

# 交通荷载作用下地下排水管道动力反应分析

徐 伟<sup>1</sup>,李世坤<sup>2</sup>,王 壬<sup>1</sup>,徐建国<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州 450001;2. 中国人民解放军陆军步兵学院  
石家庄校区,河北 石家庄 050200)

**摘 要** 目的 研究车辆多轮动载对地下排水管道的动力反应,验证高聚物注浆对管道力学性能修复效果。方法 利用 ABAQUS 软件建立带有承插结构的排水管道三维数值模型,并通过编写 Dload 子程序实现对前后轴 4 个不同轮载的施加。计算分析了管道在正常埋置、底部脱空和高聚物注浆修复 3 种工况下的动力反应,并对比了不同管道埋深、不同车辆荷载和不同车速对管道的动力反应的影响。结果 数值分析结果与试验值较为接近,数值模型具有正确性和可靠性;随着管道埋深的增加,土压力呈线性增加;交通荷载越大对管道越不利;交通荷载对管道产生的应变和位移随移动车速的增加呈减小趋势。结论 高聚物注浆可以有效地修复底部脱离的管道。

**关键词** 交通荷载;埋地管道;高聚物注浆修复;数值模拟

中图分类号 TU992

文献标志码 A

## Dynamic Response Analysis of Underground Drainage Pipeline under Traffic Load

XU Wei<sup>1</sup>, LI Shikun<sup>2</sup>, WANG Ren<sup>1</sup>, XU Jianguo<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. The Army Infantry Academy of PLA, Shijiazhuang, China, 050200)

**Abstract:** Dynamic response of vehicle's multi-wheel dynamic load to the underground drainage pipeline is studied in order to verified repair effect of pipeline by polymer grouting. The 3D numerical model of the drainage pipeline with socket structure is established by ABAQUS finite element software. And four wheel loads on the front and rear axle are implemented by Dload subroutine written. The dynamic response of the pipeline under three working conditions of normal burial, bottom evacuation and polymer grouting repair was calculated and analyzed, and the effects of different pipeline burial depths, different vehicle loads and different vehicle speeds on the dynamic response of pipeline were compared. The results show that polymer grouting can effectively repair pipe that has detached from the bottom. And the numerical analysis results are

收稿日期:2020-08-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079128);河南省科技攻关项目(182102210013,212102310289)

作者简介:徐伟(1978—),男,博士,主要从事岩土工程安全修复方面研究。

close to the experimental values, which indicates the accuracy and reliability of numerical model. The numerical analysis results show that with the increase of the pipeline depth, the earth pressure increases linearly. The larger the vehicle load is, the more unfavorable the pipeline. The strain and displacement of the vehicle load on the pipeline decrease with the increase of moving speed.

**Key words:** traffic load; buried pipeline; polymer grouting repair; numerical simulation

排水管道保证了城市居民生活废水、工业废水以及雨水的正常排放,是衡量现代化城市水平的重要标志<sup>[1]</sup>。近年来,我国排水管道建设发展迅速,截至2015年全国大中城市排水管道的总长已超过54万km<sup>[2]</sup>。在交通荷载作用下排水管道灾害事故日益频发,造成其渗漏、脱空和断裂等情况<sup>[3]</sup>。因此,研究排水管道在交通荷载下的脱空修复和动力特性十分必要。范新卓等<sup>[4]</sup>建立了路-管-土系统结构的有限元模型,分析车辆多轮荷载作用下埋地管道的动应力响应特性。吴小刚等<sup>[5]</sup>建立了交通荷载作用下管道的Eular-Bernoulli弹性地基梁受力模型。徐建国等<sup>[6]</sup>采用ABAQUS有限元模拟分析了地下管道经高聚物修复前后在静力荷载及地震荷载作用下的受力与变形特性。王直民等<sup>[7]</sup>将交通荷载简化为不连续的半波正弦荷载,采用有限元法分析了单次和多次交通荷载作用下埋地管道的动力响应规律。王复明等<sup>[8]</sup>建立了道路结构与带承插口的埋地排水管相互作用的三维数值模型,分析了在冲击荷载作用下管道的动力响应。兰国冠等<sup>[9]</sup>采用ANSYS软件分析了穿越公路的输气管道在单轮车辆荷载作用下的力学性状,探讨了横穿道路管道受车辆荷载作用时管道中点应力及竖向位移随时间变化规律。周正峰等<sup>[10]</sup>应用ABAQUS有限元软件,考虑管-土相互作用,分析了管周附加应力的分布特征,计算了飞机、施工用重型车辆双轴双轮荷载及压路机荷载作用下,管道附加应力及其引起的管道结构应力、变形随管道埋深的变化规律。FANG Hongyuan等<sup>[11]</sup>基于有限元探究了排水管道在高聚物注浆修复前后

