

山区天然气管道—滑坡体系下花管微型桩与螺纹微型桩支护性能对比试验

高建章, 方迎潮, 王学军, 葛 华, 沈茂丁, 梁 栋, 孟 建

Physical model tests on supporting performance of micro-pile and micro-pile with thread in natural gas pipe-landslide system in mountainous area

GAO Jianzhang, FANG Yingchao, WANG Xuejun, GE Hua, SHEN Maoding, LIANG Dong, and MENG Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滑坡对埋地天然气管道的作用机理分析

$\${suggestArticle.titleEn}$

彭善碧, 廖文, 徐明军, TomIseley, JohnMatthews 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(6): 59-67

桩板墙不同类型挂板的技术经济比较

Technical and economic comparison for different types of hanging board method of pile sheet wall

李菊芳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 135-142

强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

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

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202046

高建章, 方迎潮, 王学军, 等. 山区天然气管道—滑坡体系下花管微型桩与螺纹微型桩支护性能对比试验 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 120-131.

GAO Jianzhang, FANG Yingchao, WANG Xuejun, et al. Physical model tests on supporting performance of micro-pile and micro-pile with thread in natural gas pipe-landslide system in mountainous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 120-131.

山区天然气管道—滑坡体系下花管微型桩与 螺纹微型桩支护性能对比试验

高建章¹, 方迎潮^{1,2,3}, 王学军⁴, 葛 华¹, 沈茂丁⁴, 梁 栋¹, 孟 建⁴

(1. 国家管网集团西南管道有限责任公司, 四川成都 610041; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 10049; 4. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000)

摘要:山区天然气管道工程难免会遭遇滑坡等地质灾害的影响, 这给穿越滑坡区域的沿线管道的安全运营造成严重威胁。文章以中贵天然气管道 K558+700 滑坡为工程背景, 通过室内大型物理模型试验, 研究对比花管微型桩与螺纹微型桩两种新型支挡结构在管道滑坡中的支护机理及适用性。试验表明: (1) 花管微型桩山侧及河侧峰值土压力沿桩深分布形式基本相似, 大体呈“S”曲线形, 桩后土体土拱效应明显, 且在各级荷载下分布形式大致保持一致, 总体来说花管桩侧土压力分布规律为桩中最大, 桩顶次之, 桩底最小; 滑带附近的桩体周围土压力较大, 在抗滑桩设计工作中应重点考虑优化。(2) 螺纹桩山侧峰值土压力沿桩深分布图大体呈双“S”曲线形, 河侧峰值土压力相比山侧分布形式产生了较大差异, 桩底的土压力相比山侧有很大幅度减小; 随外部荷载的增加桩周土压力增加幅度较大, 表明螺纹微型桩在横向承载性能方面有所欠缺。(3) 花管桩桩身弯矩沿深度方向呈“M”形分布, 桩身离模拟滑面以上 5 cm 位置处产生最大正弯矩; 螺纹桩桩身弯矩分布沿深度方向呈“S”形, 桩体正负弯矩位置在模拟滑面附近大致呈旋转对称分布, 滑面以上大部分区段为负弯矩, 滑面以下为正弯矩; 在相同推力荷载工况下, 螺纹微型桩变形程度大于花管微型桩。(4) 在滑坡作用下花管微型桩可以有效减小传递到管道的坡体应力, 在一定程度上预防管道受力破坏; 而螺纹桩在较大横向荷载下抗弯性能不足, 变形严重, 破坏后不能有效承担滑坡推力, 传递到桩前管道的应力较大, 从而导致管道变形程度更为强烈。在本试验条件下, 花管微型桩对管道的保护效益突出, 更适用于作为管道—滑坡区域的支挡结构。

关键词: 滑坡; 天然气管道; 花管微型桩; 螺纹微型桩; 支护机理

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)02-0120-12

Physical model tests on supporting performance of micro-pile and micro-pile with thread in natural gas pipe-landslide system in mountainous area

GAO Jianzhang¹, FANG Yingchao^{1,2,3}, WANG Xuejun⁴, GE Hua¹, SHEN Maoding⁴,
LIANG Dong¹, MENG Jian⁴

(1. Pipe China Southwest Pipeline Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-07-20

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家管网集团西南管道有限责任公司科技项目(2020B-3106-0501); 国家管网集团科技项目(WZXGL202106)

第一作者: 高建章(1971-), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 高级工程师, 现主要从事工程管理工作。E-mail: eyelashes2008@126.com

通讯作者: 方迎潮(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 现从事油气管道地质灾害防治方向的研究工作。E-mail: 1176988203@qq.com

Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang, Hebei 610036, China)

Abstract: Natural gas pipeline projects in mountainous areas are inevitably affected by geological hazards such as landslides, which pose a serious threat to the safe operation of pipelines along the routes through landslide areas. Based on the engineering background of China-Guizhou natural gas pipeline K558 + 700 landslide, this paper studies and compares the supporting mechanism and applicability of two different support structures, namely, flower-tube micro-pile and threaded micro-pile, in pipeline landslide through indoor large-scale physical model tests. The results show that: (1) The distribution pattern of peak soil pressure along the mountain side and river side of flower tube micro-piles is basically similar along the pile depth, which is in the shape of "S" curve. The soil arching effect behind the pile is obvious, and the distribution pattern of soil pressure is generally consistent at all levels of load. In general, the distribution pattern of soil pressure on the side of the flower-pipe pile is the largest among piles, followed by the pile top, and the bottom of the pile. The soil pressure around the pile near the sliding zone is larger, so the optimization should be considered in the design of anti-slide pile. (2) The distribution diagram of the peak earth pressure along the pile depth of the threaded pile presents a double "S" curve. The distribution pattern of the peak earth pressure on the river side is significantly different from that of the mountain side, and the earth pressure at the bottom of the pile decreases greatly compared with that of the mountain side. With the increase of external load, the soil pressure around the pile increases greatly, indicating that the screw micro pile is deficient in lateral bearing capacity. (3) The bending moment of flowered pipe pile presents an "M" shape distribution along the depth direction, and the maximum positive bending moment occurs at the position 5 cm above the simulated slip surface. The pile body bending moment distribution along the depth direction is "S" shape, and the pile body positive and negative bending moment position near the simulated sliding surface roughly rotate symmetrical distribution, most of the region above the sliding surface is negative bending moment, the pile body below the sliding surface is positive bending moment. Under the same thrust load, the deformation degree of the screw micro pile is greater than that of the flower tube micro pile. (4) The load-bearing performance of the splined pipe pile is better than that of the threaded pile under thrust load, which effectively reduces the landslide thrust transferred to the pipeline; Under the large thrust load, the threaded pile can not effectively bear and offset the landslide thrust due to its insufficient flexural performance and serious deformation, and the stress transmitted to the pipe in front of the pile is large, causing more intense deformation of the pipe. Under the condition of this test, the flowered pipe micro-pile has outstanding protection benefit to the pipeline, and is more suitable for the retaining structure of the landslide area of the pipeline.

