

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.06.08

滑坡对埋地天然气管道的作用机理分析

彭善碧¹ 廖文¹ 徐明军² Tom Iseley³ John Matthews³

(1. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 四川 成都 610500; 2. 塔里木油田克拉油气开发部, 新疆 塔里木 841000; 3. 美国路易斯安那理工大学非开挖技术中心, 美国 路易斯安那州 71270)

摘要: 滑坡是危害天然气管道安全的地质灾害之一, 在研究滑坡对埋地天然气管的作用机理以来, 各种分析方法和模型都有着不同的优点与缺陷, 在调研、分析大量论文、研究报告的基础上, 笔者以滑坡区埋地天然气管道为对象, 总结了管土作用研究方法并进行了模型对比, 并发现在现有的土体对埋地天然气管道的作用研究中主要考虑水平、轴向和竖向三个方向的作用, 未考虑三者的相互影响。另外提出随着聚乙烯塑料管(PE管)在城市燃气输配管网中的广泛应用, 未来对非线性管材在滑坡作用下的力学响应及全尺寸模型试验等方面还需进一步研究。

关键词: 滑坡; 天然气管道; 管土作用

中图分类号: U216.41+91; U173.9; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0059-09

The effect of landslide on the stability of natural gas pipeline

PENG Shanbi¹, LIAO Wen¹, XU Mingjun², Tom Iseley³, John Matthews³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Kela Oil and Gas Development Department, Tarim Oilfield, Xinjiang, Tarim, Xinjiang 841000, China;
3. Trenchless Technology Center, Louisiana Tech University, Ruston 71270, The United States)

Abstract: Landslide is one of the geological disasters that endanger the safety of natural gas pipelines. In terms of previous studies on mechanism of landslides affecting buried natural gas pipelines, there are many advantages and disadvantages in various analytical methods and models. Based on research and analysis of a large number of papers and researching reports, different soil-pipe interaction and analytical methods of the natural gas pipeline crossing landslide are compared. According to the survey results, the effects of surrounding soil on the buried pipes were in horizontal, axial and vertical, respectively, mostly considered single direction force, and few considered mutual influences. The analysis methodology consisted of analytical method, numerical simulation and experimental method. And as the widely application of polyethylene (PE) pipelines gas distribution network, further research will focus on the mechanical response of non-linear pipe under effect of landslide, and full-scale model test will be needed as well.

Keywords: land slide; natural gas pipeline; pipe-soil interaction

0 引言

作为五大运输方式之一,管道是天然气输送的重要生命线工程。但随着天然气工业的不断发展,天然

气管道不可避免地穿越不良地质地段,如西气东输管道、川气东送管道等所经过的部分地域地质条件就异常恶劣。另一方面,由于超量开发土地、草原、森林和水资源,加速了水土流失、土地沙化等灾害的发展,滑

收稿日期: 2019-02-02; 修订日期: 2019-05-06

基金项目: 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2019-11)

第一作者: 彭善碧(1980-),女,重庆人,油气储运工程专业,硕士,副教授,主要从事管道完整性管理、管道力学分析等方面的研究工作。E-mail: shanbipeng@swpu.edu.cn

坡灾害导致的管道事故也随之增多(表 1)。美国 PHMSA(the United States Department of Transportation Pipeline and Hazardous Material Safety Administration) 统计了 1991 ~ 2014 年自然灾害造成的管道事故,除温度、闪电和不明原因外,山体滑坡约占自然灾害的 54%,占管道失效总数的 1.8%^[1]。

管道事故不仅会造成严重的经济损失和环境破坏,有时甚至会造成恶劣的社会影响(如 2015 年深圳市光明新区西气东输二线管道爆炸事故)。因此,研究滑坡土体管土相互作用,分析滑坡灾害下管道的破坏行为,对于油气管道的完整性管理具有重要意义。本文从管土相互作用模型、分析方法、未来发展趋势三个方面做一个系统总结。

表 1 滑坡造成的管道事故^[2-4]

Table 1 Pipeline accidents caused by landslide

序号	时间	管道名称	灾害及破坏情况
1	2017.07	中石油贵州天然气管道	山体滑坡挤断天然气管道,导致天然气泄漏引发燃烧爆炸
2	2016.07	川气东送管道宜昌段	暴雨导致山体滑坡,管道泄漏爆炸
3	2015.12	西气东输二线广深支干线	滑坡导致管道发生爆裂,供气中断 18 天
4	2007.08	边转油站管线	山体滑坡,管道断裂,原油泄漏
5	2007.04	西气东输山西段	坡体裂缝,形成滑坡隐患,紧急改线施工,避免了可能出现的管道事故
6	2005.09	重庆沙坪坝输气管道	野蛮施工,堆土引发滑坡,管道受外力影响变形断裂,天然气泄漏爆炸

