坡稳定状态划分表

Table 4 Classification of landslide stability states

| 稳定性系数 F_s | $F_s < 1.00$ | $1.00 \leq F_s < 1.05$ | $1.05 \leq F_s < 1.15$ | $F_s \geq 1.15$ |
|----------------|--------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 稳定性状态 | 不稳定 | 欠稳定 | 基本稳定 | 稳定 |

3 结果分析

3.1 原位监测数据分析

3.1.1 管道滑坡激发因素特征分析

研究区域自2017年至2022年的降雨量如图4所示,其中2019年降雨量最少,为713.2 mm,从2019~2022年降雨量逐渐上升,2021年降雨量比前

年增加了 159.7 mm, 由于近几年降雨量的逐年增加, 导致坡体在 2021 年开始失稳, 并且在 2022 年产生蠕滑。

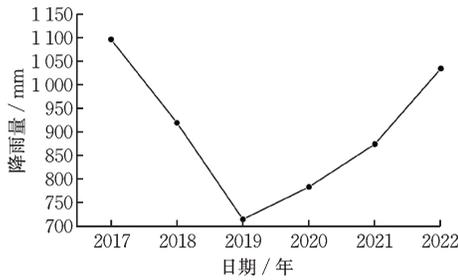


图 4 昆明市降雨量
Fig.4 Rainfall in Kunming

降雨量监测数据表明, 昆东滑坡在 2022 年 5 月到 2022 年 10 月处于降雨期; 其中 9 月份降雨最为集中, 降雨量为 280.8 mm, 2022 年 9 月 22 日降雨量最大, 达到 89.2 mm, 而从图 5(b) 可以看出, 孔隙水压力在 9 月 26 日才开始明显升高, 由于粉质黏土渗透系数为 5~10 cm/d, 在地表水蒸发、流失之后渗透至孔压监测处需要大约 10 d, 因此在地表水渗流的影响下, 导致孔隙水压力变化滞后于降雨。孔隙水压力从 5 月 3 日到 9 月 1 日呈上升趋势, 这与该时间段内降雨较为集中相吻合; 在 9 月份之后虽然处于降雨期间, 但孔隙水压力存在一段下降趋势, 是由

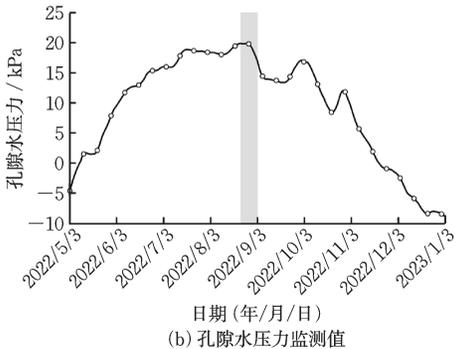
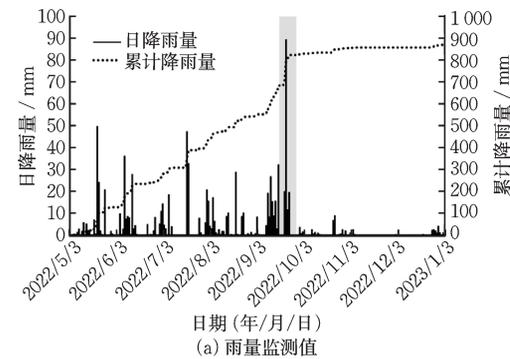


图 5 降雨量与孔压监测值

Fig.5 Rainfall and pore pressure monitoring values

于此时的气候正处于最炎热时期, 地表水蒸发量大于渗流量, 引起孔隙水压力降低。在 10 月之后, 由于降雨量的减少, 并伴随着土中水的蒸发, 孔隙水压整体呈现出下降的趋势。

3.1.2 管道滑坡位移特征分析

地面位移、倾角监测于 2022 年 5 月 3 日开始, 如图 6 所示。通过分析得知, 在 2022 年 5 月到 2023 年 1 月期间, 滑坡滑动的总位移为 3.2 cm, 倾角变化 0.61°, 其中 5 月 3 日到 6 月 20 日位移量为 2.9 cm, 该时间段内位移与倾角变化最明显, 这是由于降雨较为集中, 地表水下渗导致滑坡体重力增加, 降低了斜坡的抗剪强度, 滑坡滑动速率增大; 由于随后采取紧急措施, 滑坡体变形明显减缓并趋于稳定, 有效降低了滑坡发生的风险; 但由于处于降雨季节, 滑坡仍存在蠕滑变形, 一直持续到降雨期结束。

