中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

云南某高填方边坡对油气管道的致灾风险及CFG加固效果分析对油气管道的影响

刘章振，阿发友，张　晶，杨大慎，刘小波

Analysis of disaster risk to oil and gas pipelines and the effect of CFG reinforcement on high-fill slopes in Yunnan

LIU Zhangzhen, A Fayou, ZHANG Jing, YANG Dashen, and LIU Xiaobo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402018

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402018
刘章振, 阿发友, 张晶, 等. 云南某高填方边坡对油气管道的致灾风险及 CFG 加固效果分析对油气管道的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 115-125.
LIU Zhangzhen, A Fayou, ZHANG Jing, et al. Analysis of disaster risk to oil and gas pipelines and the effect of CFG reinforcement on high-fill slopes in Yunnan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 115-125.

云南某高填方边坡对油气管道的致灾风险及 CFG 加固效果分析对油气管道的影响

刘章振[1], 阿发友[1,2,3], 张　晶[4], 杨大慎[5], 刘小波[4]
（1. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明　650093；2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室，云南 昆明　650093；3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室，云南 昆明　650093；4. 国家管网集团西南管道有限责任公司昆明输油气分公司，云南 昆明　650093；5. 国家管网集团西南管道有限公司，云南 昆明　650093）

摘要：文章旨在研究位于云南省安宁市的某重点建设项目中填方边坡的稳定性及对坡脚油气管道的影响。该项目于2023 年初形成了长近 1.6 km、最大高度约 42 m 的高填方边坡,由于场地规划选址的限制，在高填方边坡坡脚平行埋设有 4 条油气管道，边坡坡脚距离最近的管道仅有 7 m，这给油气管道的安全带来了严重威胁。研究采用 FLAC^{3D} 软件，分析了填方边坡对坡脚管道的影响，并探讨了在边坡坡脚布置 5 排 CFG 桩的情况下边坡的稳定性。研究结果表明：失稳滑动面仅出现在人工填土内，位于油气管道上方；填方边坡的基本稳定系数为 1.305，在暴雨工况下边坡处于基本稳定状态；管道在天然工况下满足稳定性要求，但在暴雨工况下可能导致变形和破裂；边坡坡脚地基增设 5 排 CFG 桩后，暴雨工况下管道变形和椭圆度满足规范要求，边坡稳定系数提升了 4.2%，但仍未满足规范安全储备要求。建议进一步采取防治措施以保证填方边坡的安全储备。

关键词：油气管道；高填方边坡；边坡稳定性；CFG 桩；边坡安全储备
中图分类号：P642.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035(2024)04-0115-11

Analysis of disaster risk to oil and gas pipelines and the effect of CFG reinforcement on high-fill slopes in Yunnan

LIU Zhangzhen[1], A Fayou[1,2,3], ZHANG Jing[4], YANG Dashen[5], LIU Xiaobo[4]
(1. *Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan* 650093, *China*; 2. *Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming, Yunnan* 650093, *China*; 3. *Yunnan Key Laboratory of Geological Hazard Forecasting and Early Warning and Ecological Protection and Restoration in Highland Mountainous Areas, Kunming, Yunnan* 650093, *China*; 4. *Kunming Oil and Gas Transmission Branch of Southwest South China Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co. Ltd., Kunming, Yunnan* 650093, *China*; 5. *Southwest China Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co. Ltd., Kunming, Yunnan* 650093, *China*)

收稿日期：2024-02-27；**修订日期：**2024-04-12　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：国家自然科学基金地区科学基金项目(4226070179)
第一作者：刘章振(2000—)，男，硕士研究生，主要从事地质灾害防治的学习和研究工作。E-mail: 925560689@qq.com
通讯作者：阿发友(1979—)，男，教授，工学博士，主要从事地质灾害防治的教学和研究工作。E-mail: afayou@163.com

Abstract: The study aims to investigate the stability of high fill slopes and their impact on oil and gas pipelines at the foot of the slopes in a key construction project located in Anning City, Yunnan Province. The project formed a high fill slope with a length of nearly 1.6km and a maximum height of about 42 m in early 2023. Due to site planning constraints, four oil and gas pipelines were buried parallel at the foot of the high-fill slope, with the closest pipeline being only 7 m away from the foot of the slope, posing a serious threat to the safety of the oil and gas pipelines. FLAC^{3D} software was employed to analyze the influence of the fill slope on the pipelines at the foot of the slope, and to explore the stability of the slope with the installation of five rows of CFG piles at the toe. The results show that the potential failure surface exists only within the artificial fill, above the oil and gas pipelines. The basic stability factor of the fill slope is 1.305, indicating basic stability under extreme rainfall conditions. Under natural conditions, the pipeline meets the stability requirements, but may lead to deformation and rupture under heavy rainfall conditions. With the addition of five rows of CFG piles at the slope toe, pipeline deformation and ellipticity meet the specification requirements under heavy rainfall conditions, and the safety and stability coefficient of the slope increases by 4.2%, yet fails to meet the specification safety reserve requirements. Further preventive measures are recommended to ensure the safety reserve of the fill slope.

Keywords: oil and gas pipeline；high fill slopes；slope stability；CFG pile；slope safety reserve

0 引言

管道运输作为陆上油气重要的运输方式之一，具有的安全、绿色、高效等优势，是区别于其他运输方式的显著特点，成为全球最主要的油气运输方式之一，管道安全影响全球各国经济的平稳健康发展[1－4]。然而，近几十年来，伴随长距离油气管道建设的发展，管道事故已屡见不鲜。这些事故不仅导致了巨大的经济损失，还对人身安全和自然环境产生了严重的威胁[5]。管道事故的诱因是多种多样的，其中，管道沿线人工填土边坡问题是油气管道安全管控中最受关注的问题之一。管道沿线的填方边坡可能诱发管道地基土深层滑动，也可能对管道地基土造成侧向挤压，导致管道发生变形、位移甚至破裂，这对管道的运营和管理工作提出了巨大挑战。因此，在油气管道沿线存在人工填方边坡问题时，必须对边坡稳定性和管道变形进行分析研究，为填方边坡的防治和管道保护提供依据。

