

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.102



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



堆载作用下埋地 PE 管道力学响应过程 模型试验研究

林芳泽¹, 路建国¹, 李鹏程², 岑康¹, 陈诤³, 孙彬强³, 王作文¹

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500; 2. 中国石油天然气股份有限公司
西南油气田分公司, 成都 610051; 3. 甘肃一安建设科技集团有限公司, 兰州 730060)

摘要:为探究工程现场地面堆积物对埋地 PE 管道的影响,以典型埋地 PE 管道-土体为原型,依托自主设计的管道试验系统,开展堆载作用下埋地 PE 管道力学响应全过程的模型试验。结果表明:堆积荷载对管道的力学性能存在显著影响,管周应变峰值位于堆载正下方,且由该处向管道两端逐步递减;在竖向应力作用下,管道横截面应变呈对称分布。管道应变呈非线性增长,分为缓慢增长、快速增长两个阶段,平均增幅分别为 40%、76.3%。管-土相互作用使管道沿轴向不同位置受力状态存在差异,整体以轴向拉伸为主。同时,土体残余应力会抑制管道弹性恢复,管道发生梁式弯曲,变形形态近似挠曲线;管道两端受约束与土抗力作用产生小幅反向位移,上覆土层随管道变形产生沉降或局部隆起。堆载产生的附加应力沿深度向下逐步扩散并衰减;管道所受压力逐渐以土体自重应力为主。

关键词:埋地管道;堆积荷载;管-土相互作用;模型试验;力学性能

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)05-0186-10

Model experimental analysis of mechanical response process of buried polyethylene pipeline under the stacking load

LIN Fangze¹, LU Jianguo¹, LI Pengcheng², CEN Kang¹, CHEN Zheng³,
SUN Binqiang³, WANG Zuowen¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;
2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, P. R. China; 3. Gansu Yian Construction
Technology Group Co., Ltd., Lanzhou 730060, P. R. China)

Abstract: In order to explore the influence of stacking load on buried PE pipeline in engineering application, a typical buried PE pipe model test under the action of stacking load was carried out by means of an independently designed pipeline test system. The results show that the stacking load has a significant effect on the mechanical properties of the pipeline. The peak of the strain around the pipe appears below the load and decreases towards

收稿日期:2024-07-19

基金项目:四川省科技计划项目(2024NSFSC2007);中国博士后科学基金(2021M692697)

作者简介:林芳泽(2000-),男,主要从事管道力学研究,E-mail:18976098956@163.com。

路建国(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:jianguog@swpu.edu.cn。

Received: 2024-07-19

Foundation items: Sichuan Science and Technology Program (No. 2024NSFSC2007); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M692697)

Author brief: LIN Fangze (2000-), main research interest: pipeline mechanics, E-mail: 18976098956@163.com.

LU Jianguo (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: jianguog@swpu.edu.cn.

both ends of the pipe. The strains on the cross section of the pipeline develop symmetrically under vertical stress. The strain of the pipeline is non-linear, and it goes through two stages of slow and fast growth, with increase rates of 40% and 76.3%, respectively. The interaction between the pipeline and soils results in different stress states along the axial direction while the pipeline generally shows axial stretching. Simultaneously, due to the residual stress in the soil, the elastic recovery of the pipeline is inhibited under the pipe-soil interaction, and the pipeline presents a beam-type bending and a deflection curve-like shape. Additionally, both ends of the pipeline are constrained and the soil resistance produces a small degree of reverse displacement, and the overlying soil sinks or rises with the deformation of the pipeline. The additional stacking load caused by the accumulation gradually diffused and dissipated to the deep soil layer. When the buried depth of the pipeline increased, the pressure composition of the pipeline would be mainly determined by the self-weight of the soil.

Keywords: buried pipeline; stacking load; pipe-soil interaction; model test; mechanical property

近年来,中国油气储运工程高速发展。聚乙烯(PE)管道综合性能优良,广泛应用于生命线工程^[1-3]。但随着城市燃气需求持续增长,燃气管道安全事故频发。堆积荷载是典型的地面荷载^[4],主要由工程施工、地质灾害引发的物料、土石方堆积形成。堆积物长期超载会使堆载区及周边地基土体产生不均匀沉降与变形,进而导致埋地PE管道发生位移、弯曲乃至破坏失效^[5-6]。因此,系统开展堆载作用下埋地PE管道与地基土体协同变形力学特性研究,对保障埋地PE管道安全运营维护具有重要工程价值。

学者针对地面堆载作用下埋地管道的力学响应开展了大量研究。Liang等^[7]研究了地面荷载、土体弹性模量、管道壁厚及埋深等因素对PE管道受力特性的影响,结果表明,地面荷载、管道埋深与内压是主导管道力学响应的重要因素。李扬等^[8]建立了考虑管、土、堆积重物接触作用的三维有限元模型,明确了堆载作用下管周接触应力的分布规律,证实堆载作用、管道埋深与下覆土模量对管顶、管底的等效应力有显著影响。王亮等^[9]研究了地面堆载对高后果区管道承载性能的影响,结果表明,堆载高度、堆载距离对管道力学性能有显著影响,而管径、壁厚及土体性质的影响相对微弱。詹辉^[10]选取硬质、软土两种常见的地基类型,模拟分析了堆载引发的管道附加荷载与位移变化,确定了工程适用的安全堆载范围。王建华等^[11]通过模型试验探究了轴向加载速率、土体抗剪强度及作用时间对黏土中PE管道管土摩擦特性的影响规律。李长俊等^[12]基于ANSYS软件建立了地面堆载作用下三维管土相互作用模型,厘清了地面堆载大小、作用位置及作用尺寸对埋地管道位移、应力与截面椭圆度的影响。管凌霄等^[13]结合实际工程监测数据,对改进后

