

文章编号:1671-6833(2019)01-0062-05

脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析

李 斌<sup>1,2,3</sup>, 方宏远<sup>1,2,3</sup>, 王复明<sup>1,2,3</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 高聚物注浆技术是一种经济高效的排水管道渗漏脱空处置方法,但修复后管道力学性能恢复状态尚不明确.基于 ABAQUS 软件建立了道路结构、路基土体及管道相互作用的三维有限元模型,对比分析了正常管道、脱空管道和高聚物修复管道在交通荷载作用下的纵、环向力学特性.结果表明,交通荷载对其作用位置两侧 6 m 和 4 m 范围内管道的应力和变形影响显著,影响程度与荷载大小呈正相关;各管节处 Mises 应力高度不连续;交通荷载为 1.0 MPa 时管道受力和变形明显大于交通荷载为 0.5 MPa 时;高聚物修复管节脱空后管道受力和变形均恢复到了正常管道水平,达到了可靠有效的修复效果.研究成果为实施针对性管道修复提供了理论依据.

**关键词:** 排水管道; 底部脱空; 交通荷载; 高聚物注浆技术; 力学特性

**中图分类号:** TU992      **文献标志码:** A      **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.014

0 引言

排水管道是现代城市不可或缺的基础设施.随着城市规模不断发展,排水管道建设规模不断扩大.截至 2015 年,我国大中城市排水管道总长度已超过 50 万公里.然而,随着排水管道使用寿命的增加,管道老化严重,由此引发的地面塌陷等事故频发.

排水管道传统修复方式主要是开挖更换,此方法浪费资源且对附近居民生活造成严重干扰.高聚物注浆技术是一种基于高聚物材料的基础设施快速维修技术<sup>[1]</sup>.其原理是将双组分聚合物材料注入管壁外侧,材料反应后迅速膨胀固化,从而达到封堵渗漏、填充脱空的目的,如图 1 所示.目前,该技术已成功应用于多种构筑物加固修复项目中<sup>[2-3]</sup>.

交通荷载作为作用在市政管网上方最主要和最频繁的荷载,是造成管网病害的主因之一,国内外学者围绕交通荷载作用下地下管道力学响应开展了大量研究. Rakitin 等<sup>[4]</sup>实施了交通

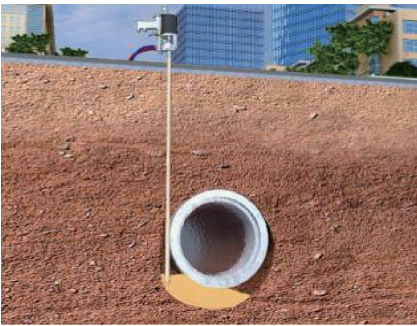


图 1 填充管道脱空和封堵渗漏

Fig.1 Filling the disengaging and sealing the leakage

荷载作用下大口径钢筋混凝土管离心试验,对管节处的力学响应进行了深入研究,结果表明,交通荷载作用位置处管节垂直位移最大;在离心试验的基础上,Xu 等<sup>[5]</sup>开展了有限元分析,其模拟结果与试验结果吻合良好;Meesawasd 等<sup>[6]</sup>基于有限元计算,对交通荷载作用下管道的应力分布进行了详细讨论,认为交通荷载能够显著影响管道力学性能;Alzabeebee 等<sup>[7]</sup>通过建立三维有限元模型,对英国现行管道设计方法进行了验证,对管径和最大垂直位移之间的

收稿日期:2018-01-20;修订日期:2018-05-06  
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802400);国家自然科学基金资助项目(5167853);国家自然科学基金青年基金资助项目(41404096);河南省科技攻关项目(152102310066);郑州大学优秀青年教师发展基金资助项目(1621323001)  
通信作者:王复明(1957—),男,河南周口人,郑州大学教授,中国工程院院士,主要从事基础设施致灾机理与检测修复技术研究,E-mail:fuming573@126.com.

关系进行了讨论;吴小刚等<sup>[8]</sup>基于 Euler-Berhoulli 弹性地基梁模型对交通荷载作用下管道的位移响应进行了解析计算;王直民<sup>[9]</sup>采用 1/4 车辆振动模型,分析了管道在车辆荷载作用下应力分布规律.徐建国等<sup>[10-11]</sup>开展了高聚物修复地下管道沉降与脱空渗漏的研究,结果表明,高聚物修复材料对管道沉降和脱空渗漏有良好的修复效果.