近年来，国内外学者在填方边坡和油气管道稳定性分析领域进行了大量研究，为管道工程的设计和安全性提供了重要支持。这些研究主要集中在降雨条件对边坡稳定性的影响、滑坡灾害评估、数值模拟的研究等方面。在降雨条件对边坡稳定性的影响方面，Zhang 等[6]通过试验和数值分析，发现水分迁移会影响高填土边坡稳定性，强调前期降雨和水分劣化的重要性；唐军等[7]通过数值模拟和离心模型试验，研究了高填土边坡在长时间降雨条件下的稳定性及滑坡机制；Yang 等[8]使用了有限元极限分析方法，对降雨条件下的高填土边坡稳定性进行了模拟研究。这些研究认为降雨对边坡稳定性产生显著影响，需要可靠的参数稳定性。在滑坡灾害评估方面，Bezuglova 等[9]研究提出了明确的稳定性评估程序和工程建议，为降低填方坡滑坡风险提供了有力依据；唐培连等[10]通过对油气管道站场地的填方边坡工程中应用的土体加筋技术的实际应用进行了分析和总结，认为该技术的发现为高填方工程的稳定性问题提供了一个有效解决方案；Croft 等[11]研究了特殊土边坡内埋设的油气管道稳定性；Ma 等[12]通过建立滑坡易发性评估模型，为管道沿线滑坡风险的定量评估提供了新的方法。在数值模拟的研究方面，Tang 等[13]采用数值模拟方法，为管道设计和支护提供了有效的指导，以确保工程的稳定性。Wang 等[14]通过 FLAC^{3D} 构建隧道模型，揭示了厚硬地层下盾构施工对埋地管道的变形影响规律。Huang 等[15]使用 FLAC^{3D} 分析滑坡对埋地管道的影响，提出了最优的管道埋设方案。Andrews 等[16]针对天然气管道施工期间和施工后导致的边坡失效分析；冯兴等[17]通过有限元分析，比较了 Mohr-Coulomb 模型和含石量 UH 模型在山区机场高填方边坡稳定性计算中的结果，得出了使用 UH 模型的有效性。崔长吉等[18]使用 ANSYS 软件对黄土地区的填方边坡稳定性进行模拟，为该地区管道工程提供了稳定性评估的有效依据。这些研究证明了 FLAC^{3D} 等模拟软件在管道安全研究方面的准确性和可靠性，并且可以直观地观察管道的危险位置，对于管道安全研究是一种可靠的手段。综合分析上述研究可知，目前对高填方边坡影响油气管道的领域研究较少，如填方边坡对管道的受力问题，以及在多种外部因素综合影响下的管道变形分析。因此，深入研究

填方边坡对管道的影响以及管道安全问题，对于降低管道安全风险、确保管道系统的长期安全运营具有重要的研究意义。

综上所述，管道运输作为陆上油气的主要运输方式，尽管具有诸多优势，但近年来频繁发生的管道事故引起了广泛关注。填方边坡问题作为导致管道事故的关键因素之一，其稳定性直接关系到管道的安全运营。为了更深入地理解填方边坡对管道的潜在影响，本文以某高填方边坡为案例展开研究。通过采用 FLAC^{3D} 数值模拟工具，在全面考察整体稳定性的同时，关注了填土边坡地基引入 5 排 CFG 桩（Cement Fly-ash Gravel-水泥粉煤灰碎石桩）后的影响。本研究全面考虑了多种外部因素综合作用下的管道变形分析，以及采用了先进的模型模拟，为填方边坡对管道的受力问题提供了深刻理解。此外，本文还对填土边坡地基的 CFG 桩进行了深入研究，旨在为后续的边坡防治工作提供实用建议。

1　边坡工程地质条件

1.1　地形地貌

某重点建设项目位于云南省安宁市，项目场地地貌特征呈现西高东低的趋势，高程范围介于 1 851 ~ 1 894 m，相对高差达到了 43 m，自然地形的坡度 0° ~ 5°。因此，在场地平整过程中场地西侧形成挖方区，场地东侧形成填方区（图 1）。填方区边坡总长接近 1.6 km，边坡的高度各不相同，其中最高处位于边坡中部，高度约为 42 m。填方边坡区采用分台放坡的设计，具体包括四级边坡：第一级、第二级和第三级边坡的高度为 10 m，坡比为 1∶1.75，平台宽度为 2 m，第四级边坡采用了一坡到底的设计，坡比为 1∶0.75，呈现斜坡上缓下陡的特征。目前，填方边坡区坡脚地基土采用 5 排 CFG 桩进行加固，填方采用土工格栅进行加固，边坡坡脚未采取任何支挡措施。

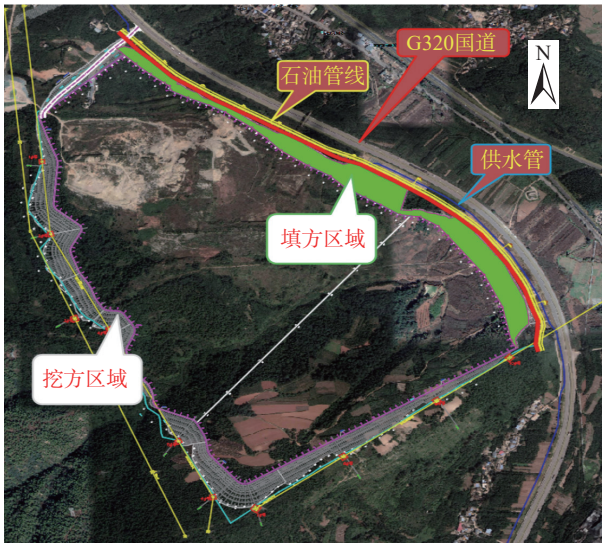


图 1　填方边坡及油气管道位置关系图

Fig. 1　Relationship between the filled slopes and the positions of oil and gas pipelines

在填方区的坡脚，分布着 4 条油气管道，从西向东依次是云南成品油管道安曲干线、云南成品油管道安保干线、中缅原油管道的安宁支线，以及中缅天然气管道的玉溪支线。这些管道的走向与填方区平行，总平行段长度达 1.6 km。其中，云南成品油管道安曲干线距离填方边坡坡脚最近，距离在 7 ~ 77 m。此外，还有一条供水管道，其走向也与项目区块平行，总平行长度达 800 m，填方边坡现状照片见图 2。

图 2　填方边坡现状照片

Fig. 2　Photographs of the current condition of the filled slopes

1.2　地层岩性

研究区地层浅表层主要为第四系人工填土（Qh^{ml}）、耕植土（Qh^{pd}），以及第四系坡残积（Qh^{el+dl}）黏土和粉质黏土，而下伏基岩为震旦系（Z$_b$*dn*）灯影组白云岩，见表 1。

1.3　水文地质条件

场地地下水主要为第四系松散孔隙水和基岩裂隙水，地下水位埋深较大，起伏较大，勘察期间未揭示稳定地下水，附近无地下泉水出露。

2　模型建立

2.1　边坡建模与分析

结合典型工程地质剖面图（图 3），利用 FLAC^{3D} 构建边坡模型，边坡岩体的本构模型采用修正的 Mohr-Coulomb 模型和遍布节理模型。

模型共有 34 000 个网格，大小为 1.8 m×1.8 m。根据地质勘探结果，模型采用表 2 所示填方边坡岩土体物理力学参数。为了模拟实际工程中地基的约束情况，本文对模型的底面进行了严格的限制，即将底面速度限定为零（v_y=0），从而成功固定了底面。