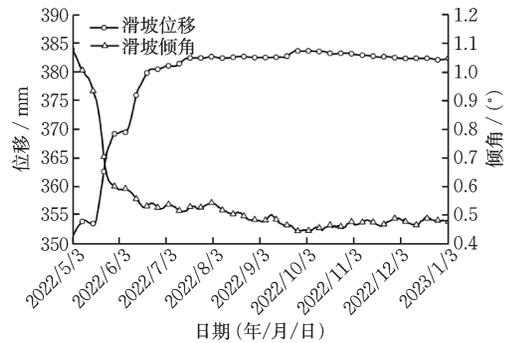


图 6 滑坡位移曲线

Fig.6 Displacement curves of landslide

3.1.3 综合指标数值分析法的斜坡危险性判别

该方法在工程地质调查分析的基础上, 从斜坡灾害形成的基础条件和主要诱发因素中筛选确定参与斜坡发生危险性的判别因子, 按因子作用的大小进行量化, 确定斜坡的危险性等级。按斜坡变形灾害的特性将判别因子生成判别指标体系, 建立斜坡判别的数学模型, 得到斜坡危险度^[39], 如式(5)所示:

$$D = \frac{\sum A_j^i}{20} \quad (5)$$

式中, A_j^i 表示某一判别因子的某一级作用指标, i 为因子编号, j 为因子分级之一; 除以判别因子作用指标总和 20, 对其进行归一化处理。

研究区域各指标取值如表 5 所示, 计算出 $D = 0.355$, 根据斜坡危险度分级判别指标表 6 得出结论, 该滑坡属于三级轻度危险斜坡。

表 5 滑坡判别因子作用指标^[39]

| 判别因子 | 作用指标 | 判别因子 | 作用指标 |
|---------------|------|-----------------|------|
| 坡度 20°~30° | 1.38 | 河流冲蚀:无 | 0 |
| 坡高 35 m | 0.85 | 人工开挖:无 | 0 |
| 地层岩性: 偶滑地层 | 0.65 | 斜坡变形现状: 弱变形 | 1.45 |
| 风化程度: 强风化 | 1.05 | 坡体结构:较完 善优势面 | 1.06 |
| 斜坡横向: 平直形 | 0.33 | 地下水作用:无 | 0 |
| 斜坡纵向: 平直形 | 0.33 | | |

表 6 斜坡危险度分级判别指标表^[39]

| I 级极危 险斜坡 | II 级危险 斜坡 | III 级轻度危险 斜坡 | IV 级稳定 斜坡 |
|---------------|----------------------|----------------------|--------------|
| $D \geq 0.65$ | $0.41 \leq D < 0.65$ | $0.25 \leq D < 0.04$ | $D < 0.25$ |

3.2 基于原位监测数据的数值模拟分析

3.2.1 降雨工况下数值模拟对比分析

图 7 为各降雨时刻下孔压分布,随着降雨时间的增加,坡体水位线逐渐升高,饱和区域逐渐增大;随着雨水的入渗,土体饱和度增加,因此坡角位置孔隙水压力更大。通过静力分析,得到滑坡场地在降雨工况下不同时刻的整体位移云图,见图 8。

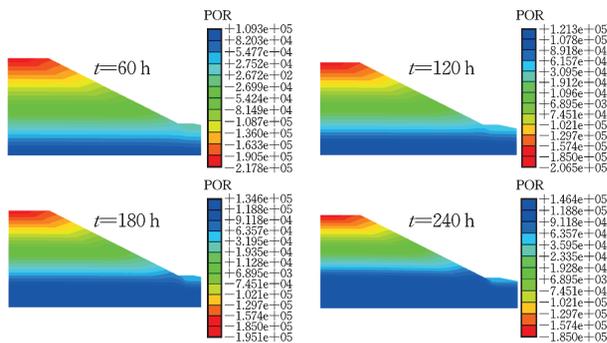


图 7 孔隙水压力分布云图

Fig.7 Pore pressure distribution cloud diagram

从图 8 中可看出,滑坡各位置的总位移随着降雨历时的增加而增加,坡顶处受到降雨冲刷导致大量土体逐渐向坡角处移动,从而出现坡顶处滑体侵蚀变薄,坡脚处土体堆积并向前滑动,滑体位移量由土体表层到下层逐渐减小。