1 滑坡作用下管道的破坏行为

埋地管道穿越滑坡区时,管道的破坏行为与管道与滑坡区的夹角有关^[5]。当管道与滑坡方向垂直时(横向滑坡),管道主要受到弯曲应力(图 1a)。当管道与滑坡方向平行或存在一定倾角时(纵向滑坡),管道一端受到弯曲应力和压应力,另一端受到弯曲应力和拉应力(图 1b,图 1c)。

2 管土相互作用

埋地天然气管道和周围土体的相互作用十分复杂,土体既是作用在管道上的载荷,又是增强管道强度和刚度的介质,研究埋地天然气管道在溃散性滑坡作用下的力学行为,必须考虑管土间的相互作用^[6]。

滑坡时,周围土体对埋地天然气管道将分别产生水平作用(Horizontal)、轴向作用(Axial)和竖向作用

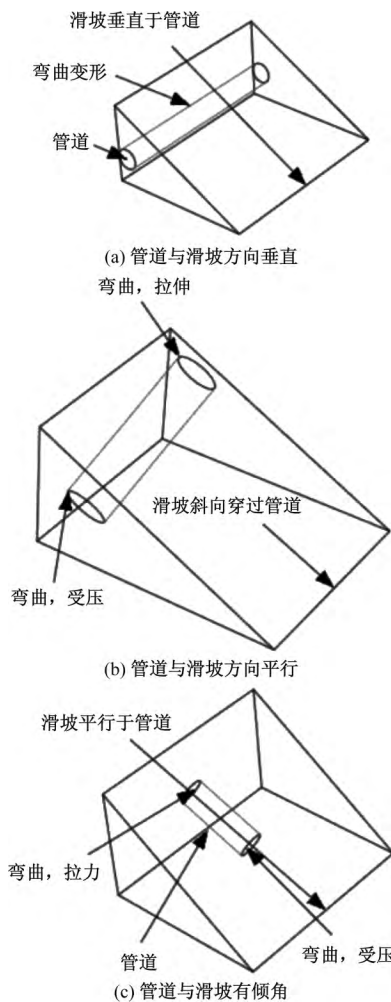


图 1 管道的破坏行为与倾角有关^[5]

Fig. 1 The destructive behavior of pipeline is related to inclination

(Vertical) (图 2)。

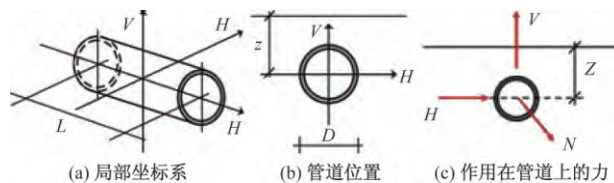


图 2 管土相互作用的受力方向

Fig. 2 The force direction of soil interaction

管土相互作用研究的实质就是分析三维空间(V, H, N)中的应力应变情况,为了简化研究,主要在 $V-H$, $V-N$ 和 $H-N$ 三个平面上分别讨论。

(1) $V-H$ 平面上的管土相互作用

目前国际上针对 $V-H$ 平面上的管土相互作用已有大量试验和数值模拟研究(图 3),图中 α 是管道受力方向与水平方向的夹角,当 $\alpha = 0^\circ$ 时,管道只有水平

方向受力(如横向滑坡),当 $\alpha = 90^\circ$ 时,管道只受垂直方向力。许多学者通过对管道施加水平方向(H 方向)的位移载荷,进行位移控制条件下的管土小规模试验,得到水平方向加载力与位移之间的关系曲线和管土相互作用机理^[7-15]。也有一些学者通过数值模拟来研究水平方向力作用下管土之间的相互作用^[16-22]。针对管道受竖向作用力时的管土相互作用,也有一定研究,分析垂直方向作用力与管道位移的关系^[8-9,16,23-25]。

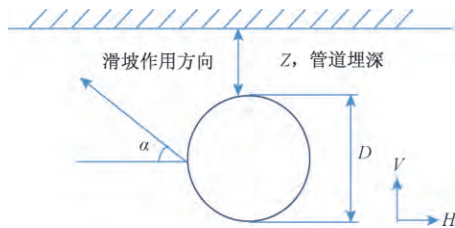


图 3 天然气管道在 $V-H$ 平面上的受力简图

Fig. 3 Schematic diagram of a natural gas pipeline on a $V-H$ plane

通过追踪广义的应力路径,有学者发现 V 方向与 H 方向上的力具有相互作用,但是目前实际工程中还没有考虑 V 方向与 H 方向上力的耦合作用^[17,19,26]。