的Loganathan公式进行工程应用,研究了盾构隧道开挖对管道水平位移与竖向沉降的影响,并依托初始计算模型进一步分析了管道水平、竖向应变的响应规律。堆载作用下埋地管道的力学响应受堆积物特性、管道物理参数及管周土体类型共同影响,通过模型试验探究上述因素的作用机制,可真实反映埋地管道的力学行为。Zhu等^[14]通过模型试验研究了爆破荷载作用下埋地管道-管周土体相互作用的动态响应特征。刘鹏等^[15]采用模型试验探究了土层连续沉降过程中埋地钢管的管土相互作用演化过程与变化规律。伍鹤皋等^[16]以大口径钢管为研究对象建立管土接触面单元,分析了管土接触状态、变形过程及管周土压力的变化规律,进一步揭示了管土相互作用机理。Liang等^[17]采用有限元方法研究地面超载条件下PE管道的力学特性发现,管道的埋深、壁厚、内部压力及回填类型对管道安全运行具有显著影响。现有研究虽已阐明堆载对埋地管道力学响应的影响规律,但多以数值仿真分析为主。作为数值模拟的有效补充,物理模型试验能提供更为真实、可靠的试验数据,而目前针对PE管道堆载响应的物理模型试验研究仍相对匮乏。

采用自主设计的管道模型试验系统,开展PE管道-土体相互作用的模型试验,研究堆载作用下埋地PE管道的应变变化规律、压力传递过程及变形特性,揭示堆载作用下PE管道与管周土体的相互作用过程与作用机理。

1 试验材料

1.1 PE管道

选用符合国家标准GB 15558.1—2015的PE100聚乙烯(PE)管道,管道外径、壁厚分别为90、9.5 mm。为贴合实际工程常用管道规格,管道长度

取 7 000 mm;通过拉伸试验测得其力学性能参数,结果如表 1 所示。

表 1 PE 管道的力学性能参数
Table 1 Mechanical parameters of PE pipeline

密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	标准尺寸比	最低要求强度/MPa
954	1 059	11	10

1.2 土体

试验土体取自四川省成都市。试验前取部分土样烘干、碾压、筛分,制得最大粒径约 1 mm 的细砂,用于管道周边填埋;其余土体不作扰动,保持原状土性质,用于分层填筑。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得原状土塑限 W_p 为 21.6%,液限 W_L 为 40.1%,颗粒级配曲线如图 1 所示。

2 试验设计

2.1 管道模型试验系统

如图 2 所示,自主研发的管道模型试验系统由模型试验组件、外加荷载控制组件及数据采集处理组件 3 部分组成。模型试验组件主要包括模型试验箱与配套构件,用于模拟真实工程中埋地 PE 管道的服役环境;外加荷载控制组件用以模拟埋地管

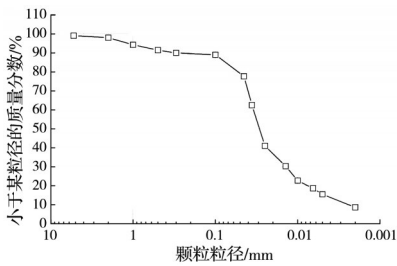


图 1 试验用土颗粒级配曲线
Fig. 1 Particle gradation curve of test soil

道承受的堆积荷载;数据采集处理组件负责试验各类数据的采集与处理。

2.2 模型试验箱体

为便于运输与安装,模型试验箱由 6 节长度为 1 000 mm 的单箱体通过螺栓拼接而成。模型试验箱总尺寸为 6 000 mm×1 400 mm×1 500 mm(长×宽×高),其侧壁与底板由 5 mm 厚的碳素钢板制成。每节箱体正上方均设置钢制横架,以保证箱体具备足够刚度,同时减小模型箱侧壁的挠度。为约束管道两端,避免管道在竖向荷载作用下产生位移,在箱体宽度方向两侧侧壁上各竖向设置 3 组框架,并配套若干可调节钢板(200 mm×50 mm),使管道穿过钢板后形成两端铰支座的类简支梁结构,如图 3 所示。