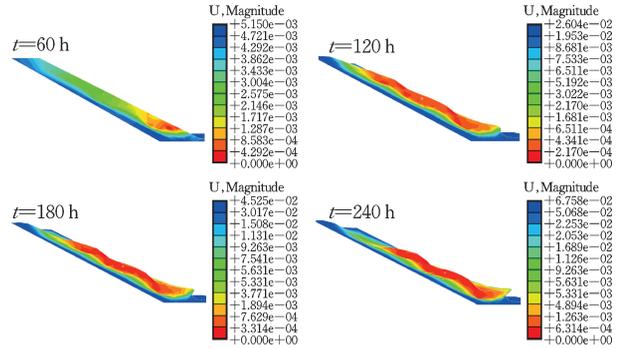


图 8 各降雨时刻的滑坡位移云图

Fig.8 Landslide displacement cloud maps of landslide under different rainfall moments

图 9 为滑坡位移曲线图,从图中可以看出,滑坡管道处至坡脚的位移量大于滑坡中上部;从坡顶到坡脚,位移变化率也逐渐增大;其中管道位置的滑坡位移约为 23 mm,这与现场监测的结果存在 9 mm 误差,主要原因是数值模拟中考虑短时降雨工况对坡体的影响,而在实际工程中无降雨时坡体会存在蠕滑;坡脚处的位移值最大,最大值为 67.6 mm,这是由于在降雨作用下,大量地表水沿坡体向坡脚汇流,地表水入渗使得坡脚处的地下水位线升高并且土体逐渐趋于饱和,由于饱和土的抗剪强度低于非饱和土,因此滑坡前缘抗剪强度逐渐降低、抗滑力减小。

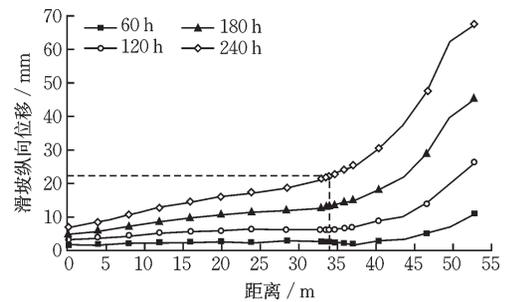


图 9 各降雨时刻滑坡位移曲线

Fig.9 Landslide displacement curves under different rainfall moments

从图 10 可以看出,管道的变形与应力在滑坡区中轴部位最大,形变量从滑坡区向滑坡床区域递减,管道中间区域变形受最大下滑力影响变化最大,管道中间应力最大且沿管道轴向向两侧逐渐减小。最大的管道应力为 175 MPa,远小于屈服应力 360 MPa,最大管道峰值位移为 22.9 mm,此时管道处于安全状态。

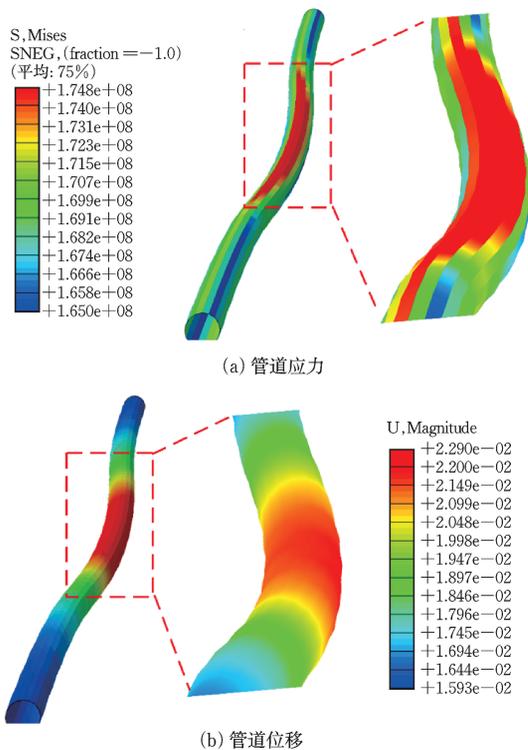


图10 降雨条件下管道应力与位移云图

Fig.10 Stress and displacement distribution of pipeline under different rainfall conditions