Keywords: landslide; natural gas pipeline; flower tube micro pile; micro thread pile; the supporting mechanism

0 引言

近年来,随着国家对天然气管道工程建设的重视力度不断提高,我国的天然气管道工程建设步伐不断加快,目前国家干线管道系统已初具规模,并加速形成“主干互联、区域成网”的全国天然气基础网络^[1]。

由于管道线路较长,通常跨越不同地区,沿线地质地貌条件复杂,因此在建设过程中难以避免会穿越不良地质地段,在不稳定因素的影响下极有可能诱发地质灾害,其中滑坡是山区油气管道工程中常见的地质灾害类型^[2]。在滑坡作用下,管道容易产生变形甚至破损,导致燃气泄漏,严重威胁沿线民众的正常生活。因此,如

何对管道滑坡进行有效的支护并保护管道安全值得关注。

花管微型桩是一种新型压力灌浆式抗滑桩,集中了钢花管桩与微型桩的优点,在20世纪80年代开始在国内应用并很快在基坑支护、滑坡治理等领域被广泛采用。目前,国内外学者对花管微型桩加固滑坡的承载性能已经开展了部分研究工作,但针对管道—滑坡体系支护性能研究方面还未涉及。潘锋^[3]提出了一种注浆钢花管桩加固滑坡的理论计算公式;陈强等^[4]通过离心模型试验研究发现注浆钢管桩在控制滑坡土体位移方面的有益作用;Wang等^[5]针对钢花管桩微型桩的双注浆技术展开了研究,并通过试验证明了此工艺可以有效

提高微型桩承载性能。

螺纹微型桩来源于地基基础工程中使用的螺纹桩,因其利用“螺丝钉比钉子更牢固”的原理^[6],使螺纹桩拥有较好的承载性能,但螺纹桩目前只在地基工程中应用较多,还未被作为支挡结构应用在滑坡治理工程中。国内外对其进行的研究多集中在竖向承载性能方面,如 Krasinski^[7]采用数值模拟方法对螺纹桩承载机理进行了研究,并通过现场载荷试验验证了方法的可靠性;方崇等^[8]通过静载试验分析了螺杆桩的竖向承载力传递特性与受力特征;叶阳升等^[9]对高速铁路中的螺杆桩复合地基进行了原位测试试验,研究获得了直杆端与螺纹段在不同受力状态下的桩侧摩阻力关系;Malik 等^[10]进行了螺纹桩与直杆桩承载性能的对比研究,结果证明螺纹桩轴径比为 2~4.1 的螺旋桩端承载力比类似桩轴径的直杆桩高 2~12 倍;孟振等^[11]通过模型试验手段针对砂土地基中的螺杆桩承载特性展开了研究。

为探究花管微型桩与螺纹微型桩加固管道—滑坡体系下桩体变形特征、桩体两侧土压力的空间分布规律以及在两种不同微型桩加固保护下管道的变形特点及破坏模式,进一步分析对比两种不同微型桩的支护性能,本文以中贵天然气管道 K558+700 滑坡工程为依托,以千斤顶模拟滑坡水平推力^[12],开展 7 种不同水平加载压力工况下的室内大型推桩模型试验,并对桩顶位移、桩体应变、桩体两侧土压力、天然气管道应变以及管道两侧的土压力进行测试。进一步分析桩体弯矩以及桩体两侧峰值土压力空间分布规律,确定不同微型桩桩体变形特征,并结合管道变形破坏情况,探究两种微型桩在管道滑坡下的承载特性,总结试验成果,为我国管道地段滑坡灾害治理提供理论参考。

1 工程概况

中贵天然气管道 K558+700 滑坡治理工程位于甘肃省陇南市成县黄陈镇中湾村。2020 年 8 月 12—18 日中湾村附近连降暴雨,导致中贵天然气管道 K558+700 处斜坡发生明显滑动变形,管道滑坡区域现场见图 1。共产生 2 处滑坡及 1 处滑塌体。其中,中贵天然气管道位于 H1 滑坡中部,横坡敷设通过,管径 1 016 mm,管道走向 186°,滑坡区管道埋深 2.2~4.1 m。H1 滑坡纵长约 190 m,宽约 186 m,滑坡平面面积约 2.25×10⁴ m²,滑体平均厚度约 8.5 m,滑体总体积约 19.13×10⁴ m³,属于中型土质滑坡。该滑坡地表变形强烈,尤其是与管道斜交的乡村水泥道路已完全损毁,受滑坡推挤作用,威胁管道安全运营。



图 1 管道滑坡区域现场地貌图

Fig. 1 Site geomorphology map of pipeline landslide area

2 试验设计

2.1 相似设计

本次试验设计以中贵天然气管道 K558+700 处 H1 滑坡典型断面为工程原型,参考试验模型箱尺寸,确定试验模型的几何相似比尺为:

$$C_L = \frac{L_P}{L_M} = 30 \quad (1)$$

式中: C_L ——几何相似常数;

L_P ——原型尺寸;

L_M ——模型尺寸。

根据模型试验中各因素对现象影响的大小,抓住其起主要作用的因素,略去其次要因素的原则。以微型桩几何尺寸(L)、密度(ρ)、重力加速度(g)为主要控制参数,其相似比分别为 30:1、1:1、1:1,其余参数相似比可根据 Buckingham π 定理导出,如表 1 所示。

表 1 相似比设计

Table 1 Design of similarity constant

物理量	相似比	物理量	相似比
几何尺寸	$C_L=30$	变形模量	$C_E=30$
质量密度	$C_\rho=1$	摩擦角	$C_\phi=1$
重度	$C_\gamma=1$	黏聚力	$C_c=30$
应变	$C_\epsilon=1$	时间	$C_t=\sqrt{30}$
位移	$C_u=30$	重力加速度	$C_g=1$

2.2 相似材料及配比设计

制作与原型形状完全相同的螺纹桩、花管桩较为困难,因此对其桩体模型进行简化,采用阻氧双色 PP-R 管材通过注水泥浆模拟桩体,其中花管桩模型为在 PP-R 管材长度方向上每隔 8 cm 环绕管道螺旋打孔并采用压力灌注水泥浆模拟;螺纹桩模型为在 PP-R 管材料外螺旋缠绕塑料软管并灌注水泥浆进行模拟;承台采用硬质木板模拟;天然气管道采用直径 20 cm 的 PVC

管模拟。制作完成的模型桩见图 2。



图 2 桩体模型实物图

Fig. 2 Physical drawing of pile model

滑坡岩土体相似材料较为复杂, 在配比过程中不易满足推导得到的相似关系, 因此试验选取滑体、滑带及基岩材料时, 以最易影响原型滑坡岩土体稳定性的若干参数 (容重、黏聚力、内摩擦角、弹性模量等) 为基础, 参考其他学者已得到的部分研究成果^[13], 通过正交配比设计, 并经直剪试验和三轴试验检验参数取值的准确合理性, 确定使用红粉土、石英砂、水泥、石膏、水的混合物模拟 IV 级基岩, 具体质量配比为 70 : 30 : 5 : 3 : 10; 滑体采用红粉土、石英砂、水的混合物模拟, 具体质量配比为 70 : 20 : 10; 滑动带采用石英砂、土、滑石粉、水的混合物模拟, 具体质量配比为 27 : 52 : 35 : 15。得到的模型材料相关力学参数及其与原型材料的对比见表 2。

表 2 模型材料与原型材料相关物理性质参数
Table 2 Physical property parameters related to model material and prototype material

物理力学参数	重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	
滑体	原型	19.0	30.0	40.0	/
	模型	19.0	30.5	1.2	/
滑带	原型	18.5	25.0	30.0	/
	模型	18.0	25.0	1.0	/
基岩	原型	27.0	/	/	5 000
	模型	26.7	/	/	160

2.3 模型设计

根据相似设计, 试验使用的模型箱尺寸为 4 m×2 m×2 m(长×宽×高), 箱体两侧由钢板及有机玻璃组成, 箱体内填筑土体, 从上往下分三层: 滑体、滑带及基岩层。箱体内共布置 4 组微型桩群模型, 其中左侧 2 组为花管桩, 右侧 2 组为螺纹桩; 桩后滑体内埋置有天然气管道模型。箱体后侧设置有反力墙, 反力墙上安装有液压千斤顶, 千斤顶通过作用在承压板上从而给滑坡模型施加水平推力。模型整体示意图如图 3。

