

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.03.009

油气管道横穿滑坡模型试验研究

赵雅君¹, 张振永², 王东源², 江珂³, 黄栋^{3*}

ZHAO Ya-Jun¹, ZHANG Zhen-Yong², WANG Dong-Yuan², JIANG Ke³, HUANG Dong^{3*}

1. 国家管网建设项目管理分公司, 河北廊坊 065001; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000;

3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041

1. Construction Project Management Branch, Pipe China, Langfang 065001, Hebei, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, Hebei, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, Sichuan, China

摘要: 滑坡是造成长输埋地油气管道破坏的主要地质灾害之一。本文以浅层土质、横向滑坡为主要研究对象, 开展大尺寸小管径足尺模型试验, 通过模型箱加载装置控制斜坡坡度和位移, 对油气管道横穿滑坡时管道的受力响应规律和变形破坏特征进行研究。研究表明: 当斜坡坡度大于 20° 时, 管道应变增幅变大; 管道跨中发生局部屈曲, 整体呈梁式对称弯曲破坏形式, 试验极限压应变值与 DNV(挪威船级社)规范和国内规范计算值基本一致; 管道处于弹性和弹塑性阶段时, 管道轴向应变的试验值与数值模拟(PSI 模型和实体单元模型)结果基本一致, 管道屈曲破坏时试验值显著大于数值模拟结果。本研究对于山区油气管道敷设和滑坡防治具有重要的指导意义。

关键词: 油气管道; 滑坡; 模型试验; 轴向应变

中图分类号: P694; TE832

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-03-0538-10

Zhao Y J, Zhang Z Y, Wang D Y, Jiang K and Huang D. 2024. Experimental Study of an Oil and Gas Pipeline Across a Landslide Model. *South China Geology*, 40(3): 538-547.

Abstract: Landslides are one of the main geological hazards that cause damage to long-distance buried oil and gas pipelines. This article focuses on shallow soil and lateral landslides, conducts full-scale model tests with large and small pipe diameters. The force response law and deformation failure characteristics of oil and gas pipelines crossing landslides were studied by controlling the slope gradient and displacement through a model box loading device. The results indicate that when the slope gradient is greater than 20°, the strain amplification of the pipeline increases significantly. The pipeline undergoes local buckling at the mid-span position, presenting a symmetrical beam-like bending failure mode as a whole. The ultimate compressive strain value obtained from the experiment is basically consistent with the calculation results of DNV (DET NORSKE VERITAS) regulations and relevant domestic regulations. When the pipeline is in the stage of elastic and elastoplastic deformation, the axial strain measured in the experiment is in good agreement with the results of numerical simulation (PSI model and solid unit model), but when the pipeline buckles and fails,

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-04-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42171087)、国家管网科研项目(FWJF-2022-198)

第一作者: 赵雅君(1972—), 女, 工程师, 从事国家管网建设项目前期规划研究, E-mail: zhaoyj02@pipechina.com.cn

通讯作者: 黄栋(1980—), 男, 副研究员, 从事山地灾害(滑坡)形成机理、风险评估、监测及预警研究, E-mail: dhuang@imde.ac.cn

the experimental value is significantly greater than the numerical simulation result. This study provides an important reference for the laying of oil and gas pipelines and landslide prevention in mountainous areas.

Key words: pipelines; landslides; model tests; axial strain

油气管网是保障油气供应的重要基础设施,是实现能源生产与消费革命的重要支撑,今后10~15年仍将是我国油气管道建设的高峰期(黄维和等, 2019)。《中长期油气管网规划》(国家发展改革委和国家能源局, 2017)中指出到2025年我国管网总规模将达到24万千米,基本建成现代油气管网体系。我国是一个多山的国家,山区面积约占陆地总面积的2/3。山区地质环境复杂,构造运动活跃,山地灾害高发频发,长输油气管道线路长、跨度大、易损性高,极易受到地质灾害威胁(帅健等, 2008)。在山区油气管道范围内地质灾害的发育和分布十分广泛,一旦发生将引起管道失效或破坏并造成严重的后果和损失。其中,滑坡是对山区管道危害最大且发生频率最高的灾害类型,近年来发生了多次典型事故,如2015年12月20日,西气东输管道深圳段由于光明新区发生滑坡并造成管道爆炸,导致香港供气中断长达18天;2017年7月2日,中缅管道贵州晴隆段沙子镇小寨村处公路边坡发生滑坡,挤断边坡中敷设的天然气管道,导致天然气泄漏引发燃爆,事故造成8人死亡、35人受伤;2018年6月10日,与2017年事故发生处间隔不足1.5 km的沙子镇三合村蒋坝营发生滑坡,在此处发生天然气泄漏并引发燃爆,事故造成1人死亡、23人受伤。可见,随着我国油气管道里程的快速增长,管道遭受滑坡灾害的风险不断增大,安全运营形势愈发严峻,开展管道穿越滑坡致灾机理模型试验研究显得非常迫切。

滑坡发生时,土体与管道发生相互作用,同时受到管道内压、温度荷载、地面附加荷载等共同作用,是一个多因素耦合的复杂过程。理论解析、数值模拟、物理试验是目前研究滑坡与管道相互作用的三种基本方法。目前,已有部分学者(O'Rourke et al., 1995; Rajani et al., 1995; 邓道明等, 1998; 刘慧, 2008)采用理论方法对滑坡推力下管道的受力变形进行简化计算,并推导出管道的