(2) $V-N$ 平面内的管土相互作用

如前所述,一些学者分别研究了管道仅受竖向作用力^[8,16,24-25]、轴向作用力^[14,27]时的管土相互作用,但这两个方向上的相互作用还未被完全证实。DI PRISCO C 等^[19]发现,对于松散颗粒土体来说,垂直方向(V 方向)上的最大作用力与轴向力(N 方向)关系不大。

(3) $N-H$ 平面内的管土相互作用

对于 $N-H$ 平面的受力分析,PHILLIPS 等^[28]研究了黏土中轴向-水平方向上的管土相互作用,发现轴向土载荷增加了管土相互作用。HSU 等^[29]通过对埋在密砂中的管道中施加倾斜位移发现, N 方向与 H 方向上受力有相互影响,但对于松砂中的管道没有发现这种相互影响。Daiyan 等^[21]也发现水平方向上与轴向上的力相互影响。

3 分析方法

滑坡作用下管道稳定性的研究方法主要有解析法、数值模拟法和试验法三大类。解析法的计算方法简单,忽略管土相互作用,已被许多管道抗震设计规范采用,如 ASCE (1984)^[30]、ALA (2001)^[31]、PRCI (2009)^[32]等。数值模拟法主要采用有限元模型模拟管道在滑坡作用下的受力情况,可以考虑管土作用的非线性。试验法最接近实际工况,但成本较高。

3.1 解析法

埋地管道设计时考虑回填土的重量、管道埋深、土压力系数、土壤内摩擦角等因素,假设管道外表面所受摩擦阻力与作用在管道上的应力和摩擦特征相关,忽略管土相互作用。这种方法被许多管道抗震设计规范采用。表 2 为目前具有代表性的解析方法总结。

另外 CHALLAMEL 等^[38]基于动力学提出了一个滑坡下管土失效机理的简化分析方法,将纵向滑坡和管道视为一个整体结构,其结构稳定性为与滑坡管道几何参数和管道材质相关的无量纲参数,并且管道几何形状是影响管道变形的主要因素。

表 2 解析法总结

Table 2 Summary of analytic methods

作者	滑坡类型	研究内容	局限
Rajani (1995) ^[33]	横向	(1) 首次分析了横向滑坡下管道的力学响应; (2) 认为周围土体对管道偏移有着较大的阻碍作用。	(1) 假设管道为线弹性;(2) 不考虑管土相互作用。
O' Rourke (1995) ^[34]	横向、纵向	分析了埋设深度、土体黏聚力、土体密度和摩擦角对管道应力的影响。	忽略了管道与土体之间的相对滑动。
邓道明 (1998) ^[35]	横向	考虑了管梁的几何非线性、土壤的纵向抗力的物理非线性以及管道的内压和温差作用。	忽略了管土之间的相互滑动。
刘慧 (2008) ^[36]	横向、轴向、深层圆弧滑坡	考虑了滑坡区宽度对管道应力的影响。	采用土弹簧管土作用模型,结果偏于保守。
Cocchetti (2009) ^[26]	横向	假设管道为梁,用非线性接触理论表征管土间的相互作用。	简化了土体的推力和阻挡作用。
郝建斌 (2012) ^[37]	横向	利用极限平衡法推导了横向滑坡对管道的推力。	将管道视作挡墙,不太符合工程实际。

虽然解析法具有计算简单,工程应用方便等优点^[2],但大量的研究表明,管道轴向拉伸试验结果和解析计算值间存在较大误差^[10,14,34,39]。

3.2 数值模拟法

随着计算机技术的不断发展,数值模拟方法在分析管道在滑坡作用下的力学响应中得到了广泛应用。

国外学者对滑坡作用下的埋地管道动力响应研究较少,主要集中在地层变形的影响上(表 3)。近年来,国

内学者对滑坡作用下的埋地管道动力响应有一定的数值模拟研究,但也存在一定的局限(表 4)。

表 3 数值模拟方法总结(国外)

Table 3 Summary of simulation methods(foreign)

作者	受力方向	有限元模型	研究内容
Daiyan(2008) [21]	轴向与横向共同作用	管道: 三维壳单元, 土壤: 八节点连续体单元	分析了土的摩擦角, 管-土界面摩擦系数和管道埋深度的影响。
Cocchetti(2009) [14]	横向位移	弹性地基梁	用全弹性的本构关系来描述管土相互作用, 模拟了管道土体位移作用下的力学响应, 分析了滑坡区宽度等对管道的影响。
Vazouras(2012) [40]	走滑断层	管道: 四节点简化的壳单元 土壤: 简化的固体(连续体)单元	分析了钢质管道对走滑断层的响应, 研究了管道内径、不同土体材料和管材对管道动力响应的影响。
Jung(2013a) [15]	竖向位移	管道: 刚性圆柱体土壤: 四面体	分析了不同砂密度条件下最大竖向力与管道埋深的关系, 提出了垂直向上力与位移的双曲线和双线性模型。
Jung(2013b) [24]	横向位移	管道: 刚性圆柱体土壤: 四面体	模拟分析了最大横向力与管道埋深之间的关系。
Xie(2013) [20]	断层	管道: 三维壳单元, 土壤: 一维弹簧单元或三维固体(连续体)单元	对断层作用下的管土相互作用进行了连续模拟, 改进了断层作用下管道响应的模拟方法。
Roy(2015) [22]	横向位移	管道为刚体	模拟了管道在横向滑坡作用下的力学响应, 没有限制管道垂直方向的移动。
Robert(2016) [41]	走滑断层	管道: 三维壳单元, 土壤: 三维固体(连续体)单元	分析了走滑断层作用下, 干砂和部分饱和砂中埋地管道的响应。