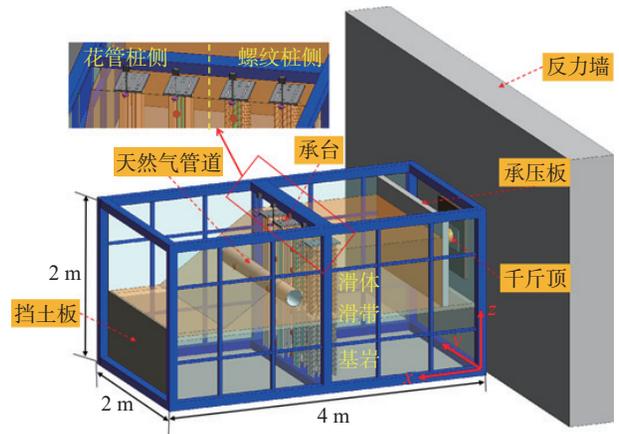


图 3 试验模型设计整体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test model design

微型桩群桩模型单桩布置形式为 5 行×3 列, 共布置 4 组微型群桩, 以模型箱中线为分界线分为左右两侧, 左侧 2 组为花管桩, 右侧 2 组为螺纹桩; 单桩桩体模型长 160 cm, 直径 2.5 cm。微型桩群桩埋深 160 cm, 从桩顶到桩底依次穿过滑体、滑带与基岩层, 其中滑体层厚 75 cm, 滑体坡面角 40°, 滑带厚度 5 cm, 基岩层厚 100 cm; 天然气管道布置在桩前滑体中, 距离桩体 20 cm, 埋深 40 cm。桩顶采用承台方式将群桩连接为整体, 单桩中心间距为 7 cm, 承台长 38 cm, 宽 24 cm, 厚 2 cm, 如图 4 所示。

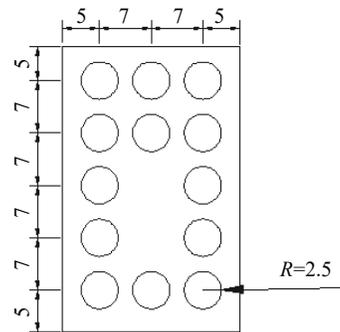


图 4 承台及单桩模型布置设计图(单位: cm)

Fig. 4 Cap and single pile model layout design drawing (unit: cm)

2.4 传感器布设位置及监测设备

试验数据采用 DH3816N 静态应变测试系统采集, 该系统具有 60 个采集通道, 可同时采集应变、土压力等测试数据。

2.4.1 百分表与应变片布设位置

选取模型箱体中间两组微型桩群桩作为研究对象, 在桩顶承台设置百分表测试桩顶位移, 并在群桩中选取不同位置的典型单桩作为应变测试桩粘贴应变片, 百分表设置位置及测试单桩的位置如图 5 所示。

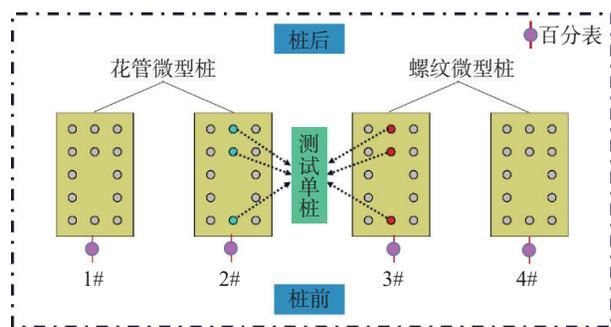


图 5 应变测试桩分布

Fig. 5 Strain test pile distribution

测试单桩为 2#花管桩及 3#螺纹桩群桩中的第二列单桩, 并对其进行编号, 从桩后到桩前依次为 1、2、3 号测试单桩, 每一测试单桩在桩体两侧沿桩体深度间隔一定距离粘贴应变片, 每根测试桩体上共粘贴 $2 \times 6 = 12$ 个应变片, 所有测试桩体共布设 $12 \times 6 = 72$ 个应变片, 具体布设位置如图 6 所示(以 1 号测试单桩为例, 其余测试桩相同)。

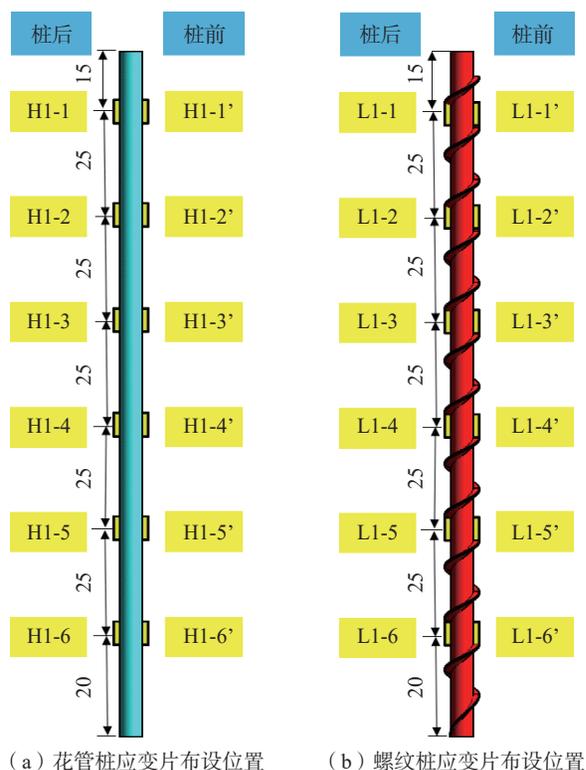


图 6 桩体应变片布设位置(单位: cm)

Fig. 6 Position of pile strain gauge (unit: cm)

天然气管道山侧与河侧对称粘贴 3 组应变片, 一组位于花管桩侧中部, 一组位于螺纹桩侧中部, 以监测在两种不同微型桩群桩支护作用下天然气管道的变形并作为对比, 进一步优化天然气管道滑坡的支护方案设

计; 另一组粘贴在天然气管道接口处, 以监测管道接口处的变形, 进一步研究在滑坡作用下天然气管道接口处的处理方法。天然气管道应变片布设位置见图 7。

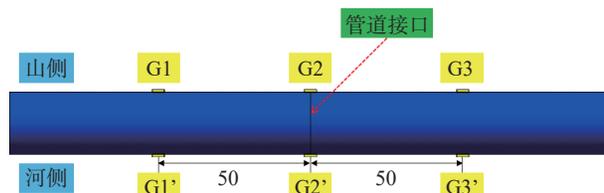


图 7 天然气管道应变片布设位置(单位: cm)

Fig. 7 Location of strain gauge for natural gas pipeline (unit: cm)

2.4.2 土压力布设位置

为了研究花管微型桩与螺纹微型桩支护下桩周土压力空间分布规律, 在 2#群桩与 3#群桩前后沿桩体深度间隔一定距离对称布置土压力盒, 布设位置如图 8, 共布设 $6 \times 2 = 24$ 个土压力盒, 以监测在滑坡水平推力作用下两种微型桩群桩前后不同深度位置土压力的变化, 以进一步分析两种不同桩体变形特征。