表 1 研究区地层岩性表

Table 1 Stratigraphic lithology of the study area

地层	代号	描述
第四系人工填土	Qh^{ml}	①$_2$层: 褐黄色, 褐灰色, 红褐色, 稍湿, 松散, 成分主要为黏性土及碎石, 主要分布于填方边坡区。层厚0.20 ~ 42 m, 揭露平均厚度约2.49 m。回填时间短, 局部经碾压
第四系耕植土	Qh^{pd}	①$_1$层: 褐红色, 稍湿, 质地松散, 均匀性较差。成分主要为黏性土及碎石, 分布于旱地内。层厚 0.30 ~ 1.80 m, 平均厚度 0.61 m
第四系坡残积黏土	Qh^{el+dl}	②层: 棕红色和褐红色的土壤, 稍微湿润, 主要呈硬塑状态, 土质均匀。钻探揭露厚度介于0.50 ~ 22.40 m, 揭露平均厚度约5.29 m
第四系坡残积粉质黏土	Qh^{el+dl}	③层: 棕红和灰黄色的土壤, 夹杂有灰白色的条带, 稍微湿润, 主要呈硬塑状态。土质不够均匀, 局部出现混有粉砂团块和少量角砾的情况。角砾成份主要为强风化砂岩、白云岩。钻探揭露厚度介于0.90 ~ 36.30 m, 揭露平均厚度约10.77 m, 部分钻孔深度内未击穿该层
震旦系灯影组白云岩	$Z_b dn$	④层: 强风化, 岩石呈灰色或灰白色, 具有细晶结构和层状构造, 经历了强烈的风化作用。其节理和裂隙非常发育, 岩芯呈碎块状, 裂隙常以灰黄色粉质黏土充填。场地范围钻孔均揭露
震旦系灯影组白云岩	$Z_b dn$	④$_1$层: 岩石呈灰色或灰白色, 具有细晶结构和层状构造, 风化程度中等。节理和裂隙非常发育, 岩芯呈短柱状, 部分地区呈碎块状

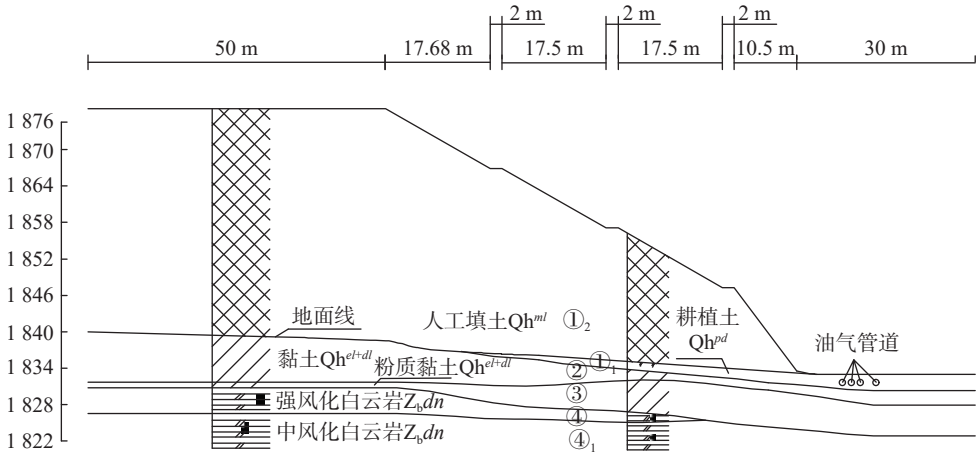


图 3 填方边坡典型工程地质剖面图

Fig. 3 Typical engineering geological cross-section profile of the filled slope

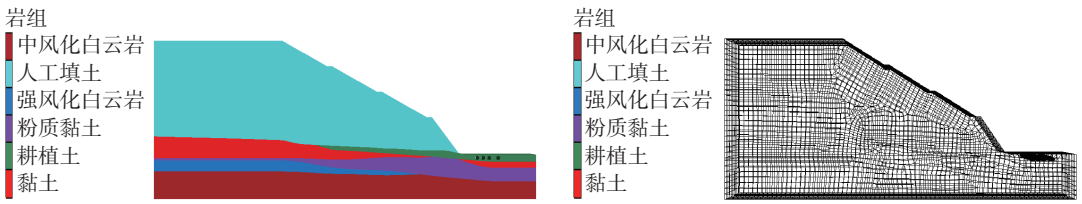
表 2 填方边坡岩土体的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the rock and soil bodies in the filled slopes

岩土名称	泊松比	天然重度 /(kN·m^{-3})	饱和重度 /(kN·m^{-3})	天然黏聚力 /MPa	饱和黏聚力 /MPa	天然内摩擦角 φ/(°)	饱和内摩擦角 φ/(°)
耕植土	0.20	17.0	17.5	9.0	8.5	19.0	18.5
素填土	0.20	17.3	18.0	9.0	8.5	19.0	18.5
黏土	0.35	18.2	18.8	35.6	27.5	25.2	22.2
粉质黏土	0.30	18.4	19.4	41.2	31.7	26.0	22.4
中风化白云岩	0.30	25.1	26.5	60.0	60.0	31.0	31.0

在数值模拟中, 模型的长度为高度的 2 ~ 3 倍有助于提高模拟精度, 以确保足够的空间分辨率和地质特征, 减小边界效应, 更真实地模拟边坡失稳过程。因此, 根据图 3 确定模型高度 52.5 m(Z 方向), 取长 150 m(X 方向), 宽 20 m(Y 方向)。具体地, 模型分为填土层(Qh^{ml})、耕植土层(Qh^{pd})、黏土层(Qh^{el+dl})、粉质黏土层(Qh^{el+dl})、强风化白云岩层($Z_b dn$)、中风化白云岩层($Z_b dn$), 由于油气管道稳定性主要与表层土体有关, 所以将基岩简化为水平状(图 4)。

在考虑边坡的特性时, 本文也纳入了侧面边界条件的设定。通过在侧面采限制侧向位移(v_x=0), 确保了模型的边界在仿真中能够反映真实的地质和土体响应。这样的边界条件设计, 旨在更全面地模拟边坡的复杂行为, 使得模型更贴近实际工程情况。通过这些设定, 能够更准确地观察和分析边坡在各种工况下的稳定性和变形特征。