表 4 数值模拟方法总结(国内)

Table 4 Summary of simulation methods (domestic)

作者	滑坡类型	有限元模型	研究内容	局限
张伯君(2013) [42]	横向滑坡	ABAQUS、钢管有限滑移接触	(1) 将管道与周围土体看作一个整体。 (2) 采用位移模拟滑坡的等效作用, 管道与周围土体的偏移沿着轴线方向呈四次多项式分布。 (3) 分析了管道内压、径厚比、滑坡区宽度、土体性能、管材性能对管道极限偏移能力的影响。	(1) 假设土体为线弹性体, 结果偏保守; (2) 管土间的相互作用是有限滑移接触。
马津津(2013) [43]	横向滑坡	PE 管, 有限滑移接触	(1) 滑坡作用加载是以四次多项式曲线为分布的位移加载。 (2) 研究了滑坡区宽度、管径、SDR(管径与壁厚之比)、内压和埋深对 PE 管强度的影响。	管土间的相互作用是有限滑移接触。
王联伟(2014) [44]	横向、纵向	土弹簧模型	(1) 考虑因素: 管道内压、滑坡长度、滑坡位移、滑坡方向与管道轴向的夹角。 (2) 考虑了管土间的非线性作用。	没有考虑管道所受轴向与横向力之间的相互作用。
张铄(2015) [45]	深层圆弧形	接触模型	(1) 考虑因素: 土壤密度、管道壁厚、管道内压以及土抗剪强度。	

其中马津津^[42]基于 Abaqus 研究了埋地天然气管道 PE 管在占压和横向滑坡复杂荷载下的管道-土体应力、位移分布, 通过施加土体 4 次多项式位移荷载, 计算管道和土体位移和应力分布, 基于 PE 管失效准则, 计算出滑坡宽度和管道屈服点最大位移 U_{max} 的关系, 并分析了管道参数和滑坡参数对管道最危险点 MISE 应力随 U_{max} 变化的影响, 及对屈服时 U_{max} 的影响。研究表明滑坡中点管道所受应力最大, 另外一个应力极值点处于管道弯曲处。当外载荷较小时管道起拱线的应力略大于管顶和管底点应力, 当远小于 PE 管的屈服应力, 当外载荷较大时, 管底应力最大, 即为最危险点。张会远等^[46]将垂直于滑坡走向管道简化为当量

轴力作用下的梁模型, 基于土体 winkler 地基假设, 即土体为纵向分离弹簧互不影响, 管道轴向抗力符合双线性假设, 对埋地天然气管进行了力学分析, 基于弹性力学推导了管道于当量轴力下的挠度和弯矩分布, 并用 FLAC^{3D} 进行了模型验证。赵潇等^[47]基于 Abaqus 分析了沿斜坡敷设埋地输气管道于不同斜坡角度和坡长的应力极值分布, 当坡度处于 20° ~ 30° 时, 斜坡长度越长, 管道极值应力越大。陈利琼等^[48]基于有限元分别用 ANSYS 和 Cersar II 分析了无滑坡作用和横向和纵向滑坡对管道的作用响应, 分析了滑坡作用下其位移荷载、埋深、管材、内压对管道最大 mise 应力的影响, 但并未说明其确切屈曲点的位置。李杭杭^[49]通过

DEM 和 FEM 耦合,采用颗粒-结构单向耦合的方式,考虑了岩土离散性,采用挡土墙撤出方式,重力驱动分析横向滑坡中管道的位移和应力分布,假设土壤推力为均布力,并忽略了管道的轴向受力和变形,这对管道强度失效判据有一定影响。