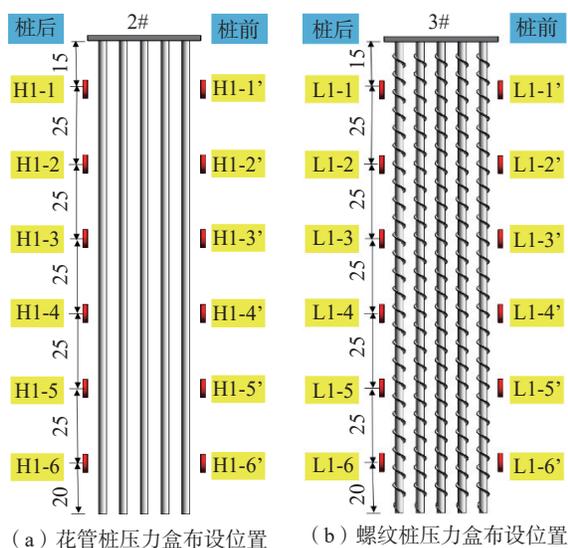


图 8 群桩前后土压力盒布设位置(单位: cm)

Fig. 8 Position of earth pressure cell before and after pile group (unit: cm)

在天然气管道前后两侧对称布设土压力盒, 布设位置分别位于花管桩支护侧、螺纹桩支护侧及管道接口附近, 共布设 $3 \times 2 = 6$ 个土压力盒, 以监测天然气管道附近土体的应力变化。具体布设位置如图 9。

2.5 加载工况设计

试验采用油压千斤顶施加水平荷载模拟滑坡推力, 加载方法为慢速维持加载法分级加载^[14], 初始加载压力为 1 MPa, 每级加载压力增加 0.5 MPa, 试验一共设置

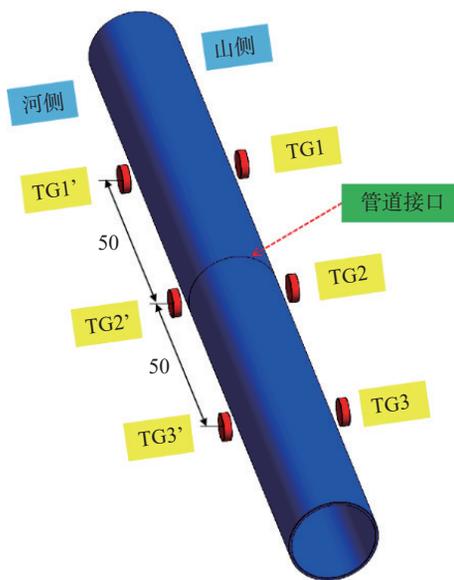


图9 天然气管道前后土压力盒布设位置(单位: cm)

Fig. 9 Location of earth pressure cell before and after natural gas pipeline (unit: cm)

7组加载工况。每级加载后观察桩顶百分表读数稳定后进行下级加载,具体加载工况见表3。

表3 各级加载工况 Q 值

Table 3 Q values of loading conditions at all levels

工况	加载压力/MPa	工况	加载压力/MPa
1	1.0	5	3.0
2	1.5	6	3.5
3	2.0	7	4.0
4	2.5	-	-

3 试验结果分析

3.1 桩顶水平位移

由图10荷载下桩顶水平位移数据分析可知,在各级水平荷载作用下,螺纹桩侧3#与4#群桩顶水平位移明显大于花管桩侧1#与2#群桩,在4 MPa加载压力作用下螺纹桩侧位移量为花管桩侧位移量的两倍之多,说明在相同水平推力荷载下花管桩抗滑承载力更强;在2 MPa以下水平荷载作用下桩顶位移变化微弱,2~3 MPa时桩顶位移开始有小幅增长,当荷载达到3 MPa时,桩顶位移变化量出现转折,增长幅度明显加大。根据桩顶位移容许值为30~50 mm,以1.67 mm(相当于原型的50 mm)为作为试验模型桩顶位移容许值,螺纹桩侧桩顶位移量在水平荷载为2.5 MPa达到容许值,花管桩侧桩顶位移量在水平荷载为3 MPa达到容许值,表明在本次试验条件下花管微型桩的加固效果优于螺纹微型桩。

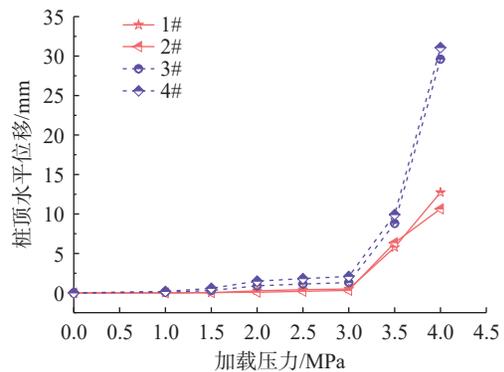


图10 桩顶水平位移随施加荷载的变化曲线

Fig. 10 The horizontal displacement of pile top varies with the applied load

3.2 微型桩群桩两侧土压力分析

3.2.1 桩体两侧土压力变化时程特性

根据图11可以看出,除个别测点外,在加载时段微型桩山侧土压力变化呈阶梯状上升,反映了随着加压荷载的增大,微型桩靠山侧土体应力在不断增加,并且有明显分级现象。

对比两侧不同桩体类型的土压力变化可知,花管桩侧不同埋深的土压力值普遍高于螺纹桩侧,花管桩侧在TH2测点达到最大值为46.09 kPa,相比螺纹侧在TL2测点达到的最大值20.54 kPa,花管桩侧土体最大应力高出螺纹桩侧两倍以上,结合螺纹桩桩顶最大位移与花管桩桩顶位移比值为2.4,说明花管桩侧土体受挤压程度大,分析为土拱效应^[15]导致,在花管微型桩支护作用下桩后土体应力得不到有效释放,进一步表明花管桩的抗弯刚度高于螺纹桩。

由图11不同测点深度的土压力变化曲线可以看出,螺纹微型桩与花管微型桩的中上部位置土压力值最大,桩顶次之,桩底一般较小。

由图12,河侧螺纹桩测点4因土压力盒出现故障导致采集数据失真,故不作为分析对象。由图12可知,桩体河侧土压力变化趋势与山侧几乎保持一致,在加载阶段都有明显的上升趋势且各级加载土压力有明显的上升幅度加大的现象,卸载阶段开始下降并最终稳定在零值附近。

两侧桩体都在测点3(滑带附近位置)的最大级加载阶段达到峰值土压力,且螺纹桩侧峰值土压力(38.81 kPa)大于花管桩侧峰值土压力(32.57 kPa),高出比值约120%,对比山侧峰值土压力,花管桩河侧峰值土压力比山侧减少41%,螺纹桩河侧峰值土压力增加89%,由于抗滑桩承担并抵消了一部分滑坡推力,桩体河侧的土压力明显小于山侧,但花管桩两侧土压力差值

