



不同断层对埋地管道受力性能的影响

曾希¹ 雷震¹ 靳方倩^{1,2} 杜国锋¹

1. 长江大学城市建设学院·湖北省油气储运工程技术研究中心; 2. 荆州市政府投资工程建设管理中心

摘要: 为了研究埋地管道在不同形式断层作用下的受力性能,自制了土箱试验装置,借此装置模拟断层的错动,测量得到埋地管道在断层错动作用下的应变分布和整体变形特点,分析了管道轴向应变和竖向位移随断层错动量变化的特征,探究了断层错动量、管道埋深、管径、断层倾角等参数对埋地管道力学性能的影响规律,采用 FEM 有限元方法进行数值模拟分析,并与试验结果进行对比。结果表明:在该试验的参数范围内,随着断层错动量和管道埋深的增加,管道轴向应变增大;管径较大的管道,抵抗变形的能力较强;当断层倾角小于 90° 时,管道轴向峰值拉应变大于峰值压应变,此时管道以受拉为主;当断层倾角大于 90° 时,管道轴向峰值拉应变小于峰值压应变,此时管道以受压为主;对于走滑断层,管道轴向应变近似呈中心对称分布,两侧变形趋于一致。逆断层对于管道应变的影响最大,正断层其次,走滑断层对于管道应变的影响最小。(图 17,表 3,参 21)

关键词: 埋地管道; 断层作用; 应变分布; 整体变形

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.010

Influence of different faults on stress performance of buried pipelines

ZENG Xi¹, LEI Zhen¹, JIN Fangqian^{1,2}, DU Guofeng¹

1. School of Urban Construction, Yangtze University//Hubei Provincial Oil and Gas Storage and Transportation Engineering Technology Research Center; 2. Jingzhou Government Investment Engineering Construction Management Center

Abstract: In order to study the stress performance of buried pipelines under different types of faulting, the soil-box test device was made to simulate the fault movement. Then, the strain distribution and overall deformation characteristics of buried pipelines under fault movement were obtained, the variation characteristics of axial strain and vertical displacement of pipelines with fault movement were analyzed, the influence rules of fault movement, pipe buried depth, pipe diameter and fault dip, etc. on the stress performance of buried pipelines were explored. The FEM method was used to conduct numerical simulation and its results were compared with test results. The results show that, within the parameter range of the test, the axial strain of the pipeline increases with the increase of fault movement and buried depth. Larger diameter pipelines will have stronger deformation resistance capability. When the fault dip is less than 90° , the axial peak tensile strain of the pipeline will be larger than the peak compressive strain, indicating that the tensile stress of the pipeline is dominant in this case. Similarly, when the fault dip exceeds 90° , the axial peak tensile strain of the pipeline will be smaller than the peak compressive strain, indicating a dominant compressive strain in that case. For strike-slip faults, the axial strain of the pipeline is approximately distributed in central symmetry, and the deformation on both sides tends to be consistent. Strike-slip fault has a minimal influence on the pipeline strain, followed by normal fault, and reverse fault has the greatest influence on the pipeline strain. (17 Figures, 3 Tables, 21 References)

Key words: buried pipelines, faulting, strain distribution, overall deformation

埋地管道在地震断裂带错动下的反应一直备受关注。虽然断层错动的影响范围有限,但其可以在很小的范围内产生较大的相对位移,使得管道随周围土体一块运动,从而发生拉伸破坏或屈曲破坏^[1],因此,对于服役中管道性能的监测极为重要^[2-3]。

刘啸奔等^[4]从解析分析、数值模拟、试验研究3个方面论述了断层作用下埋地管道应变分析的相关研究进展,发现壳-梁模型^[5]和等效弹簧边界^[6]的有限元模型能较好地模拟管道的应变反应。冯启民等^[7]开展了跨断层埋地管道的抗震试验研究,分别进行了静力试验与动力试验研究,研究表明管道在动断层位移下的反应和静力试验中的反应无明显差异。白文彪^[8]通过土箱试验研究了不同壁厚、管径管道分别在断层错动量、地震力及其组合作用下的应变、位移等,得出断层错动量越大,管道的活动性越强,变形越大,破坏也越严重;选择厚度及管径较大的管道能减轻断层错动对管道的破坏。张旭^[9]开展了全尺寸的土壤沉降对管道的影响试验,发现沉降不均匀的位置为管道易损管段。张志超等^[10-11]开展了走滑断层作用下埋地管道的振动台试验,发现管土系统本身的动力效应影响较小。汤爱平等^[12]利用离心机试验技术,模拟了埋地管道在逆断层大位移下的反应特性。李立云等^[13]利用连续体模型箱振动台,分析了一致和非一致地震作用下有无埋地管道时的场地地震响应规律。王乐等^[14-16]利用自制的土箱模型,进行了走滑断层作用下和土体沉降下的一系列实验,得到多种工况下埋地管道的力学性能。Sim等^[17]开展了基于振动台的管道穿越走滑断层与正断层的试验研究。Rofooei等^[18]使用土箱和液压驱动装置开展了用于模拟逆断层的全尺寸试验,分析了钢管与高密度聚乙烯(HDPE)管道在逆断层作用下的变形与屈曲行为。Xu等^[19]利用壳-梁耦合模型分析了埋地管道在断层作用下的屈曲行为,得到断层倾角是影响管道性能极为重要的一个参数。曾希等^[20-21]利用有限元软件ABAQUS分析了断层错动对埋地管道的影响,结果表明选取大管径和厚壁管道有利于提高管道的受力性能;管道浅埋和选择均一的软质回填土能够避免土层的不均匀变形。

以上研究表明,断层作用对管土系统本身的动力效应影响较小,因此可以利用静力试验探讨管道在断层作用下的力学性能。在以往的模型试验中,较少考虑管道端部小变形段的轴向拉伸,且断层类

型和影响参数设置较为单一。在此利用自制土箱试验装置,通过两端弹簧模拟管道小变形段轴向拉伸,通过转动挡土侧板模拟不同类型断层,充分考虑断层错动量、埋深、管径、断层倾角等影响参数,比较分析12根埋地管道在不同类型断层错动下的应变和变形分布规律。

1 断层类型

根据断层错动方向的不同,可将断层分为正断层、逆断层及走滑断层3种类型,将断层面与管道所在水平面在垂直面内的夹角称为断层倾角。当断层竖向作用于管道,且断层倾角不大于 90° 时,此断层称为正断层;当断层倾角大于 90° 时,此断层称为逆断层;当断层水平作用于管道时,此断层称为走滑断层(图1)。断层作用于管道时,断层附近的管段易发生