内力与位移方程得到解析解。还有一些学者(陈利琼等, 2017; Zhang S Z et al., 2017; 臧雪瑞等, 2020; Liao Y et al., 2021; 刘鹏等, 2021)利用数值模拟的方法开展滑坡作用下的油气管道力学响应特征研究,得到了一些规律。但是,理论解析虽然计算方便但边界条件假设过多,其结果仅适用于材料处于弹性阶段,难以适用于管道通过滑坡等大变形路段。数值模拟中管土相互模型多采用土弹簧模型或实体接触模型,存在大量简化,与实际仍存在部分误差,且在进行大变形计算时会产生网格畸变降低计算精度。因此,利用大比例尺滑坡模型,开展坡体移动段管土相关作用模型试验研究,无疑是一种行之有效的方法。目前,国内外针对管道滑坡的模型试验研究并不多见,林冬等(2011)进行了一组全尺寸试验,在人工堆积的土质滑坡中埋设外径为219 mm的管道,发现管道破坏形式为梁式弯曲,应力最大点为滑坡宽度中心和滑坡左右边界处,管道的应力变化与滑坡变形之间具有同步性。马清文(2007)使用土箱试验研究滑坡-管道相互作用的动力学机理,分析了不同固定支座配置方式对滑动阻力的影响。王仁超(2019)设计了使用PVC管模拟滑坡作用下管道受力变形响应过程,揭示出滑坡体中管道受力和变形破坏规律。

本文针对油气管道横穿滑坡的特征,借助于大型滑坡模型试验平台,开展坡体移动段管土相互作用模型试验,揭示滑坡发生过程中管道的变形和破坏规律,为山区滑坡易发地段管道安全设计准则的建立提供科学依据。

1 试验原理和方案

1.1 试验装置及原理

研究对象为管道横向穿越的浅层土质滑坡,土体为西南山区第四系全新统(Q_n)覆盖层的碎石土、黏土。管道类型为西南油气田集输钢质管道,

钢级选用 Q235。模拟平台采用中国科学院成都山地灾害与环境研究所(简称“山地所”)的大型崩塌模拟平台,如图 1 所示。该试验平台由山地所自主研制,台体尺寸为 6000 mm(长)×1400 mm(宽)×1600 mm(高),可实现无级变坡、推力变化、渗流、移动等功能。试验过程中通过坡度控制装置对模型箱的倾角进行调节,模拟不同坡度的斜坡,变坡范围为 0°~45°;此外可通过千斤顶推动模型箱后壁钢板向前移动,使坡体产生位移,可提供最大推力为 0.8 t,最大推动距离为 30 cm。

1.2 模型尺寸及材料参数

模型如图 2 所示,滑体尺寸为 4300 mm(长)×1050 mm(宽)×900 mm(高),管道埋深为 400 mm。滑体采用现场取回的碎石土进行堆砌压实,控制其密度为 19.5 KN/m³,经过三轴不排水试验测得岩土体力学参数如表 1 所示。

试验所用管道选用 Q235 型镀锌无缝钢管,长度为 1500 mm,管径 50 mm,壁厚为 1.2 mm,管道力学参数如表 2 所示。

1.3 测试内容与数据采集

1.3.1 应变测量

为了获取试验过程中管道轴向应变的变化和分布规律,在管道迎滑侧和背滑侧分别布置一条测线,如图 3 所示。每条测线布设 11 枚轴向应变片,相邻两个应变片之间的距离为 100 mm。其中,背滑侧应变片编号为 S1~S11,迎滑侧应变片编号为 S12~S22。

1.3.2 土压力测量

为了获取在不同坡度和滑坡位移条件下,管周土压力的变化情况,在管道四周即管前、管后、管顶和管底分别布置一枚土压力盒进行监测。土

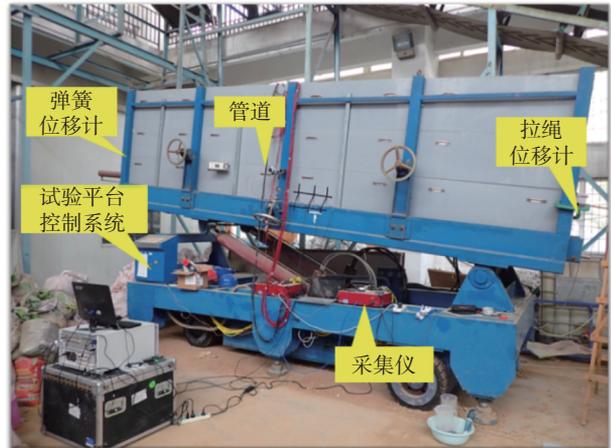


图 1 大型崩塌模拟平台

Fig. 1 Large scale sliding test simulation platform

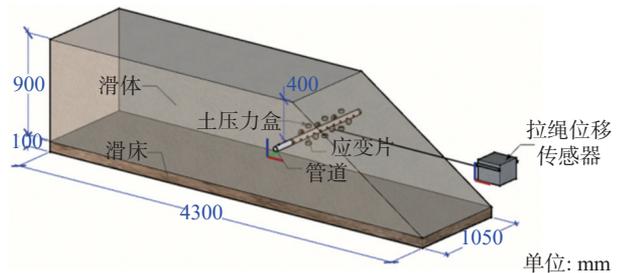


图 2 模型试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model test

压力盒选用量程 0.5 MPa,布设于跨中截面和 1/4 截面,布置三组共计 12 枚土压力盒。其中,由左至右编号为 P1~P4、P5~P8、P9~P12。土压力测试中,土压力盒不能与管体表面直接接触,管道沿线土压力盒分别布置在距离管壁前后侧约 20 mm 的土体中,安装时应避免测试区有较大土颗粒的块体,且避免用力按压压力盒中部感应区,土压力盒及其安放布置示意图见图 4。