笔者在统筹考虑道路结构、路基土体及管道有机整体和管节接触非线性的基础上,利用 ABAQUS 有限元软件建立了三维数值模型,开展交通荷载作用下正常管道、底部脱空管道和高聚物修复后管道的力学特性研究.

1 有限元模型

1.1 模型参数

模型尺寸采用长×宽×高=12 m×10 m×8 m,道路结构分为面层、基层、底基层和路基,如图 2 所示.其中面层、基层和底基层材料采用线

弹性本构,土体采用 M-C 弹塑性本构,材料参数如表 1 所示,管材为 C30 混凝土管,采用混凝土损伤塑性模型,整个管道模型由 6 节管组成,每节有效长度为 2 m,内径 1.0 m,壁厚 0.1 m,埋深 2 m.在图 2(a)所示处设置一处长 1 m、深 0.1 m 的半环形区域模拟管底脱空.图 3 为 1/2 模型网格,经网格敏感性分析,结合计算机性能,选择管道网格尺寸为 0.1 m,土体网格采用从边界到管道位置逐渐加密的方法.图 4 为单个管节模型.

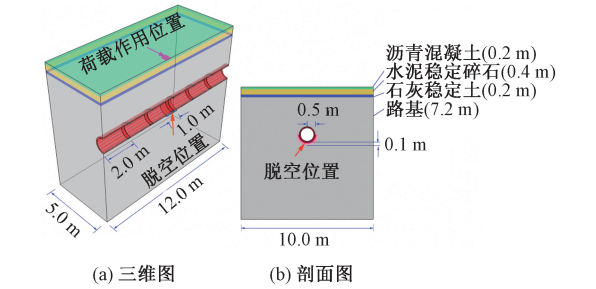


图 2 计算模型图  
Fig. 2 Calculation model

表 1 材料参数表  
Tab. 1 Material parameters

材料	密度 $\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比	黏聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	剪胀角 $\Delta\varphi/(^{\circ})$
沥青混凝土 AC20	2 420	1 200	0.30	—	—	—
水泥稳定碎石 CTB	2 360	1 500	0.25	—	—	—
石灰稳定土	2 200	500	0.35	—	—	—
压实土	2 000	80	0.35	30	30	0
粉质黏土	2 000	100	0.27	40	22	0
高聚物	400	165	0.20	—	—	—

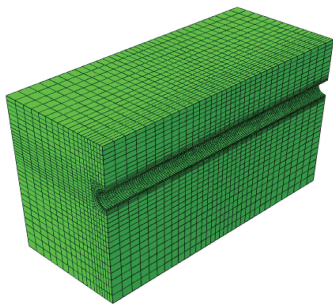


图 3 1/2 结构网格  
Fig. 3 1/2 structure mesh

1.2 接触面模型

在土体与管道、高聚物与管道、管节承口和插口接触位置设置接触单元,用来模拟管道和土体及高聚物的相互作用.切向接触采用罚函数,法向采用硬接触.设  $F_{\text{H}}$  和  $F_{\text{V}}$  分别为接触单元间的摩擦力和法向力; $F'_{\text{H}}$  为接触面未发生滑移时的摩擦力; $K_{\text{t}}$  为黏性系数; $K_{\text{n}}$  为法向刚度; $u$  为切向位

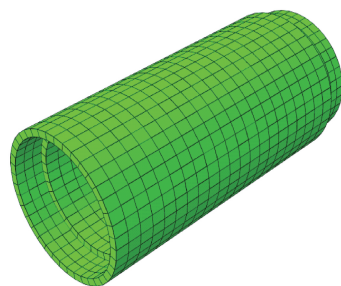


图 4 管节  
Fig. 4 The ppe segment

移; $d$  为法向接触距离,则有:

$$F_{\text{H}} = \begin{cases} K_{\text{t}}u; \\ F'_{\text{H}}, \end{cases}$$
$$F_{\text{V}} = \begin{cases} K_{\text{n}}d, & d < 0; \\ 0, & d > 0. \end{cases}$$

目前,我国管道设计规范仍将交通荷载按静载来考量.假定车辆轴距为 2.0 m,将交通荷载简

化为作用在 0.213 m × 0.50 m 区域内的均布荷载,荷载作用位置如图 2 所示.

2 数值模拟及结果分析

本节将交通荷载设置为 0.5 MPa 和 1.0 MPa,作用在管节 3 正上方,分析不同交通荷载对管道力学响应的影响.