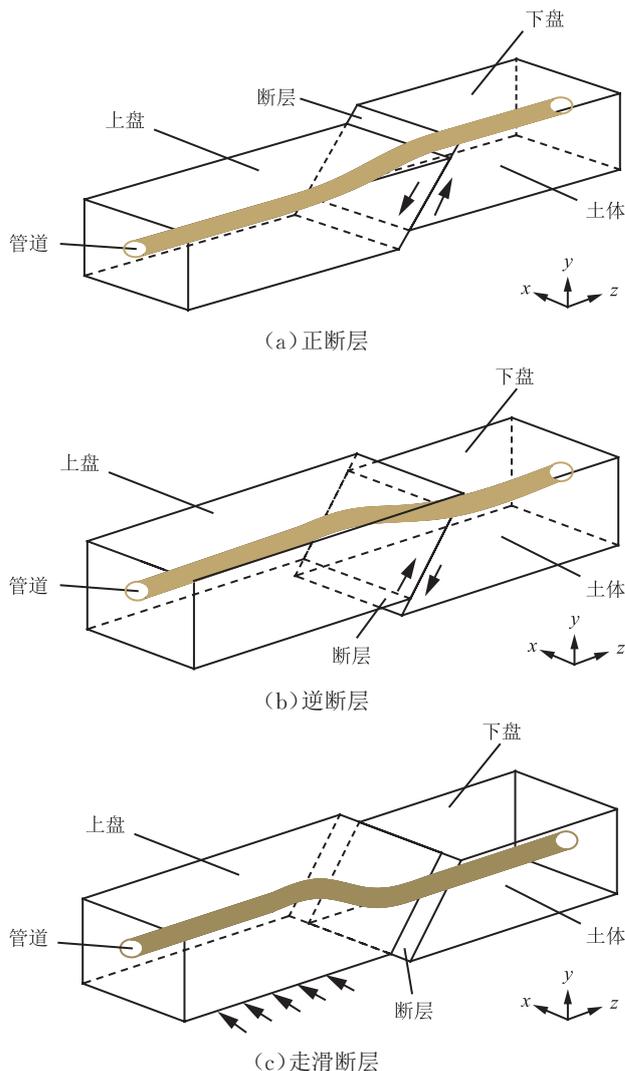


图1 管道穿越不同类型断层的示意图

大变形,此区域内的管道称为大变形段,而远离断层的管段因变形较小,且一般仅受轴向拉伸作用,此区域内的管道称为小变形段。

2 试验概况

2.1 试件设计

试验设计了12根(分为4个组别)埋地管道试件(表1),管道壁厚为2 mm,外径分别为32 mm、40 mm,长度均为3 m,管道端部焊接螺帽,将管道端部螺帽与弹簧装置相连,并固定在土箱上(图2),弹簧的弹性系数为4 729 N/m。在实际工程中,站间埋地管道长达数千千米,在实验室进行管道力学性能试验时,通常仅截取一小段管道,设计此弹簧装置的目的在于真实地模拟管道远离断层处的小变形段,使其能在轴向上有一定伸缩。由于断层的作用方向、断层与管道的相对位置对管道的受力性能影响较大,故本试验根据断层形式、断层倾角不同,设定以下4种情况:①管道与断层夹角为75°的正断层;②管道与断层垂直的正断层;③管道与断层夹角为105°的逆断层;④管道与断层垂直的走滑断层(图3)。

表1 试验所用管道试件主要参数

组别	断层类型	场地土类型	断层倾角/(°)	管径/mm	管道埋深/m
1	正断层	黏土	75	32	0.3
				32	0.6
				40	0.3
2	正断层	黏土	90	32	0.3
				32	0.6
				40	0.3
3	逆断层	黏土	105	32	0.3
				32	0.6
				40	0.3
4	走滑断层	黏土	90	32	0.3
				32	0.6
				40	0.3



(a) 试件端部

(b) 弹簧装置

图2 管道试件与弹簧装置的实物图

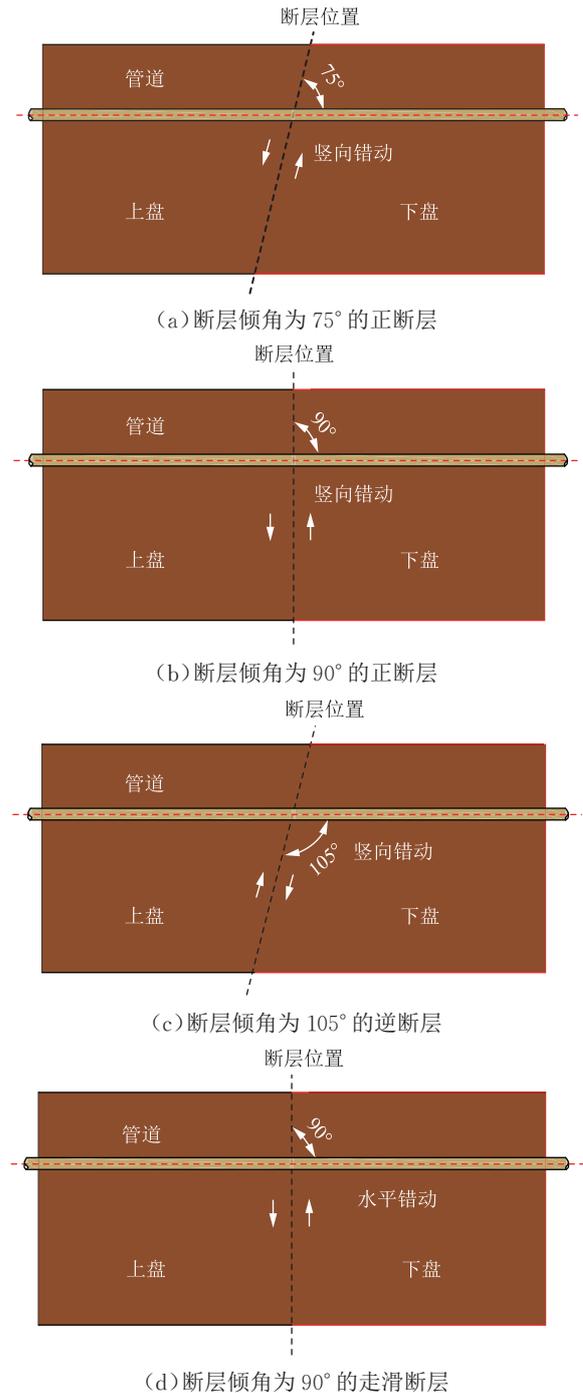


图3 不同类型断层的剖面示意图

2.2 材料特性

埋地管道为镀锌钢管,钢管的力学性能参数如下(表2)。填土采用黏土,由三轴压缩试验(不固结不排水)测得其物理性能参数(表3)。

表2 试验用埋地管道的力学性能参数

管径/mm	壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
32	2	292.8	392.3	2.03×10^5	0.3
40	2	290.7	386.1	2.02×10^5	0.3

表 3 试验所用黏土性能参数

内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比
7.8	35.5	1.88	0.35

2.3 试验加载与量测

试验在长江大学自制的土箱模型装置上完成,土箱分为固定盘箱体和错动盘箱体,箱体尺寸为 3.0 m×1.0 m×1.1 m(图 4)。

试验利用千斤顶对土箱进行竖向或水平位移的静力加载,加载位移从 0~140 mm。模拟正、逆断层时,固定盘固定在基座上,利用竖向千斤顶对错动盘施加荷载使之产生竖向位移,通过门式钢架限制其水平位移。模拟走滑断层时,利用侧板中部的水平千斤顶对错动盘施加荷载使之产生水平位移。土箱中部的挡土侧板可绕底部螺杆转动,用于模拟不同的断层倾角。

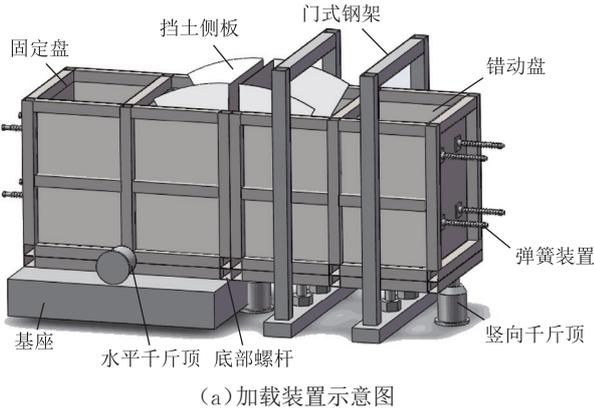


图 4 土箱模型装置结构图

由于试验主要研究管道的大变形段,因此断层附近的应变片布置较为密集,沿着管道轴向对称粘贴 18 个应变片(图 5,其中,管道上侧应变片编号为 1-1~9-1,管道下侧应变片编号为 1-2~9-2),以测得管

道应变分布。管道应变采用 DH3816 静态应变仪采集。利用 AB 胶粘接刚性杆,刚性杆杆端伸出土层表面,通过测量刚性杆端的竖向变形来间接测量管道的变形。

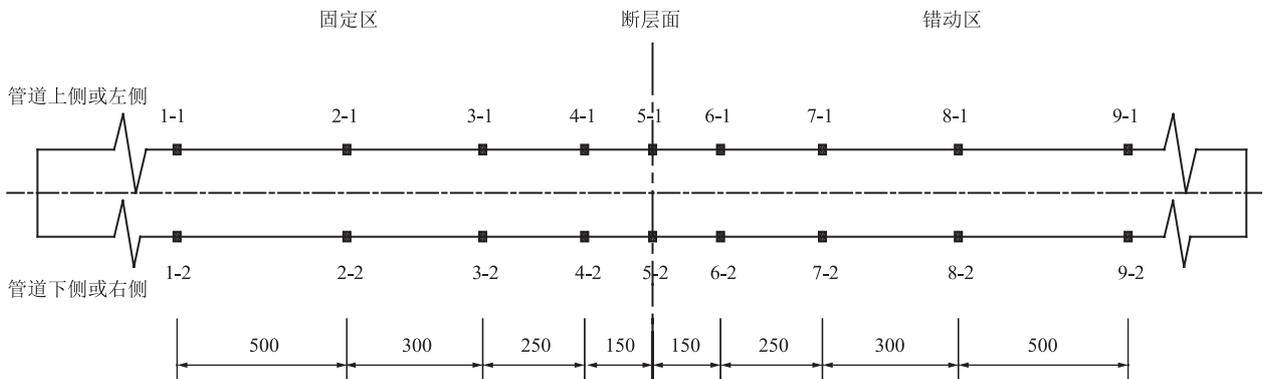


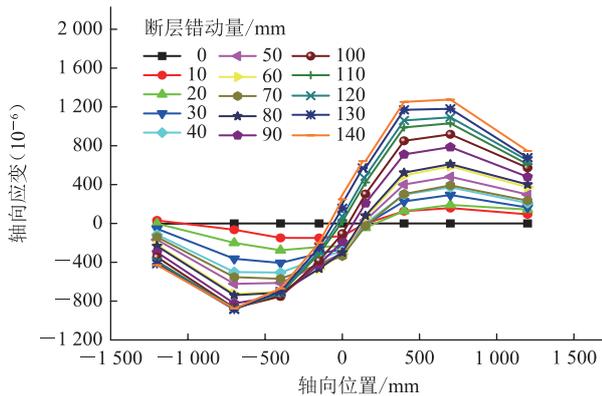
图 5 管道应变片间距及布置示意图 (mm)