1.3.3 位移测量

为了对管道变形过程中挠度进行测量,在管

表 1 岩土体力学参数

Table 1 Geotechnical physical parameters

岩土体类型	重度(kN/m ³)	弹性模量(MPa)	泊松比	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)
碎石土	19.5	27.5	0.3	15	35

表 2 管道力学参数

Table 2 Pipe mechanical parameter

管径(mm)	壁厚(mm)	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	屈服强度MPa)
50	1.2	7850	210	0.3	235

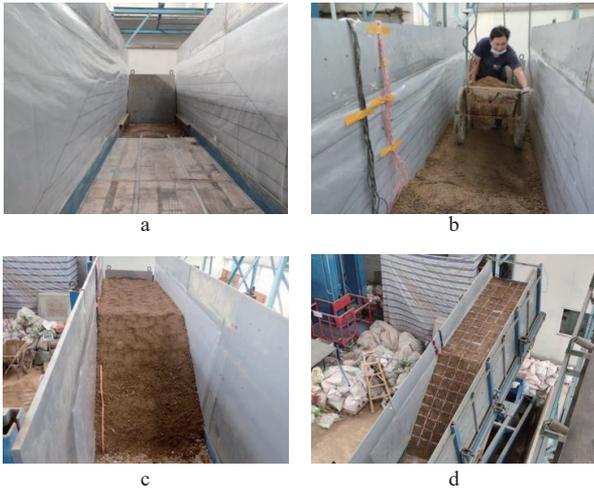
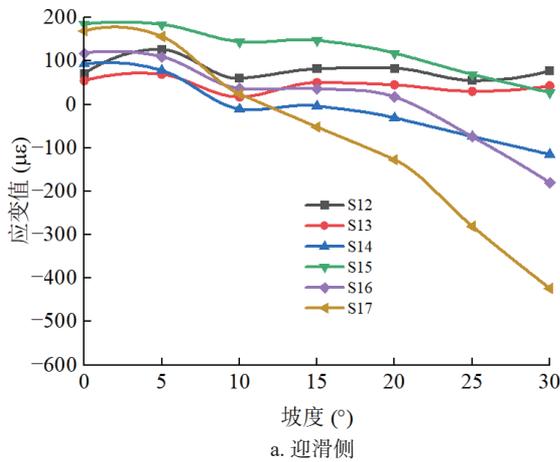


