

横穿滑坡下X80管道极限滑坡位移分析

张 鹏, 王晓宇, 唐雪梅, 刘思铭

Limit displacement of a landslide for an X80 buried pipeline crossing it

ZHANG Peng, WANG Xiaoyu, TANG Xuemei, and LIU Siming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

基于数据挖掘技术的白水河滑坡多场信息关联准则分析

Analysis on association rules of multi-field information of Baishuihe landslide based on the data mining

陈锐, 范小光, 吴益平 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 1-8

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

基于BA-LSSVM模型的黄土滑坡致灾范围预测

Prediction of the disaster area of loess landslide based on least square support vector machine optimized by bat algorithm

吴博, 赵法锁, 贺子光, 段钊, 吴韶艳 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 1-6

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析

Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology

熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 董继红, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 1-9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207021

张鹏, 王晓宇, 唐雪梅, 等. 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.

ZHANG Peng, WANG Xiaoyu, TANG Xuemei, et al. Limit displacement of a landslide for an X80 buried pipeline crossing it[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 21-29.

横穿滑坡下 X80 管道极限滑坡位移分析

张 鹏¹, 王晓宇¹, 唐雪梅¹, 刘思铭²

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:长输管道在运输天然气时不可避免地会穿越地质灾害频发区域,其中滑坡对于管道的威胁性最大,因此对滑坡作用下管道的安全进行评估十分重要。针对 X80 管道横穿滑坡可能遇到的安全问题,提出管道的极限滑坡位移定义,将其作为评价管道安全的外部指标。依据中贵线某滑坡工况,采用 ABAQUS 软件建立横穿滑坡下的管-土模型,对不同滑坡裂缝、滑坡宽度下的管道力学行为与极限滑坡位移变化情况进行数值模拟研究。结果表明:不同裂缝位置、滑坡宽度下,管道应力均随位移荷载增加而增大;滑坡裂缝位置距管道越远,管道承受的极限滑坡位移值越大,当裂缝位置为 9 m 时,管道所能承受的极限滑坡位移达 4.03 m;文中工况下滑坡宽度 35 m 为管道应力变化分界点,此时管道所能承受的极限滑坡位移值最小。

关键词:横向滑坡; X80 管道; 裂缝位置; 滑坡宽度; 极限位移

中图分类号: P642.23; TE937

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)02-0021-09

Limit displacement of a landslide for an X80 buried pipeline crossing it

ZHANG Peng¹, WANG Xiaoyu¹, TANG Xuemei¹, LIU Siming²

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: When transporting natural gas, long-distance pipelines will inevitably pass through areas with frequent geological disasters, and landslides are the most threatening to pipelines. Therefore, it is very important to study the safety assessment of pipelines under the action of landslides. In view of the possible safety problems of X80 pipeline crossing the landslide, the definition of the limit landslide displacement of the pipeline is proposed as an external index to evaluate the safety of the pipeline. According to the working condition of a landslide on the Zhongwei Guiyang line, the pipe soil model under the landslide is established by using ABAQUS software, and the mechanical behavior of the pipeline and the change of the limit landslide displacement under different landslide cracks and landslide widths are numerically simulated. The results show that the pipeline stress increases with the increase of displacement load under different crack positions and landslide widths; The farther the landslide crack location is from the pipeline, the greater the limit landslide displacement that the pipeline can bear. When the crack location is 9 m, the limit landslide displacement that the pipeline can bear reaches 4.03 m; Under the working condition of this paper, the landslide width of 35 m is the dividing point of pipeline stress change. At this time, the limit

收稿日期: 2022-07-15; 修订日期: 2022-11-09

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974105); 中国工程院重大咨询研究项目(2011-ZD-20)

第一作者: 张 鹏(1964-), 男, 上海人, 教授, 博导, 博士(后), 主要从事结构工作性能及力学行为、管道系统完整性的研究。

E-mail: 18482112584@163.com

通讯作者: 王晓宇(1998-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 主要从事管道完整性管理的研究。E-mail: 815469766@qq.com

landslide displacement that the pipeline can withstand is the smallest.

Keywords: lateral landslide; X80 pipeline; landslide crack; landslide width; limit displacement

0 引言

天然气是最低碳的自然资源之一,与人们的日常生活密不可分。随着国家“双碳”国策的进一步推行,天然气将是未来大力开采、运用的绿色能源,是维持国家安全与人民正常生活的重要战略资源^[1]。管道作为石油、天然气最主要的运输方式,与国民生活息息相关。截至 2021 年底,中国大陆建成油气长输管道长度累计达到 15.0×10^4 km,其中天然气管道里程约 8.9×10^4 km^[2]。埋地长输管道在铺设过程中会穿越各种地形,不可避免地会遭受各种地质灾害的影响,而滑坡造成的管道破坏在所有地质灾害中是最频繁的,也是危害性最强的^[3]。例如 2017 年贵州沙子镇段的中缅天然气管道在滑坡作用下发生断裂燃爆事故,造成 8 人死亡,35 人受伤^[4]。滑坡灾害的发生会迫使管道发生大变形、破裂甚至爆炸。已有研究表明,同等滑坡尺寸与滑坡位移下,横穿滑坡时管道更易断裂破坏^[5]。