3 试验结果

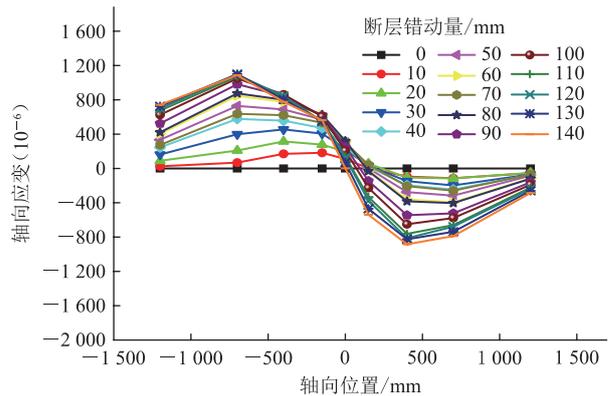
3.1 断层倾角为 75° 的正断层

根据组别 1 中管道轴向应变沿管轴的分布(图 6)可见,随着断层错动量的增大,不同测点的轴向应变也增加。应变最大值的位置往往不是在断层处,而是在断层两侧附近,离断层较远测点处管段的轴向应变则相对较小。对比图 6a~图 6d 可见,断层错动量一定时,大口径的管道轴向应变反应相对较小。

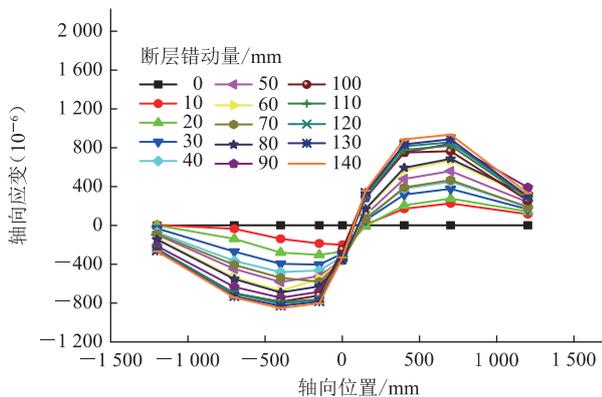
这其一是因为增加管道的外径,相当于增加了管道横截面的惯性矩,管道刚度变得更大;其二,管道外径增加导致土体对管道的约束作用增强(当管道单元长度一定时,管道外径与土弹簧的刚度呈正比)。当断层错动量从 0 逐渐增至 140 mm 时,随着土体裂缝的逐渐扩展,管道外径增加导致管道刚度变大的影响始终大于土体对管道约束作用增强的影响,从而导致管道的应变反应随着管道外径的增加而减小。因此,在实际工程中铺设埋地管道时,应尽量选择管



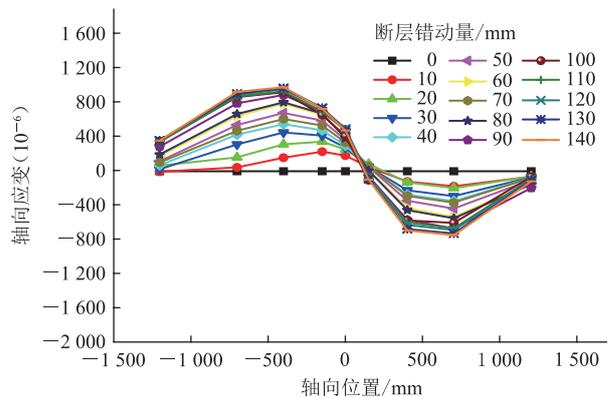
(a) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道上侧



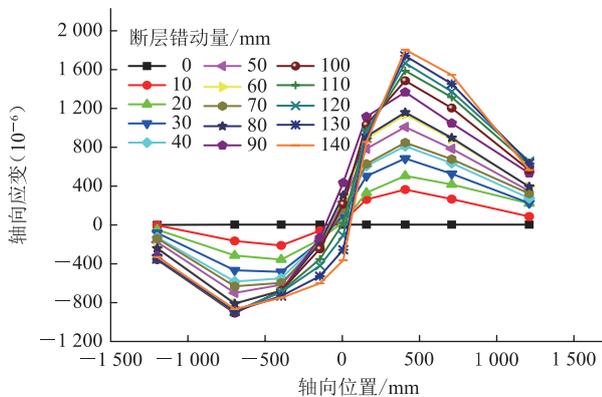
(b) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道下侧



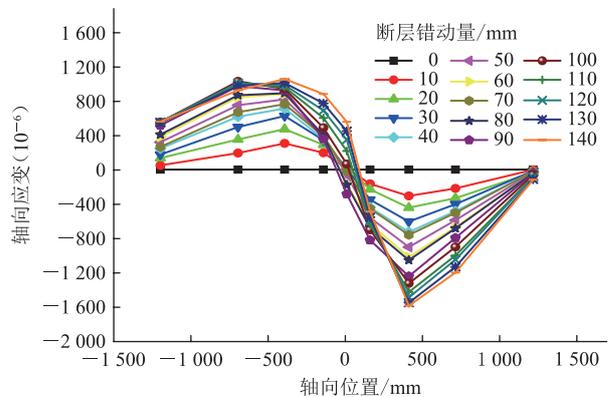
(c) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道上侧



(d) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道下侧



(e) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道上侧



(f) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道下侧

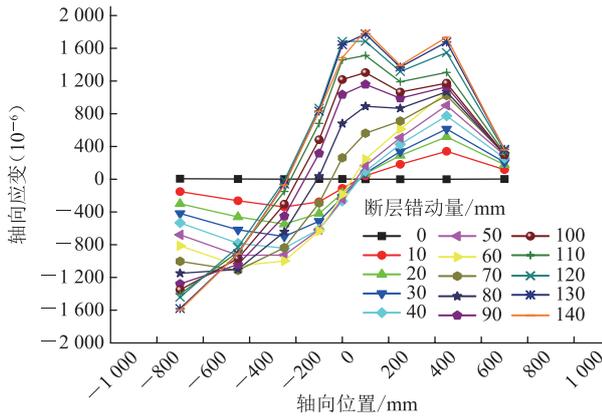
图6 组别1中管道轴向应变沿管轴的分布曲线

径较大的管道,其更有利于抵御场地土的错动变形。对比图6a、图6b、图6e、图6f可见,随着管道埋深的增大,管道轴向峰值拉、压应变均增加,表明管道浅埋为宜。

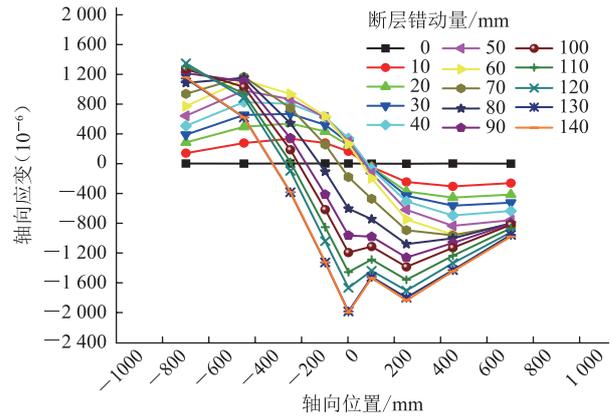
3.2 断层倾角为 90° 的正断层

根据组别2中管道轴向应变沿管轴的分布(图7)可见,随着断层错动量的增加,管道各个测点的应变也随之增大。对比图7a~图7d可见,断层错动量均为140 mm时,管径为32 mm的峰值拉应变为 1.814×10^{-6} ,峰值压应变为 1.999×10^{-6} ,而管径为