（a）模型岩层分布图　　（b）模型网格划分图

图 4　边坡模型

Fig. 4　Schematic view of the Slope model

2.2　管道模拟与参数化

成品油管道和天然气管道选用 L415N 螺旋缝双面埋弧焊钢管，由规范查得屈服强度为 415 MPa[19－20]。原油管道选用螺旋缝双面埋弧焊钢管，屈服强度为 450 MPa，管材参数见表 3。经过辨识，边坡工程周边的输气管道经过的地区等级为三级，按 0.5[19－20]为设计系数。通常情况下，管道发生小变形后表面仍处于线弹性范围内。因此，本文将采用 Shell 单元对油气管道进行模拟。根据表 3 计算参数建立图 5 油气管道模型。

表 3　各管道参数表

Table 3　Parameters of each pipeline

名称	输送介质	管材参数
云南成品油管道安曲线	95#汽油、92#汽油、0#柴油、航空煤油，常温密闭输送	L415级，管径406.4 mm，壁厚7.9 mm，高频电阻焊钢管（HFW管），杨氏模量2.0 GPa，泊松比0.30，密度8 500 kg/m
云南成品油管道安保线	95#汽油、92#汽油、0#柴油，常温密闭输送	L415级，管径406.4 mm，壁厚7.9 mm，高频电阻焊钢管（HFW管），杨氏模量2.0 GPa，泊松比0.30，密度8 500 kg/m
中缅原油管道安宁支线	轻质原油，常温密闭输送	X65（L450），管径610 mm，壁厚7.9 mm，螺旋缝埋弧焊钢管，杨氏模量2.0 GPa，泊松比0.30，密度8 500 kg/m
中缅天然气管道玉溪支线	天然气，常温密闭输送	X80（L555），管径813 mm，壁厚14 mm，螺旋缝埋弧焊钢管，杨氏模量2.0 GPa，泊松比0.30，密度8 500 kg/m

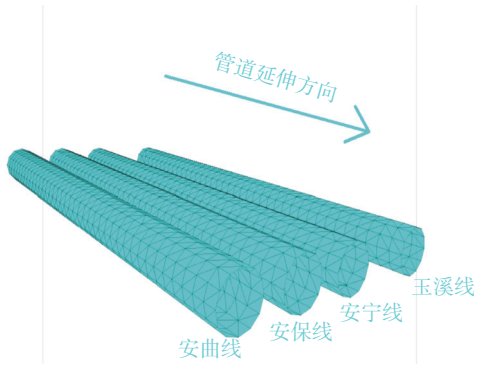


图 5　油气管道模型

Fig. 5　Oil and gas pipeline model

2.3　计算模型与参数选取

2.3.1　填土的计算模型

基于人工填土的力学性质，本文使用修正的 Mohr-Coulomb 模型来分析填土。模型的硬化行为遵循增量弹性定律，并采用了 Mohr-Coulomb 准则，包括张拉和剪切的组合[18]（图 6）。

屈服函数使用 Mohr-Coulomb 破坏准则描述，从点 A 到点 B 的破坏包络线 f^s=0[18]，即

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \tag{1}$$

其中，

$$N_\varphi = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{2}$$

描述从 B 点到 C 点的破坏包络线 f^t=0 的是张拉破坏准则，即：

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{3}$$

式中：σ_1、σ_3——大主应力和小主应力；

φ——内摩擦角；

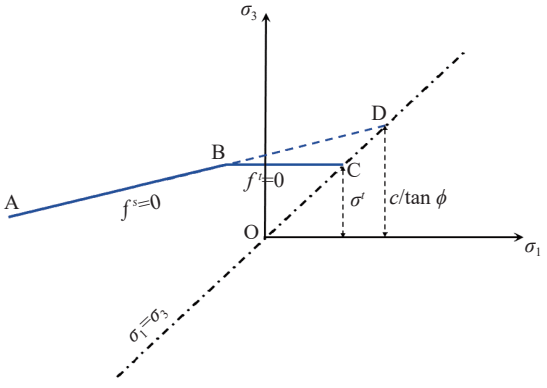


图 6　FLAC^{3D} Mohr-Coulomb 失效模型

Fig. 6　FLAC^{3D} Mohr-Coulomb failure model

σ^t——张拉强度。

张拉强度不可超过σ_3值，最大值由下式给定

$$\sigma^t_{\max}=\frac{c}{\tan\varphi} \tag{4}$$

由函数g^s和g^t描述势函数。

$$g^s=\sigma_1-\sigma_3 N_\Psi \tag{5}$$

其中，

$$N_\varphi=\frac{1+\sin\Psi}{1-\sin\Psi} \tag{6}$$

$$g^t=\sigma_3 \tag{7}$$

式中：Ψ——膨胀角。

用式$h(\sigma_1,\sigma_3)=0$将流动法则写成统一的形式为

$$h=\sigma_3-\sigma^t+\alpha^p(\sigma_1-\sigma^p) \tag{8}$$

其中，

$$\alpha^p=\sqrt{1+N_\varphi^2}+N_\varphi \tag{9}$$

$$\sigma^p=\sigma^t N_\varphi-2c\sqrt{N_\varphi} \tag{10}$$

2.3.2 接触面的分析模型

在 FLAC^{3D} 中，土层之间通常使用 Interface 单元连接。该单元在计算中可以模拟土层之间的滑动、分离现象，因此也可以用来模拟其他不连续的物理系统，如断层面或不同材料之间的界面(图 7)。当模拟人工填土时，接口的参数对初始平衡计算至关重要。其中，Interface 的参数包括剪切刚度(k_s)和法向刚度(k_n)，这些参数会对初始平衡计算中的应力传递产生重要影响。

对于人工填土，通常假设剪切刚度(k_s)与土壤内摩擦角(φ)成正比，法向刚度(k_n)与黏聚力(c)成正比，具体为：$k_s=0.3\varphi$，$k_n=0.2c$。

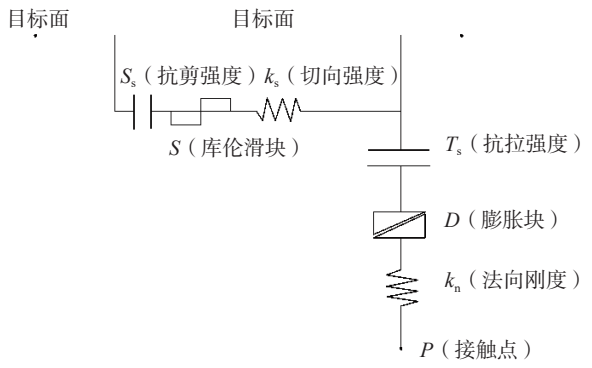


图 7 Interface 单元的力学模型

Fig. 7 Mechanical model of interface unit

描述弹性界面响应的法向力和剪切力是在计算时间（$t+\Delta t$）利用以下关系确定的

$$F_n^{(t+\Delta t)}=k_n u_n A+\sigma A \tag{11}$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)}=F_{si}^{(t)}+k_n\Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)}A+\sigma_{si}A \tag{12}$$