的力学特性,分析了排水管道在荷载作用下不同工况的力学响应。但大部分数值分析的结果未得到现场试验验证。基于此,笔者以车辆多轮动载对地下排水管道的动力特性研究为基础,采用ABAQUS有限元分析软件,建立了带有承插结构的排水管道三维数值模型,从数值分析和现场试验方面探讨交通荷载作用下埋地管道的动力反应,研究成果将为管道注浆技术、数值建模分析、工程抢险及高聚物注浆推广应用等提供相关指导。

1 地下排水管道足尺试验

1.1 试验设计

试验采用小型设备开挖长宽深为8 m×2.3 m×2.3 m的试验坑进行测试,试验选取3节完整管段和两节半截管段通过承插口连接,有效长度为8 m,管体埋深1.1 m(见图1)。图中P<sub>n</sub>为第n节管道,j<sub>m</sub>为第m个承插口。

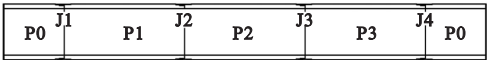


图1 试验管道

Fig. 1 Test pipeline

为了评价高聚物注浆技术应用于脱空管道的修复效果,试验进行了管道正常埋置,管道底部贯穿脱空和高聚物注浆修复3种不同工况下的试验。脱空区设计为沿管底(管臀以下约1/4圆环区域)纵向底部贯穿式空洞,其截面宽度和高度为0.5 m×0.15 m,车辆各轴左侧车轮沿着管线纵向以10 km/h的速度匀速通过试验管道。表1为试验用车整车参数。试验管道应变片布置如图2所示。

表 1 试验用车整车参数

Table 1 Parameters of test vehicle

整车长×宽×高/mm	满载质 量/kg	满载前 轴荷/kN	满载后 轴荷/kN	轴距/ mm	前轮轮 距/mm	后轮轮 距/mm
6 790×2 110×2 900	6 100	20. 3	40. 7	3 815	1 504	1 525



图 2 试验管道应变片布置

Fig. 2 Arrangement of pipeline strain gauge

1.2 试验管道参数

试验管选取的是柔性接头 C 型钢承口 RCPⅢ700×2000GB/T11836,即管段的内径为 0.7 m,壁厚为 0.07 m,长度为 2.0 m。管道材料为 C30 混凝土管,抗压强度为 30 MPa,管内橡胶圈起到密封防渗的作用,符合标准《混凝土和钢筋混凝土排水管》(GB/T 11836—2009)中的规定要求。

1.3 测点布置

试验采用 80 mm 和 30 mm 长的单轴测试应变片,通过粘贴在管道外表面得到钢筋混凝土管结构的力学响应数据。其中较长的应变片沿管线纵向粘贴,较短的沿圆周环向粘贴<sup>[12]</sup>,在管身 3 个截面以及钢承口截面,应变测点沿圆周方向布置,管圆周方向 0°、90°和 180°分别代表管顶、管西测和管底。数据采集采用东华测试技术公司生产的 DH3821 静态及动态应变测试分析系统,通过网线与电脑相连,对参数、采样频率进行设置,每次测试开始前,将所有设备重置归零。