针对管道穿越滑坡体的问题,学者做了大量研究。1998 年,邓道明等^[6]将管道视为半无限长梁,考虑了穿越滑坡时管道内力以及变形的连续性,首次得出拉、压当量轴力下管道的内力及变形的计算公式。2012 年,郝建斌等^[7]假设管后土体为刚性楔形体,对横穿滑坡时管道所受的推力进行了推导,表明滑坡土体、管径、埋深是影响管道所受滑坡推力的主要因素。2014 年,练章富等^[8]建立了滑坡段埋地管道有限元力学模型,分析管道不同工况下的应力和变形。2019 年,彭善碧等^[9]考虑了管-土三相作用力的相互影响对滑坡对天然气管道的作用机理进行了分析,同年,席莎等^[10]基于现场监测和非完全耦合数值模拟对折线型埋地输气管道的力学响应进行了研究。2020 年,Chaudhuri 等^[11]假设土体位移呈四次抛物线分布,对横穿滑坡时管道的位移、变形公式进行了推导,同年,曹乃月^[12]采用 FLAC^{3D} 有限元软件对环江县埋地管道在滑坡下的承载能力以及安全运行进行分析。罗忠行等^[13]通过有限元软件建立滑坡分析模型,得出数值模拟结果相较极限平衡法更加直观可靠的结论。2022 年,唐雪梅等^[14]针对含腐蚀缺陷的 X80 管道,采用极限滑坡宽度作为管道安全状态的判别因子。然而,少有研究将极限滑坡位移作为评判管道安全的外部指标。

为此,创新地定义了管道的极限滑坡位移,将其作

为评判管道安全的外部指标。通过 Abaqus 有限元软件建立模型,对不同滑坡裂缝位置、滑坡宽度下的 X80 管道力学行为进行分析,并计算了极限滑坡位移值,最后对管道应力进行多元回归分析,研究结果对实际工程有一定意义。

1 管-土变形特征与相互作用

1.1 管-土相互作用模型

目前常用的管-土相互作用模型有弹性地基梁模型、土弹簧模型和非线性接触模型^[15]。在工程实际中,管-土的接触是非线性的,土体变形受到土体孔隙水压力、摩擦角、泊松比等多种因素的影响,弹性地基梁模型和土弹簧模型都将这些因素的影响进行了简化,不能完全真实反映出土体的变形情况,而 ABAQUS 中的非线性接触模型能较好模拟出管-土间的相互作用,因此本文选用非线性接触模型进行研究。

1.2 失效准则

管道的失效准则是用来判断处于安全状态还是危险状态的依据,由于 X80 管道是高强度钢,但塑性、韧性较低,工程中常用应力失效准则来判断管道的安全。本文采用第四强度理论(Von Mises)作为管道失效判断准则,具体公式:

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

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——假设单元体的第一、第二、第三主应力/MPa;

$[\sigma]$ ——许用应力/MPa。

1.3 力学模型

在以往的研究中,前人多将管道所受滑坡推力假定为均匀力荷载作用、二次抛物线力荷载作用。然而山体滑坡过程中,由于管道与周围土体所受的外力十分复杂,很难用简单的拉伸、弯曲、剪切力来表述,因此进行有限元分析时,可将滑坡作用的等效力采用位移荷载形式施加在后方土体表面上,与滑坡推力相比更为合理^[16]。Zheng 等^[17]通过对现场滑坡的调查研究,得出滑坡位移呈四次抛物线分布,因此假定滑坡区土体位移呈四次抛物线分布更为合理。在土体位移荷载下,可通过解管道微分方程式,得到滑坡区管道挠度计算式(2)和非滑坡区管道挠度计算式(3)。

$$\omega_1(x) = e^{\alpha_1 x} (c_1 \cos \beta_1 x + c_2 \sin \beta_1 x) + e^{-\alpha_1 x} (c_3 \cos \beta_1 x + c_4 \sin \beta_1 x) - \frac{\delta}{x_1^4} \left[(x-x_1)^4 - \frac{24EI}{k_1} (x-x_1)^2 + \frac{24T^2}{k_1^2} \right] \quad (2)$$

$$\omega_2(x) = e^{-\lambda x} (c_5 \cos \lambda x + c_6 \sin \lambda x) \quad (3)$$

式中: ω_1 ——距滑坡区域中心 x 位置处的管道挠度/m;

ω_2 ——偏离滑坡区边缘 x 位置处的管道挠度/m;

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ ——通过边界条件求出;

EI ——抗弯刚度/(N·mm²);

T ——轴向张力/N, 且 $T \leq 2\sqrt{k_1 EI}$;

α_1 ——系数, 无量纲, 无具体含义, 作用仅是简化公式, $\alpha_1 = \sqrt{\sqrt{k_2/4EI} + T/4EI}$;

β_1 ——系数, 无量纲, 无具体含义, 作用仅是简化公式, $\beta_1 = \sqrt{\sqrt{k_2/4EI} - T/4EI}$;

x_1 ——滑坡区域中心到边缘的长度/m;