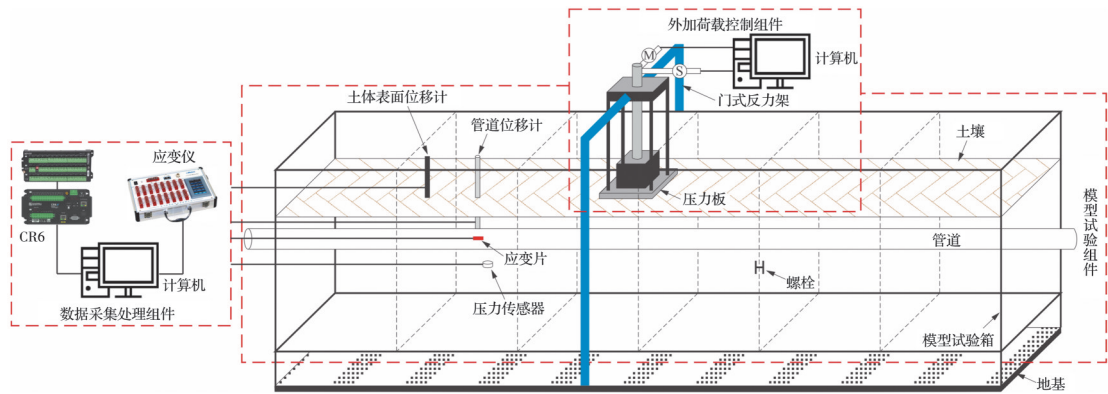


图 2 模型试验系统
Fig. 2 Model test system

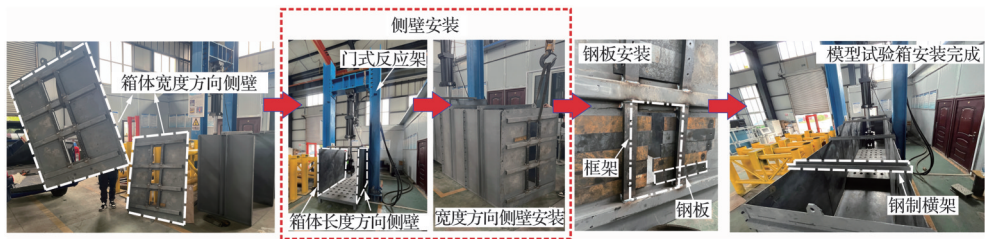


图 3 模型试验箱的安装
Fig. 3 Assembly of model test tank

2.3 测量设备

试验所用测量设备包括各类传感器与数据采集仪器。如图 4、图 5 所示,试验共布设 4 类传感器,

具体如下:沿管道轴向布设 2 个管道位移计 P-DG1、P-DG2,量程为 400 mm,二者分别距堆载中心 300、1 800 mm,用于监测 PE 管道的竖向位移。上覆土表

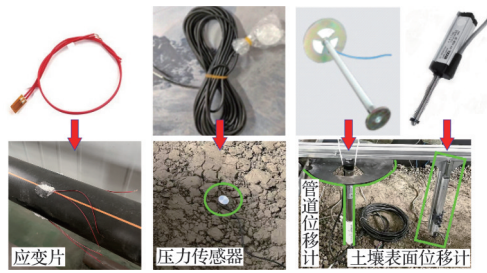
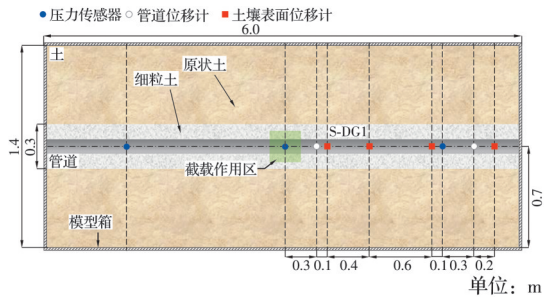
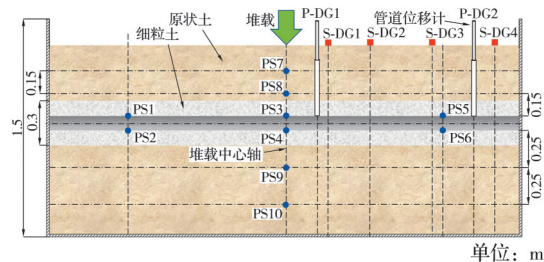


图4 传感器的安装

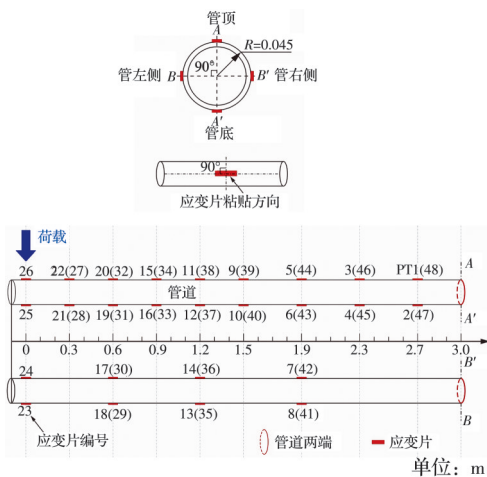
Fig. 4 Installation of sensors



(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 应变片布置图

图5 传感器布置示意图

Fig. 5 Layout diagram of sensors

面布设4个土体表面位移计S-DG1、S-DG2、S-DG3、S-DG4,量程为140 mm,分别距堆载中心400、800、1 400、2 000 mm,用于监测土体表面位移。布设10个压力传感器PS1~PS10,量程分别为0.3、0.5、1.0 MPa,用于监测土压力与管周压力的传递及消散过程。沿管道外壁粘贴48个应变片SG1~SG48,量程为0~20 000 $\mu\text{m}/\text{m}$,每个监测横截面沿环向间

隔90°布设传感器,测点分别位于管道顶部、底部、左侧与右侧,用于监测管周应变演化过程。其中,A-A'为管道端部横截面竖向对称轴,B-B'为该截面水平对称轴。应变片沿管中心对称布置,以编号PT1(48)为例,表示布设1号、48号传感器的点位。

2.4 试验方案

采用电液伺服液压加载装置模拟堆载作用,加载位置为模型箱正中心(管道中部)。将各类堆载简化为矩形堆载,施加竖向矩形均布荷载,采用分级加载控制方式。结合管道周边既有堆积土的现场勘察范围,确定实际堆载面积^[18]。所用压力板长、宽均为450 mm,加载面积为202 500 mm²。加载范围为0~60 kN,每级荷载大小为10 kN。加载方案确定后,依据CJJ 101-2016规定的管道最浅埋深600 mm设定试验管道埋深,以此探究管道在该埋深条件下的力学响应。