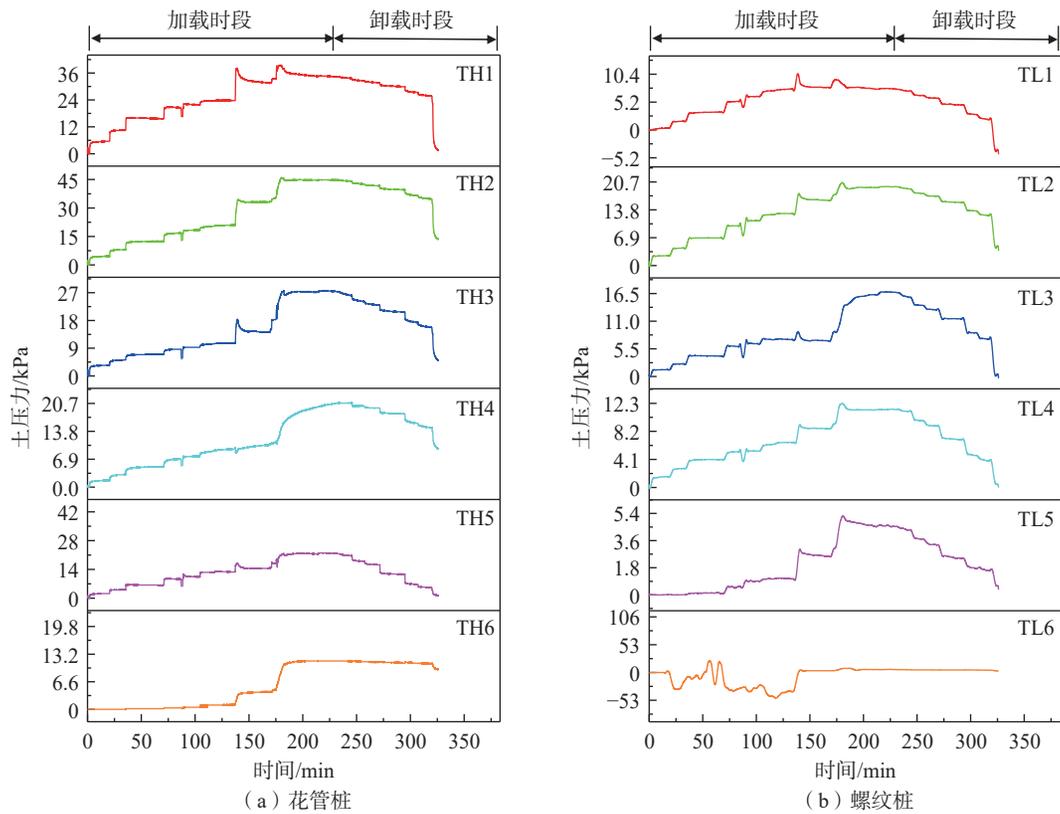


图 11 山侧花管桩和螺纹桩土压力时程曲线对比

Fig. 11 Comparison of soil pressure time-history curves of flowered pipe pile and threaded pile on the mountainside

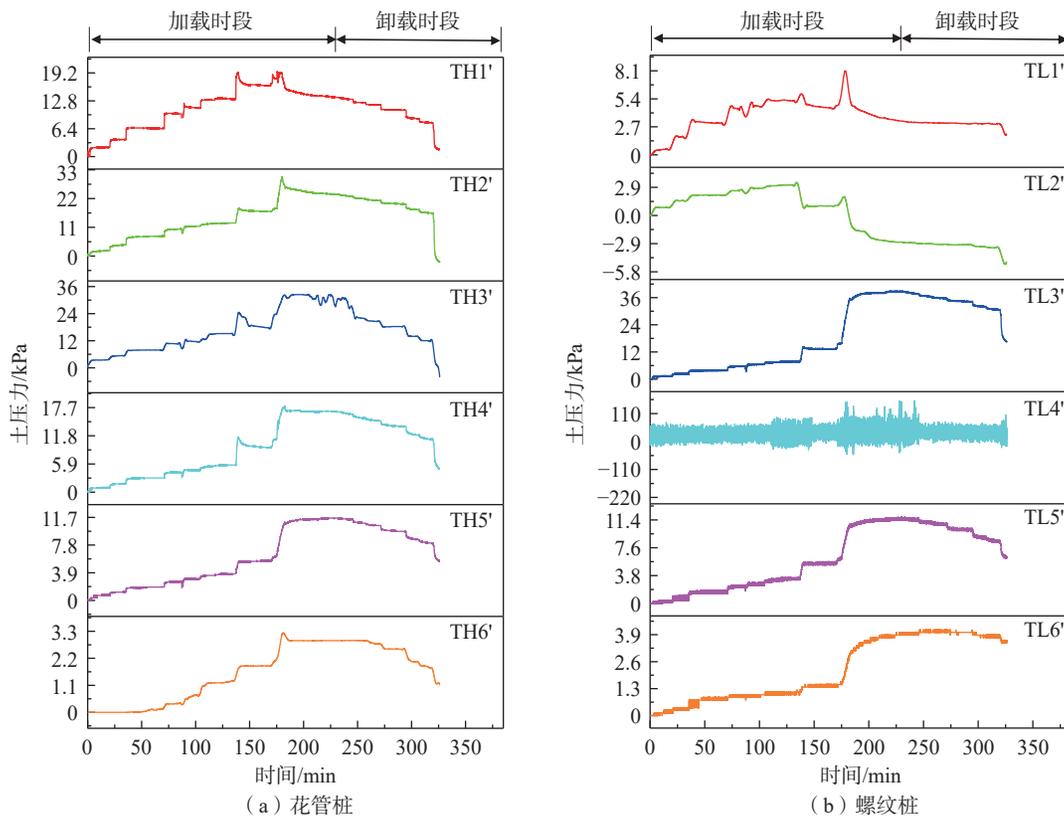


图 12 河侧花管桩和螺纹桩土压力时程曲线对比

Fig. 12 Comparison of earth pressure time-history curves of flowered pipe pile and threaded pile beside the river

明显大于螺纹桩两侧土压力差值, 表明花管桩在承担滑坡推力作用方面发挥了良好的效果。

3.2.2 桩体两侧峰值土压力分析

提取桩体两侧各测点在各级加压荷载下土压力的峰值土压力进行单独分析, 如图 13 绘制沿桩身深度不

同位置随荷载改变的峰值土压力变化曲线分布图, 峰值土压力基本随加压荷载的增大而增大, 花管桩侧在 4 MPa 荷载下 0.4 m 桩深位置达到最大值 46.09 kPa, 螺纹桩侧在 4 MPa 荷载下 0.4 m 桩深位置达到最大值 20.54 kPa。

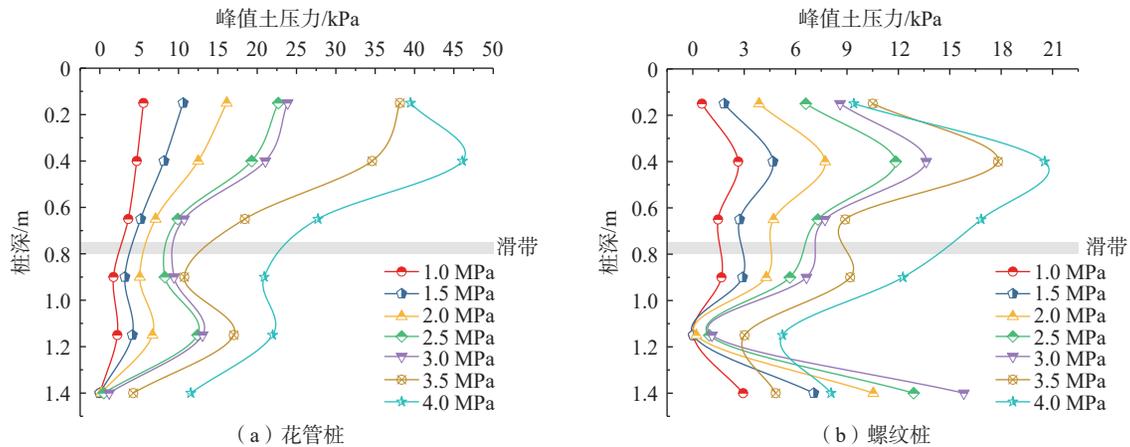


图 13 山侧花管桩和螺纹桩峰值土压力分布曲线对比

Fig. 13 Comparison of peak earth pressure distribution curves of splined pipe pile and threaded pile on the mountainside