λ ——系数, 无量纲, 无具体含义, 作用仅是简化公式, $\lambda = \sqrt{k_2/4EI}$ 。

1.4 管道极限滑坡位移定义

为给工程中横穿滑坡的管道安全状态提供一个外部预警指标, 将许用应力作为管道安全阈值, 将管道应力达到许用应力时承受的临界滑坡位移荷载定义为管道的极限滑坡位移。根据规范 [18] 中的许用应力计算公式可得, X80 管道的许用应力为 499.5 MPa, 因此当管道应力达到 499.5 MPa 时的滑坡位移即为管道所能承受的极限滑坡位移。

2 有限元模型建立

2.1 工程概况

中贵天然气管道遭遇的某滑坡位于甘肃省陇南市礼县盐官镇三江口村, 根据调查资料显示, 管道从滑坡后部横穿而过, 埋深约为 1 m。滑坡后缘以斜坡陡坎为界, 滑坡平面形态呈圈椅状, 滑坡体所在坡面地形起伏不大, 自然坡度 15°~30°, 坡向 260°, 滑坡体宽度 20~28 m, 平均宽度 25 m, 纵向长 50~62 m, 平均长度 60 m, 滑坡体厚度 2.6~3.6 m, 平均滑体厚 3.0 m, 总体积约 0.6×10⁴ m³, 属小型滑坡(图 1)。滑坡区属构造剥蚀低中山斜坡地貌, 上陡下缓, 剖面形态整体呈折线形, 滑坡坡面在纵向上, 呈阶梯状, 阶坎高 0.5~2.5 m。滑坡滑体以马兰黄土为主, 滑带为土体内软弱带, 根据现场调查分析, 该滑坡为一沿土体内软弱带滑动的浅层土质滑坡(图 1)。

根据现场调查资料得到滑坡区与非滑坡区的土体



图 1 滑坡全貌

Fig. 1 Landslide panorama

性质, 具体见表 1。

表 1 土体参数

Table 1 Soil parameters

岩土参数	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa
非滑坡区域	32.5	0.35	20	25	20
滑坡区域	32.5	0.40	20	10	15

注: E 为弹性模量, μ 为泊松比, γ 为容重, φ 为摩擦角, c 为黏聚力。

滑坡段管道采用的 X80 管道, 管径 1 016 mm, 管道壁厚 18.2 mm, 埋深约 1 m, 具体管道性质见表 2。

表 2 管材参数

Table 2 X80 pipe parameters

型号	外径/mm	壁厚/mm	密度/(kg·m ⁻³)	E/GPa	μ	σ/MPa
X80	1 016	18.2	7 850	207	0.3	555

注: σ 为屈服应力。

2.2 模型建立

运用 ABAQUS 建立简化的管-土有限元模型, 滑坡过程中, 土体将推动管道同时运动, 后方的土体主要起推动作用, 前方的土体起阻碍作用。因此模型拟从后方土体加载位移荷载。依据文献 [16] 证明结果可知, 管道后方土体大于 5D 时, 后方土体对管道的偏移影响可忽略, 因此模型后方土体长度拟取 10 m, 管道埋深取 1 m。非滑坡区土体宽度取 25 m, 高度取 6 m, 初始裂缝位置取 3 m, 裂缝深度为滑坡深度, 土体本构模型采用摩尔库伦模型。

管-土装配后, 建立 3 个分析步分别用于计算管道自重、内压和土体位移, 管道与土体间的相互作用模型选用非线性接触模型, 接触采用面-面接触, 选取管道外表面为主表面, 法向方向采用硬接触, 切向方向选用

“罚”，摩擦系数与土体性质相关，由文献可知黄土与管道间摩擦系数可取 0.4^[19-21]。

位移荷载于边界条件栏施加，通过在管道滑坡区中部建立局部坐标系，以其为坐标，对滑坡区后方施加位移分布方式为四次抛物线形式的位移荷载。整个管土模型底面选为固定约束，模型除去滑坡区的侧面四周选为与该面垂直的面约束。

为避免管道后方土体长度对不同滑坡宽度下管道的极限滑坡位移计算结果产生影响，选取最大滑坡宽度工况，即 80 m 为研究依据，建立后方土体长度 10 m 时的管-土模型。图 2 为模型计算后的土体位移云图，可以看出管道后方土体长 10 m 时，土体位移较大的区域集中在施加滑坡位移处，且后方土体存在位移无变化区域，因此可保证后续在计算不同滑坡宽度时，都可在位移云图上观察到完整位移变化区域。

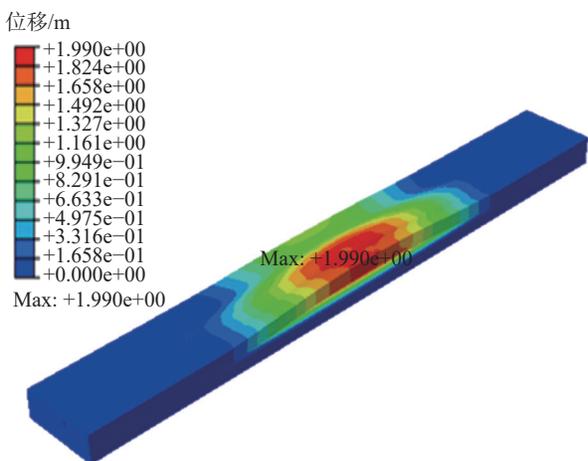


图 2 后方长度 10 m 时土体位移云图
Fig. 2 Displacement cloud diagram of rear soil mass at 10 m