沿管顶正上方纵向取路径,图 5 和图 6 分别为两种交通荷载下管顶 Mises 应力和竖向位移对比曲线.

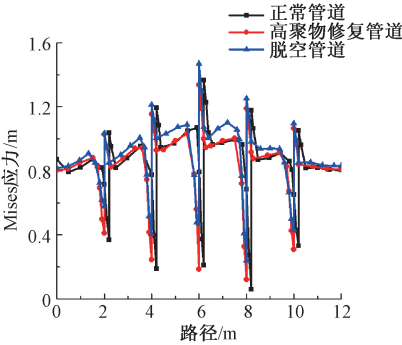


图 5 管顶 Mises 应力对比曲线 (0.5 MPa)  
Fig.5 Comparison of the Mises stress(0.5 MPa)

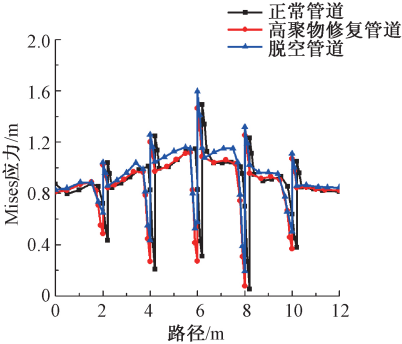


图 6 管顶 Mises 应力对比曲线 (1.0 MPa)  
Fig.6 Comparison of the Mises stress(1.0 MPa)

从图 5 和图 6 可以看出,管顶 Mises 应力并不严格关于荷载作用位置对称. Mises 应力沿荷载作用位置两侧呈递减趋势,且交通荷载为 1.0 MPa 时 Mises 应力从荷载作用位置两侧递减趋势明显大于交通荷载为 0.5 MPa 时. 此外,交通荷载对其作用位置两侧 6 m (0 ~ 6 m、6 ~ 12 m) 范围内的管道影响较大,且交通荷载越大,影响也越大. 三种状态管道 Mises 应力曲线在管节处高度不连续,说明交通荷载作用下管道破坏的危险点位于管节处. 对比图 5 和图 6,脱空管道 Mises 应力明显大于正常管道和高聚物修复管道,且正常管道和高聚物修复管道 Mises 应力极为接近,说明脱空对管道受力影响较大且高聚物材料对脱

空起到了有效修复. 当交通荷载为 1.0 MPa 时,脱空管道在管节 3(即脱空位置)处的 Mises 应力比交通荷载为 0.5 MPa 时大 0.4 MPa 左右,比正常管道和高聚物修复管道大 0.2 MPa 左右.

两种交通荷载下管顶竖向位移对比曲线如图 7 和图 8 所示. 从图 7 和图 8 可以看出,交通荷载作用位置两侧 4 m (2 ~ 6 m、6 ~ 10 m) 范围内沉降明显,说明交通荷载对其作用位置两侧 4 m 范围内管道的沉降影响较大. 0.5 MPa 时脱空管道最大沉降值约为 0.3 mm,其他两种管道最大沉降值约为 0.28 mm,1.0 MPa 时脱空管道最大沉降值约为 0.83 mm,其他两种管道约为 0.53 mm.

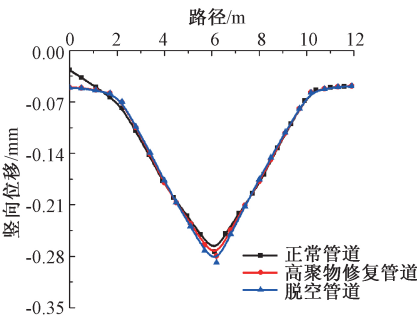


图 7 管顶竖向位移对比曲线 (0.5 MPa)  
Fig.7 Comparison of the vertical displacement (0.5 MPa)

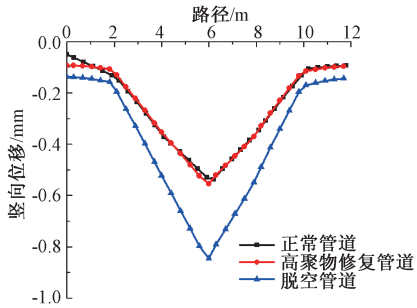


图 8 管顶竖向位移对比曲线 (1.0 MPa)  
Fig.8 Comparison of the vertical displacement (1.0 MPa)