3.3 试验法

试验研究方面,国外学者主要对地震作用下的管道力学响应进行了大量试验研究,对滑坡作用下埋地管道力学响应研究较少。一些研究结构还开展了全尺寸试验或田野试验,如康奈尔大学^[8],冷海资源工程中心^[10],皇后大学^[50]和英属哥伦比亚大学^[13]等。由于滑坡土体一般体积较大,考虑到全尺寸模型构建和实验的困难,目前多采用土工离心机实验构建加速场通过实验室模型来模拟实际滑坡作用下管道的受力情况。Hadi Farahi Jahromi 等^[51]基于 I_{ai} ^[52-53]的方法将工程原型参数转化为实验室模型参数,进行了相似性分析,重点分析了管道埋深对管道变形和滑坡响应的影响,研究表明管道的存在对滑坡土壤的位移几乎没有影响,验证了将管道应变视为滑坡土壤位移的合理性。现在可通过土工离心机来构建加速场以放大

实验室模型参数,如 Weiyuan Zhang I Amin Askarinejad 通过离心试验机,基于 Audibert JM, Nyman KJ 提出的水平地面下受拉管道极限力 q_u ,推导了滑坡作用下位于失效面管道的极限力 q_{us} 。

国内对埋地管道在滑坡作用下的力学性能有一定研究,林冬等^[54]采用人工堆积的方法构建了管道全尺寸滑坡模型,研究滑坡对管道力学的影响实验,发现前缘临空条件和地下水条件是影响管道滑坡稳定性的关键因素。刘金涛^[55]进行了管道横穿滑坡相互作用大尺度模型试验,得到了试验不同阶段滑坡的变形特点、应力与变形间的相互关系。但未考虑管道埋深、管道直径、滑坡宽度、滑坡带深度的影响。牛文庆等^[56]在滑坡体前、中、后部不同部位布设管道进行模型试验,研究了管道与滑坡正交情况下不同部位管道的受力与变形情况(表5)。Feng wenkai 等^[57]通过逐步开挖滑坡土体前方挡土墙的方式(重力驱动),进行全尺寸管土作用实验,分析了管道应力应变随土壤变形的过程,得出经验公式,研究表明管道应力和变形沿管线呈马鞍型分布。

表5 试验法总结

Table 5 Summary of experimental methods

作者	滑坡类型	试验类型	研究内容
O'ROURKE(2006) ^[58]	轴向受拉	全尺寸实验	发现 HDPE 管道的行为与应变率和温度密切相关。
CALVETTI(2004) ^[17]	轴向受拉	土箱	(1) 将土体作用力简化为弯曲和拉伸作用;(2) 没有考虑轴向剪切作用。
林冬(2011) ^[54]	横向滑坡	全尺寸滑坡实验	研究横向滑坡对管道的影响,发现前缘临空条件和地下水条件是影响管道滑坡稳定性的关键因素。
刘金涛(2012) ^[55]	横向滑坡	全尺寸滑坡实验	分析了试验不同阶段滑坡的变形特点、应力与变形间的相互关系。
牛文庆(2015) ^[56]	横向滑坡	模型实验	研究了管道与滑坡正交情况下不同部位管道的受力与变形情况。
WIJEWICKREME(2014) ^[59]	轴向拉伸	田野实验	分析了中密度聚乙烯管道在轴向拉伸下的应力-应变响应。
O'ROURKE(2016) ^[60]	走滑断层	全尺寸实验	高密度聚乙烯管道在水平和竖向作用下的力学响应

目前主要通过上述3种方式分析滑坡作用下埋地天然气管的应力应变,管道的强度设计准则分为基于应力或者应变两种方式,通过对管土的受力分析并基于管道失效准则的极限应力和极限应变来判断管道是否处于安全应力状态,通过对滑坡、管道的参数分析,拟合计算一定滑坡参数下管道最危险点(应力最大点)或最大界面变化率作为管道失效判据。通常滑坡对管道的危险评价是基于不同的数学方法来构建评价模型对其危害进行定性或者定量的评估,如张满银等^[61]提出了一种基于云理论的滑坡作用下油气管道危险综合评价方式,冼国栋等^[62]对管道危害影响因素分析,确定评价指标因子,通过样本统计分析,计算其灾害影响因子敏感性。Juan Pablo Alvarado-Franco 等^[63]

提出了一种定量评估方法,将所需考虑模型参数定义为不同概率密度函数,通过蒙特卡洛模拟估计每个点滑坡发生和管道失效概率,并用语言尺度将这些概率映射到危险暴露水平。

4 未来发展趋势

4.1 非线性管材在滑坡作用下的力学响应

近年来,聚乙烯(Polyethylene,以下简称PE)管在城市燃气输配管网中的应用越来越广泛。与钢管相比,PE管具有经济性好、防腐蚀、柔韧性好、易于维修、使用使命长等优点^[59]。由于没有合适的管土作用模型来分析PE管,通常采用钢管的管土相互作用模型去分析PE管。但塑料管的应力应变关系是非线性