2.3 模型网格敏感性分析

网格划分是有限元模型计算的基础，网格的尺寸会对计算结果的准确性产生直接影响。因此需对管道厚度方向的网格层数进行分析，依次划分为 2~6 层，提取各层数下管道迎滑坡面中部处的轴向应力(图 3)。

由图 3 可知，管道壁厚方向网格划分为 2、3 层时，应力值存在偏差；当划分为 4 层时，管道应力曲线与 5 层、6 层完全重合，几乎不存在偏差，因此考虑较为节约计算成本的划分方式，将管道厚度方向的网格划分为 4 层。

对于建立的管-土模型，采取不同应力对应不同网格密度的原则，将滑坡区网格以 0.5 m 尺寸划分，非滑坡区网格以 0.75 m 尺寸划分进行计算，并在此模型基础上增加一倍的网格数量，将网格细化，提取两模型管道迎滑坡面中部的轴向应力。通过网格细化前后管道

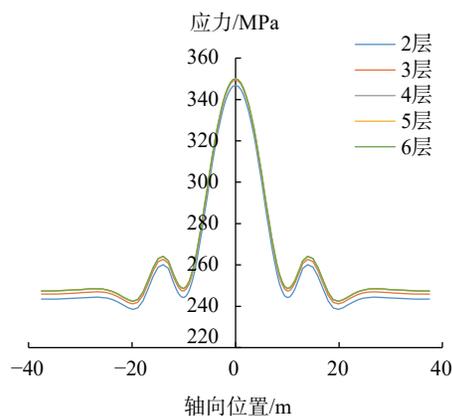


图 3 不同层数管道应力分布图

Fig. 3 Stress distribution diagram of pipelines with different layers

应力值的对比，排除网格尺寸对计算精度的影响，结果如图 4 所示。

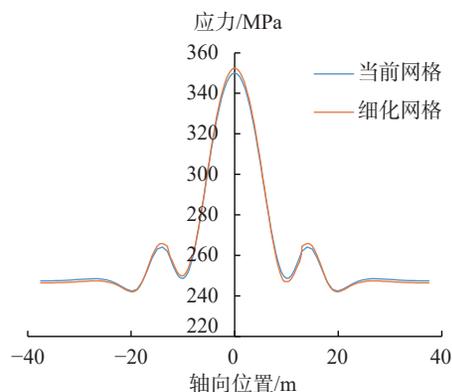


图 4 网格细化管道应力对比图

Fig. 4 Comparison diagram of pipe stress before and after mesh refinement

由图 4 可知，模型在网格细化前后管道的应力值与分布情况差别极小，曲线整体重合度很高，细化前的网格尺寸满足计算需求，因此后续模型按细化前网格尺寸进行划分。最终网格划分完成后的有限元模型如图 5 所示。

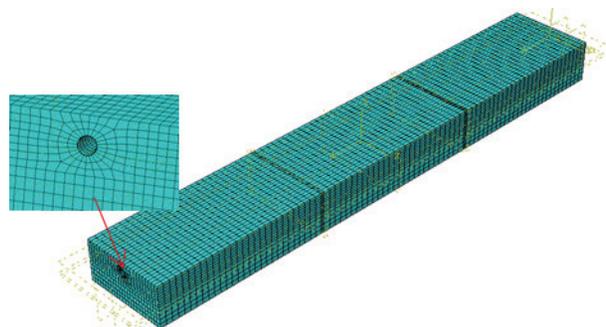


图 5 网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grid division

模型依据实际工况建立, 针对实际工况数据局限性, 对有限元边界条件的设置和模型网格大小敏感性进行分析, 以验证模型有效性。模型边界条件的选用是众多学者通过大量试验和数据验证后的边界加载方式, 根据网格尺寸分析, 选取的网格尺寸在一定精度上不会影响计算结果, 能很好地反应滑坡与管道的相互关系, 因此, 认为模型可行可信。

3 滑坡参数影响分析

3.1 不同裂缝位置影响分析

滑坡处于蠕滑变形阶段时, 滑坡体各处会慢慢形成裂缝, 裂缝出现的位置与滑坡稳定性有关。当裂缝与管道的距离不同时, 管道的应力、位移、所能承受的极限滑坡位移值都存在差异, 因此需建立不同裂缝距离下的管-土模型进行分析。

管道极限滑坡位移为管道应力达到许用应力时的滑坡位移荷载, 1.4 节计算得到许用应力为 499.5 MPa, 因此在不同裂缝位置下, 管道应力达到 499.5 MPa 时的滑坡位移荷载即是管道在该滑坡宽度下所能承受的极限滑坡位移。