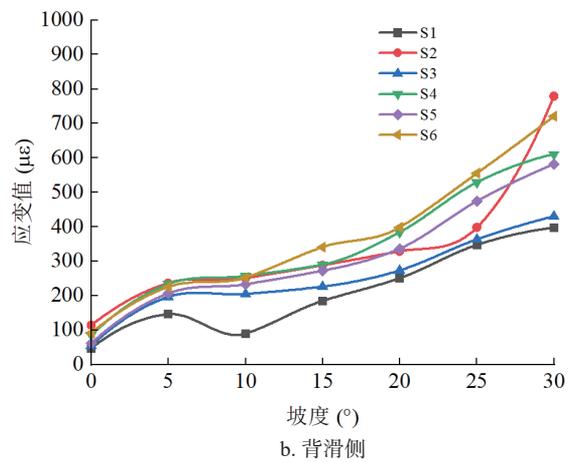
图5 模型制备

Fig. 5 Model preparation process

变处于管道跨中(即 750 mm 处), 两侧应变呈现对称式分布。随着坡度的增大, 管道沿轴线上



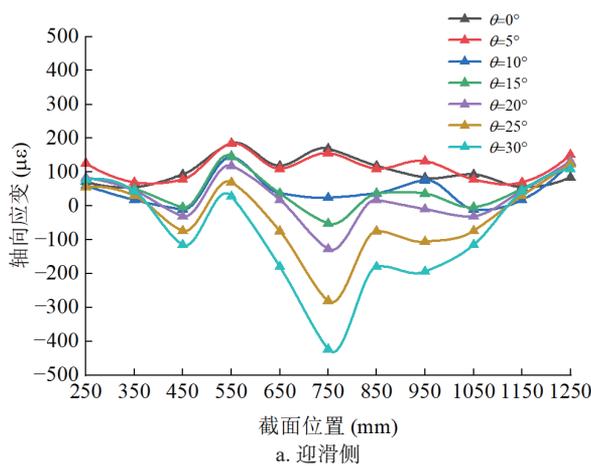
a. 迎滑侧



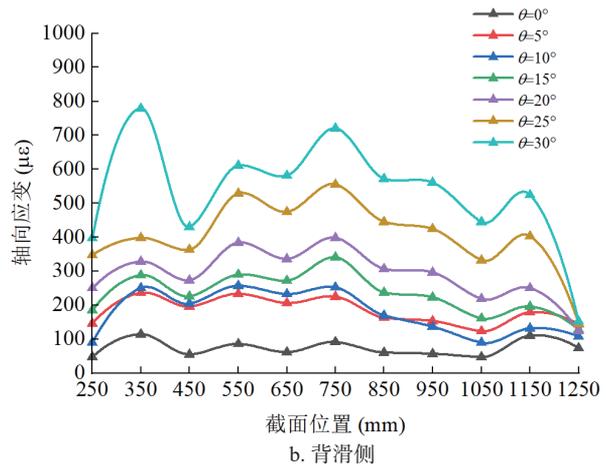
b. 背滑侧

图6 管道应变变化图

Fig. 6 Diagram of axial strain variation of pipeline



a. 迎滑侧



b. 背滑侧

图7 管道应变分布图

Fig. 7 Diagram of axial strain distribution of pipeline

应变逐渐增大, 且迎滑侧应变增幅逐渐集中于跨中区域, 背滑侧应变增幅基本一致(除两端应变值)。

2.1.2 位移加载阶段

当坡度升至 30°, 斜坡稳定后, 进行位移加载模拟滑坡产生。图 8 给出了管道各测点处应变值随滑坡位移的变化曲线。从图 8 中可以看出, 管道各测点应变值随着滑坡位移的增加呈先增大后减小的趋势。当滑坡位移为 58 mm 时, 管道迎滑侧应变值达到极值 -12400 με (受压), 如图 8a 所示。当滑坡位移为 50 mm 时, 管道背滑侧应变值达到极值 8100 με (受拉), 如图 8b 所示。这种现象表明随着滑坡位移增加, 管道拉应变(背滑侧)早于管道压应变(迎滑侧)达到极值, 且拉应变约为压应变的 2/3。

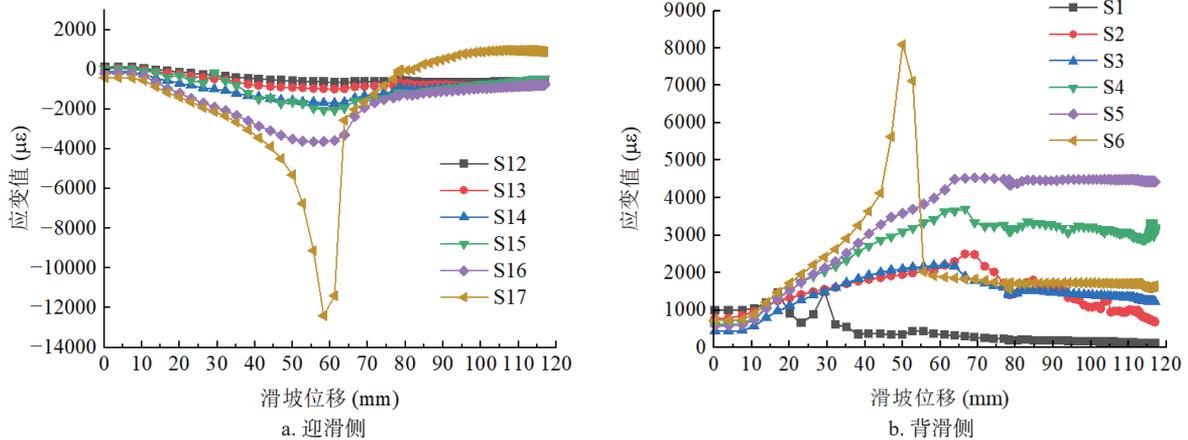


图 8 管道轴向应变变化图

Fig. 8 Diagram of axial strain variation of pipeline

图 9 给出了管道不同截面位置应变值随滑坡位移改变分布规律。由图 9a 中可知, 当滑坡位移为 $D=[40 \sim 60]$ mm 时, 管道的迎滑侧(受压)跨中区域出现应变集中现象, 跨中点出现极值; 当滑坡位移为 $D=[70 \sim 100]$ mm 时, 跨中区域应变值随着滑坡位移的增加呈现逐渐减小的趋势。由图 9b 可知, 当滑坡位移为 $D=[40 \sim 50]$ mm 时, 管道的背滑侧(受拉)跨中区域出现应变集中现象,

跨中点出现极值; 当滑坡位移为 $D=60$ mm 时, 跨中点处应变值出现下降, 跨中点两侧应变值保持不变; 当滑坡位移为 $D=[70 \sim 100]$ mm 时, 跨中区域应变值基本保持不变, 不随着滑坡位移变化而变化。这种现象表明, 随着滑坡位移增加, 管道压应变(迎滑侧)快速达到极值后并逐渐下降, 管道拉应变(背滑侧)达到极值后将保持稳定(除跨中点)。