的, 并与材料和温度相关, 采用钢管材料的线弹性应力应变关系去分析 PE 管的管土作用会存在很多局限。因此, 非线性管材在滑坡作用下的力学响应需要进一步的研究。

4.2 全尺寸模型试验

全尺寸模型试验是分析管土复杂相互作用的有效途径。但纵观目前国内外已经开展的滑坡作用下管道力学响应试验, 目前仅有非常少的几例大型试验, 且考虑的影响因素还非常有限。且国内还没有针对埋地 PE 管的全尺寸模型试验。因此, 针对滑坡作用下的埋地天然气管道进行全尺寸模型试验研究, 对保证埋地天然气管道的安全运行具有重要意义。目前多采用土工离心机来模拟进行参数放大以模拟全尺寸实验, 通过构造加速场能有效定量分析管道于滑坡作用下的真实应力情况, 从而为管道完整性管理提供一定的参考基础。

参考文献:

- [1] FERRIS G, NEWTON S, PORTER M. Vulnerability of buried pipelines to landslides [C]//Proceedings of ASME Conference on 2016 11th International Pipeline Conference, 2016.
- [2] 帅健, 王晓霖, 左尚志. 地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策 [J]. 焊管, 2008, 31(5): 9-15.
SHUAI Jian, WANG Xiaolin, ZUO Shangzhi. Breakage action and defend measures to pipeline under geological disaster [J]. Welded Pipe and Tube, 2008, 31(5): 9-15, 93.
- [3] 新浪新闻中心. 湖北恩施“川气东送”管道爆炸 [R/OL]. [2016-07-20]. <http://news.sina.com.cn/c/2016-07-20/doc-ifyuaiwa7336604.shtml>
- [4] 网易新闻网. 贵州山体滑坡致天然气管道断裂发生爆燃 [R/OL]. [2017-07-03]. <http://news.163.com/17/0702/22/COCG3UGV000187VI.html>
- [5] DEMIRCI H E, BHATTACHARYA S, SINGH R M. A review of the behaviour of buried continuous pipelines crossing faults [C]. 3rd International Soil-Structure Interaction Symposium. 2007.
- [6] 杨俊涛. 垂直荷载作用下埋地管道的纵向力学性状分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
YANG Juntao. Research on longitudinal mechanical characteristics of pipelines buried in soft soil under vertical loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] AUDIBERT J M E, NYMAN K J. Soil restraint against horizontal motion of pipes [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(10): 1119-1142.
- [8] TRAUTMANN CH, O'ROURKE TD. Behaviour of pipe in dry sand under lateral and uplift loading, Geotechnical Engineering Report 83-7, 1983.
- [9] TRAUTMANN C H, O'ROURKE T D. Lateral force-displacement response of buried pipe [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1077-1092.
- [10] PAULIN M J, PHILLIPS R, CLARK J, et al. A full-scale investigation into pipeline/soil interaction [C]// Proceedings of ASME Conference on 1998 2nd International Pipeline Conference, 2016: 779-787.
- [11] ZHANG J G, STEWART D P, RANDOLPH M F. Modeling of shallowly embedded offshore pipelines in calcareous sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(5): 363-371.
- [12] TURNER J E. Lateral force-displacement behavior of pipes in partially saturated sand [M]. Cornell University, May, 2004.
- [13] OLSON N. Soil performance for large scale soil-pipeline tests [D]. 2009. Ph. D. thesis, Cornell University, Ithaca, N. Y.
- [14] WIJEWICKREME D, KARIMIAN H, HONEGGER D. Response of buried steel pipelines subjected to relative axial soil movement [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(7): 735-752.
- [15] JUNG J K, O'ROURKE T D, OLSON N A. Lateral soil-pipe interaction in dry and partially saturated sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 2028-2036.
- [16] YIMSIRI S, SOGA K, YOSHIZAKI K, et al. Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 830-842.
- [17] CALVETTI F, DI PRISCO C, NOVA R. Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(12): 1292-1299.
- [18] GUO P J, STOLLE D F E. Closure to “lateral pipe-soil interaction in sand with reference to scale effect” by P. J. Guo and D. F. E. Stolle [J]. Journal of