3.2.2 基于数值模拟的管道斜坡稳定性分析

通过强度折减法分析坡体在天然状态、降雨工况下的稳定性,得到的稳定性系数曲线如图11所示,当坡体达到破坏时,位移会发生突变,发生突变时对应的折减系数即为坡体稳定性系数;图11(a)

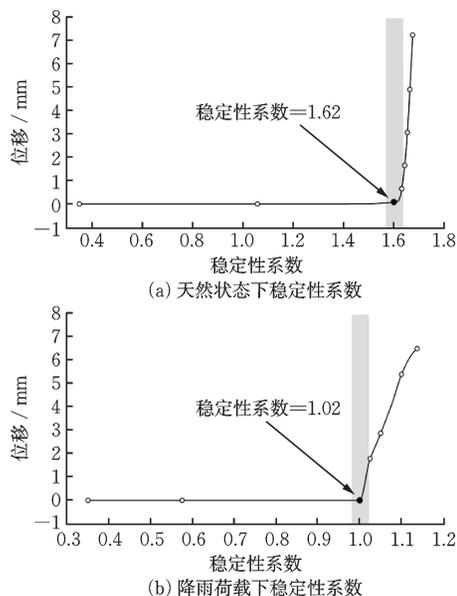


图11 折减系数与位移关系曲线

Fig.11 Relationship between reduction coefficient and displacement

为坡体未受到外部荷载下的稳定性系数,其值为1.62,由表4可知天然状态下坡体处于稳定状态。实际工程中由于坡体会受到降雨荷载的作用,雨水入渗会使坡体稳定性降低,因此在降雨历时240h后,坡体稳定性系数如图11(a)所示,由图中可以看出该稳定性系数为1.02,结合表4分析得出,该坡体在降雨条件下处于欠稳定状态,与综合指标数值分析法所得结果相一致,即该斜坡存在危险性。

3.3 基于数值模拟的管道变形预测与失效评估

3.3.1 基于数值模拟的管道变形预测

管道与土壤相互作用导致管道被迫运动,以跟随地面变形。图12为在不同滑坡位移下埋地管道的位移曲线。当管道水平穿过滑坡体时,滑坡对管道所施加的荷载均匀分布在水平和垂直方向上。由于滑坡体的挤压作用,致使埋地管道在沿坡体滑动方向产生一定程度的位移。管道的弯曲变形随着滑坡位移的增加而增加,且管道位移随着滑坡位移的增加呈现出非线性特征。

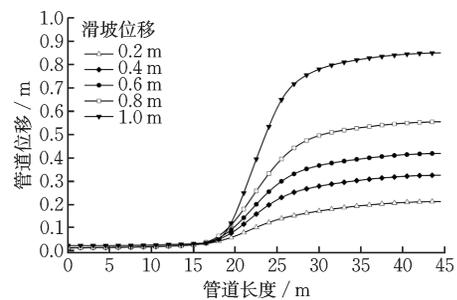


图12 不同滑坡位移下管道位移曲线

Fig.12 Displacement of pipeline under different landslide displacements

在滑坡作用下,埋地管道的应力和变形变化过程如图13所示。随着滑坡位移的增加,滑坡体与非滑坡体交界处产生明显的弯曲变形,并且会出现局部应力集中现象。管道弯曲外侧受拉区的高应力

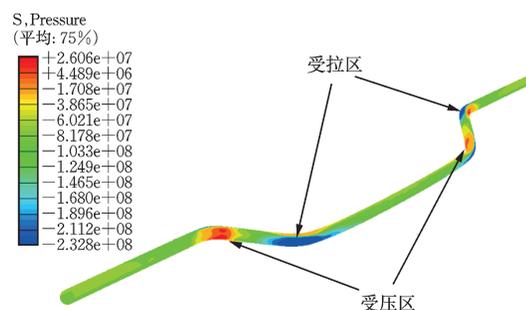


图13 管道应力云图

Fig.13 Stress distribution cloud map of pipeline

区域尺寸大于弯曲内侧受压区的高应力区域,且管道最大拉应力值远大于压应力值。因此,拉伸破坏是管道失效的主要原因。

管道在不同滑坡位移下的拉应力分布如图 14 所示,图 15 所示为管道最大应力与位移的关系。从图 14 中可以看出,应力随着滑坡位移的增加而增加,当滑坡位移小于 0.2 m 时,管道没有发生塑性应变,此时管道变形处于图 15 中的 A 到 B 的弹性变形阶段,管道应力随着滑坡位移的增加而增大;当滑坡位移达到 0.4 m 时,管道开始出现两个塑性变形区,此时管道的最大应力达到屈服强度的 360 MPa,且塑性区的范围随着滑坡位移的增加而增大,此时管道最大应力变化处于图 15 中的 B 到 C 塑性变形阶段,该阶段管道最大应力随着管道位移的增加缓慢增大,虽未达到极限抗拉强度,但管道已经处于失稳状态。