2 地下排水管道数值分析模型

2.1 管道有限元模型建立

利用 ABAQUS 软件对管-土-高聚物模型进行了三维有限元模拟,三维数值模型长宽高为 8 m×10 m×10 m,土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构,橡胶圈变能函数采用文献[13]Mooney-Rivlin 相关参数,模型材料参数如表 2 所示。为了确保数值模型和现场试验结构间的一致性,垂直边界设置为横向约束,底部边界设置为固定约束,考虑管道与土体自重。对管土模型进行网格划分时,采用 C3D8R 六面体单元,整体结构网格和承插口模型如图 3 和图 4 所示。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters					
材料	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模 量/MPa	摩擦 系数	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/kPa
土体	1. 80	60	0. 30	37	28. 5
混凝土	2. 50	3 000	0. 20	—	—
钢材	7. 85	200 000	0. 31	—	—
高聚物	0. 16	18. 2	0. 30	—	—

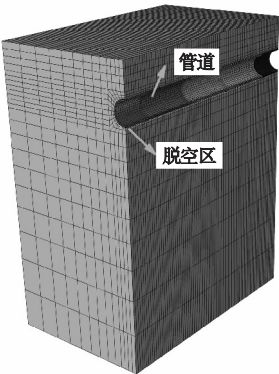


图 3 整体结构网格图

Fig. 3 Grid diagram of overall structure

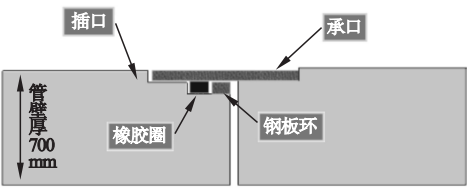


图4 承插口细部图

Fig. 4 Detailed drawing of socket

2.2 接触面模型

管周土体不仅是作用在管道上的荷载,还是增强管道强度和刚度的一种介质<sup>[14]</sup>。在管土交界面设置接触单元,模拟不同介质间产生的相对错动与分离状态。切向采用罚函数,法向采用硬接触,设 $F_s$ 和 $F_n$ 分别为接触单元间的摩擦力和法向力。

$$F_s = \begin{cases} K_t u, \\ F, \end{cases} \tag{1}$$

$$F_n = \begin{cases} K_n d, & d < 0; \\ 0, & d > 0. \end{cases} \tag{2}$$

式中: $K_t$ 为黏性系数; $u$ 为切向位移; $F$ 为接触单元为发生滑移时的摩擦力; $K_n$ 为法向刚度, $d$ 为法向接触距离。

2.3 荷载模型

基于 ABAQUS 用户子程序平台,使用 Fortran 语言编写子程序 Dload,实现两个车轴两侧车轮平行竖向的移动加载过程,用来模拟真实的车辆轮载。需在子程序中定义车辆各轴车轮的起始位置、车轮荷载作用位置、车辆前进的速度、车轮荷载大小和作用尺寸等。轮胎接触面等效为矩形接触面<sup>[15]</sup>,前轴单轮轮胎接地面积为 $0.018\text{ m}^2$ ,后轴双轮胎接地面积为 $0.036\text{ m}^2$ ,轮载大小为在接触面内的均布荷载。图5为荷载移动过程,可以看到在四个轮载作用下土体表面位移的沉降。