2.5 试验准备

在试验前,分层向模型箱内填筑试验用土,每层初始填筑高度控制在200 mm左右。每层设置200 mm基准线,以此控制土体压实度。使用人工夯实工具将每层土体压实不少于3遍,土体高度达到基准线即代表该层土体压实完成,试验中填土的压实度不低于95%。填土过程中,按照图5所示的位置预埋土体压力传感器。随后将粘贴应变片的管道布设至设计埋深600 mm处,并在管道顶部安装管道位移计。管道周围填埋细砂,细砂层设置300 mm夯实基准线,并将细砂拍打密实。最后完成上覆土的填筑,同步安装覆土内压力传感器与土体表面位移计。

3 试验结果与分析

3.1 管道应变

3.1.1 管道应变-荷载曲线

图6给出了堆载作用下PE管道应变-荷载曲线。随着堆载的增大,管道应变相应增大,且不同加载阶段的应变增长速率存在差异。加载初始阶段(0~24 kN)荷载水平较低,管道应变增长缓慢,呈现瞬态弹性响应特征。低荷载作用下聚乙烯分子链未发生明显拉伸与重组,因此应变增长速率相对较低。

随着堆载持续增大(24~60 kN),管道应变进入快速增长阶段。该变化规律与PE管道的黏弹性特性及管-土相互作用密切相关。当荷载提升至一定水平后,管道蠕变特性逐渐凸显,聚乙烯分子链发生滑移与重排。此时管道应变不再瞬时响应荷载变化,而是随加载时间持续发展。该特性使得管道

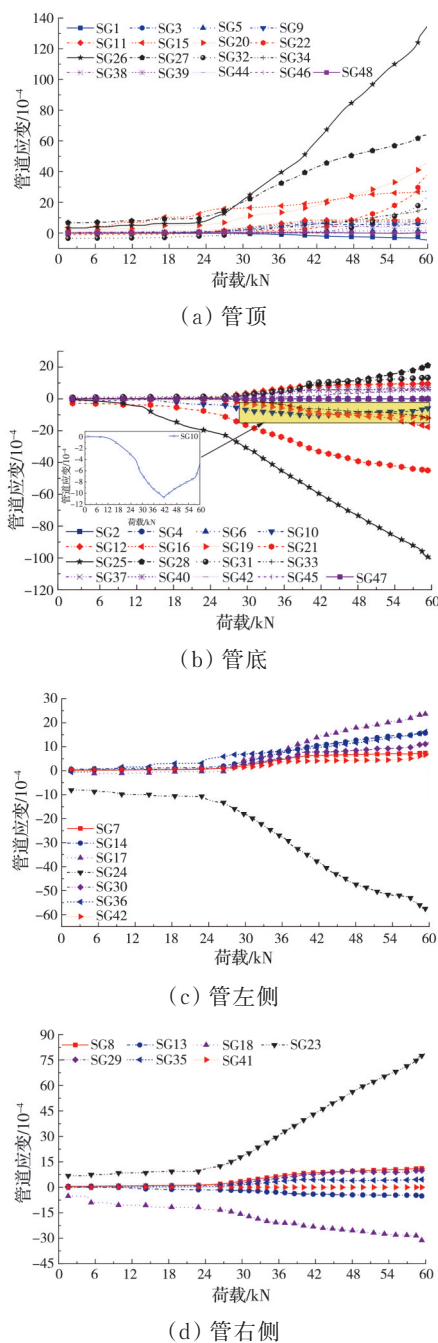


图 6 管道不同测点的应变-荷载曲线

Fig. 6 Strain-load curves of the pipeline at different measured points

在持续加载条件下应变响应随加载时间的延长不断增大。同时,土体压缩变形趋于复杂,包含土体侧向膨胀、界面摩擦力变化等现象,多因素共同作用造成管道应变快速增长^[19]。

试验过程中,管顶与管底、管左侧与右侧应变呈对称分布,增长趋势基本一致。表明堆载作用下管道横截面受力较为均匀,管道整体具备良好的抗弯性能。值得注意的是,荷载正下方测点(应变片 SG23、SG24、SG25 和 SG26 位置)应变均达到同一轴向的最大值。由此可见,荷载产生的作用力可通过土体有效传递至管道,使正下方管段承受较大的

竖向附加荷载,产生显著变形。由图 6 可知,管道同一轴向大部分测点的应变变化趋势一致,仅少数测点呈相反变化规律。具体而言,管顶与管左侧主要产生正应变,管底以负应变为主,管右侧正负应变分布趋于均衡。该应变分布特征反映了不同加载工况下管道各部位的受力状态。与环向应变不同,轴向应变表征管道轴向的整体变形,综合分析可得,管道受力以轴向拉伸为主。由图 6(a)、(b)可知,在堆载正下方及周围 300 m 范围内,管顶受拉、管底受压。这是因为加载过程中该区域以荷载作用为主,造成管顶产生明显轴向拉伸,同时施加的荷载快速传递至下部土体,下部土体保持相对密实,未产生显著沉降。荷载与下部土体抗力的共同作用提升了土体密实度,增大了管土界面的剪切应变率^[20]。剪切应变率的增加表明土体出现应变强化,具备一定的阻抗作用^[21],使管土间轴向摩擦阻力快速提升,进而抑制了管底的轴向拉伸变形。此外,由图 6(b)可知,随着荷载的增加,应变片 SG10 测得的应变先增至 -11×10^{-4} ,后减至 -6×10^{-4} 。该变化反映了堆载作用下管道上覆土体压实过程中产生的受力状态转变,即“峰值”效应^[22]。该现象不仅体现了管土相互作用的复杂性,也表明逐级加载过程中动态的应变响应特征会显著影响管道的受力状态。

