

超载工况下固化土回填对埋地管道的变形调控机制研究

李超

(浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州 311202)

摘要: 施工区土体在超载条件下产生的过大沉降,会导致埋地管道变形超限甚至破坏。采用固化土回填方式可以有效地控制地下埋管变形。为分析地面车辆超载对固化土回填前后地下埋管应力变形的影响,分别建立固化前后三维实体模型,分析土体固化回填前后埋管竖向变形、横向变形、轴向变形与对应应力情况。结果表明:埋管变形主要表现在竖向,原状土工况下,地下埋管整体沉降和局部沉降均较大,变形量最大达27.6 mm,应力超过安全标准;土体固化回填后可有效避免埋管出现应力集中现象,埋管变形控制效果明显,最大应力在安全许用范围内。

关键词: 埋地管线;管线变形;固化土回填;地面超载;车辆荷载

中图分类号: TU94

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0069-05

Research on Deformation Control Mechanism of Stabilized Soil Backfill for Buried Pipelines under Overload Conditions

LI Chao

(Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311202, China)

Abstract: Excessive settlement of soil in the construction zone under overload conditions can lead to deformation exceeding design limits or even failure of buried pipelines. The application of stabilized soil backfill method can effectively control the deformation of buried pipelines. To analyze the impact of ground vehicle overload on stress and deformation of buried pipelines before and after stabilized soil backfill, the three-dimensional solid models before and after stabilization are established to analyze the vertical deformation, lateral deformation, axial deformation and corresponding stress conditions of the buried pipe before and after the stabilization and backfilling of the soil. The results indicate the pipeline deformation predominantly occurs in the vertical direction. Under the natural soil conditions, both the overall settlement and localized settlement of the buried pipeline are substantial, the maximum deformation reaches 27.6 mm and the stress exceeds the safety standards. After the soil is stabilized and backfilled, the stress concentration phenomenon in the buried pipe can be effectively avoided. The deformation control effect of the buried pipe is obvious, and the maximum stress is within the safe allowable range.

Keywords: buried pipeline; pipeline deformation; stabilized soil backfill; ground overload; vehicle load

0 引言

地下埋管是城市给排水工程、燃气工程等地下市政网络的主要载体,在维系现代城市功能方面有着举足轻重的作用。在市政工程建设中,土体开挖、隧道盾构、堆载都会引起土体应力变化,从而引起管线变形破坏。在理论推导方面,前人已有丰富的研

究。龚晓南等^[1]基于Winkler弹性地基梁理论应用Boussinesq解考虑土体沉降及侧向移动,建立地面超载对埋地管线影响计算模型。徐长节等^[2-3]在Pasternak地基梁模型求解管线受力变形基础上进一步推导基于Kerr地基梁模型并考虑侧向土体作用下管线的纵向变形解析解。杨毅哲^[4]将地理管线假定为连续刚体,采用Pasternak模型推导了堆载情况下管线位移方程。王雨等^[5]基于弹性层状理论,利用传递矩阵法和有限差分法建立了能够考虑土体非均质条件下的地下管道变形计算方法。在物理模型实验方面,Wang等^[6]通过模型试验讨论了不同地表堆

收稿日期: 2025-07-06

基金项目: 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金资助项目(Y202403)