模型计算完成后, 通过提取管道的轴向位移分布数据, 可得管道最大位移。同理可根据土体位移云图得到土体最大位移。

不同裂缝下的管道位移、土体位移、管道极限滑坡位移变化曲线结果如图 6 所示。

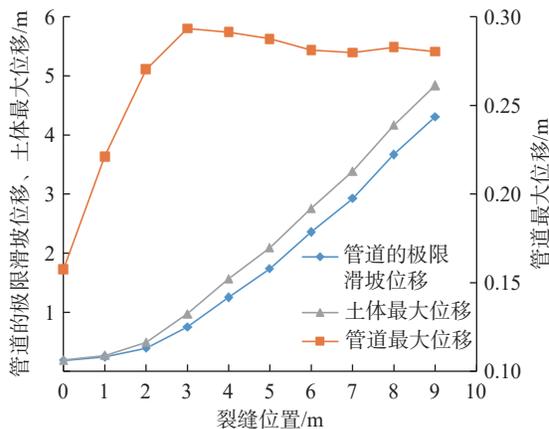


图 6 不同裂缝位置下管道的极限滑坡位移、最大位移和土体最大位移变化曲线

Fig. 6 Variation curves of limit landslide displacement, maximum displacement and maximum displacement of soil mass of pipeline under different crack positions

由图 6 可知, 随着裂缝与管道之间的距离增加, 管道所能承受极限滑坡位移不断增加。当裂缝距离管道

小于 1 m 时, 管道的极限滑坡位移增长缓慢, 在裂缝位置 1~3 m 时, 曲线上升趋势加快, 裂缝距离 3 m 之后管道的极限滑坡位移开始近线性增长。土体最大位移变化趋势同管道的极限滑坡位移曲线变化趋势一致, 裂缝位置 3 m 之后一直保持比管道的极限滑坡位移值略大一些, 曲线近似平行。管道最大位移的变化有所不同, 当裂缝距管道小于 3 m 时, 管道最大位移不断增加, 最大为 0.293 m, 随后随着裂缝距离的增加, 管道达到许用应力时的最大位移缓慢减小, 最后稳定在 0.28 m 左右, 可见裂缝位置对管道的位移影响较小。

滑坡裂缝位置不同, 管道的最大应力也会随位移荷载产生变化, 图 7 为不同裂缝位置与位移荷载下管道的应力变化曲线。由图 7 可知, 当裂缝距管道小于 3 m 时, 随着位移荷载的增加, 管道的应力在达到屈服应力之前呈线性增加, 从裂缝位置 4 m 开始呈抛物线型变化, 且随着裂缝位置的增加, 管道的应力随位移荷载变化的变化速率不断变小, 曲线的斜率不断减小, 从裂缝距管道 6 m 开始, 随着位移荷载的增加, 管道应力变化曲线存在一段近似无增长期, 这是因为裂缝距管道较远, 裂缝处受到位移荷载产生的变形需要推动裂缝与管道之间的土体发生足够变形才能使管道应力增长, 可视作是裂缝与管道间的土体消耗了一部分位移荷载, 且随着裂缝位置的增加, 这种消耗也不断增加。

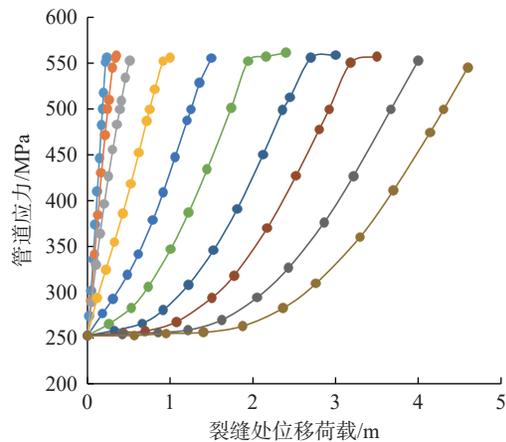


图 7 不同裂缝位置与位移荷载下管道的应力曲线图

Fig. 7 Stress curve of pipeline under different crack positions and displacement loads

注: 图 7 从左到右分别为裂缝位置距管道 0~9 m 时的曲线。

图 8 为各裂缝位置下, 管道位移随位移荷载的曲线。由图 8 可知, 裂缝位置小于 1 m 时, 位移变化曲线近似重合, 曲线斜率相同; 随着裂缝位置的增大, 管道位移与位移荷载的变化曲线斜率不断减小, 且从裂缝位置 4 m 开始, 曲线由直线型逐步发展为抛物线型, 从裂缝

位置 6 m 开始,管道位移变化曲线都有一段位移无增长区,曲线近似水平,这是由于裂缝距管道越远,位移荷载作用时需要推动的土体量就越大,即土体消耗位移荷载量变大,需要更大的位移荷载才能推动管道产生位移,管道位移开始增加后,随着位移荷载的增加,管道位移的增速不断增大,即抛物线斜率不断变大,但增速始终小于裂缝位置 0~3 m 时的管道位移增速。