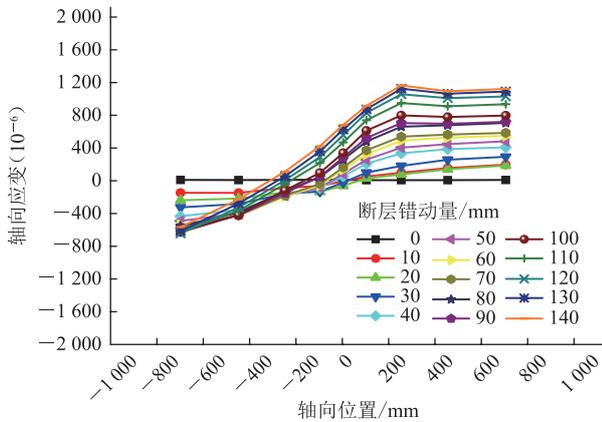
40 mm的峰值拉应变为 1.118×10^{-6} ,峰值压应变为 1.121×10^{-6} ,进一步表明选择较大口径的管道有利于提高管道承受载荷和抵抗变形的能力。对比图8a、图8b、图8e、图8f可见,随着断层错动量增加,埋深0.3 m的管道试件拉、压应变转折点有所偏移,而埋深为0.6 m的管道试件拉、压应变转折点始终位于中心点附近,表明土体对埋深越大的管道约束作用越强,管道活动能力越弱。断层倾角为 90° 时管道的峰值拉、压应变大于倾角为 75° 时管道的峰值拉、压应变,对管道的破坏亦越大。



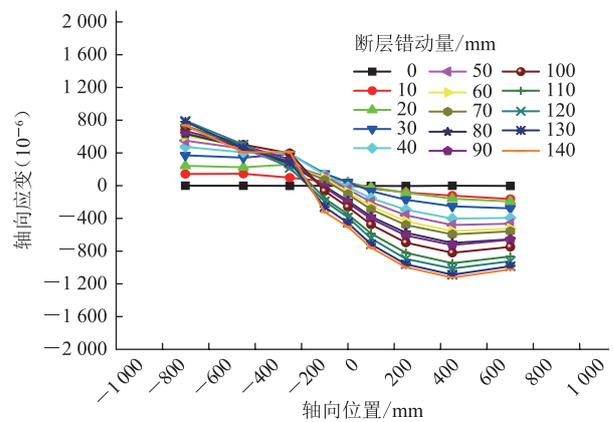
(a) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道上侧



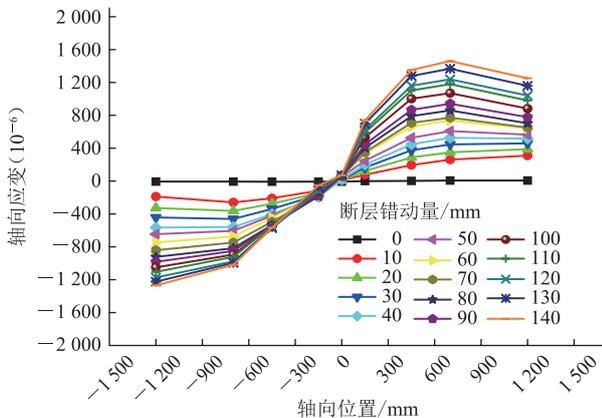
(b) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道下侧



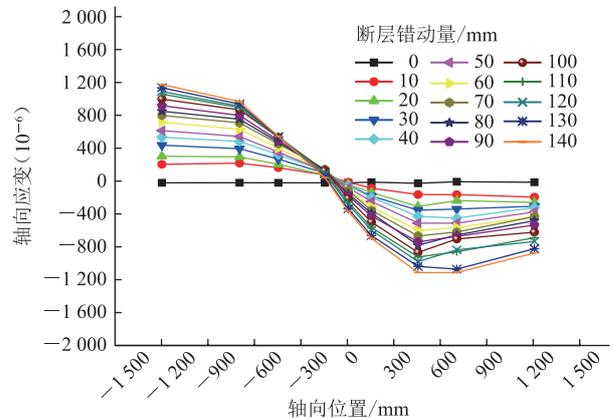
(c) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道上侧



(d) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道下侧



(e) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道上侧



(f) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道下侧

图7 组别2中管道轴向应变沿管轴的分布曲线

3.3 断层倾角为 105° 的逆断层

根据组别3中管道轴向应变沿管轴的分布(图8)可见,逆断层作用与正断层相似,随着管道管径的增加,埋深的减小,管道轴向应变均呈现减小的趋势。在逆断层作用下,无论是管道上侧还是下侧,错动盘管道轴向拉、压应变均大于固定盘。近断层处管道两侧轴向拉、压应变呈现出较大的差异,而远断层处管道两侧轴向拉、压应变却基本相近,这表明远断层处主要承受轴向力的作用;而近断层处除承受轴向

力外,也承受断层错动引起的弯矩,因此可以将埋地管道看成一根承受弯矩和轴向力组合作用的梁。结合图8a、图8b可见,当断层错动量为140 mm时,管道峰值拉应变为 $1\ 209 \times 10^{-6}$,而峰值压应变为 $1\ 468 \times 10^{-6}$,表明在逆断层作用下,管道以受压为主,类似现象也可见图8c、图8d或图8e、图8f。此外,对比图8a、图8e可见,随着埋深增加,断层作用受影响的管段长度变小,应变峰值点的位置也更接近断层处。