作者简介: 李超(1990—),男,硕士,工程师,从事隧道及地下工程、岩石结构面等方面的研究工作。

载下管道变形过程。梁爱武等^[7]基于地层-结构法开展排管结构在均布荷载作用下的模型试验,提出使用曲率半径描述管线的纵向变形的指标。郝凤发^[8]使用土箱埋地试验探究燃气管道在地面荷载作用下的受力性能。孙鹏飞^[9]利用缩尺模型对不同埋深条件下原水管道受力特征进行分析,综合研究管道外径、管道埋深、加载值和加载方式等因素对管道受力影响。吴奇峰^[10]采用量纲分析法得出模型试验相似比,并根据相似比进行模型箱的设计、管道材料的选取和重塑土的配制,研究不同工况下管道的受力特征。模型试验虽然结果精确,但往往需要设备及场地、大量的材料,同时试验成本较高,试验周期较长,而数值模拟材料参数及边界条件可以随时改变,具有模型实验不具备的灵活性与通用性。因此,许多学者通过数值模拟的方法探究管线对地表堆载的力学响应。在数值模拟方面,Wang等^[11]使用Plaxis 2D研究了钢增强高密度聚乙烯管线(SRHDPE)在不同厚度土壤覆盖层下的最大挠度。孙忠菊^[12]使用ABAQUS数值模拟软件研究了埋地管道在地面超载作用下的力学性能。Zhang与Liang等^[13-14]分别建立三维管道土体实体模型,分析了在地面超载作用下管线变形与土体参数、管线参数、压力之间的关系。综上所述,对于地面超载对管线影响,前人已有大量研究,然而关于土体固化对埋地管道承载状态提升的研究较少。本文基于实际工程,采用数值模拟分析固化土回填前后管线的力学性能,以探究固化效果对管线的影响,可为类似工程提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

杭州地铁15号线钢材堆场区主要承担钢材运输及临时堆放功能,需长期通行100吨级重型卡车,属于典型地面超载工况。场区地下4~5 m处设置埋管(见图1),地面超载会引发土体变形及应力传递,从而对埋管造成不利影响,主要表现为土体沉降导致埋管变形超限、应力集中引发埋管结构安全隐患、施工过程对埋管的附加扰动等,且由于场区功能需求紧迫,并需要短期内强度达到要求,因此,需要采取一定的措施保证地下埋管的安全。

1.2 方案选择

针对车载超载工况下埋地管道的变形控制需求,工程中常用的管线保护或地基加固方法详见表1。为科学决策,对潜在可行方案进行了详细的技术

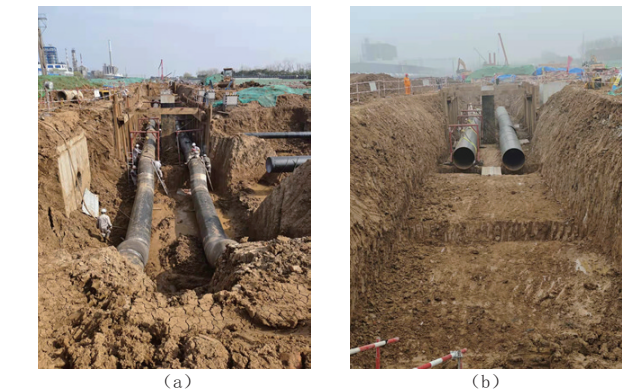


图1 地下埋管现场布置

经济比选,比选要点涵盖技术原理、优缺点、关键控制因素、单位造价及依据、适用性(工期/效果)等方面。比选方案包括固化土回填、级配砂石回填、灰土挤密桩、采用高强度管材、增加壁厚或设置套管。加固方法对比见表1。

表1 管线加固方法对比

方法类别	具体方法	优点	效果评价
加强回填强度类	固化土回填	强度提升显著,整体性好,能有效控制差异沉降和应力集中,施工相对便捷	7~14 d强度可达设计值,适配短期强度要求。效果显著,从土体改良根源解决问题
	级配砂石回填	材料来源广,施工工艺成熟,透水性好	需分层摊铺压实,每层厚度控制严格,工期较长(预计需3~4周),无法满足短期强度要求。效果中等偏下,沉降控制不如固化土
	灰土挤密桩	能同时处理较深范围土体,复合地基承载力提升明显	施工周期长(成桩+养护>4周),无法满足短期强度要求。效果较好,但成本高、工期长,且施工期扰动风险大
增强管道性能类	高强度管材	直接提高管道自身抗变形、抗屈服能力	采购周期可控,但沉降问题未解决,且更换管道成本极高、实施困难。效果有限,仅提升管道安全裕度
	增加壁厚/套管	提高局部抗压、抗冲击能力	实施周期相对较短,但沉降未解决,成本增加显著,且仅为局部加强,整体风险依然存在。效果有限