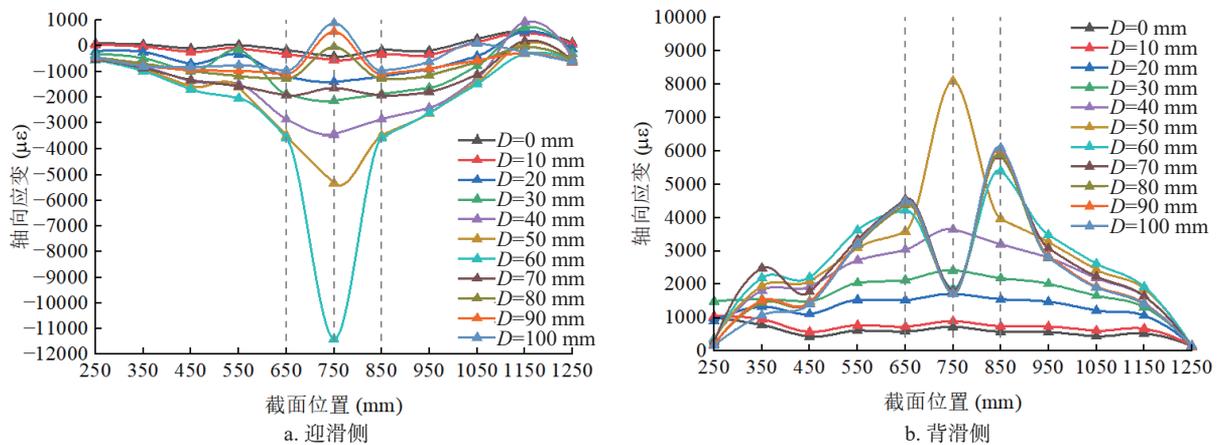


图 9 管道轴向应变分布图

Fig. 9 Diagram of axial strain distribution of pipeline

2.2 管周土压力变化特征

变坡阶段, 管周土压力值随着坡度的增加而增大, 但变化幅度不大, 管周土压力增幅值为 2~10 kPa。图 10 给出了位移加载阶段 500 mm 截面和 750 mm 截面管前土压力盒 P8 和 P12 数据的变化情况。由图 10 可以看出, P8 和 P12 的土压力值随滑坡位移增大呈先增大后减小的趋势, 当

滑坡位移为 $D=47$ mm 时, P8 土压力值达到极值 45 kPa, 随后发生下降; 当滑坡位移为 $D=67$ mm 时, P12 土压力值达到极值约为 68 kPa, 随后维持一段时间后发生下降。

分别取管前土压力极值时刻的管周土压力值分布情况作图(图 11)。由图 11 可知, 坡体移动段管前土压力最大, 管顶次之, 管后和管底由于管

道的支撑作用土压力值较小。由此可知,在变坡阶段滑坡处于静力平衡状态,管周土压力变化不大;在位移加载阶段,管道与管周土体将形成一个结构阻止滑坡下滑,导致管前土压力逐渐增大。

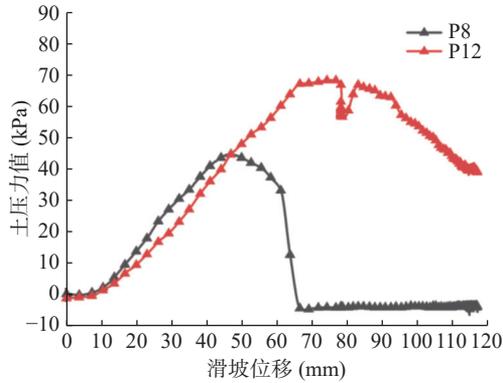


图 10 土压力变化曲线

Fig. 10 Soil pressure variation curve

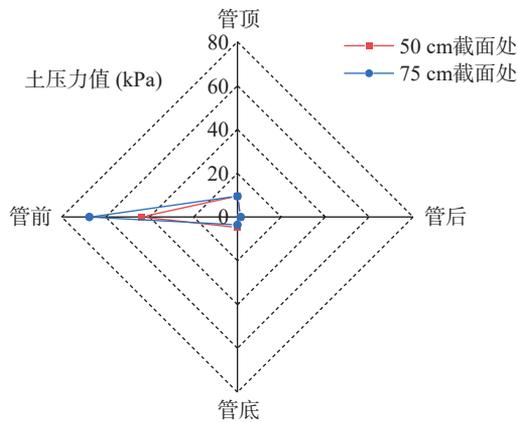


图 11 管周土压力分布

Fig. 11 Distribution of earth pressure around the pipe

2.3 监测数据综合分析

滑坡位移、管道跨中应变、管前土压力值与管道跨中挠度变形之间的关系如图 12 所示。由图 12 可知,位移加载初期即 $D=[0 \sim 10]$ mm 过程中,管周土压力、管道跨中应变及挠度数值随着滑坡位移的增加而逐渐增大,表明管周土处于压缩密实阶段,管道应变及挠度均匀增大,管道处于弹性阶段。滑坡位移加载为 $D=[10 \sim 58]$ mm 过程中,管前土压力值呈先增大后减小趋势,表明管前土处于压缩密压破坏阶段,管前土体于滑坡位移为 46 mm 时发生破坏;随着滑坡的位移增加管道应变及挠度加速增大,管道应变于滑坡位移为 58 mm 时达到极限应变状态,管道处于弹塑性阶段。滑坡位移加载为 $D=[58 \sim 100]$ mm 过程中,管前土压力快速下降,管前土处于残余应力状态;管道失稳破坏,应变值骤降,管道处于破坏阶段。