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2006 , 132(10) : 1372.
- [19] DI PRISCO C , GALLI A. Soil-pipe interaction under monotonic and cyclic loads: experimental and numerical modelling [C] // Proceedings of the First Euromediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures , 2006 , 35: 755 – 760.
- [20] XIE X J , 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.
- [21] DAIYAN N , KENNY S , PHILLIPS R , et al. Investigating pipeline-soil interaction under axial-lateral relative movements in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2011 , 48(11) : 1683 – 1695.
- [22] ROY K , HAWLADER B , KENNY S , et al. Finite element modeling of lateral pipeline-soil interactions in dense sand [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2016 , 53(3) : 490 – 504.
- [23] MEYERHOF G G , ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1968 , 5(4) : 225 – 244.
- [24] JUNG J K , O'ROURKE T D , OLSON N A. Uplift soil-pipe interaction in granular soil [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2013 , 50(7) : 744 – 753.
- [25] KOURETZIS G P , KRABBENH? FT K , SHENG D C , et al. Soil-buried pipeline interaction for vertical downwards relative offset [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2014 , 51(10) : 1087 – 1094.
- [26] COCCHETTI G , DI PRISCO C , GALLI A , et al. Soil-pipeline interaction along unstable slopes: a coupled three-dimensional approach. Part 1: Theoretical formulation [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2009 , 46(11) : 1289 – 1304.
- [27] SCARPELLI G , SAKELLARIADI E , FURLANI G. Evaluation of soil-pipeline longitudinal interaction forces [J]. Rivista Italiana di Geotecnica , 2003 , 37(4) : 24 – 41.
- [28] PHILLIPS R , NOBAHAR A , ZHOU J. Combined axial and lateral pipe-soil interaction relationships [C] // Proceedings of ASME Conference on 2004 International Pipeline Conference , 2008: 299 – 303.
- [29] HSU T W , CHEN Y J , HUNG W C. Soil restraint to oblique movement of buried pipes in dense sand [J]. Journal of Transportation Engineering , 2006 , 132(2) : 175 – 181.
- [30] ASCE. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems , American Society of Civil Engineers , Gas and Liquid Fuel Lifelines Committee , Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering , 1984: 157 – 170.
- [31] ALA. Guidelines for the design of buried steel pipe. American Lifeline Alliance (ALA) , 2001.
- [32] PRCL. Guidelines for constructing natural gas and liquid hydrocarbon pipelines in areas subject to landslide and subsidence hazard. Technical Committee of Pipeline Research Council International Inc. 2009.
- [33] RAJANI B B , ROBERTSON P K , MORGENSTERN N R. Simplified design methods for pipelines subject to transverse and longitudinal soil movements [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1995 , 32(2) : 309 – 323.
- [34] O'ROURKE M J , LIU X J , FLORES-BERRONES R. Steel pipe wrinkling due to longitudinal permanent ground deformation [J]. Journal of Transportation Engineering , 1995 , 121(5) : 443 – 451.
- [35] 邓道明 , 周新海. 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. Calculation of pipeline inner force and distortion during transverse landslide body [J]. Oil & Gas Storage and Transportation , 1998 , 17(7) : 18 – 22.
- [36] 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 Hui. Response analysis for buried pipelines subjected to the landslide [D]. Dalian: Dalian University of Technology , 2008.
- [37] 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.
- [38] ANDERSON C. Soil-pipeline interaction of polyethylene natural gas pipelines in sand [J]. MA Sc thesis , Department of Civil Engineering , University of British Columbia , Vancouver , BC , Canada , 2004.
- [39] VAZOURAS P , KARAMANOS S A , DAKOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 2012 , 41: 164 – 180.
- [40] ROBERT D J , SOGA K , O'ROURKE T D , et al. Lateral load-displacement behavior of pipelines in