式中：$F_n^{(t+\Delta t)}$——$t+\Delta t$时步的法向力；

$F_{si}^{(t+\Delta t)}$——$t+\Delta t$时步的切向力；

u_n——接触点 P 点与目标面法向嵌入的绝对位移；

Δu_{si}——相对切向位移矢量的增量；

σ_n——界面应力初始化过程中产生的附加法向应力矢量；

σ_{si}——界面应力初始化过程中产生的附加切向应力矢量；

A——P 点所对应的等代面积[21]。

2.4 对雨水的模拟

在边坡稳定性分析中，对降雨的考虑主要集中在雨水引起的坡体强度参数降低和容重变化。因此，在计算过程中，本文假设经过一段时间的降雨后，局部范围内形成饱和区，将该范围内土体的容重取为饱和容重，以此来模拟雨水的软化作用对该范围内土体的抗剪强度参数折减。

3 管道失效判据

3.1 强度校核标准

埋地管道在受到复杂应力状态的影响下，一般为三向应力状态。因此，为了更贴合实际情况，本文采用 Von Mises 应力屈服条件，即管道的最大 Von Mises 应力达到一定值时，管道将屈服[22]，即

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}<\phi\sigma_s \tag{13}$$

式中：σ_1、σ_2、σ_3——主应力；

ϕ——设计系数，取 0.5；

σ_s——屈服应力[22]。

3.2 稳定性校核标准

对于油气管道的稳定性，本文采用椭圆度进行校核[23]，即

$$\begin{cases}\Delta x\leqslant 0.03D\\ \Delta x=\dfrac{ZKWD_m^3}{8EI+0.061E_sD_m^3}\\ W=W_1+W_2\\ I=\dfrac{\delta_n^3}{12}\end{cases} \tag{14}$$

式中：Δx——水平最大变形量/m；

D——直径/m；

D_m——平均直径/m；

W——单位总荷载/(N·m^{-1})；

W_1——单位竖向荷载/(N·m^{-1})；

W_2——地面传递到油气管道上载荷/(N·m^{-1})；

Z——变形滞后系数，取 1.5；

K——基床系数；

E——弹性模量/Pa；

I——油气管截面惯性矩/m^4；

δ_n——管道壁厚/m；

E_s——土壤变形模量/Pa[23]。

油气管道的最大变形量除以管径的结果为椭圆度 Δ_θ，当椭圆度大于 3%时，通常被认为是失稳状态。

$$\Delta_\theta = \frac{\Delta x}{D} \tag{15}$$

4　模拟与分析

4.1　边坡稳定性结果分析

边坡对油气管道的影响主要体现在滑坡体的水平向(X 方向)位移上。因此，边坡的模拟主要以安全系数和滑体的水平向位移为研究对象[24]。图 8 展示了天然工况下油气管线工程填土边坡的水平向位移分布云图和安全系数。从图 8 中可以看出人工填土内部潜在滑动面明显，未发生地基土深层滑动。天然工况下边坡的稳定安全系数为 1.305>1.3[25－26]，处于稳定状态，符合规范要求的安全储备。

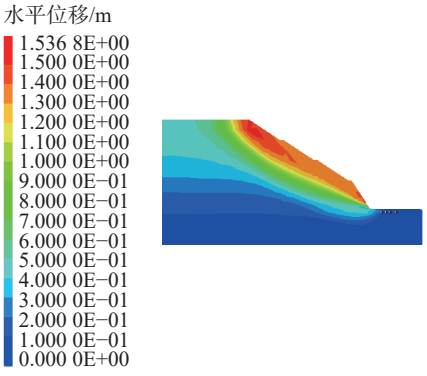


图 8　天然工况下坡体水平位移场

Fig. 8　Horizontal displacement field of the slope body under natural working conditions

图 9 展示了在暴雨工况下，填土边坡水平向位移分布云图和相应的安全系数。在暴雨工况下，雨水渗透导致填土及地基土强度急剧下降[27]。在重力作用下滑动面明显，填土边坡的稳定系数为 1.06<1.15[26]，处于不稳定状态，不满足规范要求。

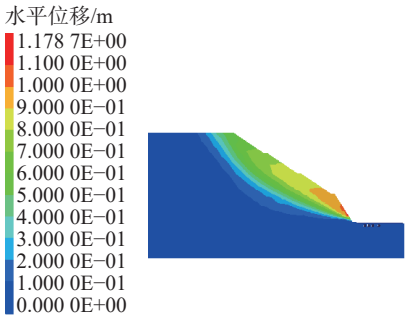


图 9　暴雨工况坡体水平位移场

Fig. 9　Horizontal displacement field of the slope body under heavy rainfall conditions

4.2　油气管道受力分析

油气管道的安全性主要从强度、稳定性两方面进行评价[28]。强度方面，主要关注管道在水平向(X 方向)上承受的 Von Mises 应力，当 Von Mises 应力超过管道的规定承受范围时，管道可能发生变形甚至断裂；稳定性方面，管道在外部载荷作用下的椭圆度不应大于 3%[19－20]。

对 Shell 单元进行模拟计算，可以得到油气管道在天然、暴雨两种工况下的应力与变形云图，如图 10、图 11 所示。从计算结果可知，天然工况下油气管道管最大应力集中于油气管道的水平方向管壁，最大 Von Mises 应力为 1.45 kPa，远小于 207.5 MPa。同时，油气管道最大变形出现在靠坡脚一侧成品油管道的管壁，最大变形量为 1.18 mm，椭圆度为 0.29%，满足要求。

在暴雨工况下，油气管道的最大 Von Mises 应力达到 5.74 kPa，小于 207.5 MPa。同时，管道的最大变形出现在靠近坡脚一侧成品油管道的管道侧壁，最大为 33.0 mm，最大椭圆度为 8.12%>3.00%，不满足规范要求。