2.4 管道破坏特征分析

变坡阶段,滑坡整体稳定,管道变形量较小,处于弹性变形阶段。位移加载阶段,滑坡整体发生位移,通过模型箱两侧露出部分管道可发现管道变形显著。位移加载完成后,将管道上层土体分层剥离,不难发现管道跨中发生局部屈曲,整体呈梁式对称弯曲破坏形式,如图 13 所示。

3 讨论

3.1 极限应变分析

目前,油气管道通过地震断裂带、岩溶采空

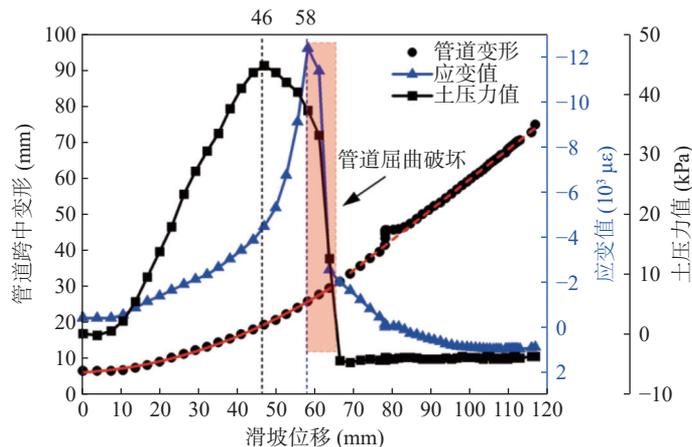


图 12 综合数据分析

Fig. 12 Integrated data analysis

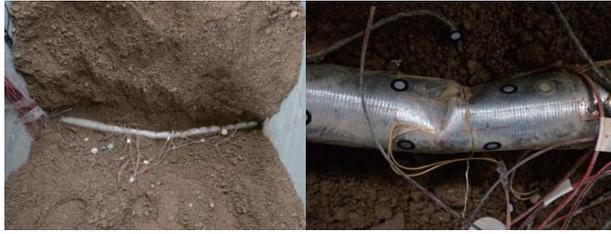


图 13 管道开挖照片

Fig. 13 Photos of pipeline excavation

区、滑坡区、冻土区等大变形区段通常采用基于应变设计方法以保障其安全。基于应变设计理念是极限状态设计, 管道在破坏时临界极限的失效模式包括椭圆化、拉裂、局部屈曲、失稳断裂。为验证试验结果的有效性, 将试验局部屈曲极限压应变值与国内外相关规范推荐取值方法进行对比研究, 结果如下。

3.1.1 挪威船级社 (DNV) 规范

挪威《海底管道系统》(DNV-OS-F101-2007) (DET NORSKE VERITAS, 2007) 指出受弯矩和轴力、内压作用的管道发生局部屈曲时极限压应变按下式进行取值:

$$\varepsilon_c(t, p_{\min} - p_e) = 0.78 \left(\frac{t}{D} - 0.01 \right) \times \left[1 + 5.75 \frac{p_{\min} - p_e}{p_b(t)} \right] \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (1)$$

式中, t 为管道壁厚, D 为管道外径, $P_b(t)$ 和 P_e 分别为管道的内压和外压, P_{\min} 为相关应变作用下的最小内压, α_h 和 α_{gw} 分别为考虑屈强比和考虑环焊缝相关设计系数。

3.1.2 加拿大标准协会 (CSA) 规范

加拿大《油气管线系统》(CSA Z662-2007) (Canadian Standards Association, 2007) 中管道发生屈曲采用的压应变极限公式为:

$$\varepsilon_c^{crit} = 0.5 \frac{t}{D} - 0.0025 + 3000 \left[\frac{(p_i - p_e) D}{2tE_s} \right]^2 \quad (2)$$

式中, t 为管道壁厚, D 为管道外径, P_i 和 P_e 分别为管道最大设计内压和外部最小压力, E_s 为管材弹性模量。

3.1.3 美国石油协会 (API)/ 美国船舶部 (ABS) 相关规范

美国石油协会 (American Petroleum Institute Publishing Services, 1999; American Petroleum Institute, 2005) 和美国船舶部 (American Bureau of

Shipping, 2006) 均提出了管道同时受弯曲应变和外压作用时的极限压应变公式如下所示:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{p_e - p_i}{p_e} \leq g(\delta) \quad (3)$$

式中, ε 为管道的极限压应变, $\varepsilon_b = \frac{t}{D}$, 为管道仅受弯曲应变时的屈曲应变, $g(\delta)$ 为破坏折减系数, t 为管道壁厚, D 为管道外径, δ 为初始椭圆度, P_e 为管道的失稳压力, P_i 分别为管道的最大设计内压。

3.1.4 日本 SUZUKI 公式

日本 Suzuki et al. (2008) 给出考虑径厚比和钢级的极限压应变公式:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{4}{3} \sqrt{n} \frac{t}{D} \quad (4)$$

式中, t 为管道壁厚, D 为管道外径, n 为硬化系数, 对于 X65 及以下钢级取值为 0.11, 对于 X80HD1 和 X80HD2 钢级分别取值 0.06 和 0.09。