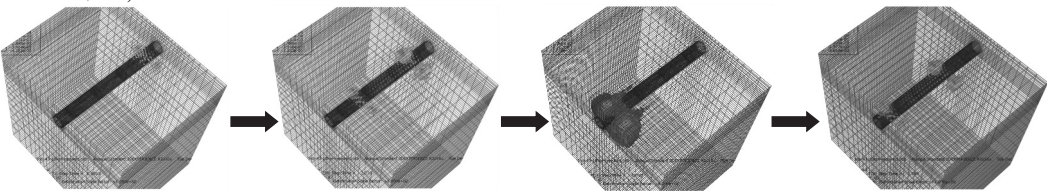


图5 荷载移动过程

Fig. 5 Load moving process

3 结果对比分析

3.1 3种工况下试验值与数值结果比较

为了验证模型的有效性,选取 J3 钢承口

截面底部应变数据在正常埋置、底部贯穿脱空和高聚物注浆修复3种不同工况下与数值模拟结果进行比较(见图6)。

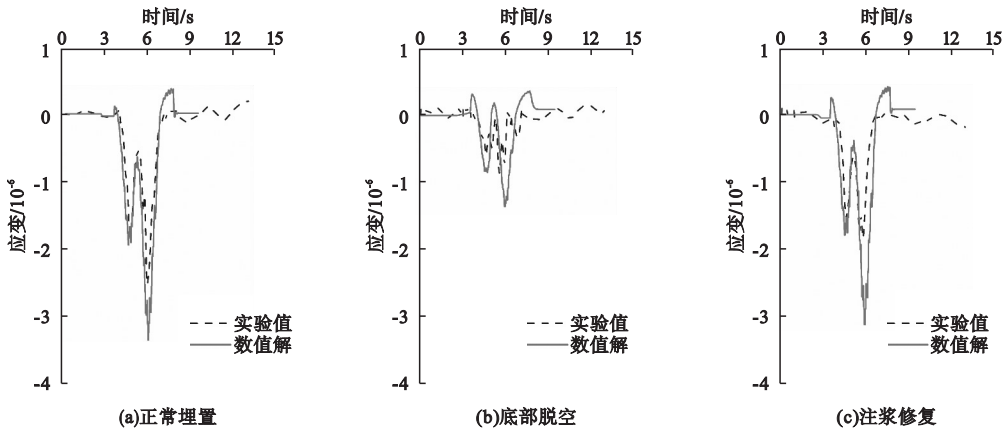


图6 试验结果与数值结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental and numerical results



在车辆多轮动载下,应变时程曲线形状均类似于齿根,呈受压状态,在出现两次峰值后逐渐趋于平缓,两个峰值大小不同,后者大于前者,这是由于轴荷较小的前轮先经过测点,所以后轮通过时产生的应变大于前轮。车辆轴距为3.815 m,以10 km/h 的速度匀速通过 J3 采集点,两齿根峰值的理论时间间距约为1.4 s,与试验值相符。对比结果如表3所示,可以看出模拟结果略大于试验值,在同一数量级内,模拟结果与试验值吻合良好,说明所采用方法的正确性和有效性,模型网格划分合理,计算准确可靠,可以用于地下排水管道结构分析。

表3 试验结果与数值结果对比  
Table 3 Comparison of experimental and numerical results

工况	应变/ $10^{-6}$	
	试验值	模拟值
正常埋置	-2.57	-3.40
底部贯穿脱空	-0.87	-1.37
注浆修复	-1.87	-3.18

3.2 3 种工况下承插口处的应力分布

由于承插口往往是引起管道破坏的源头之一<sup>[16]</sup>,对管道的整体性能起着非常重要的作用。当车辆后轮经过采集点时,该点的应变值达到最大,为最不利状态,因此将分析对象选为后轮经过 J3 采集点时的 J3 承插口。取 J3 承插口环向路径,对3种不同工况下承插口 Mises 应力进行分析,其应力对比曲线如图7所示。0°、90°和180°分别代表管道的顶部、侧面和底部,与试验测点布置环向相同。

由于管线结构的对称性<sup>[17]</sup>,管道两侧对称部位的 Mises 应力值较一致。从图7可以看出,管道在正常埋置和高聚物注浆修复后的承插口 Mises 应力曲线较吻合,且修复后的 Mises 应力值较正常埋置值小。承口处底部 Mises 应力值最大,略大于顶部,在管肩和管臀处 Mises 应力值最小,两种工况之间承插口环向 Mises 应力差值在管底处最大(差值分别为0.60 MPa 和0.05 MPa),管侧和管顶次之,管肩和管臀最小。可见,管道在高聚