3.1.2 管道应变峰值

图 7 为堆载作用达到 60 kN 时管道不同方位沿轴向长度的应变峰值曲线。由图 7 可知,应变集中分布在堆载中心($x=0$)附近,且整体呈对称分布;管顶、管底、管左右两侧的应变峰值均出现在堆载中心处。随着与堆载中心距离的增大,管道应变逐渐趋近于 0,表明堆载的影响范围主要集中于管道中段,管道应变峰值由中心向两端逐步衰减。

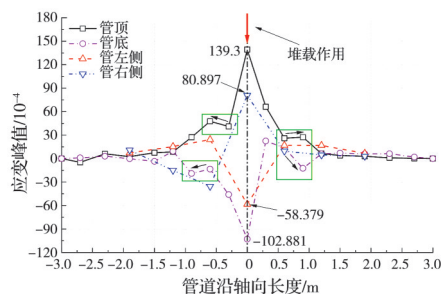


图 7 管道沿轴向长度的应变峰值

Fig. 7 Peak strain of the pipeline along axial length

此外,在堆载中心下方管顶应变达到最大,应变峰值为 139.3×10^{-4} ,表现出显著的应力集中;管底的应变峰值相对较低,为 -102.881×10^{-4} 。由此可推断,土体的支撑作用显著抑制了管底应变的增

长。对于管道左、右两侧,其应变值明显低于管顶、管底,二者的应变峰值分别达到 80.897×10^{-4} 、 -58.379×10^{-4} ,均在堆载作用点附近出现局部应变峰值,但整体变化幅度较小。表明两侧管壁均受到一定弯曲应力作用。同时,加载过程中管道左、右两侧应变呈现不对称特征,该现象由两侧土体密实度差异导致^[23]。结合图5进一步分析可知,管道同一侧的应变正负交替分布,说明该侧存在多种受力状态,这种受力非均匀性使管道沿轴向产生不同程度的拉伸、压缩变形。在堆载附近,管顶、管底应变小幅上升。例如,堆载左侧管顶在 $x=0.3$ 处的应变峰值为 41.02×10^{-4} ,在 $x=0.6$ 处增至 47.68×10^{-4} (图7绿色线框)。说明即便在非直接受荷区域,管道也会出现应变突增现象,该现象或与局部土体压实程度、相邻区域土体沉降差异相关^[24]。荷载正下方土体受到较强压实作用,沉降量较小;相邻土体未直接承受堆载,但土体间存在相互作用与连续性,因此同样产生沉降。该沉降使对应管段出现悬空,进而引发弯矩增大^[25],这进一步说明试验中不同区域的土体性质与管道应变响应存在紧密关联。

3.1.3 管道应变衰减

图8为卸载后管道某一截面的应变衰减曲线。由图8可知,卸载后管道仅承受土体自重,其应变随时间变化幅度较小,平均仅减小4%。由此表明,卸载后管道在土体中的变形恢复十分缓慢。堆载作用下土体产生的压实应力显著阻碍管道变形恢复;即便卸载后压实应力逐步消散,管道也无法立即恢复至初始状态。因为土体内部仍留存残余应力,会一定程度约束管道变形恢复,造成管道恢复期较长。

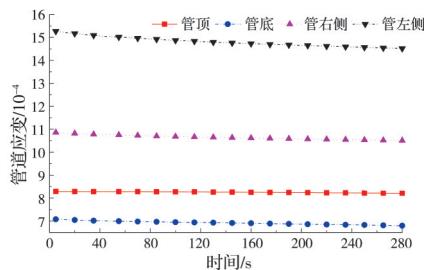


图8 卸载后的管道应变恢复

Fig. 8 Strain recovery of the pipeline after unloading

3.2 管道位移及土壤表面位移

3.2.1 土壤表面位移

图9为整个加载过程中管道上覆土表面位移变化曲线。位移量为负值表示土体向下沉陷,反之为向上隆起。由图9可知,整个加载过程中土体表面均发生沉陷,且土体表面沉陷程度随堆载的增大而

加深。在加载初期(0~24 kN),除土体表面位移计S-DG1所在测点(距离堆载中心0.4m)外,其他测点几乎无明显位移,表明在加载初期堆载主要影响加载中心附近土体,外围土体仍处于弹性响应阶段。随着荷载增至30 kN以上,S-DG1所在测点的位移显著增大,呈明显线性递增趋势;而远离堆载中心的测点处(土体表面位移计S-DG2、S-DG3、S-DG4所在位置)位移变化仍然很小。当堆载达到60 kN时,S-DG1所在测点的位移达到最大值,为4.29 mm;位移计S-DG2、S-DG3、S-DG4所在测点对应的覆土表面位移分别为0.55、0、0.05 mm,其分别距离堆载中心800、1 400、2 000 mm。该结果表明,堆载下方土体变形表现出明显的区域分布特性。随着堆载的增大,土体变形逐渐由弹性阶段过渡至塑性阶段,且塑性变形集中在堆载中心及周边区域,变形程度随与堆载中心距离的增加而减小。土体受压过程中,塑性区主要分布在加载中心附近;塑性区以外区域,土体依靠自身内聚力与摩擦力约束变形而保持稳定。此外,受土拱效应影响,堆载区域土体与非堆载区域土体产生相对位移,二者接触面抗剪强度增大。因此,非堆载区域覆土表面在加载初期具备一定抗变形能力^[26],位移增长幅度较小。