花管桩侧峰值土压力沿桩深分布图大体呈“S”曲线形, 且在各级荷载下分布规律保持一致, 桩体中上部(位于滑带与桩顶中部)土压力值最大, 在滑带附近土压力值有所减小, 又在桩体中下部(位于滑带与桩底中部)有小幅增大, 往桩底位置开始减小。螺纹桩侧峰值土压力沿桩深分布图大体呈双“S”曲线形, 同样在桩体中上部位置土压力值最大, 滑带附近减小, 桩体中下部土压力值最小, 桩底土压力值开始增大。总的来说, 花管桩侧土压力分布规律为桩中>桩顶>桩底, 螺纹桩侧土压力分布规律为桩中>桩底>桩顶。

滑面以上的土压力由推力荷载的传递引起, 滑面以下的土压力主要由微型桩群的变形引起^[16]。根据上述土压力分布规律, 由此说明, 花管桩在滑面以上桩中上部位置所受的推力荷载最大, 滑面以下桩体中下部位置变形最大; 螺纹桩在滑面以上桩中上部位置所受的推力荷载最大, 滑面以下桩底位置变形最大。

根据图 14 可知, 花管桩侧在 4 MPa 荷载下 0.65 m 桩深位置达到最大值 32.57 kPa, 螺纹桩侧在 4 MPa 荷载下 0.65 m 桩深位置达到最大值 38.81 kPa。

花管桩河侧峰值土压力分布形式与山侧分布形式

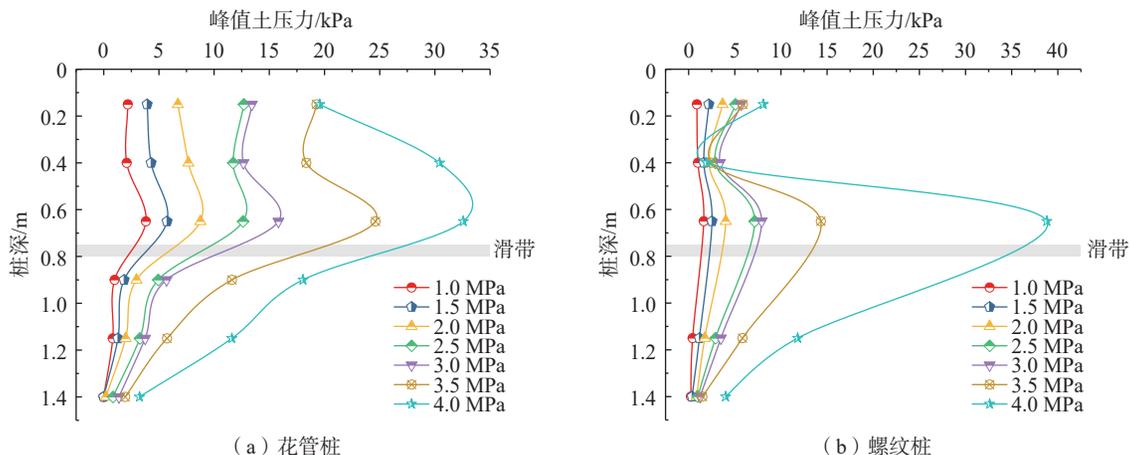


图 14 河侧花管桩和螺纹桩峰值土压力分布曲线对比

Fig. 14 Comparison of peak earth pressure distribution curves of flowered pipe pile and threaded pile beside the river

大体呈现相似,土压力大小分布规律仍为桩中>桩顶>桩底,但土压力最大值出现位置下移到滑面附近,说明在花管微型桩支护作用下推力荷载在土体的分布形式发生了改变,由于花管桩刚度大于桩周土体,土体应力传递到桩体上产生应力集中,桩后土体应力重分布,最大水平应力作用点下移。螺纹桩测河侧峰值土压力相比山侧分布形式产生了较大差异,土压力大小分布规律变为桩中>桩顶>桩底,桩底的土压力相比山侧有很大幅度减小。与花管桩侧类似,由于桩前土体应力重分布,土压力最大值出现位置下移到滑面附近且比山侧土压力最大值高出 89%,说明螺纹微型桩并没有有效承担推力荷载,变形较大,在推力荷载作用桩前土体应力仍较大。

3.3 桩身弯矩分析

选取花管微型桩 1 号测试单桩与螺纹微型桩 1 号测试单桩作为研究对象,根据桩身两侧应变数据可由以下公式计算测点弯矩值^[17]:

$$M = \frac{EI(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{d} \quad (2)$$

式中: M ——测试截面的弯矩/(kN·m);
 E ——桩身材料的弹性模量/MPa;
 I ——测试界面的惯性矩/m⁴;
 ε_1 ——微型桩后的桩身应变;
 ε_2 ——微型桩前的桩身应变;
 d ——桩身直径/m。

图 15—16 为两种桩体各截面测点在分级加压荷载下的弯矩分布图,图中弯矩正值表示桩后侧受拉。

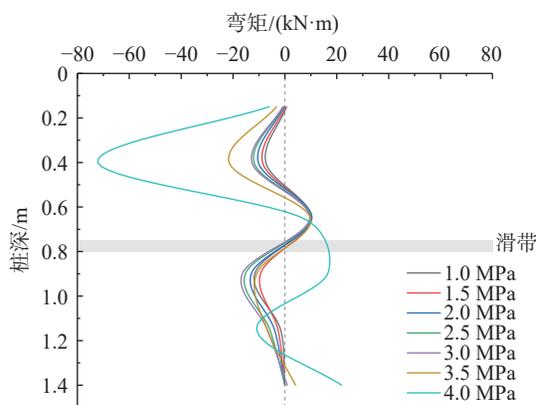


图 15 花管桩实测桩身弯矩分布图

Fig. 15 Measured bending moment distribution diagram of flowered pipe pile

从图 15 可以看出,在 1~3.5 MPa 加压荷载下,弯矩分布特征几乎保持一致,花管桩桩身弯矩沿深度方向

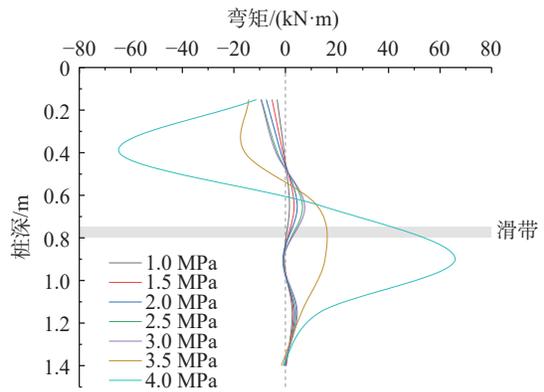


图 16 螺纹桩实测桩身弯矩分布图

Fig. 16 Measured bending moment distribution diagram of threaded pile

呈“M”形分布,桩顶与桩底弯矩值较小,桩身中上部与中下部出现较大的负弯矩,桩身离模拟滑面以上 5 cm 位置处产生最大正弯矩;在 4 MPa 加载压力作用下,弯矩分布曲线有所偏移,桩身中上部位置负弯矩极具增大,最大正弯矩位置下移到桩中位置(模拟滑面处)且桩身正弯矩长度范围增大到 0.5 m,滑面以下负弯矩最大值减小,且在桩底出现正弯矩。说明在 1~3.5 MPa 推力荷载下,花管桩桩体变形特征一致,桩后桩身中上部与中下部位置受压变形,桩后桩身离模拟滑面 0~10 cm 段受拉变形;在 4 MPa 推力荷载下,桩身弯曲变形加剧,在桩深 0.4 m 处出现最大负弯矩 -71.96 kN·m,在桩深 0.8 m 处(模拟滑面位置)出现最大正弯矩 16.47 kN·m。花管桩设计时对桩身变形较大处可开展进一步的优化工作。