本次试验中所用管道外径为 50 mm, 壁厚为 1.2 mm。在试验过程中, 管道迎滑侧受压区在滑坡位移加载过程中发生局部屈曲的极限压应变值约为 12400 $\mu\varepsilon$ 。不考虑管道的内外压力和焊缝系数, 仅考虑钢级和管道径厚比代入上述公式中进行计算得到极限压应变值进行对比, 结果如图 14 所示。其中, 试验中取得的极限压应变值与根据 DNV 和国内规范 (中国石油天然气集团公司, 2018) 公式的计算值基本一致, 与根据 API/ABS、SUZUKI 公式的计算值较为接近, 与 CSA 规范的计算值有些差别。

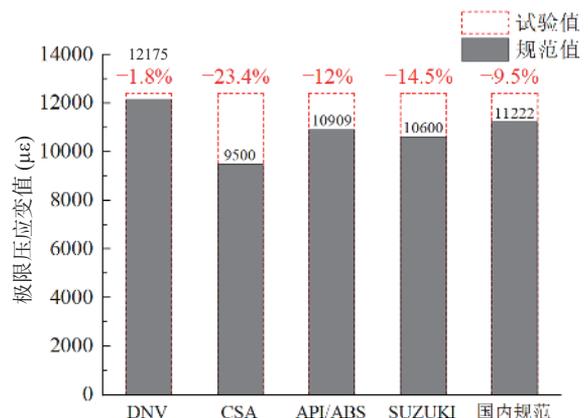


图 14 不同规范极限应变值对比结果

Fig. 14 Comparison of limit strain values of different specifications

3.2 数值模型对比分析

根据模型试验结果,运用应变设计常用的两种数值模型即 PSI 土弹簧模型(规范模型)和实体接触模型进行验证分析,通过管道的轴向应变分布数值进行对比。土弹簧模型采用 INP 文件进行二次开发,然后通过有限元模型求解器直接求解。实体接触模型,使用有限元软件采用 M-C(Mohr-Coulomb)模型和 R-O(Ramberg-Osgood)模型反演试验过程。图 15 给出了滑坡位移为

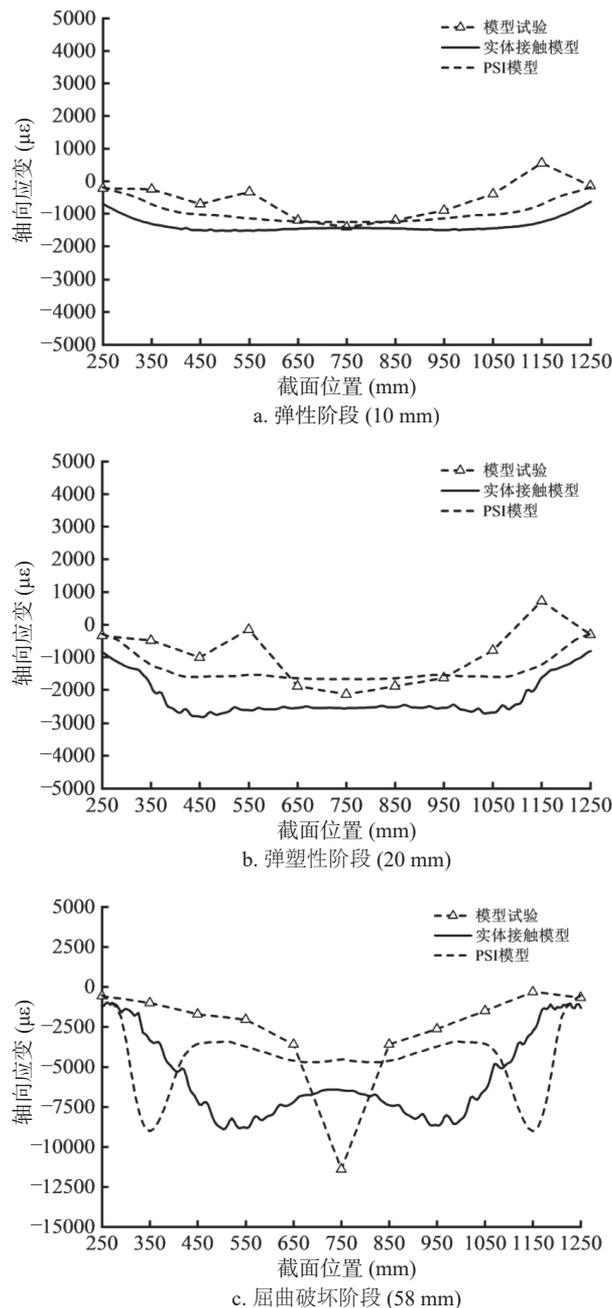


图 15 有限元对比结果

Fig. 15 Finite element model comparison results

10 mm、20 mm 和 58 mm 时管道的轴向应变分布情况,分别对应管道的弹性阶段、弹塑性阶段和屈曲破坏阶段。

当滑坡位移 $D=[0\sim 10)$ mm 时,管道处于弹性工作阶段,此时试验结果与两种数值模拟结果的应变值与应变分布形式基本一致。当滑坡位移 $D=20$ mm 时,管道处于弹塑性工作阶段,试验结果与两种数值模拟结果的应变值与应变分布形式较为接近,实体单元模型计算结果略大于试验和 PSI 模型结果,偏于安全。当滑坡位移 $D=58$ mm 时,此时管道处于屈曲破坏阶段,试验结果屈曲破坏处应变值与两种数值模拟结果的应变值存在 2 倍以上的误差,数值计算结果显示此种情况下管道不安全。