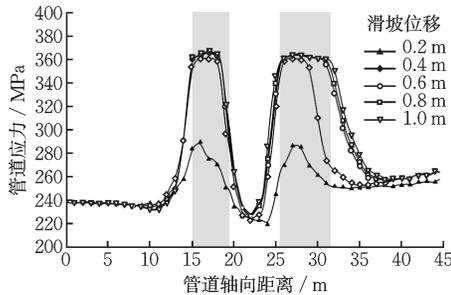


图 14 不同滑坡位移下管道应力

Fig.14 Stress of pipeline under different landslide displacements

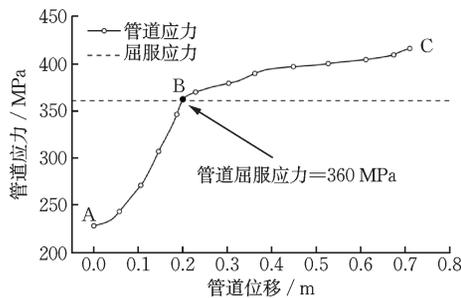


图 15 管道最大应力与位移关系曲线

Fig.15 Relationship between maximum pipeline stress and landslide displacements

3.3.2 基于数值模拟的管道失效风险评估

管道在外荷载的作用下,当应力或应变超过许用应力、应变值时即发生管道失效,对于滑坡、断层等地质灾害产生地表大变形的情形下,采用基于许用应力的失效判据过于保守。而基于应变的管道失效判据在保证管道运行安全的前提下,管道应力可以超过屈服应力,发生一定的塑性变形,但管道

仍满足运行需求。在横向滑坡作用下,管道会发生拉伸、弯曲以及由弯曲导致的压缩变形,从而有可能出现屈曲破坏(压缩变形)以及拉伸断裂破坏模式,根据前文分析,管道主要受拉伸破坏的影响,依据《油气输送管道线路工程抗震技术规范》^[40],管道容许拉应变取值如表 7 所示。

表 7 管道容许拉应变^[39]

Table 7 Permissible tensile strain in pipelines^[39]

单位: %

| 钢级 | 设计容许拉伸应变 | 校核容许拉伸应变 |
|---------|----------|----------|
| X65 及以下 | | 1.0 |
| X70、X80 | 0.5 | 0.9 |
| X90 | | 0.8 |

图 16(b)显示了不同滑坡位移下管道的轴向应变分布,由于在滑坡作用下管道的性质具有对称性,因此选择管道的一半进行分析。由图可知,稳定区和滑动区连接处两侧应变显著增大,随着滑坡的位移,连接区域的左侧 I 区应变变化最明显,对于 0.4 m 的滑坡位移,其应变值为 0.35%,而对于 0.8 m 的滑坡位移,应变值超过 1%,达到容许拉应变;由图 16(a)可以看出, I 区管道应变变形量远大于 II 区内管道应变变形量,因此管道破坏主要发生在坡体稳定区域内的 I 区位置。

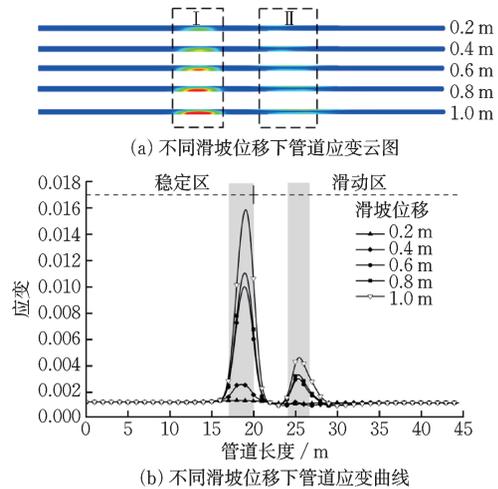


图 16 滑坡位移与管道应变变化关系

Fig.16 The relationship between landslide displacement and pipeline strain change