由图 16 可知,螺纹桩桩身弯矩分布沿深度方向呈“S”形,桩体正负弯矩位置在模拟滑面附近大致呈旋转对称分布,滑面以上大部分区段为负弯矩,滑面以下为正弯矩;螺纹桩在桩深 0.4 处出现最大负弯矩 -64.44 kN·m,在桩深 0.9 m 处(模拟滑面以下 10 cm)出现最大正弯矩 65.85 kN·m,相比花管桩,最大负弯矩相差不大,最大正弯矩高出近 4 倍,表明在相同推力荷载工况下,螺纹微型桩变形程度大于花管微型桩。

3.4 管道受力变形特征分析

3.4.1 管道两侧土压力变化规律及分布特性

为了研究天然气管道在两种不同微型桩支护作用下的变形特征,通过埋设土压力盒监测管道两侧土体应力变化,图 17 为管道山侧与河侧各测点的土压力变化时程曲线。其中 TG1/TG1'测点位于花管桩支护侧, TG3/TG3'测点位于螺纹桩支护侧, TG2/TG2'测点位于管道接口位置两侧。

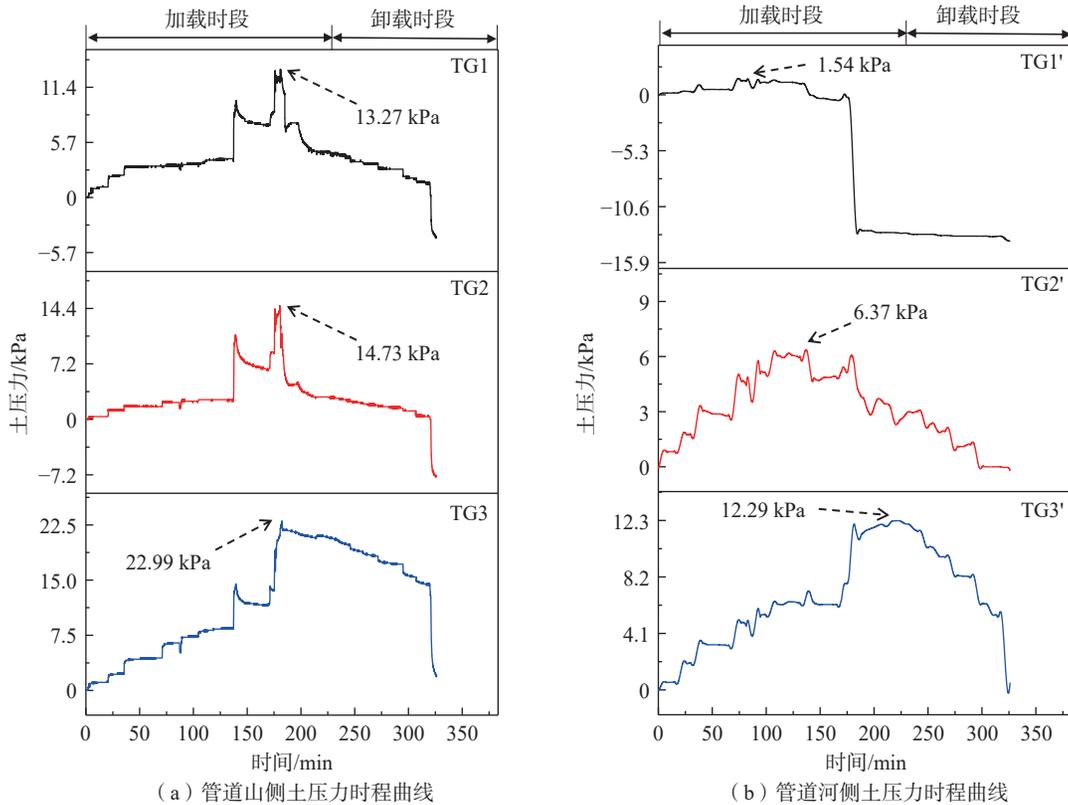


图 17 管道山侧与河侧土压力时程曲线对比

Fig. 17 Comparison of soil pressure time history curve between mountain side and river side of pipeline

根据图 17 可以看出,管道山侧与河侧各测点土压力在加载阶段都有明显的随时间增大的趋势。山侧各测点变化趋势大致相同,在初期加载土压力值增长表现平稳,而在后期加载阶段土压力出现跳跃式增长,并在最后加载阶段达到峰值,位于螺纹桩支护侧的 TG3 测点峰值土压力达 22.99 kPa,为花管桩支护侧的 1.73 倍;结合图 18 各级荷载下管道山侧峰值土压力分布曲线可知,管道山侧峰值土压力随荷载的增大而增大,并且螺

纹桩支护侧峰值土压力整体大于花管桩支护侧及管中接口位置。说明花管桩在推力荷载下承载力表现优于螺纹桩,减小了传递到管道的滑坡推力,而螺纹桩在较大推力荷载下由于抗弯性能不足,变形严重,破坏后不能有效承担并抵消滑坡推力,传递到桩前管道的应力较大,从而导致管道易产生变形破坏。

由图 17,管道河侧土压力变化趋势与山侧存在较大差异,在加载阶段整体呈波动性增长,测点最大峰值土压力在螺纹桩支护侧为 12.29 kPa,最小峰值土压力在花管桩支护侧为 1.54 kPa,比值 7.98 : 1。结合图 19 管道河侧峰值土压力分布曲线,在分级推力荷载作用下,峰值土压力规律表现为:花管桩支护侧<管中接口位置<螺纹桩支护侧。

3.4.2 管道弯矩分析

由图 20 分级荷载管道弯矩分布图可以看出,在较小推力荷载作用下(1~3 MPa),管道接口附近弯矩值整体较小,花管桩支护侧呈现负弯矩,螺纹桩支护侧呈现正弯矩,绝对值大小相差不大,说明在较小推力荷载下,管道变形程度较小;在较大推力荷载作用下(3.5~4 MPa),管道接口处弯矩急剧增大,最大值达-317.75 kN·m,说明在较大推力荷载下管道接口位置变形严重甚至破坏,

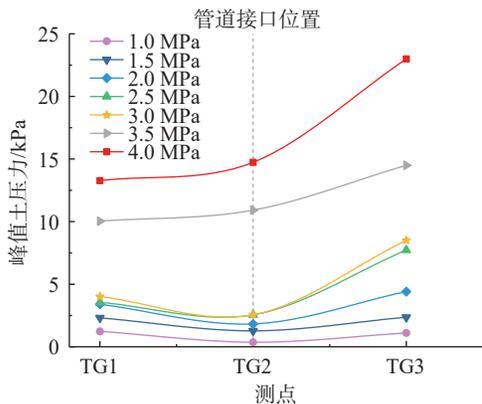


图 18 管道山侧峰值土压力分布图

Fig. 18 Distribution diagram of peak earth pressure on the mountain side of pipeline