4.3　模拟小结

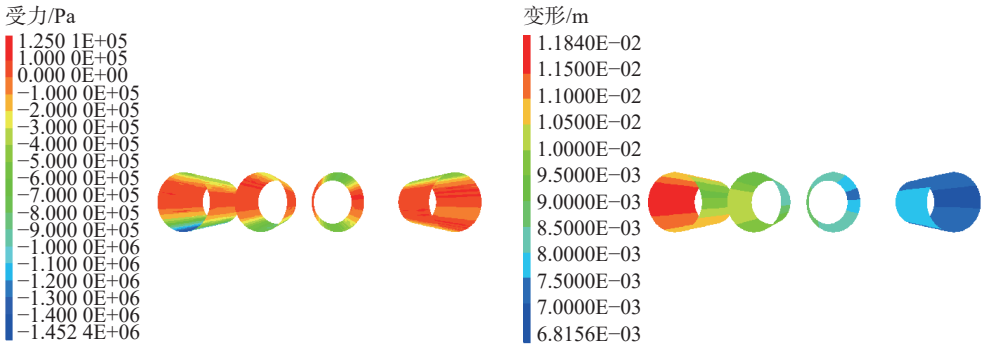
经过 FLAC^{3D} 对填土边坡与管道的分析，结果表明，在天然工况下，填方边坡处于基本稳定状态，对坡脚油气管道的影响较小；在暴雨工况下，填方边坡处于失稳状态，对成品油管道造成了推移，存在重大安全隐患。

结合规范的要求，可以得出如下结论：在天然工况下，本项目的填方边坡保持着稳定或者基本稳定的状态，但稳定性系数不满足规范要求的安全储备要求；在暴雨工况下，填土边坡稳定性系数不符合规范要求，存在失稳的潜在风险。同时，成品油管道的椭圆度超出了规范所允许的范围，有可能发生油气管道形变、位移甚至断裂。

5　CFG 桩对边坡稳定性的影响分析

5.1　CFG 桩布置概况

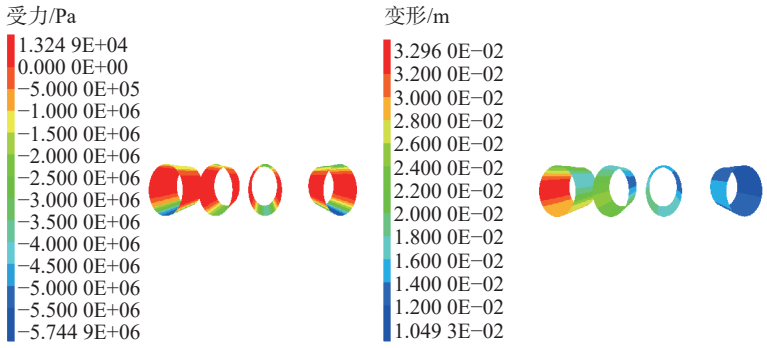
为降低填方边坡对坡脚油气管道的影响，设计单位



（a）受力 （b）变形

图 10 天然工况管道模拟计算结果

Fig. 10 Simulation results of pipeline under natural conditions



（a）受力 （b）变形

图 11 暴雨工况管道计算结果

Fig. 11 Simulation results of pipeline under heavy rainfall conditions

在靠近坡脚位置布置了 5 排 CFG 桩，桩径为 0.5 m，桩长为 16 m，桩体嵌入基岩深度为 2.8 ~ 3.1 m，桩间距为 2 m(图 12—13)。本文在模拟、分析填方边坡的基础上，在模型中布置 5 排 CFG 桩，以分析 CFG 桩地基加固对填土边坡诱发潜在深层滑动的影响。为模拟 CFG 桩，本文采用了 FLAC^{3D} 中的 beam 单元[29]，并使用了表 4 中的计算参数。

5.2 数值模拟结果

在 CFG 桩布置后，得到整个边坡在暴雨工况下的水平向(X 方向)位移、管道应力分布云图(图 14—15)。由计算结果可知，边坡的安全系数为 1.105<1.15[16]，较未处理前提升了 4.2%，边坡处于基本稳定状态，不满足规范要求的安全储备；在管道变形方面，管道最大变形降低至 1.15 mm，椭圆度为 0.28%，影响程度降低明显。总的来说，CFG 桩处理后仍不能满足规范要求的安全储备。

根据模拟结果，CFG 桩在整个滑坡区的支护效果并不明显。根据剪力分布图 16(a)，CFG 桩受到剪应力主要分布于桩体中部，大小为 0.16 ~ 0.45 MPa。其中，最大剪应力出现在每排居中的桩体中部，大小为 0.53 MPa。从图 16(b)中可以看出，桩的水平位移主要出现在桩体的中上部，最大值为 9.83 mm，未出现断桩情况，同时，CFG 桩的嵌固段几乎没有位移，这是因为 CFG 桩的嵌固段与基岩岩体结合紧密且地基系数相对较大。

考虑到在暴雨工况下，填土边坡的稳定性系数仍未达到规范要求，因此，需要采取进一步的治理措施。鉴于 CFG 桩在抵抗横向荷载方面的贡献有限，建议建设方在填方边坡坡脚增设抗滑桩，以确保边坡的稳定性。