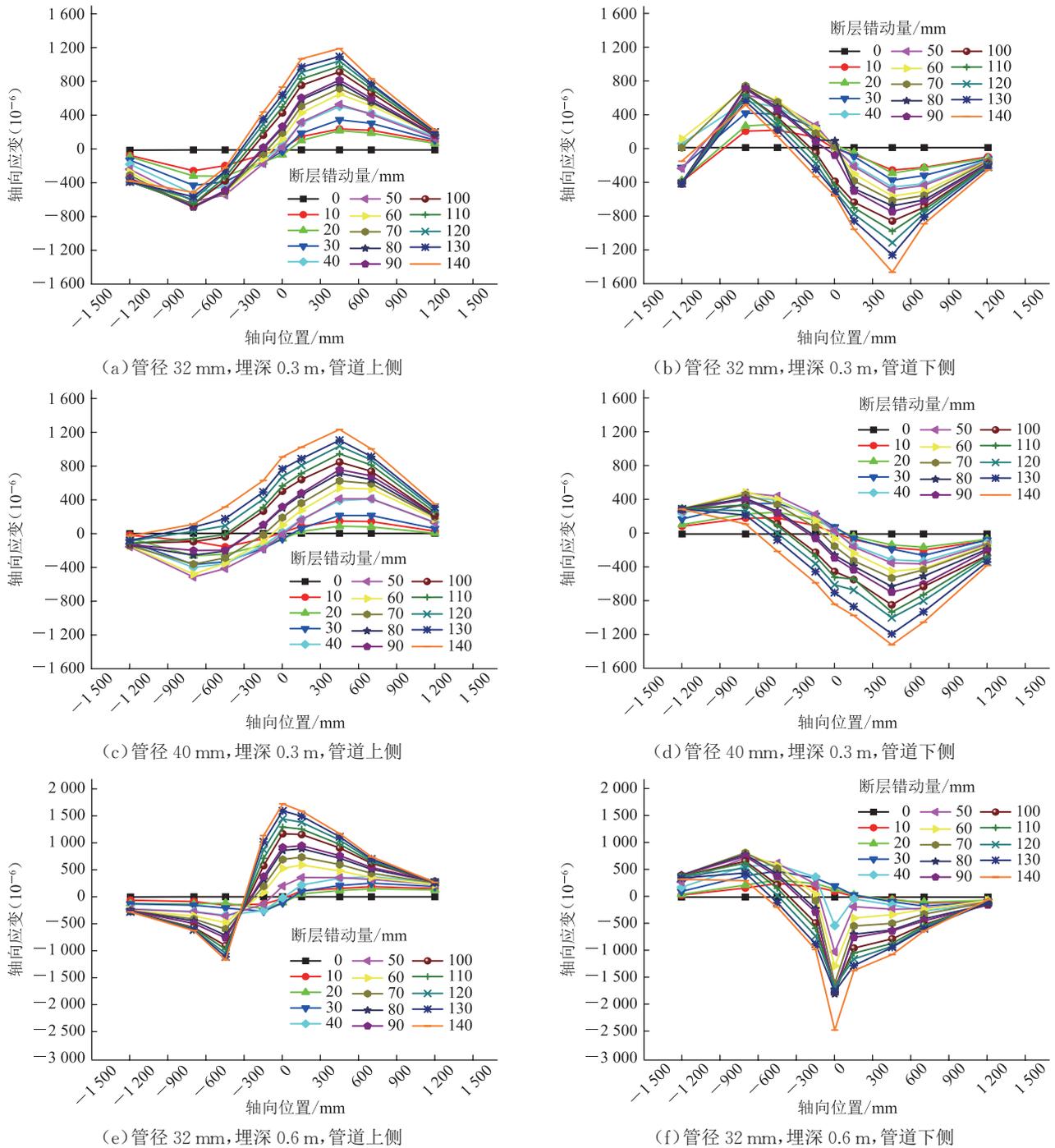


图8 组别3中管道轴向应变沿管轴的分布曲线

3.4 断层倾角为 90° 的走滑断层

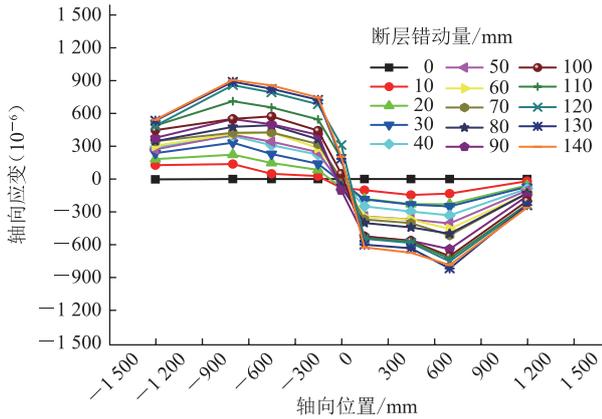
由组别4中管道轴向应变沿管轴的分布(图9)可见,与正、逆断层作用不同,随着断层错动量增加,走滑断层两侧管道轴向应变始终呈中心对称分布,这表明错动盘和固定盘对于管道应变的影响无明显差异,原因在于断层错动的方向与土压力作用于管道的方向不一致,断层两侧土体对管道作用的大小相近,断层错动量施加在错动盘的同时,固定盘内管道也受到了大小相近的反作用力。当断层错动量施加至140 mm时,

对比图6~图9中同一工况下管道的峰值拉、压应变可以发现,走滑断层作用对管道应变反应的影响最小,正断层次之,逆断层作用的影响最大。

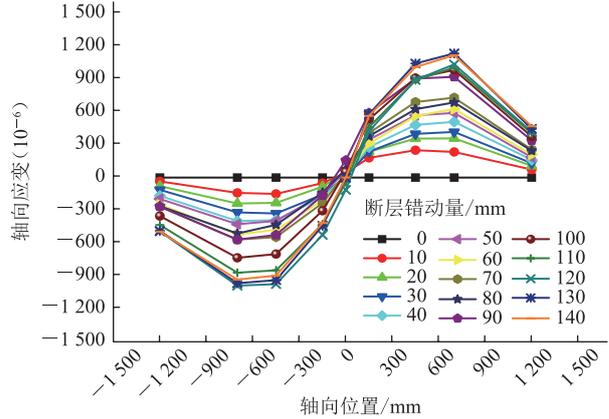
4 有限元模拟

4.1 模型建立

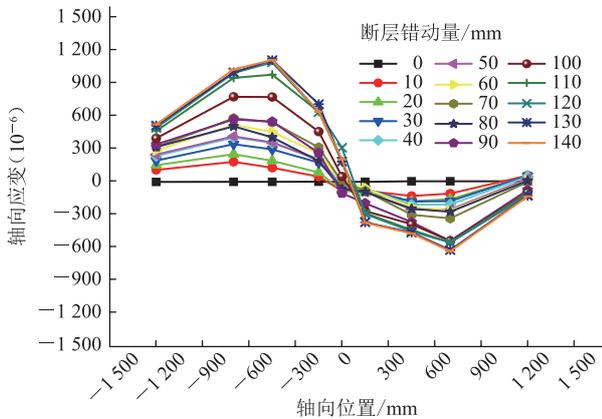
管道本构模型采用三折线简化模型(图10, ε_1 、 ε_2 分别为管道的弹性屈服应变、塑性屈服应变, σ_1 、 σ_2



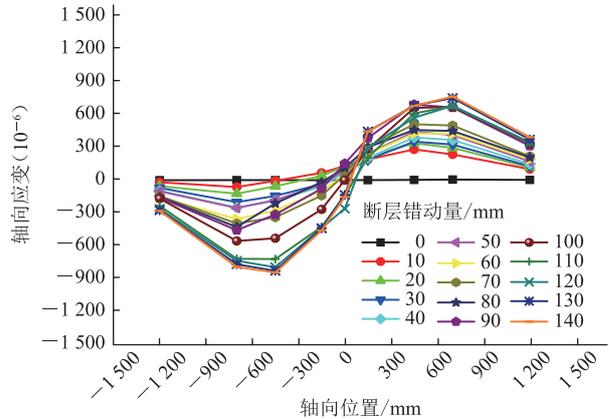
(a) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道左侧



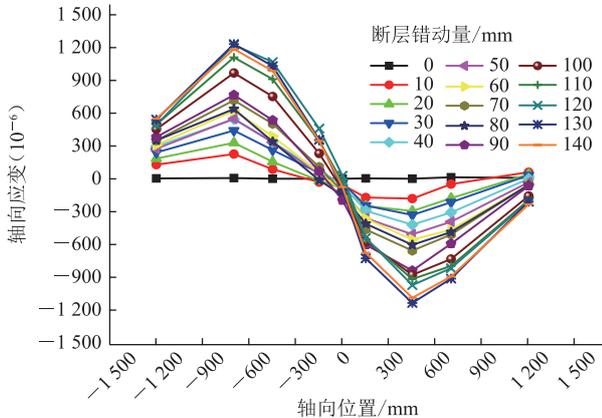
(b) 管径 32 mm, 埋深 0.3 m, 管道右侧



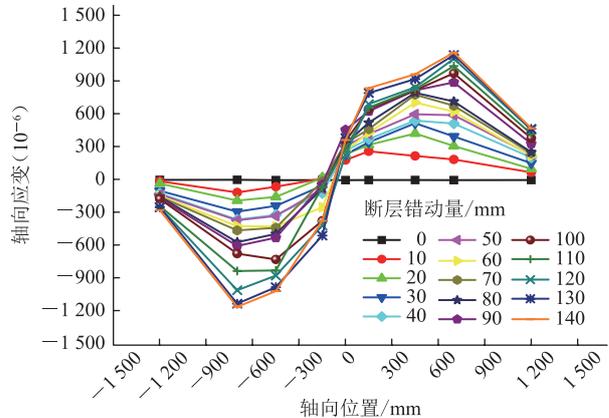
(c) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道左侧



(d) 管径 40 mm, 埋深 0.3 m, 管道右侧



(e) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道左侧



(f) 管径 32 mm, 埋深 0.6 m, 管道右侧

图 9 组别 4 中管道轴向应变沿管轴的分布曲线

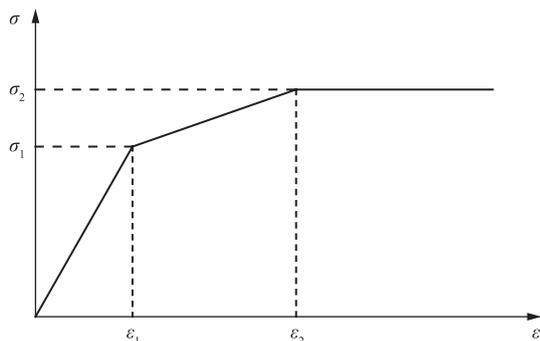
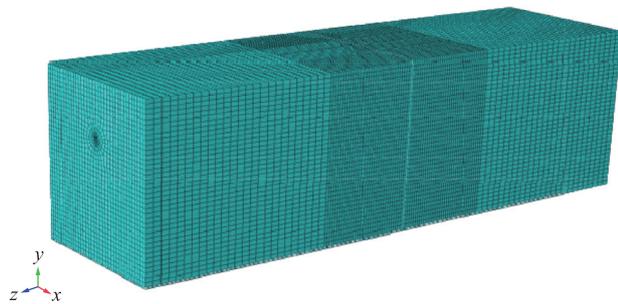