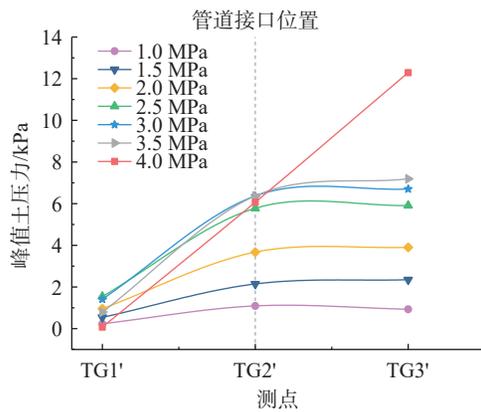


图 19 管道河侧峰值土压力分布图

Fig. 19 Distribution diagram of peak earth pressure at river side of pipeline

在设计滑坡区管道工程时应注意管道接口位置的加固；另一方面，对比花管桩支护侧与螺纹桩支护侧管道弯矩可知，弯矩分布曲线明显向螺纹桩侧偏移，并整体大于花管桩支护侧，说明在本试验条件下花管微型桩支护作用下天然气管道的变形程度低于螺纹微型桩支护，在滑坡推力作用下，花管微型桩对管道的保护效益更突出，花管桩更适用于作为管道滑坡区域的支挡结构。

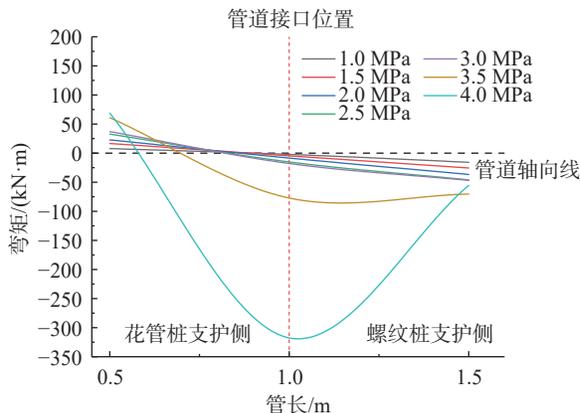


图 20 管道实测桩身弯矩分布图

Fig. 20 Measured pile bending moment distribution diagram of pipeline

4 结论

(1)花管微型桩山侧及河侧峰值土压力沿桩深分布形式基本相似，大体呈“S”曲线形，桩后土体土拱效应明显，且在各级荷载下分布形式大致保持一致，总体来说花管桩侧土压力分布规律为桩中>桩顶>桩底，滑带附近的桩体周围土压力较大，在抗滑桩设计工作中应重点考虑优化。

(2)螺纹桩山侧峰值土压力沿桩深分布图大体呈双

“S”曲线形，河侧峰值土压力相比山侧分布形式产生了较大差异，桩底的土压力相比山侧减小很大幅度；随外部荷载的增加桩周土压力增加幅度较大，表明螺纹微型桩在横向承载性能方面有所欠缺。

(3)花管桩桩身弯矩沿深度方向呈“M”形分布，桩身离模拟滑面以上 5 cm 位置处产生最大正弯矩；螺纹桩桩身弯矩分布沿深度方向呈“S”形，桩体正负弯矩位置在模拟滑面附近大致呈旋转对称分布，滑面以上大部分区段为负弯矩，滑面以下为正弯矩；在相同推力荷载工况下，螺纹微型桩变形程度大于花管微型桩。

(4)在滑坡作用下花管微型桩可以有效减小传递到管道的坡体应力，在一定程度上预防管道受力破坏；而螺纹桩在较大推力荷载下抗弯性能不足，变形严重，破坏后不能有效承担滑坡推力，传递到桩前管道的应力较大，从而导致管道变形程度更为强烈；在本试验条件下，花管微型桩对管道的保护效益突出，更适用于作为管道-滑坡区域的支挡结构。

参考文献 (References):

- [1] 高鹏, 高振宇, 赵赏鑫, 等. 2020年中国油气管道建设新进展 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(3): 53-60. [GAO Peng, GAO Zhenyu, ZHAO Shangxin, et al. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2020 [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(3): 53-60. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李智毅, 颜宇森, 雷海英. 西气东输工程建设用地区的地质灾害 [J]. 地质力学学报, 2004, 10(3): 253-259. [LI Zhiyi, YAN Yusen, LEI Haiying. Geological hazards in the area for the construction of pipelines in the project of diversion of natural gas from the western to the eastern region [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(3): 253-259. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 潘锋. 注浆钢花管微型桩在路基滑坡治理中的应用 [J]. 工程与建设, 2017, 31(4): 527-529. [PAN Feng. Application of grouted steel flower pipe micro-pile in subgrade landslide treatment [J]. Engineering and Construction, 2017, 31(4): 527-529. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈强, 陈炜韬, 刘世东, 等. 注浆钢管微型桩加固滑坡的试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 758-763. [CHEN Qiang, CHEN Weitao, LIU Shidong, et al. Model test on application of grouting steel-tube micropiles to landslide reinforcement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5): 758-763. (in Chinese with English abstract)]
- [5] WANG Kaiyang, SHANG Yanjun. An experimental study of horizontal bearing capacity of vertical steel floral tube micropiles with double grouting [J]. Advances in Civil Engineering,

- 2018: 1 - 11.
- [6] 赵建兵. 螺杆桩在铁路路基中的运用 [J] . 工程建设标准化, 2015(2): 105. [ZHAO Jianbing. Application of screw pile in railway subgrade [J] . Standardization of Engineering Construction, 2015(2): 105. (in Chinese)]
- [7] KRASIŃSKI A. Numerical simulation of screw displacement pile interaction with non-cohesive soil [J] . *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, 14(1): 122 - 133.
- [8] 方崇, 张信贵, 彭桂皎. 对新型螺杆灌注桩的受力特征与破坏性状的探讨 [J] . 岩土工程技术, 2006, 20(6): 316 - 319. [FANG Chong, ZHANG Xingui, PENG Guijiao. Discussion on the bearing force characteristic and the failure behavior of a new kind half-screwed filling pile [J] . *Geotechnical Engineering Technique*, 2006, 20(6): 316 - 319. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 叶阳升, 蔡德钧, 陈晓斌, 等. 高速铁路螺杆桩复合地基桩侧摩阻力原位试验研究 [J] . 中国铁道科学, 2020, 41(2): 1 - 10. [YE Yangsheng, CAI Degou, CHEN Xiaobin, et al. In-situ test study on lateral friction of screw pile composite foundation of high speed railway [J] . *China Railway Science*, 2020, 41(2): 1 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [10] MALIK A A, KUWANO J, TACHIBANA S, et al. End bearing capacity comparison of screw pile with straight pipe pile under similar ground conditions [J] . *Acta Geotechnica*, 2017, 12(2): 415 - 428.
- [11] 孟振, 陈锦剑, 王建华, 等. 砂土中螺纹桩承载特性的模型试验研究 [J] . 岩土力学, 2012, 33(增刊1): 141 - 145. [MENG Zhen, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Sup 1): 141 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩后侧推力分布物理模型试验 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 79 - 87. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Physical model test on landslide thrust distribution on double-row stabilizing piles [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 79 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 等. 抗滑桩应变特征与内力非线性研究 [J] . 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 114 - 124. [REN Qingyang, ZHAO Mengyuan, XIE Zhongwei, et al. A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 114 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 中华人民共和国建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2003 [S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2003 [S] . Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [15] 董捷. 悬臂桩三维土拱效应及嵌固段地基反力研究 [D] . 重庆: 重庆大学, 2009. [DONG Jie. Study on three-dimensional soil arching effect of cantilever piles and ground resisting force acted on its build-in zone [D] . Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民, 等. 微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究 [J] . 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1564 - 1570. [SUN Shuwei, ZHU Benzhen, MA Huimin, et al. Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1564 - 1570. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杜衍庆, 白明洲, 邱树茂, 等. 集约式微型桩群水平承载性能试验研究 [J] . 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 821 - 830. [DU Yanqing, BAI Mingzhou, QIU Shumao, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of concentrated micropiles [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 821 - 830. (in Chinese with English abstract)]