- unsaturated sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142 (11): 04016060.
- [41] 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.
- [42] 马津津. 典型复杂载荷条件下埋地聚乙烯管强度的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
MA Jinjin. Numerical simulation of strength of buried polyethylene pipe under typical complex loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [43] 王联伟, 张雷, 董绍华, 等. 基于土弹簧模型的管道滑坡力学影响因素分析[J]. *油气储运*, 2014, 33(4): 380 – 384.
WANG Lianwei, ZHANG Lei, DONG Shaohua, et al. Analysis of mechanical influencing factors of pipeline landslide based on soil spring model [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(4): 380 – 384, 390.
- [44] 张铄, 吴明, 牛冉, 等. 深层圆弧形滑坡作用下长输埋地输气管道响应分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(11): 29 – 34.
ZHANG Shuo, WU Ming, NIU Ran, et al. Analysis on response of long distance buried gas pipeline impacted by deep circular arc landslide [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 29 – 34.
- [45] BRACHMAN R W I, MOORE I D, ROWE R K. The design of a laboratory facility for evaluating the structural response of small-diameter buried pipes [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(2): 281 – 295.
- [46] 林冬, 雷宇, 许可方, 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, et al. An experiment on the effect of a transverse landslide on pipelines [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 728 – 732.
- [47] 刘金涛. 管道横穿滑坡相互作用大尺度模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
LIU Jintao. Study on the large scale model test of the interaction of pipeline across landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [48] 牛文庆, 郑静, 吴红刚, 等. 管道受横向滑坡影响的模型试验研究 [J]. *铁道建筑*, 2015 (6): 117 – 120.
NIU Wenqing, ZHENG Jing, WU Honggang, et al. Experimental study on effect of orthogonal landslide on pipe by model simulation [J]. *Railway Engineering*, 2015(6): 117 – 120.
- [49] O'ROURKE T D, TURNER J E. Earthquake soil-pipeline interaction in partially saturated sand [C]// *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, 2006: 18 – 22.
- [50] WIJEWICKREME D, WEERASEKARA L. Analytical modeling of field axial pullout tests performed on buried extensible pipes [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(2): 04014044.
- [51] O'ROURKE T D, JUNG J K, ARGYROU C. Underground pipeline response to earthquake-induced ground deformation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 91: 272 – 283.
- [52] FENGWK, HUANGR Q, LIUJ T, et al. Large-scale field trial to explore landslide and pipeline interaction [J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(6): 1466 – 1473.
- [53] JAHROMI F, JAFARZADEH F, ZAKARIA M S. Experimental study of burial depth effect on embedded pipe deformations in sandy slopes under dynamic landsliding [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 114: 281 – 297.
- [54] IAI S. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1ggravitationalfield [J]. *Soilsand Foundations*, 1989, 29(1): 105 – 118.
- [55] IAI S, TOBITA T, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(5): 355 – 362.
- [56] 张会远, 管巧艳, 骆晓阳, 等. 管道穿越滑坡下静力学与数值模拟对比分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(1): 85 – 89.
ZHANG Huiyuan, GUAN Qiaoyan, LUO Xiaoyang, et al. Comparative analysis of statics and numerical simulation of buried gas pipeline crossing landslide [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 85 – 89.
- [57] 赵潇, 李章青, 王海兰, 等. 斜坡地段埋地输气管道应力分析[J]. *管道技术与设备*, 2018(2): 15 – 18.
ZHAO Xiao, LI Zhangqing, WANG Hailan, et al. Stress analysis on buried gas pipeline in slope section [J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2018(2): 15 – 18.
- [58] 陈利琼, 宋利强. 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, 2017, 37(2): 84-91.
CHEN Liqiong, SONG Liqiang. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 84-91.
- [59] 李杭杭. 基于 DEM-FEM 耦合的滑坡作用下管道力学响应分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LI Hanghang. Mechanical response analysis of pipeline subjected to landslide based on DEM-FEM coupling [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [60] CHALLAMEL N, DE BUHAN P. Mixed modelling applied to soil-pipe interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(3): 205-216.
- [61] 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.
- [62] 洗国栋, 吴森, 潘国耀, 等. 油气管道滑坡灾害危险性评价指标体系[J]. 油气储运, 2018, 37(8): 865-872.
XIAN Guodong, WU Sen, PAN Guoyao, et al. Hazard assessment index system of landslide disasters along oil and gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(8): 865-872.
- [63] ALVARADO-FRANCOJ P, CASTRO D, ESTRADA N, et al. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides [J]. Engineering Geology, 2017, 222: 212-224.

(上接第 58 页)

- [18] 孙东, 王道永, 吴德超, 等. 美姑河断裂活动性研究及对水电工程影响评价[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 13-17.
SUN Dong, WANG Daoyong, WU Dechao, et al. Research on activity of Meigu River fracture zone and effect evaluation on hydropower project [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4): 13-17.
- [19] 孙东, 王道永. 四川省美姑地区叠加褶皱构造特征[J]. 四川地震, 2008(1): 43-47.
SUN Dong, WANG Daoyong. Structure characteristics of the superposition fold of Meigu Region, Sichuan Province [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2008(1): 43-47.
- [20] 殷志强, 孙东, 张瑛, 等. 美姑河流域滑坡时空展布及成生机制研究[J]. 第四纪研究, 2018, 38(6): 1358-1368.
YIN Zhiqiang, SUN Dong, ZHANG Ying, et al. Study on spatial temporal distribution characteristics and forming mechanism of landslides in the Meigu River basin [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(6): 1358-1368.
- [21] 朱永莉. 四川美姑县城南滑坡稳定性及防治方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
ZHU Yongli. The study on the stability and remedial measures of Meigu south landslide [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [22] 王金鹏. 美姑县拉马阿觉滑坡成因机制及运动学特征分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
WANG Jinpeng. Research on formation mechanism and motion characteristics of Lamajue Landslide in Meigu County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [23] 许声夫. 美姑河火洛古地震滑坡的动力学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
XU Shengfu. Research on dynamical characteristics of historical seismic landslide on Huoluo village near Meigu River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [24] 胡正涛. 美姑河坪头水电站尔古沟-万波沟古滑坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
HU Zhengtao. Study on the stability of the ancient landslide of Ergu groove-Wanbo groove of Meigu Pingtou hydropower station [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.