取脱空处承插口环形路径对其 Mises 应力进行分析,图 9 和图 10 为承口 Mises 应力对比曲线 (0°、90°、180°分别代表管顶、管侧和管底,角度沿管周顺时针增大). 从图 9 和图 10 可以看出,两种交通荷载作用下三种状态管道承口处 Mises 应力分布基本一致,管侧(90°)应力最大,管顶(0°)最小. 交通荷载为 0.5 MPa 和 1.0 MPa 时,脱空管道管底 Mises 应力分别在 157.5° ~ 202.5° 区域及 135° ~ 225° 区域内大于其他两种状态管道,其余区域均小于其他两种状态管道,说明脱空处管节(管节 3)在交通荷载作用下发生了小幅度的转

动,使承口管底区域出现应力集中,且应力集中区域随着交通荷载的增大而增大。

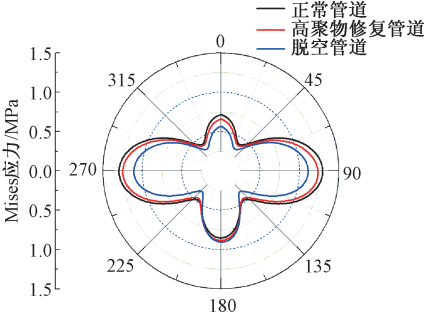


图 9 承口 Mises 应力对比 (0.5 MPa)  
Fig. 9 Comparison of the Mises stress at the bell (0.5 MPa)

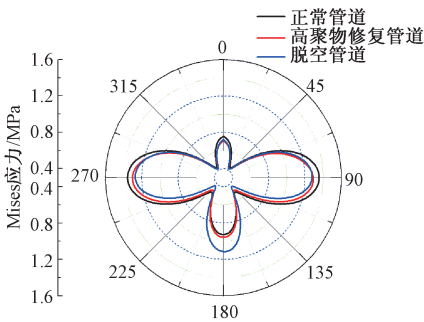


图 10 承口 Mises 应力对比 (1.0 MPa)  
Fig. 10 Comparison of the Mises stress at the bell (1.0 MPa)

图 11 和图 12 为插口 Mises 应力对比曲线。从图 11 和 12 中可以看出,0.5 MPa 交通荷载下插口处管顶(0°)和管底(180°) Mises 应力最大,管侧(90°、270°)最小,1.0 MPa 交通荷载作用下管顶(0°)最大,管侧(90°、270°)最小。0.5 MPa 交通荷载作用下脱空管道整个环向 Mises 应力均小于其他两种状态的管道,1.0 MPa 时除管顶略大于其他两种状态管道外,其余区域均小于其他两种状态管道,在管底 135°~225°区域内表现更为明显,其原因是脱空处管节转动导致承插口发生相对滑动,此时应力主要集中在承口底部,而插口在承口内部,受力反倒最小。

对比图 9~12 正常管道与高聚物修复管道以及高聚物修复管道与脱空管道环向 Mises 应力,可以看出高聚物材料填充脱空后管道脱空处的环向应力恢复到了正常管道的水平,说明高聚物材料能有效修复管道脱空。

3 结论

基于 ABAQUS 建立了埋地管道三维有限元模型,通过计算,对比了不同大小交通荷载作用

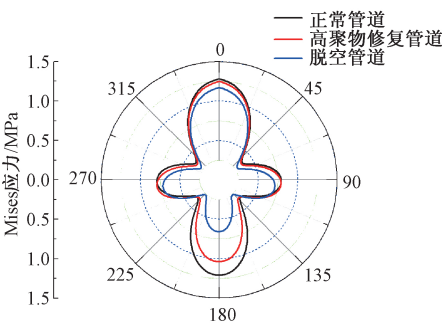


图 11 插口 Mises 应力对比 (0.5 MPa)  
Fig. 11 Comparison of the Mises stress at the spigot (0.5 MPa)

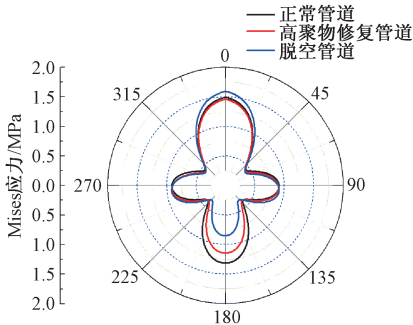


图 12 插口 Mises 应力对比 (1.0 MPa)  
Fig. 12 Comparison of the Mises stress at the spigot (1.0 MPa)