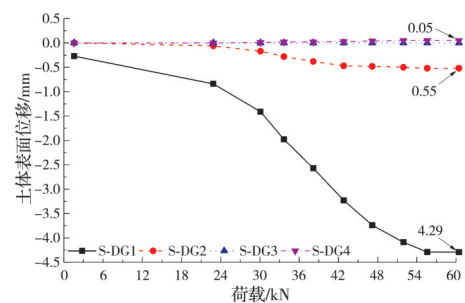


图9 加载过程中的土体表面位移

Fig. 9 Displacements of the soil surface in loading process

3.2.2 管道位移

图10为整个加载过程中管道的位移变化曲线。位移量为正值表示管道竖直向下移动,反之为向上移动。由图10可知,在堆载作用下,管道竖向位移增长明显。管道位移计P-DG1所在测点(距离堆载中心轴300 mm)产生显著位移,而管道位移计P-DG2所在测点(距离堆载中心轴1 800 mm)几乎无位移变化。随着荷载从0增至24 kN,位移计P-DG1所在测点的位移逐渐增大,P-DG2所在测点受荷载影响不显著,位移保持稳定,表明加载初期管道变形主要集中于荷载中心区域。当堆载超过24 kN以后,位移计P-DG1所在测点的位移快速增

大,荷载达到 60 kN 时的位移最大值为 53 mm。该现象表明,该位置下方土体支撑进入塑性阶段,无法完全承担上部堆载,致使管道产生较大沉降变形。同时,位移计 P-DG2 所在测点的位移始终很小(-0.6 mm),说明堆载的影响范围有限,仅集中在加载中心附近。管道位移变化规律与覆土表面位移规律一致:管道测点距离堆载中心越近,变形越显著,反之变形越小。

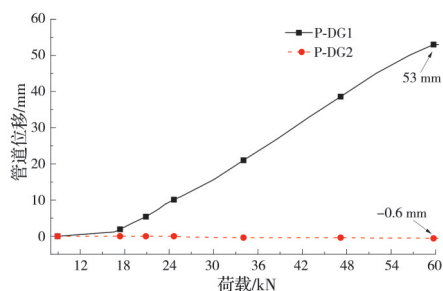


图 10 加载过程中的管道位移

Fig. 10 Displacements of the pipeline in loading process

图 11 为堆载达到 60 kN 时管道位移与覆土表面位移的受力分析示意图。在整个试验过程中,上部堆载产生的附加应力通过土体传递至管道,形成主要竖向作用力,使管道呈横梁式弯曲并向两端扩展^[27]。但由图 9、图 10 可知,位移计 S-DG4 处的地表与位移计 P-DG2 处的管道均出现轻微隆起(位移为负值)。管道整体下沉会压缩下部土体,土体孔隙被挤压减小、密实度提高,进而产生竖向土抗力;管道两端近似铰支座的支撑位置会对管道施加向上约束作用。当竖向土抗力与两端支座向上约束力的合力大于管道向下位移产生的作用力时,土体即可抑制管道持续下沉,局部区域出现隆起。隆起段管道会对上部覆土施加向上的反向作用力,进而引起对应位置覆土表面隆起。

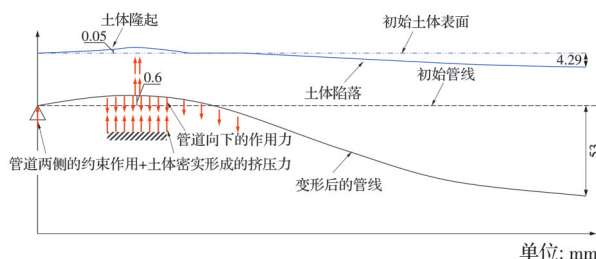


图 11 加载过程中管道与土体表面位移的力学示意图

Fig. 11 Mechanical diagram of displacements of the pipeline and the soil surface in loading process