土弹簧和实体接触模型适用于模拟计算管道处于弹性阶段、弹塑性阶段时的管道应变值及其应变分布形式。但当管道处于屈曲破坏阶段时,由于数值计算结果远低于试验值(相差为 2 倍以上),故在管道处于临界破坏阶段即大变形阶段数值模型具有一定的不足。模型试验中管道采用无缝钢管,并未考虑管道环焊缝的影响,实际案例中也不乏滑坡作用下管道沿环焊缝发生拉裂的破坏模式。因此,下一步将开展考虑环焊缝的管-土相互作用模型试验。

4 结论

通过管道横穿滑坡的大尺寸模型试验,对滑坡作用下的管道应变响应规律和变形破坏特征进行了分析和讨论,得出以下结论:

(1) 变坡阶段管道应变值随着坡度变大呈明显增大趋势,且当斜坡坡度大于 20° 时,管道应变增加幅度增大。因此,建议山区管道选定线设计时,尽量避免斜坡坡度大于 20° 的地段。

(2) 位移加载阶段,随着滑坡位移的增加管道各测点应变值呈先增大后减小的趋势,且管道拉应变(背滑侧)早于管道压应变(迎滑侧)达到极值。

(3) 管道跨中迎滑侧产生局部屈曲破坏,整体呈梁式对称弯曲破坏形式。管道发生局部屈曲时

的极限压应变值为 $12400 \mu\epsilon$, 与 DNV 和国内规范计算值基本一致。

(4)管道处于弹性、弹塑性阶段时,数值模型与试验结果基本一致;管道处于临界破坏阶段时,数值模型与试验结果相差为 2 倍以上。

参考文献:

- 陈利琼,宋利强,吴世娟,邱星栋,刘琦,夏燕,孙靖云.2017.基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析[J].天然气工业,37(2):84-91.
- 邓道明,周新海,申玉平.1998.横向滑坡过程中管道的内力和变形计算[J].油气储运,17(7):18-22.
- 国家发展改革委,国家能源局.2017.关于印发《中长期油气管网规划》的通知[EB/OL].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201707/t20170712_962238.html.
- 黄维和,郑洪龙,李明菲.2019.中国油气储运行业发展历程及展望[J].油气储运,38(1):1-11.
- 林冬,雷宇,许可方,黄润秋,朱勇,罗敏,陶宏伟.2011.横向滑坡对管道的影响试验[J].石油学报,32:728-732.
- 刘慧.2008.滑坡作用下埋地管线反应分析[D].大连理工大学硕士学位论文.
- 刘鹏,李玉星,张宇,孙明源,张玉,张炎.2021.典型地质灾害下埋地管道的应力计算[J].油气储运,40:157-165.
- 马清文.2007.滑坡与输气管道的力学机理与防治—以兰成渝输油管道为例[D].中国科学院大学博士学位论文.
- 帅健,王晓霖,左尚志.2008.地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策[J].焊管,(5):9-15+93.
- 王仁超.2019.滑坡作用下管道变形破坏机理试验研究[D].中国科学院大学博士学位论文.
- 臧雪瑞,顾晓婷,王秋妍,曹平.2020.深层圆弧滑坡作用下埋地管道有限元模型研究[J].能源化工,41:65-70.
- 中国石油天然气集团公司.2018.SY/T 7403-2018 油气输送管道应变设计规范[S].北京:石油工业出版社.
- American Bureau of Shipping. 2006. ABS 2006 ABS guide for building and classing subsea pipeline systems [S]. Houston: ABS.
- American Petroleum Institute Publishing Services. 1999. Designs, construction, operation and maintenance offshore pipelines (Limit state design)[S]. Washington DC: API Publishing Services.
- American Petroleum Institute. 2005. API 1104 Welding of pipelines and related facilities [S]. Washington DC: API Publishing Services.
- Canadian Standards Association. 2007. CSA-Z662-2007 Oil and gas pipeline systems[S]. Toronto: CSA Group.
- Liao Y, Liu C, Wang T, Xu T, Zhang J, Ge L. 2021. Mechanical behavior analysis of gas pipeline with defects under lateral landslide[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(23): 6752-6766.
- O'Rourke M J, Liu X, Flores-Berrones R. 1995. Steel pipe wrinkling due to longitudinal permanent ground deformation[J]. Journal of Transportation Engineering, 121: 443-451.
- Rajani B B, Robertson P K, Morgenstern N R. 1995. Simplified design methods for pipelines subject to transverse and longitudinal soil movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 32: 309-323.
- Suzuki N, Igi S, Masamura K. 2008. Seismic integrity of high-strength pipelines[J]. JFE Technical Report, (17): 14-19.
- DET NORSKE VERITAS. 2007. DNV OS-F101 Offshore standard- submarine pipeline systems[S]. Norway: DNV.
- Zhang S Z, Li S Y, Chen S N, Wu Z Z, Wang R J, Duo Y Q. 2017. Stress analysis on large-diameter buried gas pipelines under catastrophic landslides[J]. Petroleum Science, 14: 579-585.