5.3 防御与治理

5.3.1 防护措施建议

考虑到暴雨工况下填土边坡的稳定性系数未满足规范要求，建议采取以下防护措施：

(1)加固 CFG 桩布置区域：对 CFG 桩布置区域进行进一步加固，增强边坡的整体稳定性。

(2)增设抗滑桩：在填方边坡坡脚处增设抗滑桩，提高整体抗滑能力。

(3)引入植被覆盖：考虑在边坡表面引入植被覆盖，以提高土壤的抗冲刷能力。

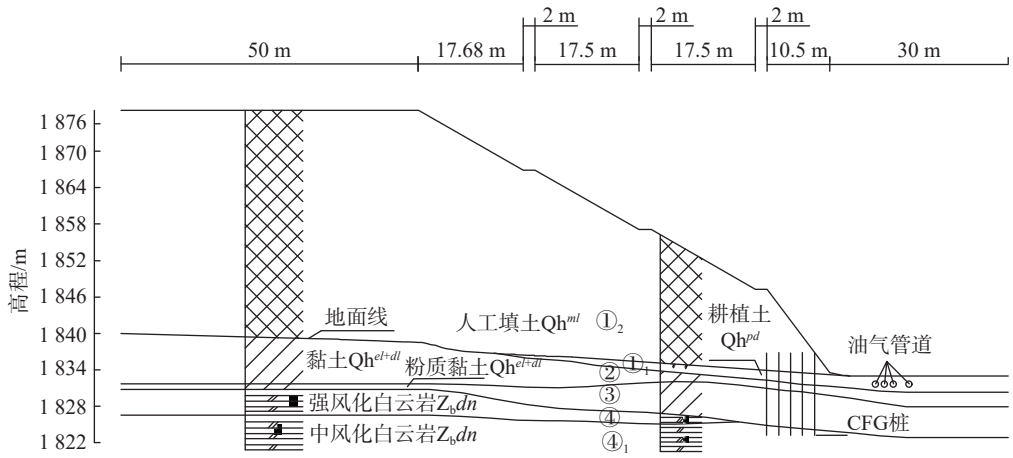


图 12　CFG 桩布置剖面图

Fig. 12　Cross-Sectional diagram of CFG pile arrangement

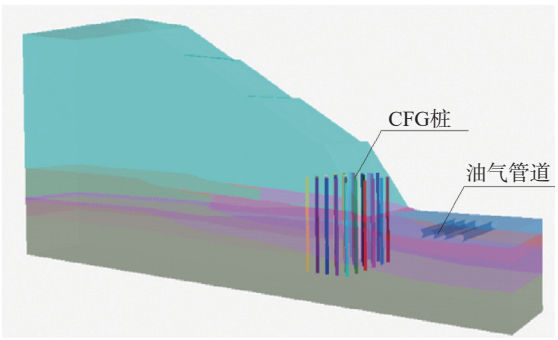


图 13　CFG 桩布置情况

Fig. 13　CFG pile arrangement

表 4　CFG 桩单元计算参数

Table 4　Calculation parameters of CFG pile units

横截面积/m²	弹性模量/GPa	泊松比	法向及剪切耦合弹簧单位长度		
			刚度/GPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
0.785	15	0.3	130	500	20

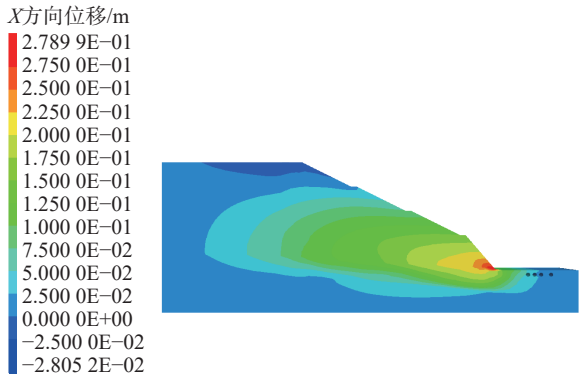


图 14　CFG 桩处理后在暴雨工况下的边坡 *X* 方向位移分布云图

Fig. 14　Contour map of *X*-direction displacement distribution of the slope under heavy rainfall conditions after CFG pile treatment

5.3.2　后续治理建议

为确保工程长期稳定运行，提出以下后续治理建议：

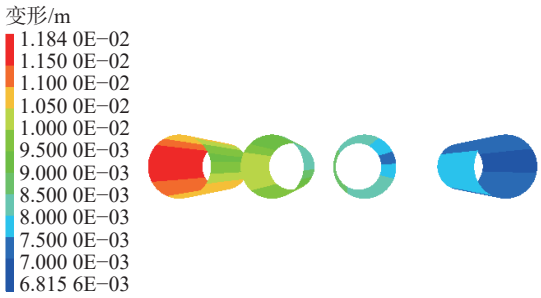


图 15　CFG 桩处理后在暴雨工况管道变形分布云图

Fig. 15　Contour map of pipe distribution deformation under heavy rainfall conditions after CFG pile treatment

（1）定期监测与维护：实施定期的边坡监测，特别关注暴雨季节，及时采取维护措施。

（2）加强排水系统：针对暴雨工况下雨水渗透引起的强度下降问题，完善排水系统，减小水分对土壤的不利影响。

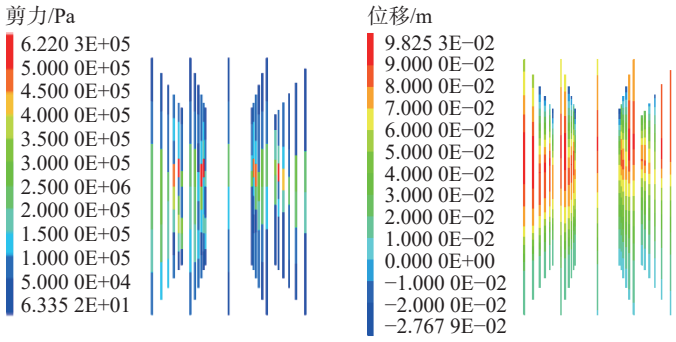
（3）动态风险评估：针对变化的气候和地质条件，定期进行动态风险评估，及时更新治理方案。

通过综合实施上述建议，可有效提高填土边坡的稳定性，降低油气管道受到的影响，确保工程的安全可靠性。

6　结论

（1）使用 FLAC^{3D} 计算边坡稳定性，在天然工况下，边坡稳定系数为 1.305，滑坡体水平向最大位移为 1.53 m；而在暴雨工况下，边坡稳定系数为 0.951，滑坡体水平向最大位移为 1.71 m，潜在滑动面均出现在管道上方，未出现从管道下方根植土穿出的情况。两种工况下边坡的稳定性系数均未达到要求，这表明边坡不符合规范要求的安全储备，需要采取措施来提高边坡的稳定性。

（2）根据受力分析结果可知，在天然工况下，Von



（a）剪力 （b）位移

图 16 CFG 桩剪力与位移模拟计算结果

Fig. 16 Simulation results of shear stress and displacement of CFG piles

Mises 应力最大值为 1.45 kPa, 椭圆度为 0.29%, 符合规范要求; 而在暴雨工况下, Von Mises 最大值应力达到 5.74 kPa, 椭圆度为 8.12%, 超过了规范允许的 3.00%。这表明在暴雨工况下, 管道可能会发生变形和破裂。

(3)经过 CFG 桩治理后, 油气管道的变形降至 1.184 mm, 最大应力降至 1.56 kPa, 影响程度降低明显。此时, 边坡的安全系数提高至 1.105, 较暴雨工况提高了 4.2%。但仍然未满足规范要求安全储备, 因此建议采取进一步的防治措施以确保边坡的稳定性。

参考文献(References):

[1] 陈腾辉, 阿发友, 黑明昌, 等. 输油管道纵向穿越滑坡的成灾机理研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(1): 57 − 62. [CHEN Tenghui, A Fayou, HEI Mingchang, et al. Study on disaster mechanism of oil pipeline longitudinal crossing landslide[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 33(1): 57 − 62. (in Chinese with English abstract)]

[2] 张佳璐. 兰成渝输油管道剑阁段滑坡稳定性及治理监测研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017. [ZHANG Jialu. Study on landslide stability and treatment monitoring of Jiange section of Lan Cheng Yu oil pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017. (in Chinese with English abstract)]

[3] 梁政, 张杰, 韩传军. 地质灾害下油气管道力学[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [LIANG Zheng, ZHANG Jie, HAN Chuanjun. Mechanics of oil and gas pipelines under geological hazards[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]

[4] 程玉峰. 保障中俄东线天然气管道长期安全运行的若干技术思考[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 1−8. [CHENG Yufeng. Technical insights into the long-term integrity and sustainability of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 1 − 8. (in Chinese with English abstract)]

[5] 杨卫涛, 苏东. 秦巴山区长输管道地质灾害发育特征及防治对策[J]. 天然气与石油, 2020, 38(4): 130 − 134. [YANG Weitao, SU Dong. Geological hazards development characteristics and their prevention and control measures of long distance pipeline engineering in Qinba mountainous terrain[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(4): 130 − 134. (in Chinese with English abstract)]

[6] ZHANG Zhenping, SHENG Qian, SONG Dingfeng, et al. Stability evaluation of the high fill deposit slope subjected to rainfall considering water deterioration[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(3): 68.