3.3 土压力及管道外壁压力

图 12、图 13 分别为加载过程中试验土体土压力与管道外壁压力的变化曲线。由图 12、图 13 可知,土压力与管道外壁压力均随堆载的增加而增大;堆

载正下方的管道外壁压力值远高于堆载中心轴线两侧 1 500 mm 位置(压力计 PS1、PS2、PS5、PS6 测点)。

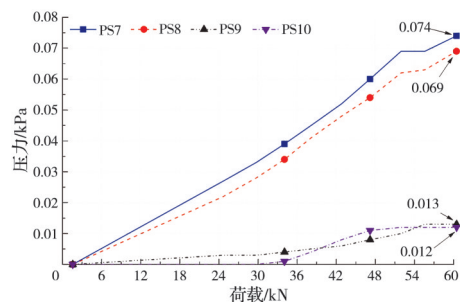


图 12 加载过程中的土体压力

Fig. 12 Soil pressures in loading process

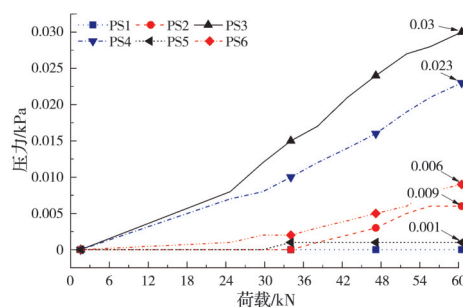


图 13 加载过程中的管外壁压力

Fig. 13 Outer pipe wall pressures in loading process

图 12 中浅层土内压力计 PS7、PS8 测点(埋深分别为 200、350 mm)的土压力随荷载的增加呈显著线性上升趋势,荷载达到 60 kN 时,二者土压力分别为 0.074、0.069 kPa。同时,压力计 PS7 测点的土压力始终高于压力计 PS8 测点,说明堆载作用力随深度的增加而逐步衰减,浅层区域仍存在明显应力传递。与之对比,深层土体内压力计 PS9、PS10 测点(埋深分别为 840、1 090 mm)的土压力峰值仅分别为 0.013、0.012 kPa,压力增幅较小。产生该现象的原因可能是土体受荷载作用产生轻微压缩,部分应力向下层土体传递。以上规律说明,大荷载作用下浅层覆土土压力大幅提升,深部土层应力状态相对稳定,堆载向深部土体的应力传递作用显著减弱,土体具备一定应力缓冲效果。由此可见,堆载压应力的影响存在显著的深度衰减规律,浅层覆土承担绝大部分堆载荷载,深层土体受力变化较小。深入分析可知,试验全过程压力计 PS10 测点的压力偶尔高于压力计 PS9 测点。其原因是埋深持续增大,堆载产生的附加应力不断消散,场地存在临界埋深,超过该深度后土体自重应力成为土压力主要组成部分。

如图 13 所示,堆载中心下方管顶(压力计 PS3 测点)的压力显著增大,峰值达到 0.03 kPa 时,堆载中心轴线两侧 1 500 mm 处管顶(压力计 PS1、PS5

测点)压力相对较小。堆载中心下方管底(压力计PS4测点)的压力始终小于PS3,但大于PS2、PS6。该现象表明管道外壁压力随土层深度的增加逐层递减,存在明显竖向分布特征,同时具备区域集中分布规律。地面堆载产生的土体附加应力以竖向为主要传递方向,横向可大范围扩散,该横向压力随传递距离的增加逐步衰减^[28]。理想半无限弹性介质中,地表施加点荷载时,土体竖向压力呈圆形分布,压力峰值集中于荷载中心,距中心越远土体压力越小^[29]。针对堆载作用下的管道外壁压力,管顶压力明显高于管底。以堆载中心下方测点为例,管顶压力峰值为0.03 kPa,管底为0.023 kPa。但在荷载中心轴线两侧1 500 mm位置,管顶压力反而低于管底。原因是堆载作用下管道受力变形近似简支梁,整体向下变形,对管底土体产生较大压力;土体与管道自重共同作用于管底,进一步增大了管底受力。

4 结论

基于自主开发的管道试验系统,对埋地PE管道的力学响应开展模型试验研究,分析埋深600 mm工况下PE管道的力学特性,结果表明:

1)堆载作用下PE管道应变随荷载的增大发生明显变化,整体呈现由管道中部(堆载中心下方)向管端递减的分布规律。管道应变呈阶段性增长特征,缓慢增长阶段平均增幅40%,快速增长阶段平均增幅76.3%。堆载作用下管道受力以轴向拉伸为主。

2)管道应变峰值集中在堆载中心附近,呈明显轴对称分布,同一轴向位置的应变增长趋势相近。土体的侧向挤压与支撑作用使管道不同区域应变状态存在差异;管道横截面竖向(管顶、管底)应变大于横向(左、右两侧)。卸载后管道形变恢复缓慢,残余应力会延长其变形恢复时长。

3)土体与管道位移均随与堆载距离的增大而逐步减小。堆载作用使上部覆土产生地表沉降。埋地PE管道受力等效于横梁,堆载荷载作用下产生梁式弯曲变形,受荷段与非受荷段管道位移差值可达52.7 mm。管道发生位移时,两端受竖向土抗力与约束作用形成反向支撑,致使管道及周边土体产生轻微隆起。

4)堆载作用下,土压力与管道外壁压力均随荷载的增加而不断增大,具备深度衰减、区域集中的分布特征。浅层土体承担大部分堆载荷载,深层土体应力逐步衰减,土体体现显著缓冲效应。同时,

管顶压力明显高于管底,管道中段受力最为突出,远离堆载中心轴线位置的管顶压力相对较小。在地面堆载与土体自重作用下,管道存在临界埋深。

参考文献

- [1] 凌晓,程凌宇,郭凯,等.基于ResNet模型的聚乙烯燃气管道接头缺陷识别算法[J].压力容器,2023,40(7): 73-80.
Ling X, Cheng L Y, Guo K, et al. Defect recognition algorithm of polyethylene gas pipeline joint based on ResNet model[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(7): 73-80. (in Chinese)
- [2] Alsabri A, Al-Ghamdi S G. Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: perspective on environmental performance[J]. Energy Reports, 2020, 6: 364-370.
- [3] 郑度奎,李敬法,宇波,等.临氢环境中聚乙烯管道寿命预测方法探讨[J].油气储运,2023,42(8): 882-893.
Zheng D K, Li J F, Yu B, et al. Lifetime prediction method for polyethylene pipeline in hydrogen environment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 882-893. (in Chinese)
- [4] Ma Q, Yin H L, Xi L, et al. Physical model test investigation of mechanical properties of double pipe culverts subjected to vertical loading[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2024, 15(1): 04023048.
- [5] 王雨,陈文化,王凯旋.地层非均质成层性对地下管道的变形影响[J].岩土工程学报,2018,40(5): 900-909.
Wang Y, Chen W H, Wang K X. Effect of soil stratification on deformation of buried pipelines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 900-909. (in Chinese)
- [6] 帅健,王晓霖,叶远锡,等.地面占压荷载作用下的管道应力分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(2): 99-103, 108.
Shuai J, Wang X L, Ye Y X, et al. Stress analysis of pipeline subject to surface load[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 99-103, 108. (in Chinese)
- [7] Liang Z, Yang Q, Zhang J, et al. Mechanical analysis of buried polyethylene pipelines under ground overload[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(1): 193-203.
- [8] 李扬,葛华,汤明高,等.堆载作用下埋地管道应力影响因素及失效荷载研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(12): 33-42.
Li Y, Ge H, Tang M G, et al. Research on stress influencing factors and failure load of buried pipeline under