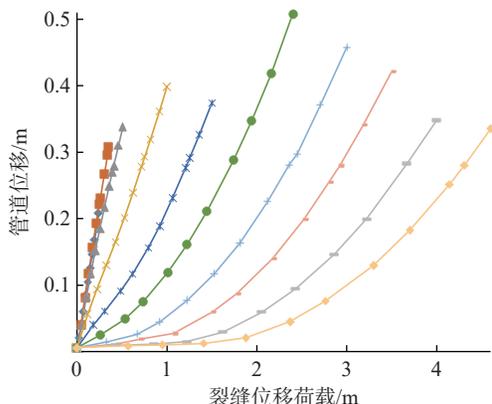


图 8 不同裂缝位置与位移荷载下管道的位移曲线图

Fig. 8 Displacement curve of pipeline under different crack positions and displacement loads

注:图 8 从左到右分别为裂缝位置距管道 0~9 m 时的曲线。

3.2 滑坡宽度影响分析

管道横穿滑坡时,不同的滑坡宽度对管道安全产生的影响不同,管道所能承受的极限滑坡位移也不同。根据项目调研数据显示,滑坡宽度在 10~80 m 的滑坡占比为 50.91%,因此根据资料建立不同滑坡宽度下的管-土模型,分析管道所能承受的极限滑坡位移与力学行为变化。图 9 为不同滑坡宽度管道的极限滑坡位移、管道最大位移与土体最大位移曲线图。

由图 9 可知,在滑坡宽度 35 m 之前,随着滑坡宽度的增加,管道所能承受的极限滑坡位移不断减小,且减速减低,滑坡宽度 35 m 之后管道的极限滑坡位移随滑坡宽度的增大而不断增加,最小为 0.788 m,这是由于当滑坡宽度较小时,即在滑坡宽度 35 m 前,滑坡宽度的增大导致管道的极限滑坡位移的减小效果大于应力集中减弱的效果,故此阶段呈现管道的极限滑坡位移不断减小的趋势,在滑坡宽度 35 m 之后,滑坡区管道应力集中的削弱导致管道的极限滑坡位移增加的作用大于受位移荷载作用宽度增大的效果,故管道的极限滑坡位移呈现不断增加的趋势。不同滑坡宽度下管道应力达到许用应力时管道的最大位移随滑坡宽度的增加而不断增大,而土体的最大位移变化趋势与管道的极限滑坡位移变化趋势相同。

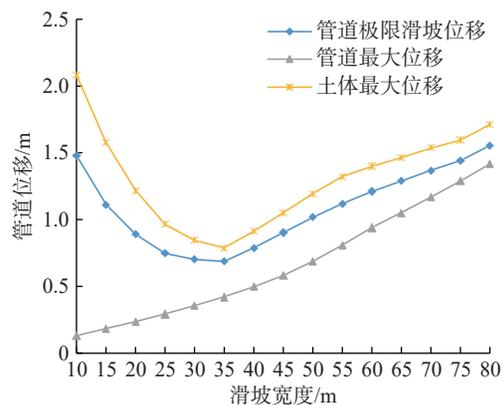


图 9 不同滑坡宽度下管道的极限滑坡位移、管道最大位移与土体最大位移曲线

Fig. 9 Curves of limit landslide displacement, maximum pipeline displacement and maximum soil displacement of pipelines with different landslide widths

图 10、图 11 为不同滑坡宽度下管道应力变化曲线。由图可知,在滑坡宽度 10~30 m 时,随着位移荷载的增加,管道应力不断增大,且增速不断增长,曲线斜率不断变大,管道应力变化曲线由幂函数型变化为直线型,滑坡宽度为 35 m 时的曲线斜率比滑坡宽度 30 m 时略大;在滑坡宽度 35~80 m 时,随着滑坡宽度的增加,管道的应力曲线斜率不断减小,且曲线由直线型变化为幂函数型,故滑坡宽度 35 m 是管道应力变化的分界点。

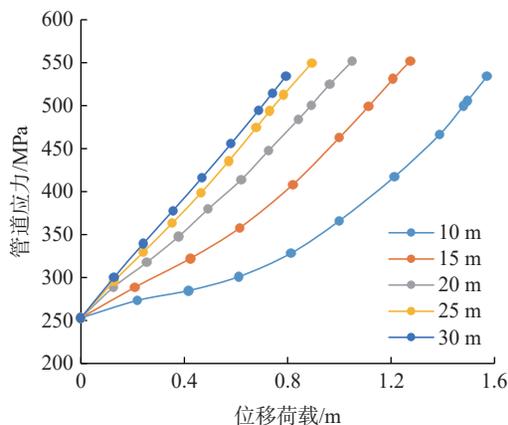


图 10 滑坡宽度 10~30 m 的管道应力变化曲线

Fig. 10 Pipeline stress change curve with landslide width of 10~30 m

4 多元回归分析

管道在山区滑坡监测时需要能够快速分析管道应力与滑坡、位移荷载之间的定量关系,因此根据有限元计算结果,可建立多元回归方程,以此知晓各工况下管道的应力与所能承受的极限滑坡位移,判断管道是否处于安全状态。