总结以往管道滑坡失事的案例如表 8 所示,管道破坏时破坏位置应力超过屈服应力,并且破坏位置均发生在管道与滑坡的交界处,因此支撑区是管道破裂的易发位置。

表8 管道失事案例

Table 8 Pipeline failure cases

| 案例位置 | 管道型号 | 研究区管道长度/m | 滑坡宽度/m | 破坏位置(距离管道中心)/m | 破坏应力/MPa |
|-------------------------|--------|-----------|--------|----------------|----------|
| 伊朗 ^[11] | API B级 | 60 | 40 | 10 | 402 |
| 贵州 ^[41] | X60 | 140 | 70 | 35 | 598.2 |
| 大武支线 ^[42] | L360 | 90 | 50 | 25 | 406 |
| 洛阳镇 ^[43] | X70 | 140 | 65 | 32.5 | 436.5 |
| 中缅管道小寨村 ^[44] | X80 | 80 | 40 | 0 | 585 |
| 中缅管道蒋坝营 ^[44] | X80 | 260 | 123 | 65 | 592 |

根据分析的结果,选取管道应变最大的 I 区进一步分析,得到不同滑坡位下管道的最大应变变化曲线如图 17 所示。由图 17 可知,滑坡位移小于 0.4 m 时,管道处于弹性变形阶段,管道应变的变化率较小,管道变形缓慢;当滑坡位移达到 0.4 m 时,管道应变的变化率开始增大,此时管道进入塑性变形,并在滑坡位移为 0.75 m 时,管道最大应变达到容许应变值 1%,此时管道失效。管道达到最大屈服应力时,滑坡位移为 0.4 m,远小于管道达到极限应变时的滑坡位移,由此可知较小的位移即可导致管道应力失效,而应变失效则需要土体发生较大位移。因此滑坡发生时,管道应力先达到极限值发生应力失效,进而发生应变失效。

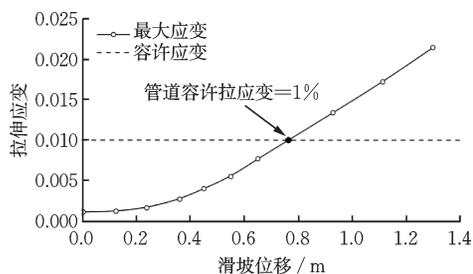


图 17 管道最大应变与滑坡位移关系曲线

Fig.17 Relationship between maximum pipeline strain and landslide displacements

4 结 论

本文结合野外监测和工程实践,采用 ABAQUS 有限元软件,选取管土相互作用非线性接触模型分析方法,建立滑坡作用下管道有限元模型,并对滑坡在降雨条件下的稳定性进行分析,最后从基于应变的管道极限状态判断准则对管道失效风险进行评估,所得结论如下:

(1) 管-土相互作用非线性接触模拟结果得出滑坡最大位移、孔压均位于坡角;根据有限元强度折减法与综合指标数值分析法计算出坡体处于欠

稳定状态,存在危险性。

(2) 管道在滑坡作用下所受拉应力大于压力,主要发生拉伸破坏,并且根据管道应力应变准则可知,管道所能承受的应力极限值小于应变极限值,因此应力破坏准则比应变破坏准则更保守。

(3) 管道在滑坡的作用下最大位移主要发生在管道中部,而管道的危险位置发生在滑坡区和稳定区的交界处,此处为管道的危险截面。因此在管道设计与监测时应重点关注危险截面处。

参考文献:

- [1] Challamel N, Debuhan P. Mixed modelling applied to soil-pipe interaction [J]. *Comput Geotech*, 2003, 30(3): 205-216.
- [2] Yu L Q. Pipeline construction in landslide area [J]. *Oil Gas Storage Transp*, 1989; 8(6): 60-64.
- [3] 张银辉, 帅健, 张航, 等. 一种基于云服务平台的滑坡管道状态远程实时监测系统 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(2): 124-129.
Zhang Y H, Shai J, Zhang H, et al. A remote real-time monitoring system for landslide pipeline state based on cloud service platform [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(2): 124-129. (in Chinese)
- [4] 苏培东, 姚安林, 蒋宏业. 西气东输管道沿线滑坡特征及防治对策 [J]. *岩土工程技术*, 2008, 22(6): 316-319.
Su P D, Yao A L, Jiang H Y. Landslide characteristics and countermeasure of west-east gas transportation pipeline project [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2008, 22(6): 316-319. (in Chinese)
- [5] 刘慧. 滑坡作用下埋地管线反应分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Liu H. Response analysis of buried pipeline under landslide [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 王小梅. 地质灾害作用下 X80 钢质管道应变设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.