下三种状态管道的力学和位移响应,得出如下结论:

(1)由于管节承插口的非对称性,管顶纵向 Mises 应力和竖向位移曲线并不严格关于荷载作用位置对称。

(2)交通荷载对其作用位置两侧 6 m 和 4 m 范围内的 Mises 应力和竖向位移影响显著,影响程度与交通荷载大小成正比。

(3)各管节处 Mises 应力相对于管身明显增大且不连续,说明交通荷载作用下管道破坏的潜在点位于管节处,实际工程中应将承插口施工作为重点关注对象。

(4)交通荷载作用下脱空管道纵向 Mises 应力、竖向位移均比正常管道大,说明含缺陷地下排水管道受交通荷载影响较大。

(5)交通荷载大小对管道应力和变形影响显著,表征重载车辆对路面结构及下方构筑物存在较大危害。

(6)高聚物修复脱空管道后其纵向 Mises 应力、竖向位移和环向 Mises 应力均大幅减小,说明高聚物修复脱空管道后其受力更趋合理,管道也更加安全稳定,达到了可靠有效的修复效果。



参考文献:

- [1] WEI Y, WANG F M, GAO X, et al. Microstructure and fatigue performance of polyurethane grout materials under compression [J]. Journal of materials in civil engineering, 2017, 29(9): 04017101.
- [2] 李嘉,王博,张景伟,等. 高聚物注浆材料动力特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 198-203.
- [3] SHI M S, WANG F M, LUO J. Compressive strength of polymer grouting material at different temperatures [J]. Journal of wuhan university of technology-Mater Sci Ed, 2010, 25(6): 962-965.
- [4] RAKITIN B, XU M. Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading[J]. Canadian geotechnical journal, 2015, 52(11): 1762-1774.
- [5] XU M, SHEN D, RAKITIN B. The longitudinal response of buried large-diameter reinforced concrete pipewith gasketed bell-and-spigot joints subjected to traffic loading[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 64: 117-132.
- [6] MEESAWASD N, BOONYASIRIWAT C, KONGNU-AN S, et al. Finite element modeling for stress analysis of a buried pipeunder soil and traffic loads [C]// Industrial engineering and engineering management (IEEM). Bali: IEEE, 2016: 385-390.
- [7] ALZABEEBEE S, CHAPMAN D, JEFFERSON I, et al. The response of buried pipes to UK standard traffic loading[J]. Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering, 2016, 170(1): 38-50.
- [8] 吴小刚,吴军,宋洁人. 交通载荷下管道的位移响应分析初探[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 14-15.
- [9] 王直民. 交通荷载作用下埋地管道的力学性状研究[D].杭州:浙江大学建筑工程学院, 2006: 1-154.
- [10] 徐建国,胡会明,李松涛,等. 地下管道脱空渗漏高聚物注浆抬升修复与数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 35-40.
- [11] 徐建国,胡会明,钟燕辉,等. 地下管道沉降与脱空高聚物注浆修复数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1165-1172.

Analysis of the Mechanical Characteristics of Disengaging Drainage Pipe Before and After Polymer Repairing

LI Bin<sup>1,2,3</sup>, FANG Hongyuan<sup>1,2,3</sup>, WANG Fuming<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University. Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and Transportation Infrastructure Safety, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Polymer grouting technology was a kind of economical and efficient method for leakage pipeline. However, the application of this technology for the restore statue of the mechanical properties of the pipe after repairing was not yet clear. In this paper, the three-dimensional numerical model of the road structure, sub-grade and pipe-soil interaction were established by the ABAQUS software. The longitudinal and circumferential mechanical properties of normal pipe, disengaging pipe and polymer-repaired pipe under traffic load were compared and analyzed. The results showed traffic load had obvious influence on the pipe stresses and deformations in the range of 6 m and 4 m on both sides of its position, and the influence was positively correlated with the amplitude of traffic load. The stresses at the bell and spigot joints were highly discontinuous. When traffic load was 1.0 MPa, the stresses and deformations of the pipe are obviously greater than that of traffic load is 0.5 MPa; The stresses and deformations of the pipe recovered to the normal pipe level after the disengaging was repaired by the polymer, and a reliable and effective repairing effect was achieved. The research results provided a theoretical basis for the implementation of targeted pipe repair.

**Key words:** drainage pipe; disengaging pipe; traffic load; polymer grouting technology; mechanical characteristics