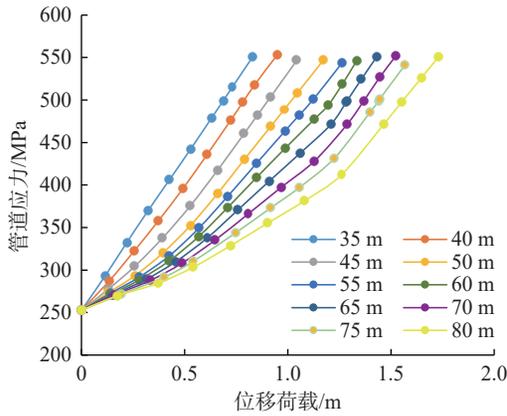


图 11 滑坡宽度 35~80 m 的管道应力变化曲线

Fig. 11 Pipeline stress change curve with landslide width of 35~80 m

4.1 不同裂缝位置下多元回归分析

以裂缝位置和位移荷载作为自变量,管道最大应力作为因变量,进行多元回归分析(图4)。采用1Stopt软件定义得到管道应力与裂缝位置和滑坡位移的多元拟合式,见式(4):

$$\sigma = E \left(a \times b \frac{x}{L_s} + c \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + \sigma_0 \quad (4)$$

式中: σ ——管道受到的应力/MPa;

E ——管道弹性模量;

a 、 b 、 c ——未知系数,与土体类型和管道类型相关,是一个无量纲量;

x ——裂缝到管道的距离/m;

y ——裂缝处土体移动的位移/m;

L_s ——裂缝位置离管道的最大距离/m;

σ_0 ——管道正常运行时的应力值/MPa。

通过有限元计算结果进行拟合分析, $\sigma_0=252.5$ MPa, L_s 取 10 m, $E=2.07 \times 10^5$ MPa, 软件分析得到系数 $a=3.488$, $b=8.90 \times 10^{-5}$, $c=5.94 \times 10^{-3}$, 最终可得管道应力随裂缝位置和滑坡位移的影响关系式(5), 模型检验见表3。

$$\sigma = E \left(3.488 \times (8.90 \times 10^{-5}) \frac{x}{L_s} + 5.94 \times 10^{-3} \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + 252.5 \quad (5)$$

由表3可知, 相关系数 $R=0.991$, 相关系数的平方 $R^2=0.982$, 决定系数为 0.97, 相关系数与决定系数较大, 说明拟合的方程与原数据比较贴切, 回归效果较好。

表3 模型检验

Table 3 Model test

模型	R	R^2	决定系数	均方差	F 检验
检验值	0.991	0.982	0.970	16.364	133.490

4.2 不同滑坡宽度下多元回归分析

由于同一土体位移下滑坡宽度从 10~30 m 时管道应力逐渐增大, 而 35~80 m 时管道应力又逐渐减小, 因此采取分段函数式进行多元拟合, 见式(6):

$$\sigma = \begin{cases} E \left(a \times \frac{x}{L_s} + b \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + \sigma_0, x \leq 30 \\ E \left(a \times \frac{L_s}{x} + b \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + \sigma_0, x > 30 \end{cases} \quad (6)$$

式中: x ——管道穿越滑坡区的长度/m;

y ——位移荷载/m。

其余同式(5)。

当滑坡宽度小于 30 m 时, 软件计算得出系数 $a=97.51$, $b=-4.48$, 代入得到式(7):

$$\sigma = E \left(97.51 \times \frac{x}{L_s} - 4.48 \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + 252.5, x \leq 30 \quad (7)$$

当滑坡宽度大于 30 m 时, $a=10.41$, $b=-8.33$, 代入得到式(8):

$$\sigma = E \left(10.41 \times \frac{L_s}{x} - 8.33 \right) \left(\frac{y}{L_s} \right)^2 + 252.5, x > 30 \quad (8)$$

表4、表5为模型检验, 可知 R 值都较大, 且决定系数都达到了 0.9 以上, 说明拟合的方程与原数据比较贴切, 回归效果较好。

表4 滑坡宽度小于 30 m 的模型检验

Table 4 Model test of landslide width less than 30 m

模型	R	R^2	决定系数	均方差	卡方检验系数	F 检验
检验值	0.985 7	0.971 6	0.936 4	31.45	141.43	144.76

表5 滑坡宽度大于 30 m 的模型检验

Table 5 Model test of landslide width more than 30 m

模型	R	R^2	决定系数	均方差	卡方检验系数	F 检验
检验值	0.981 1	0.962 6	0.925 9	26.64	224.24	490.04

5 结论

基于中贵天然气管线某滑坡处资料, 建立 X80 管道横穿滑坡计算模型, 进行数值模拟研究。对不同滑坡裂缝距离、不同滑坡宽度下管道的力学行为与极限滑坡位移进行讨论, 并进行多元回归分析, 得出以下结论:

(1) 不同滑坡裂缝位置下管道的应力、位移、土体位移随位移荷载的增加而增大; 当滑坡裂缝与管道间距离增大时, 管道的应力变化曲线由直线型变化为幂函数型, 且曲线斜率不断减小; 管道位移增长量不断变小, 曲线斜率不断减小。从裂缝位置 6 m 开始, 裂缝与管道的