- Wang X M. Research on strain design of X80 steel pipeline under geological disasters[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2014. (in Chinese)
- [7] 南庆宾. 山体滑坡背景下天然气管道泄漏与火灾规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- Nan Q B. Study on leakage and fire law of natural gas pipeline under the background of landslide [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- [8] 赵应奎. 川中永堡寨滑坡及其对输气管道的破坏[J]. 工程地质学报, 2000, 8(增): 97-100.
- Zhao Y K. Yongbaozhai landslide in central Sichuan and its damage to gas pipeline[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(Sup): 97-100. (in Chinese)
- [9] 王现中, 谢成, 邵其其, 等. 基于原位监测的高填方下穿管道有限元分析[J]. 油气储运, 2022, 41(10): 1150-1158.
- Wang X Z, Xie C, Shao Q Q, et al. Finite element analysis of pipeline under passing high fill based on in-situ monitoring [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(10): 1150-1158. (in Chinese)
- [10] 王仁超, 孔纪名, 崔云. 西南山区长输油气管道坡面泥石流成灾特征与防治——以云南昆明水节箐高位溃决型泥石流为例[J]. 山地学报, 2018, 36(5): 813-820.
- Wang R C, Kong J M, Cui Y. Characteristics and countermeasures of slope debris flow in Kunming of Yunnan Province of China [J]. Mountain Research, 2018, 36(5): 813-820. (in Chinese)
- [11] Vasconez F, Estrella M, Velastegui A, et al. Landslide hazard assessment, monitoring and stabilization: Villano Oil Pipeline system, Ecuador [J]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2010: SPE-135504-MS.
- [12] 杨晓蔚, 刘春, 张晓宇, 等. 基于OFDR的不连续管道竖向错开变形定量监测[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(5): 1087-1095.
- Yang X W, Liu C, Zhang X Y, et al. Quantitative monitoring of vertical staggered deformation of discontinuous pipeline based on OFDR [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 1087-1095. (in Chinese)
- [13] 刘绪都, 冯新, 李明昊, 等. 基于分布式应变监测的埋地管道悬空识别方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1076-1084.
- Liu X D, Feng X, Li M H, et al. Suspension identification on buried pipeline based on distributed strain monitoring [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1076-1084. (in Chinese)
- [14] Yan Y, Ma S Y, Yin S Y, et al. Detection and numerical simulation of potential hazard in oil pipeline areas based on UAV surveys [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 665478.
- [15] 陈超. 山体滑坡区天然气集输管道监测预警技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- Chen C. Research on monitoring and early warning technology of natural gas gathering pipeline in landslide area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019. (in Chinese)
- [16] 王现中, 王仁超. 复杂山区煤矿采空区油气管道稳定性监测与数值分析[J]. 山地学报, 2022, 40(3): 411-420.
- Wang X Z, Wang R C. In-situ monitoring and numerical analysis of oil and gas pipelines in coal seam goaf located in mountainous terrain [J]. Mountain Research, 2022, 40(3): 411-420. (in Chinese)
- [17] Liu P F, Zheng J Y, Zhang B J, et al. Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method [J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1384-1391.
- [18] 彭善碧, 廖文, 徐明军, 等. 滑坡对埋地天然气管道的作用机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 59-67.
- Peng S B, Liao W, Xu M J, et al. The effect of landslide on the stability of natural gas pipeline [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 59-67. (in Chinese)
- [19] 席莎, 文宝萍. 滑坡作用下横向折线形埋地输气管道的力学响应[J]. 油气储运, 2019, 38(12): 1350-1358.
- Xi S, Wen B P. Mechanical response of polygonal-shape transverse buried gas pipeline under the action of landslide [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(12): 1350-1358. (in Chinese)
- [20] 徐建, 马廷霞, 潘玉林, 等. 横向滑坡作用下管道裂纹力学影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 270-276, 285.
- Xu J, Ma T X, Pan Y L, et al. Analysis on influencing factors of pipeline crack mechanics under lateral landslide [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 270-276, 285. (in Chinese)
- [21] 王涛, 张雷, 廖方建, 等. 滑坡灾害下航油管道抗滑桩的阻滑性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 250-258, 269.
- Wang T, Zhang L, Liao F J, et al. Analysis of anti-slide performance of slide-resistant piles of aviation fuel pipeline under landslide disaster [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 250-258, 269. (in Chinese)
- [22] Xu P, Zheng J Y, Liu P F. Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels [J]. Mater and Design, 2009, 30: 2295-2301.
- [23] 丁鸿超, 蒋宏业, 赵新好, 等. 黏性泥石流对山区油气管道的冲击动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 277-285.