- ground load[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(12): 33-42. (in Chinese)
- [9] 王亮, 廖柯熹, 何国玺, 等. 地面堆载对高后果区埋地管道承载能力的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6084-6091.
- Wang L, Liao K X, He G X, et al. Influence of surface surcharge on bearing capacity of buried pipeline in high consequence area[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6084-6091. (in Chinese)
- [10] 詹辉. 地面堆载对坚硬地基和软土地基中沟埋式天然气管道的影响差异评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 57-63, 94.
- Zhan H. Evaluation of the effect of landfilling on trenching natural gas pipelines with solid foundation and soft foundation[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 57-63, 94. (in Chinese)
- [11] 王建华, 杨召焕. 轴向荷载作用下管与软土相互作用模型试验[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 61-65.
- Wang J H, Yang Z H. Model test of interaction between pipe and soft soil under axial load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 61-65. (in Chinese)
- [12] 李长俊, 马树锋, 季楚凌, 等. 地面堆载对埋地管道的安全影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 23-28.
- Li C J, Ma S F, Ji C L, et al. Study on influence to safety of buried pipelines caused by ground loads[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 23-28. (in Chinese)
- [13] 管凌霄, 徐长节, 可文海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平位移研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 54-62.
- Guan L X, Xu C J, Ke W H, et al. Analysis of horizontal pipeline deformation caused by shield tunnelling[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 54-62. (in Chinese)
- [14] Zhu B, Jiang N, Zhou C B, et al. Dynamic interaction of the pipe-soil subject to underground blasting excavation vibration in an urban soil-rock stratum[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104700.
- [15] 刘鹏, 张宇, 李玉星, 等. 连续沉降过程中管土相互作用规律[J]. 油气储运, 2024, 43(3): 332-341.
- Liu P, Zhang Y, Li Y X, et al. Pipe-soil interaction during continuous settlement[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 332-341. (in Chinese)
- [16] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 大直径回填钢管管土相互作用研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(10): 1053-1061.
- Wu H G, Yu J H, Shi C Z, et al. Pipe-soil interaction of large-diameter buried steel pipe[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(10): 1053-1061. (in Chinese)
- [17] Liang Z, Yang Q, Zhang J, et al. Mechanical analysis of buried polyethylene pipelines under ground overload[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(1): 193-203.
- [18] Wang J, Wang L, Chen Q Y, et al. Model tests of the raw-water pipeline under the excessive stacking load[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 994862.
- [19] Malta E R, Dong X Y, Shiri H. Decoupled analysis of a multi-layer flexible pipeline buried in clay subjected to large lateral soil displacement[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(7): 1238.
- [20] 刘希亮, 赵光思, 罗静. 高应力下界面剪切体积应变影响因素分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(1): 92-94, 119.
- Liu X L, Zhao G S, Luo J. The affecting factors analysis on the shearing volumetric strain of the interface under high pressure[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(1): 92-94, 119. (in Chinese)
- [21] 曹鹏, 吴明, 刘广鑫, 等. 城镇燃气埋地含缺陷聚乙烯管道应力分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 77-81.
- Cao P, Wu M, Liu G X, et al. Stress analysis on buried urban gas PE pipeline containing defects[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 77-81. (in Chinese)
- [22] Masada T, Sargand S M. Peaking deflections of flexible pipe during initial backfilling process[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(2): 105-111.
- [23] 孙鹏飞, 汪磊, 吴奇峰, 等. 考虑非均匀地基原水管道受力特征模型试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 59-65.
- Sun P F, Wang L, Wu Q F, et al. Model test study on mechanical characteristics of raw water pipeline considering non-uniform foundation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 59-65. (in Chinese)
- [24] 朱分清, 陈群. 车辆荷载对不同压实度黏土路堤沉降的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13893-13898.
- Zhu F Q, Chen Q. Influence of vehicle loads on settlement of clay embankment with different compaction degree[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13893-13898. (in Chinese)
- [25] 吴玉国, 高勇飞, 帕尔哈提·阿布都克里木, 等. 沙丘地质下悬空输油管道力学特性分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 146-153.
- Wu Y G, Gao Y F, Paerhati A, et al. Analysis on

- mechanical characteristics of suspended oil pipeline under sand dune geology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 146-153. (in Chinese)
- [26] 崔蓬勃, 朱永全, 刘勇, 等. 非饱和砂土隧道土拱效应模型试验及颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3451-3466.
- Cui P B, Zhu Y Q, Liu Y, et al. Model test and particle flow numerical simulation of soil arch effect for unsaturated sandy soil tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3451-3466. (in Chinese)
- [27] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 232-239.
- Wang L P, Zhang W J, Zhao S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 232-239. (in Chinese)
- [28] 饶佩森, 李丹, 孟庆山, 等. 循环荷载作用下钙质砂地基土压力分布特征研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1579-1586, 1600.
- Rao P S, Li D, Meng Q S, et al. Study on earth pressure distribution characteristics of calcareous sand foundation under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1579-1586, 1600. (in Chinese)
- [29] 付海清, 伊纪祥, 冯陆伟, 等. 考虑上覆压力影响的现场液化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 558-566.
- Fu H Q, Yi J X, Feng L W, et al. In-situ liquefaction tests considering effects of overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 558-566. (in Chinese)
- (编辑 朱备)