通过综合比选可知:从技术效果来看,固化土回填、灰土挤密桩能从根源上改善土体性能,有效控制沉降和管道应力,效果最优。级配砂石效果有限。管道增强类方案无法解决沉降问题;从工期适应性来看,固化土回填可在7~14 d内达到设计强度,是唯一满足本工程“短期内强度达标”紧迫需求的方案。级配砂石、灰土挤密桩施工及强度形成周期过长(>3~4周);从经济性来看,固化土回填单位造价(180~220元/m³)虽高于级配砂石(120~150元/m³)和

原状土(约 50 元/m³),但显著低于灰土挤密桩(200~250 元/m³)。管道增强类方案(尤其是更换高强管或套管)成本极高。综合性价比(效果/成本/工期)考虑,固化土回填最优;从安全与环保来看,固化土施工扰动小,对邻近管道影响小。灰土挤密桩施工振动风险大,生石灰消解存在安全环保隐患。级配砂石对压实要求高,质量控制难。

因此,尽管固化土回填材料成本并非最低,但其在快速提升地基强度、有效控制管道变形与应力、施工便捷性和综合成本效益方面的优势突出,是适配本工程“短期高强度承载”与“保障埋管安全”双重目标的^{最佳方案}。为深入理解其作用机制,后续通过数值模拟分析超载工况下固化土回填对埋地管道变形的调控效果。

2 数值模拟

2.1 模型建立

本计算拟通过 ABAQUS 有限元软件,对路面荷载条件下固结土层埋管承载状态进行评估。由于土体为回填土,未经过长期固结沉降过程,故采用摩尔库伦本构模型;整体模型尺寸为 30 m×30 m×20 m,土层分为两层,总厚度为 20 m,上层为固化土,下层为原状土,建立整体有限元模型,如图 2 所示。

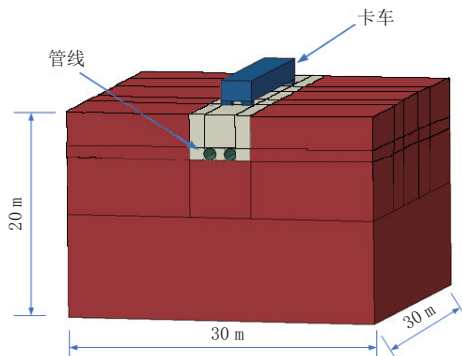


图 2 有限元计算模型

路面有重型卡车通行,100 吨级重型卡车模型尺寸为 17 m×3 m;土中有两根埋管,埋管底部距离地面 4.4 m,管径 1.2 m,壁厚 12.7 mm,两管中心间距 2 m,弹性模量 200 MPa。

2.2 材料参数

根据地勘报告及实验室试验结果,砂质黏土压缩模量为 4.57×10⁶ Pa,根据贾堤等^[15]压缩模量在建模时需换算弹性模量。固化土参数通过与本工程相同土源(砂质黏土)和设计配合比(水泥掺量 15%)的室内试样,参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—

2019)进行无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验和固结试验确定。弹性模量取三轴试验在预期应力水平下的割线模量,凝聚力和内摩擦角由三轴剪切试验结果确定。其强度与模量值显著高于原状土,符合工程预期。得到的土层计算参数取值,详见表 2。

表 2 模型土层计算参数

土层名称	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ (N·m ⁻²)	泊松比	凝聚力/ kN	摩擦角
固化土	1 875	3×10 ⁷	0.3	35	16.3
砂质黏土	1 800	5.35×10 ⁶	0.3	29	14.8

2.3 荷载模拟

路面通行车辆为 100 吨级重型卡车(总重≈1 000 kN)。为真实模拟其荷载特性,荷载分布主要考虑后轴荷载(约占整车重 70%)。典型 100 吨卡车后轴为双轴 8 轮组,单轴重约 350 kN,单轮重约 87.5 kN。轮印面积参照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)及车辆实际参数,采用等效矩形轮印。单轮接地尺寸取 0.6 m(长)×0.3 m(宽),面积为 0.18 m²。