[7] 唐军. 高填方边坡在强降雨条件下稳定性分析——以攀枝花机场为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [TANG Jun. In high fill slope stability analysis under the condition of heavy rainfallby Panzhihua airport as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]

[8] YANG Zhou, CHENG Xiaohui. High fill slope collapse: Stability evaluation based on finite element limit analyses[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 44: 101156.

[9] BEZUGLOVA E V, MATSII S I. Stability express-assessment of landslide prone slopes during pre-design development work on engineering protection for gas pipeline and power transmission line routes[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2017, 54(2): 122 − 127.

[10] 唐培连, 穆树怀, 霍锦宏, 等. 土体加筋技术在油气长输管道站场高填方工程中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 109 − 113. [TANG Peilian, MU Shuhuai, HUO Jinhong, et al. Application of soil reinforcement technology to high fill engineering at long-distance oil and gas pipeline stations[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 109 − 113. (in Chinese with English abstract)]

[11] CROFT P, HOOPES O T, WUTTIG F J, et al. Slope stabilization along a buried crude-oil pipeline in ice-rich permafrost[C]//Permafrost 2021. Virtual Conference. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 339 − 350.

［12］ MA Fengshan, WANG Jie, YUAN Renmao, et al. Application of analytical hierarchy process and least-squares method for landslide susceptibility assessment along the Zhong-Wu natural gas pipeline, China［J］. Landslides, 2013, 10(4): 481 − 492.

［13］ TANG P, MU S, HUO J, CHEN, X. Application of soil reinforcement technology to high fill engineering at long-distance oil and gas pipeline stations. Natural Gas Industry, 37(9), 109 − 113.

［14］ WANG Hongde, CUI Tiejun. Deformation effect of buried pipeline in shield tunneling crossing thick and hard rock［J］. Advanced Materials Research, 2013, 639/640: 961 − 964.

［15］ HUANG Fan, LU Hongzhi, WU Zhaoming. Buried pipeline optimization in landslide area［C］//ICPTT 2011. Beijing, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011: 113 − 117.

［16］ ANDREWS J, GARCIA D, NELSON E J. Analyses of slope failures resulting during and after construction of a natural gas pipeline, southeastern Ohio［C］//Forensic Engineering 2022. Denver, Colorado. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2022: 288 − 293.

［17］ FENG Xing, YAO Yangping, ZHANG Jian et al. Stability analysis of high fill slopes in mountainous airports［J/OL］. Mechanics and Practice, (2023-09-07)［2024-03-15］. https://lxsj.cstam.org.cn/en/article/doi/10.6052/1000-0879-23-140

［18］ 崔长吉，任晓东，李申. 利用 ANSYS 模拟边坡稳定性并分析其对西气东输管道的影响［J］. 科技风, 2014(2): 20 − 21.［CUI Changji, REN Xiaodong, LI Shen. Analysis of slope stability by ANSYS to study it's influence to West-East Gas Pipeline Project［J］. Technology Wind, 2014(2): 20 − 21.(in Chinese with English abstract)］

［19］ 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)］

［20］ 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输气管道工程设计规范：GB 50251—2015［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 gas transmission pipeline engineering: GB 50251— 2015［S］. Beijing: China Planning Press, 2015.(in Chinese)］

［21］ 孙书伟，朱本珍，谭冬生. 黄土地区管道沿线填土边坡滑坡发生机理和防治对策［J］. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 8 − 14.［SUN Shuwei, ZHU Benzhen, TAN Dongsheng. Mechanism of filling slope landslide along pipeline in loess area and the countermeasures［J］. China Railway Science, 2008, 29(4): 8 − 14.(in Chinese with English abstract)］

［22］ 郭书太，邵景林，孙炜锋，等. 西气东输管道工程 EJ065 桩附近边坡稳定性分析［J］. 水文地质工程地质, 2002, 29(5): 33 − 36.［GUO Shutai, SHAO Jinglin, SUN Weifeng, et al. Assessment on the slope stability around the EJ065 pile on the line of the gas diversion tunnel engineering from the West China to the east［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(5): 33 − 36.(in Chinese with English abstract)］

［23］ 帅健. 管线力学［M］. 北京：科学出版社，2010.［SHUAI Jian. Pipeline mechanics［M］. Beijing: Science Press, 2010.(in Chinese)］

［24］ 王子，王栋，姜帅，等. 西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析［J］. 中国地质灾害与防治学报，2023, 34(3): 8 − 19.［WANG Zi, WANG Dong, JIANG Shuai, et al. Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the west-east gas pipeline project［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 8 − 19.(in Chinese with English abstract)］

［25］ 中华人民共和国建设部. 建筑边坡工程技术规范：GB 50330—2002［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2002.［Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330— 2002［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.(in Chinese)］

［26］ 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高填方地基技术规范：GB 51254—2017［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2017.［Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for deep filled ground: GB 51254—2017［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.(in Chinese)］

［27］ 文海家，张岩岩，付红梅，等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展［J］. 中国公路学报, 2018, 31(2): 15 − 29.［WEN Haijia, ZHANG Yanyan, FU Hongmei, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods［J］. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 15 − 29.(in Chinese with English abstract)］

［28］ 贺三，张伊恒，梁武东. 中缅输气管道澜沧江段地震工况的应力分析［J］. 天然气技术与经济, 2016, 10(1): 50 − 53.［HE San, ZHANG Yiheng, LIANG Wudong. Stress under seismic operation for the China-Burma gas pipeline across Lantsang River［J］. Natural Gas Technology and Economy, 2016, 10(1): 50 − 53.(in Chinese with English abstract)］

［29］ 李宁，刘冠麟，许建聪，等. 降雨条件下抗滑桩边坡三维稳定性分析［J］. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 38 − 46.［LI Ning, LIU Guanlin, XU Jiancong, et al. 3D numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles under rainfall conditions［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 38 − 46.(in Chinese with English abstract)］