- Ding H C, Jiang H Y, Zhao X H, et al. Study on the impact dynamic response of viscous debris flow on oil and gas pipelines in mountainous areas[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(2): 277-285. (in Chinese)
- [24] Vasseghi A, Haghshenas E, Soroushian A, et al. Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 119(2): 105009.
- [25] 樊兴祥. 中缅天然气昆明东支线空港联络线及站场配套工程项目可行性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
Fan X X. Feasibility study of China-Myanmar natural gas Kunming east branch airport contact line and station supporting project[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. (in Chinese)
- [26] 李金和. 昆明城市中心区开放式公园绿地使用状况研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
Li J H. Research on the post-occupancy evaluation of free-opening urban park of the centre district of city in Kunming[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [27] 王力. 基于水足迹理论研究的昆明地区水资源可持续利用评价[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.
Wang L. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Kunming based on water footprint theory[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014. (in Chinese)
- [28] 杨一帆. 面向对象的高分辨率遥感影像信息提取研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
Yang Y F. Object-oriented high-resolution remote sensing image information extraction research [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016. (in Chinese)
- [29] 谭超. 地下水对滑坡的力学作用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
Tan C. Study on groundwater to the mechanical function of landslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [30] Ramberg W. Description of stress-strain curves by three parameters[R]. Washington, D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [31] 油气输送管道应变设计规范: SY/T 7403—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- [32] 石油天然气工业管线输送系统用钢管: GB/T 9711—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [33] 张鹏, 王晓宇, 唐雪梅, 等. 基于数值模拟的横穿滑坡下 X80 管道极限滑坡位移分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 21-29.
Zang P, Wang X Y, Tang X M, et al. Limit displacement of the landslide with an X80 pipeline laying based on numerical simulation[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 21-29. (in Chinese)
- [34] Xie X, Symans M D, O'Rourke M J, et al. Numerical modeling of buried HDPE pipelines subjected to normal faulting: a case study[J]. *Earthquake Spectra*, 2013, 29(2): 609-632.
- [35] Zhang J, Liang Z, Han C. Mechanical behavior analysis of the buried steel pipeline crossing landslide area [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2016. 138(5): 73-85.
- [36] Van G, Th M. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892.
- [37] Tamotsu M, Ka-ching S. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils & foundations*, 1992, 32(1): 59-70.
- [38] 滑坡防治工程勘察规范: GB/T 32864—2016[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2016.
- [39] 崔鹏, 邓宏艳, 王成华, 等. 山地灾害[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [40] 油气输送管道线路工程抗震技术规范: GB/T 50470—2017[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2017.
- [41] Yan Y, Zhou J J, Xie C. et al. Quantitative estimation of pipeline slope disaster risk in China[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2023, 14: 298-312.
- [42] 唐俊杰. 滑坡作用下管道变形特征与应变计算模型研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
Tang J J. Study on deformation characteristics and strain calculation model of pipeline under landslide[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology. 2022. (in Chinese)
- [43] 何信予. 埋地管线横穿滑坡的力学响应与安全性评价[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
He X Y. Mechanical Response and safety evaluation of buried pipeline crossing land[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [44] 江珂, 王东源, 余志峰, 等. 管道受横向滑坡作用破坏分析——以中缅管道贵州晴隆段两次爆炸事故为例[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 8988-8995.
Jiang K, Wang D Y, Yu Z F, et al. Analysis of pipeline damage caused by lateral landslides: taking two explosion accidents in the qinglong section of China-Myanmar pipeline in Guizhou as an example [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 8988-8995. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)