车辆在堆场行驶,轮载位置可变。基于 Boussinesq 弹性半空间理论,考虑表层轮载集中力向管道埋深(4.4 m)处的应力扩散影响,为考虑最不利影响并简化计算,将双后轴 8 个轮载等效为作用于模型中心区域上的均布荷载。经 Boussinesq 理论推算,在管道埋深处的附加竖向应力峰值小于 20 kPa。为安全计,本模拟将 20 kPa 作为控制值施加于路面模型区域,以评估其对管道的影响。

3 结果分析

3.1 土层变形情况

土体固化前后土层变形情况如图 3、图 4 所示,土体未固化时,路面荷载引起局部不均匀沉降,车轮与地表接触沉降量最大达 27.6 mm;土体固化后,路面荷载引起土层整体沉降变形呈现向地层周边扩散现象,地表处沉降最大,沉降量最大达 9.4 mm,实测最大沉降量为 8.3 mm,地表沉降对比如图 5 所示。

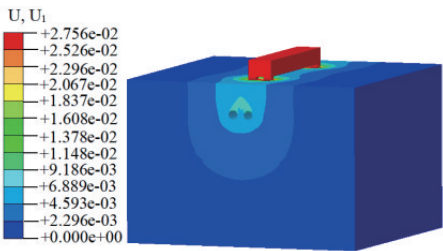


图 3 土体未固化时竖向位移云图

由图 5 可知,未加固土层整体沉降 7.25 mm,不均匀沉降接近 2 cm,这是由原土较为松软,压缩模量较

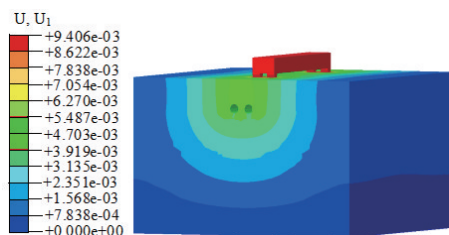


图4 土体固化后竖向位移云图

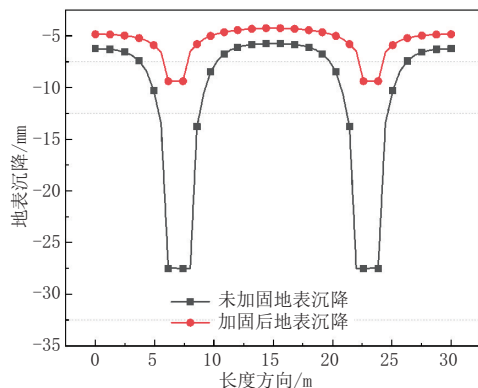


图5 地表沉降对比

低造成的。经过固化土回填后,整体沉降减小到5 mm,不均匀沉降控制在4.5 mm,加固效果良好。

3.2 埋管变形情况

土体未固化条件下,土中埋管呈现向模型下方及两侧变形的趋势,最大值达8.42 mm,较危险(见图6)。土体回填加固后,管线表现为整体下沉,主要为钢管竖向沉降变形,钢管本身被压扁的趋势不明显,且总体变形量值仅为5.7 mm,满足规范要求(见图7)。