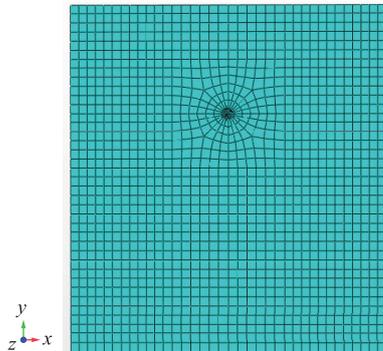
图 10 管道三折线本构关系示意图

分别为管道的弹性屈服应力、塑性屈服应力), 分为弹性、弹塑性及塑性 3 个阶段, 土体本构采用摩尔库伦模型。所建的管土模型主要包括管道和土体两个部件, 考虑到管道与土层材料的非线性, 在断层的错动加载中可能会存在位移不协调的情况, 管道部件选用 S4R 壳单元(4 节点四边形有限薄膜应变线性减缩积分壳单元), 土体部件选用 C3D8R 单元(8 节点减缩积分三维实体单元)。对于管土模型, 采用结构化网络的划分技术, 在此重点关注大变形段管道的受力情况, 因此可

对此区域内的网格进行细化,将距离断层一侧 500 mm 范围内的土体及管道网格进行加密,对其他区域的网格间距适当放大(图 11)。有限元分析中,可以通过在土体边界施加位移约束和位移荷载来模拟断层对管道的作用,法向作用采用硬接触,切向作用采用库伦摩擦模型来传递管土表面的剪应力,管土间的摩擦因数根据 GB/T 50470—2017《油气输送管道线路工程抗震设计规范》建议取 0.6。此外,由于管材的刚度较大,在选取主控面和从属面时,将接触单元的目标面选取为管道的主控面,而将管材及土体的交界面作为接触单元的从属面。在有限元分析中选取弹簧单元,建立管端约束,模拟管道小变形段轴向拉伸(图 12)。



(a) 模型网格划分



(b) 土体截面网格划分



(c) 管道网格划分

图 11 管土有限元模型网格划分示意图

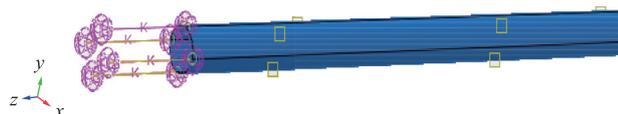
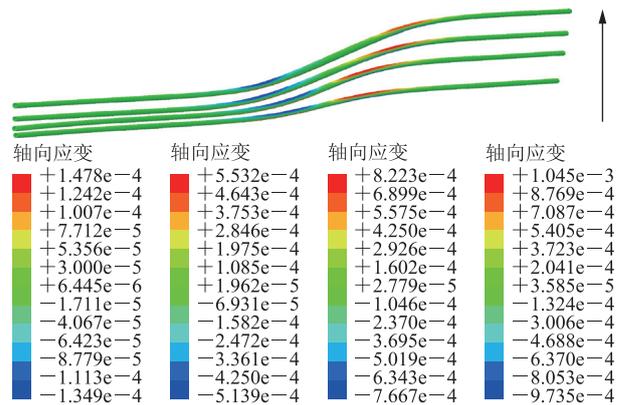


图 12 管端弹簧约束有限元模拟图

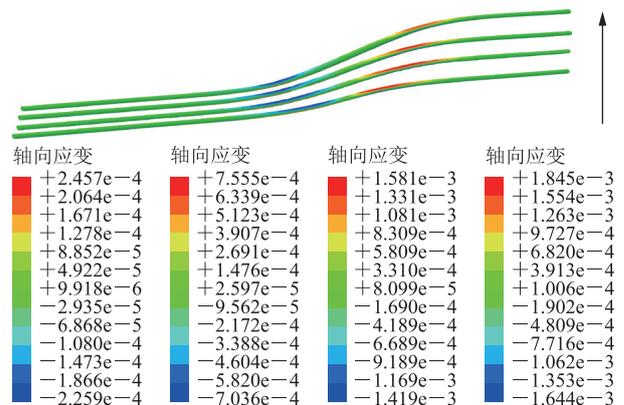
4.2 模拟结果

4.2.1 管道沿轴向应变

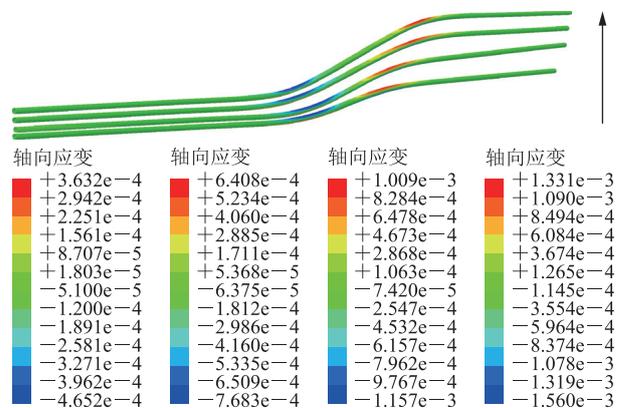
模拟得到不同形式断层作用下管道(管径 32 mm, 壁厚 2 mm)沿轴向的应变云图(图 13),箭头所指



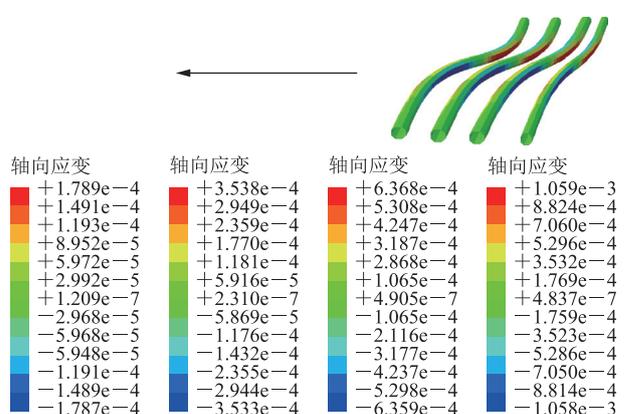
(a) 断层倾角为 75° 的正断层



(b) 断层倾角为 90° 的正断层



(c) 断层倾角为 105° 的逆断层



(d) 断层倾角为 90° 的走滑断层

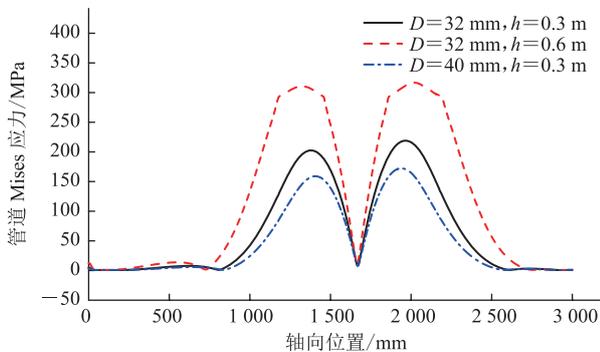
图 13 不同形式断层作用下管道沿轴向应变云图

方向的断层错动量分别为 20 mm、60 mm、100 mm、140 mm。管道一侧受拉,另一侧受压,应变最大点的位置不在断层处,距断层面有一定的距离,且随着断层错动量的增加,管道的变形范围和变形程度增大,应变最大点距离断层的位置向外偏移。对比图 13a、图 13b 可见,在不同的断层错动量工况下,管道受拉侧的应变均大于管道受压侧的应变,表明当断层倾角不大于 90° 时,管道以受拉为主。对比图 13c 中不同断层错动量下管道的轴向应变可见,在不同的断层错动量工况下,管道受拉侧的应变始终小于管道受压侧的应变,表明当断层倾角大于 90° 时,管道以受压为主。对比图 13d 中不同断层错动量下管道的轴向应变可见,管道受拉侧的应变与受压侧的应变十分接

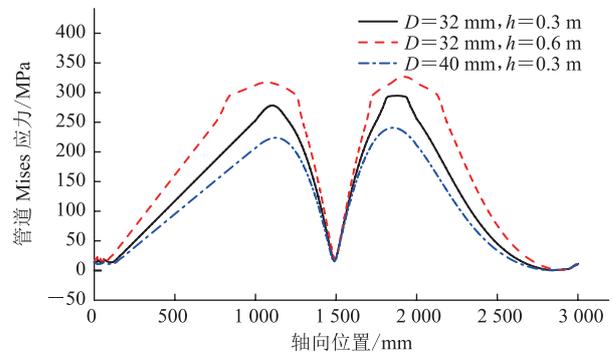
近,断层两侧管段的变形趋于一致。对比同一断层错动量下不同形式断层管道的应变云图可以发现,逆断层对于管道应变的影响最大,正断层其次,走滑层最小。