土体对位移荷载的消耗量较大,管道应力曲线都有一段停滞期,并不断变长;工程中应及时对距离管道小于 6 m 的裂缝进行处理。

(2)随着滑坡裂缝到管道处距离的增大,管道所能承受的极限滑坡位移值不断增大,当裂缝位置为 9 m 时,管道所能承受的极限滑坡位移达 4.03 m。

(3)不同滑坡宽度下,管道应力、位移随位移荷载的增加而增大,当滑坡宽度小于 30 m 时,管道应力的增速随滑坡宽度的增加而增大,此后随滑坡宽度的增加而减小,管道的应力曲线由抛物线型变为直线型再变为抛物线型。

(4)随着滑坡宽度增长,管道的极限滑坡位移先减小后增大,滑坡宽度为 35 m 时管道的极限滑坡位移最小;管道应力曲线的增速在滑坡宽度不大于 35 m 时随位移荷载的增加而增大,此后不断减小,工程中应着重关注横穿宽度 35 m 左右的滑坡时的管道安全。

参考文献(References):

- [1] 黄维和,郑洪龙,王婷.我国油气管道建设运行管理技术和发展展望[J].油气储运,2014,33(12):1259-1262. [HUANG Weihe, ZHENG Honglong, WANG Ting. Construction and operation management technology and prospect of oil and gas pipelines in China [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1259-1262. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 高鹏.2021年中国油气管道建设新进展[J].国际石油经济,2022,30(3):12-19. [GAO Peng. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2021 [J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(3): 12-19. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张满银,王生新,孙志忠,等.基于云理论的油气管道滑坡危险性综合评价[J].工程科学学报,2018,40(4):427-437. [ZHANG Manyin, WANG Shengxin, SUN Zhizhong, et al. Comprehensive evaluation of landslide risks of oil and gas pipelines based on cloud theory [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(4): 427-437. (in Chinese with English abstract)]
- [4] MA Hongqiang, HE Binxian, LUO Xinmei, et al. Investigation on strain characteristic of buried natural gas pipeline under longitudinal landslide debris flow [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 86: 103708.
- [5] YİĞİT A, LAV M A, GEDIKLI A. Vulnerability of natural gas pipelines under earthquake effects [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018, 9(1): 17-36.
- [6] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郝建斌,刘建平,荆宏远,等.横穿状态下滑坡对管道推力的计算[J].石油学报,2012,33(6):1093-1097. [HAO Jianbin, LIU Jianping, JING Hongyuan, et al. A calculation of landslide thrust force to transverse pipelines [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1093-1097. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 练章富,李风雷.滑坡带埋地管道力学强度分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(2):165-170. [LIAN Zhangfu, LI Fenglei. Analysis of mechanical strength of buried pipelines in landslide areas [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 165-170. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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 Shanbi, LIAO Wen, XU Mingjun, 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 with English abstract)]
- [10] 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 Sha, WEN Baoping. 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 with English abstract)]
- [11] CHAUDHURI C H, CHOUDHURY D. Buried pipeline subjected to seismic landslide: A simplified analytical solution [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 134: 106155.
- [12] 曹乃月.滑坡作用下埋地管线的安全性研究——以某管段环江县段为例[D].绵阳:西南科技大学,2020. [CAO Naiyue. Study on safety of buried pipelines under landslide: Based on Huanjiang County of pipelines [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 罗忠行,雷宏权.基于FLAC3D的米贝复式滑坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):52-62. [LUO Zhongxing, LEI Hongquan. Study on Mibei Landslide analysis based on FLAC3D [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 52-62. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张鹏,唐雪梅,李虎,等.滑坡作用下X80腐蚀管道的极限宽度分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):47-54. [ZHANG Peng, TANG Xuemei, LI Hu, et al. Study on Mibei Landslide analysis based on FLAC3D [J]. The Chinese

- Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 47 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李明. 穿越土质滑坡体的钢质管道受力特性分析及抗滑桩加固研究 [D]. 济南: 济南大学, 2021. [LI Ming. Mechanical characteristics analysis of crossing soil landslide steel pipeline and anti-slide pile reinforcement [D]. Jinan: University of Jinan, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张伯君. 山体滑坡区域内长输埋地油气管道强度研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [ZHANG Bojun. Research on strength behavior of long-distance buried pipe for oil and gas transportation in the landslide area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ZHENG J Y, ZHANG B J, LIU P F, et al. Failure analysis and safety evaluation of buried pipeline due to deflection of landslide process [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 25: 156 – 168.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输油管道工程设计规范: GB 50253—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of oil transportation pipeline engineering: GB 50253 —2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.(in Chinese)]
- [19] CHAN P D S. Soil-pipeline interaction in slopes [M]. University of Calgary, 1999.
- [20] 李琪, 赵小二, 武周虎, 等. 溶潭容积对岩溶管道穿透曲线的影响实验 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 979 – 991. [LI Qi, ZHAO Xiaoer, WU Zhouhu, et al. Experiments on effect of karst pool volume on breakthrough curves in karst conduits [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 979 – 991. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈亚洲, 董维红. 利用示踪试验时间-浓度曲线分析岩溶管道结构特征 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 41 – 47. [CHEN Yazhou, DONG Weihong. Analysis of structural characteristics of karst conduit by time-concentration curve of tracer test [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 41 – 47. (in Chinese with English abstract)]