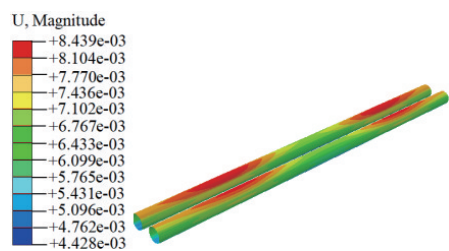


图6 未加固埋管整体变形

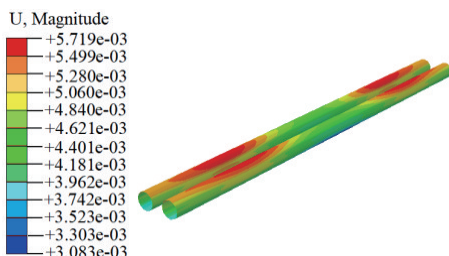


图7 加固后埋管整体变形

由于左右两根管线变形结果高度对称,取左侧管线对其竖向位移、水平方向位移及轴向位移进行分析,如图8、图9所示。

由图8可知,管线的上表面竖向位移大于下表面竖向位移,原因是上表面为主要承压面。同时,原状

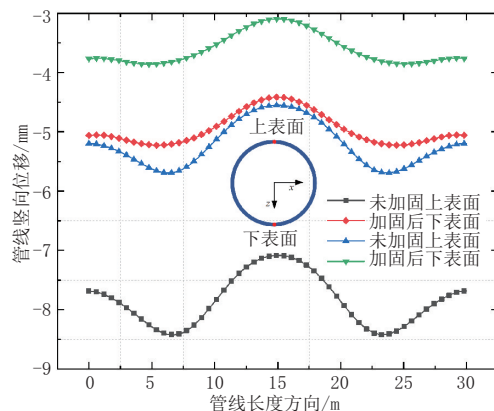


图8 管线竖向位移

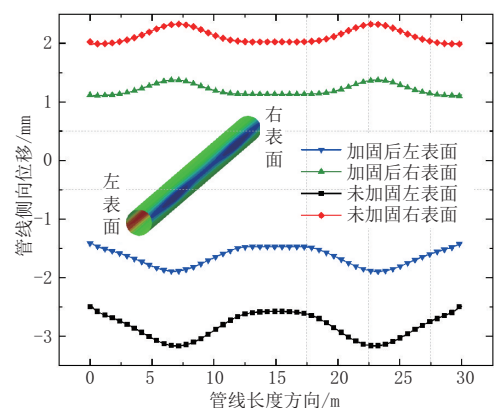


图9 管线侧向位移

土中加载后管线上下表面竖向位移差值最高达3.3 mm,而加固土回填后的管线上下表面竖向位移差值最大仅1.1 mm,实测值为0.7 mm。原状土中由于土体压缩模量较低,导致管线受力集中,上下表面位移趋势相差较大,易造成管线泄露;加固土回填加固后,土体强度提高,管线受力较为均匀,上下表面竖向位移趋势趋近,管线较为安全。对于管线侧向位移,由图9可知,原状土管线左右表面侧向位移之和最大达5.4 mm,回填加固后左右表面侧向位移之和缩小到3.3 mm。同时,由于是并行管线,相邻侧管线起到一定的挡土作用,因此左侧管线的右表面侧向位移较小,左表面侧向位移较大。

对于存在接头的管线,接头处为薄弱环节,为避免管线在接头处拉伸破坏,取管线上下表面的轴向位移进行分析,如图10所示。原状土中管线上下表面轴向位移大于加固回填后管线轴向位移,但差值并不明显。因此,固化土回填对管线的轴向变形控制作用有限。

3.3 埋管应力情况

埋管应力情况如图11~图14所示。在原状土中,钢管 Mises 应力最大处发生在钢管上端,最大值为92.4 MPa,最大主应力为102.3 MPa。钢管屈服强

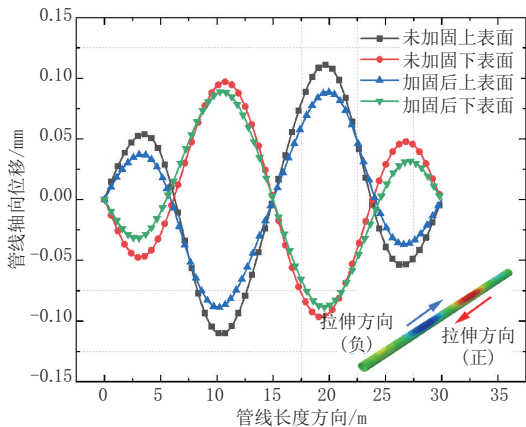


图 10 管线轴向位移

度为 235 MPa,许用应力为 117.5 MPa,接近许用应力,较为危险。固化土回填加固后,由于钢管变形量较小,应力也对应较小,Mises 应力最大处发生在钢管上端,最大值为 56 MPa,最大主应力的最大值为 62 MPa,而钢材的屈服强度为 235 MPa,许用应力为 117.5 MPa,目前的应力状态远未达到屈服强度,因此钢材大部分区域仍处于弹性阶段,塑性表现不明显。