4.2.2 管道 Mises 应力

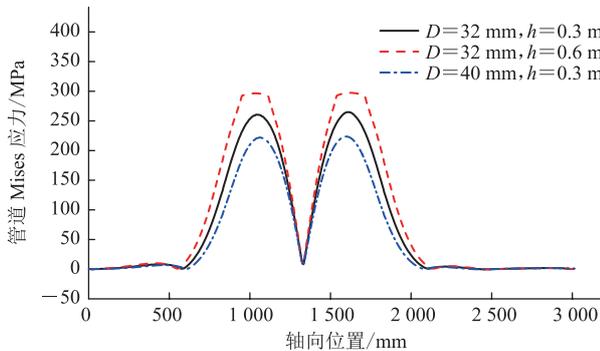
当断层错动量为 140 mm 时,模拟得到不同断层错动作用下管道的 Mises 应力曲线(图 14,其中 D 为管道外径, h 为管道埋深)。由图可见,管径较大的管道 Mises 应力相对较小,随着埋深增加,管道的 Mises 应力增大。图 14b、图 14d 中管道 Mises 应力分布的范围较图 14a、图 14c 更广,这是因为当断层垂直作用于管道时,其竖向分量(正、逆断层)或水平分量(走滑断层)最大,对管道作用也越强。



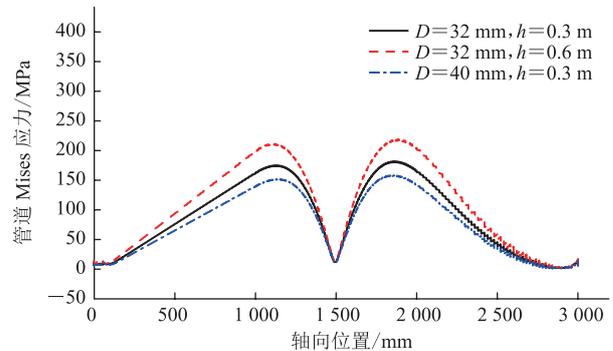
(a) 断层倾角为 75° 的正断层



(b) 断层倾角为 90° 的正断层



(c) 断层倾角为 105° 的逆断层



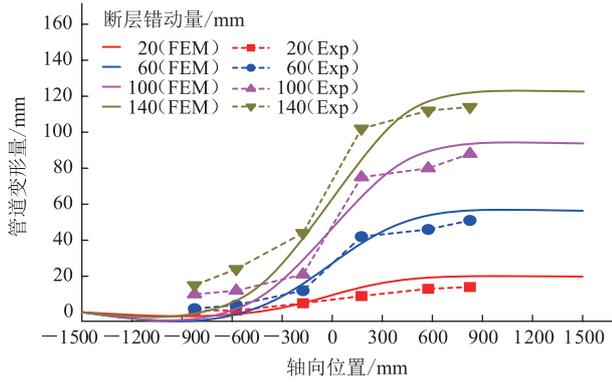
(d) 断层倾角为 90° 的走滑断层

图 14 不同形式断层作用下管道 Mises 应力曲线

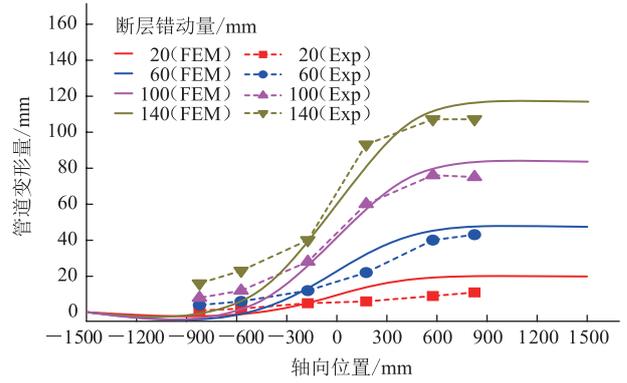
4.2.3 管道竖向变形

由不同组别管道竖向变形对比图(图 15~图 17,其中 FEM 表示有限元方法,Exp 表示试验方法)可见,有限元结果与试验值整体比较接近,但部分区域管道的变形存在较大差异,如轴向位置 -900 mm 处的试验值大于有限元值,原因在于土箱加载过程中土体裂缝的不断拓展,导致土压力对管道的约束作用减弱,进而管道变形量有所增大。不同组别管道竖向变

形趋势相同,随着断层错动量的增加,管道变形量增大,近断层处管道的变形较大,而远断层处由于管道随着土体一起运动,因此变形趋于平缓。对比图 15a、图 15b 可见,随着管道管径的增加,管道的变形量减小,表明增加管径能够提高管道的抗变形能力。对比图 15a、图 17a 可见,当管道由正断层作用转换为逆断层作用时,管道变形加剧,表明逆断层对管道变形的影响更大。

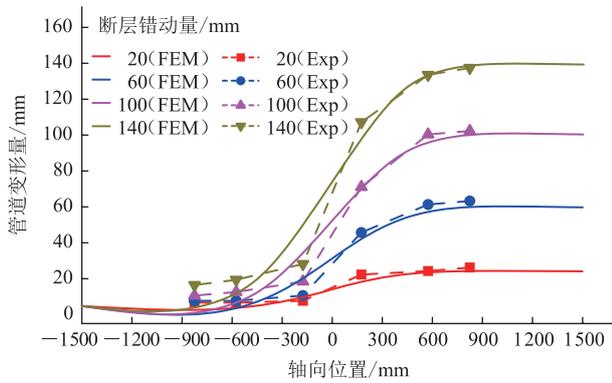


(a)管径 32 mm,埋深 0.3 m

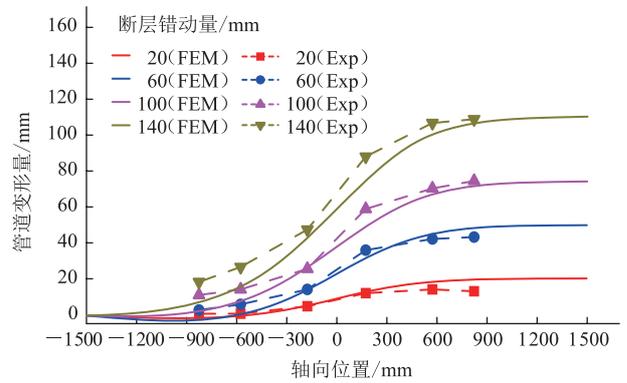


(b)管径 40 mm,埋深 0.3 m

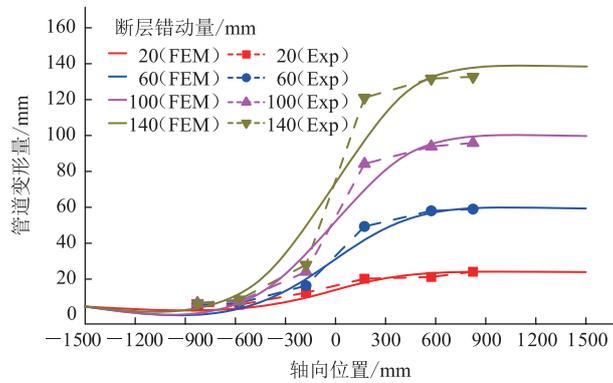
图 15 组别 1 中管道竖向变形沿管轴分布曲线



(a)管径 32 mm,埋深 0.6 m

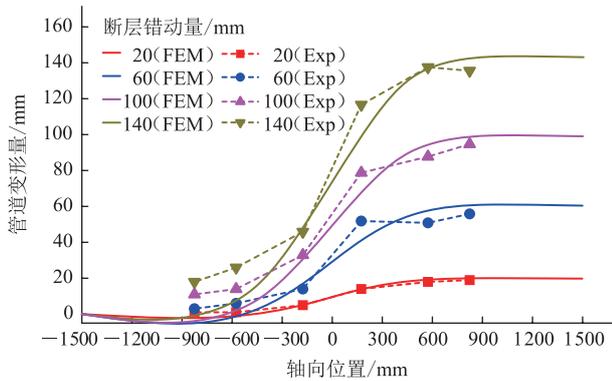


(b)管径 40 mm,埋深 0.6 m

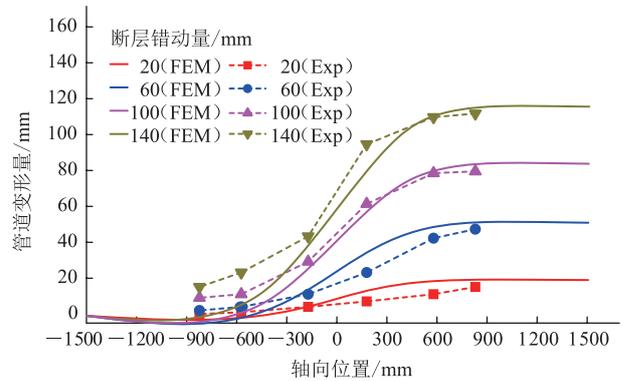


(c)管径 32 mm,埋深 0.6 m

图 16 组别 2 中管道竖向变形沿管轴分布曲线



(a)管径 32 mm,埋深 0.3 m



(b)管径 40 mm,埋深 0.3 m

图 17 组别 3 中管道竖向变形沿管轴分布曲线

5 结论

研制了可用于分析多种形式断层对埋地管道作用机制的试验装置,通过模拟断层的错动,对12根埋地管道开展试验,并进行了有限元分析,得到以下结论:

(1)随着断层错动量的增大,不同测点的轴向应变也随之增加。应变最大值的位置往往不在断层处,而在断层两侧附近,离断层较远测点处管段的轴向应变值则相对较小。

(2)选用较大管径、较小埋深的管道有利于提高管道承受载荷和抵抗变形的能力。

(3)对于正、逆断层,断层两侧管道轴向应变呈现较大差异,当断层倾角小于 90° 时,管道轴向峰值拉应变大于峰值压应变,此时管道以受拉为主。当断层倾角大于 90° 时,管道轴向峰值拉应变小于峰值压应变,此时管道以受压为主。对于走滑断层,管道轴向应变近似呈中心对称分布,两侧变形趋于一致。逆断层对于管道应变的影响最大,正断层其次,走滑断层最小。

(4)随着断层错动量的增加,管道的变形量增大,近断层处管道的变形较大,而远断层处由于管道随着土体一起运动,因此变形趋于平缓。

参考文献:

- [1] 刘爱文. 基于壳模型的埋地管线抗震分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002: 6-7.
LIU A W. Response analysis of a buried pipeline crossing the fault based on shell-model[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 2002: 6-7.
- [2] DU G F, HUO L S, KONG Q Z, SONG G B. Damage detection of pipeline multiple cracks using piezoceramic transducers[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(5): 2828-2838.
- [3] DU G F, KONG Q Z, ZHOU H, GU H C. Multiple cracks detection in pipeline using damage index matrix based on piezoceramic transducer-enabled stress wave propagation[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1812.
- [4] 刘啸奔, 张宏, 李劼, 郑伟, 吴镔. 断层作用下埋地管道应变分析方法研究进展[J]. 油气储运, 2016, 35(8): 799-807.
LIU X B, ZHANG H, LI M, ZHENG W, WU K. Research progress of strain analysis methods for buried pipelines under faulting process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(8): 799-807.
- [5] 张士岩, 房茂立, 庞鑫峰, 张立松, 闫相祯. 基于梁-壳混合教学单元的输气管道穿越地震断层模型[J]. 油气储运, 2018, 37(2): 210-215.
ZHANG S Y, FANG M L, PANG X F, ZHANG L S, YAN X Z. A model of gas pipeline crossing earthquake fault based on beam-shell combined teaching element[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(2): 210-215.
- [6] 雷震. 跨斜滑断层埋地管道力学性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019: 31-58.
LEI Z. Study on mechanical properties of buried pipelines crossing oblique slip faults[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2019: 31-58.
- [7] 冯启民, 郭恩栋, 宋银美, 高惠瑛, 张培珍, 徐文德. 跨断层埋地管道抗震试验[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 56-62.
FENG Q M, GOU E D, SONG Y M, GAO H Y, ZHANG B Z, XU W D. A seismic test of buried pipe crossing fault[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 56-62.
- [8] 白文彪. 跨断层埋地管道抗震性能的试验研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2008: 23-28.
BAI W B. Experimental research on anti-seismic behavior of buried pipes crossing fault[D]. Tangshan: Hebei Polytechnic University, 2008: 23-28.
- [9] 张旭. 由于地基沉降引起柔性管线的内力和变形的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 21-25.
ZHANG X. The experiment of deformation and internal force of soft pipeline caused by subsoil[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013: 21-25.
- [10] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(I): 试验方案设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 93-98.
ZHANG Z C, WANG J T, XU Y J. Shaking table test for cross-fault buried pipelines(I) - Model design[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 93-98.
- [11] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(II): 试验成果分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12): 116-125.
ZHANG Z C, WANG J T, XU Y J. Shaking table test for cross-fault buried pipelines(II) - Test results[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 116-125.
- [12] 汤爱平, 王连发, 武百超, 麦克·诺金. 考虑土结相互作用的逆断层作用下埋地管道性能离心机试验[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 639-642.
TANG A P, WANG L F, WU B C, ROURKE M J. Centrifuge

- model test on a buried pipeline crossing reverse fault considering soil-structure interactions[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(3): 639-642.
- [13] 李立云, 王成波, 韩俊艳, 侯本伟, 许成顺, 杜修力. 埋地管道-场地地震反应振动台试验研究的场地响应[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(3): 166-176.
- LI L Y, WANG C B, HAN J Y, HOU B W, XU C S, DU X L. Analysis of site responses during shaking table test for the interaction between pipeline and soil[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2015, 35(3): 166-176.
- [14] 王乐. 不均匀沉降下埋地输液管道力学性能的试验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016: 13-53.
- WANG L. Experimental research on mechanical properties of buried pipeline for liquid-conveying under differential settlement[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016: 13-53.
- [15] 陈艳华, 刘洲, 刘晓, 杨梅, 蒋录珍. 走滑断层作用下埋地充液钢质管道接口应变特性的试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2017, 33(3): 447-457.
- CHEN Y H, LIU Z, LIU X, YANG M, JIANG L Z. Experimental study on strain properties of buried steel pipeline joint under strike-slip faults[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2017, 33(3): 447-457.
- [16] 陈艳华, 刘晓, 王乐, 葛楠, 陈海彬, 刘琳琳. 穿越走滑断层埋地管道应变特性的试验研究[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(4): 55-61.
- CHEN Y H, LIU X, WANG L, GE N, CHEN H B, LIU L L. Experimental research on strain properties of buried pipelines at strike-slip fault crossings[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(4): 55-61.
- [17] SIM W W, TOWHATA I, YAMADA S, MOINET G J M. Shaking table tests modelling small diameter pipes crossing a vertical fault[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2012, 35: 59-71.
- [18] ROFOOEI F, JALALI H H, ATTARI N K A, KENARANGI H. Parametric study of buried steel and HDPE gas pipelines due to oblique-reverse faulting[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2015, 42(3): 178-189.
- [19] XU L G, LIN M. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion using the vector form intrinsic finite element method[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2017, 93: 61-83.
- [20] 曾希, 董飞飞, 廖恒, 杜国锋. 跨断层埋管力学行为的多参数模拟分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(6): 874-880.
- ZENG X, DONG F F, LIAO H, DU G F. Multiparameter simulation analysis of mechanical behavior of buried pipeline crossing fault[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(6): 874-880.
- [21] 董飞飞, 曾希, 徐晋东, 杜国锋. 跨断层长输管道受力性能的影响因素分析[J]. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(5): 169-174.
- DONG F F, ZENG X, XU J D, DU G F. Analysis of influencing factors on mechanical behavior of long-distance pipeline across faults[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2018, 35(5): 169-174.
- (收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2020-02-18; 编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“基于分布式压电陶瓷传感器的长输管道动力响应监测与损伤识别研究”, 51778064; 湖北省自然科学基金资助项目(创新群体)“山地长输管道地震致灾机理与抗震设计方法研究”, 2016CFA022; 中国石油科技创新基金项目“跨断层长输管道抗震分析方法与抗冲击性能研究”, 2016D-5007-0605。
- 作者简介:** 曾希, 男, 1994年生, 助理工程师, 2019年硕士毕业于长江大学建筑与土木工程专业, 现主要从事污水处理、生态修复相关技术工作。地址: 湖北省荆州市长江大学东校区, 434023。电话: 15927867646。Email: 201672335@yangtzeu.edu.cn
- 通信作者:** 杜国锋, 男, 1975年生, 教授, 2008年博士毕业于武汉大学结构工程专业, 现主要从事智能材料与结构、长输管道结构抗震及健康监测方向的研究工作。地址: 湖北省荆州市长江大学东校区, 434023。电话: 13972397784。Email: gfd_1125@126.com