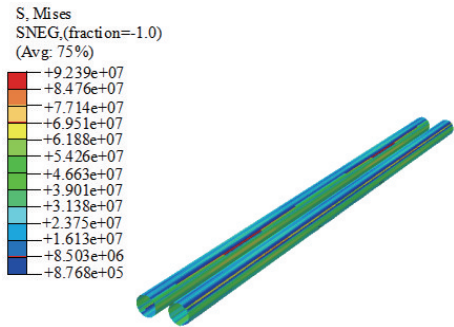


图 11 未加固管线 Mises 应力

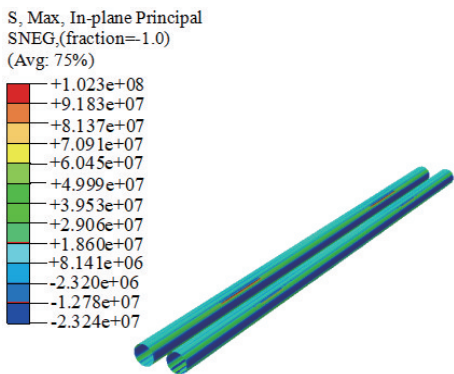


图 12 未加固管线最大主应力

4 结 论

为探究地下埋管在土体固化前后的不同受力状态,建立车辆荷载与地下埋管模型,分析土体固化前后地下埋管应力变形状态,得到如下结论。

(1)原状土工况下,路面荷载引起土层整体沉降和局部沉降均较大,变形量最大达 27.6 mm;原状土

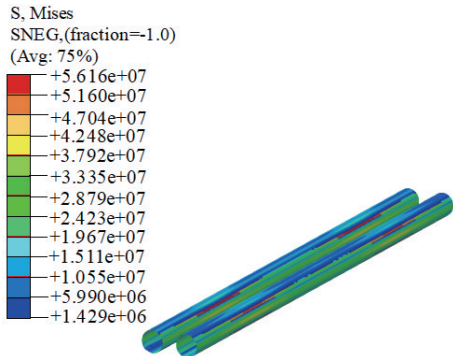


图 13 加固后 Mises 应力

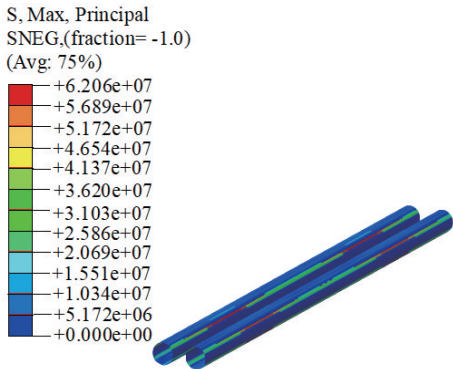


图 14 加固后最大主应力

条件下管线上下表面差异变形最大达 3.3 mm,左右表面侧向位移之和最大达 5.4 mm;管线最大应力超过许用应力。

(2)采用综合比选确定的固化土回填方案后,路面荷载引起土层整体沉降变形呈现向地层周边扩散现象,地表变形最大,变形量最大可达 9.4 mm,实测最大变形量为 8.3 mm,与原状土相比,变形量显著变小。回填加固后埋管上下表面差异变形为 1.1 mm,实测为 0.7 mm,左右表面侧向位移之和最大达 3.3 mm,变形量显著变小。固化后的土层避免了应力集中现象,回填后的管线应力在安全使用范围内,回填效果显著。

参考文献:

[1] 龚晓南,孙中菊,俞建霖.地面超载引起邻近埋地管道的位移分析[J].岩土力学,2015,36(2):305-310.
[2] 可文海,管凌霄,刘东海,等.盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J].岩土力学,2020,41(1):221-228;234.
[3] 何小龙,杨天鸿,周云伟,等.考虑管-土分离的基坑开挖引起邻近地下管线位移分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):9-16.
[4] 杨毅哲.堆载对软土区埋地管线的影响分析[D].徐州:中国矿业大学,2021.
[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.
[6] Wang D Y, Zhu H H, Wang B J, et al. Performance evaluation of buried pipe under loading using fiber Bragg grating and particle image

(下转第 98 页)