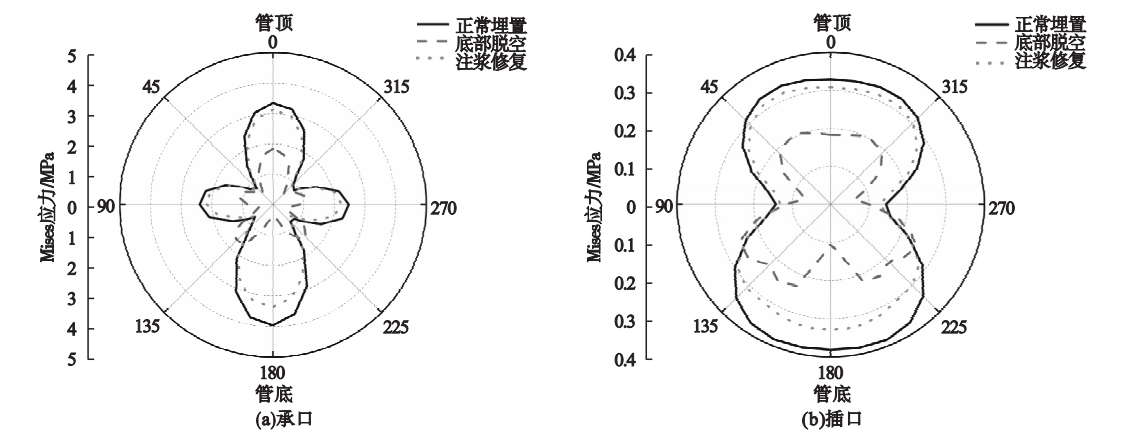


图7 不同工况作用下 J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线

Fig.7 Comparison curve of circumferential Mises stress of J3 socket under different working conditions  
物修复之后可以达到正常埋置时的受力状态,效果较好。  
当管道自管臀以下土体脱空时,承插口环向 Mises 应力状态发生很大的变化,相较于正常埋置,承口两侧管臀的 Mises 应力值分别增大了2.08倍和1.97倍,管底压应力减小很多,插口在管臀和管底处的 Mises 均减小很多。这是因为管道原本受上下土体约束,在行车荷载作用下产生受压变形,由于底部土体的脱空致管底失去了土体的约束,使得整个管道截面受力整体减小,尤其在底部更为明显,而管臀附近处的土体承担大部分

的支撑作用,所以在管臀处会产生较大的应力集中,该处的 Mises 应力值自然变大。因此,管道底部脱空,对其整体受力有很大的影响。

3.3 不同埋深排水管道动力响应分析

为了研究土体覆盖深度对管线力学性能的影响,进行了覆盖深度分别为 0.9 m、1.0 m、1.1 m 和 1.2 m 的数值模拟。在车载为 6.1t 作用下,车辆单侧轮压沿着管线纵向以 10 km/h 的速度匀速通过试验管道上方覆土,将 J3 钢承口截面底部应变时程最大值、P3 插口内顶部位移时程最大值和后轮经过 J3 采集点时的 J3 承插口环向 Mises 应力最大值进行比较(见表 4)。

表 4 不同埋深作用下 J3 承插口最大应变、位移和环向 Mises 应力

Table 4 Maximum strain,displacement and circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different buried depth

埋深/ m	应变/ 10 <sup>-6</sup>	位移/ mm	承口应力/ MPa	插口应力/ MPa
0.9	-3.881	-0.169	3.598	0.352
1.0	-3.615	-0.164	3.764	0.366
1.1	-3.403	-0.160	3.955	0.381
1.2	-3.315	-0.157	4.136	0.403

不同埋深作用下 J3 钢承口截面底部应变和 P3 插口内顶部位移对比曲线如图 8 所示。

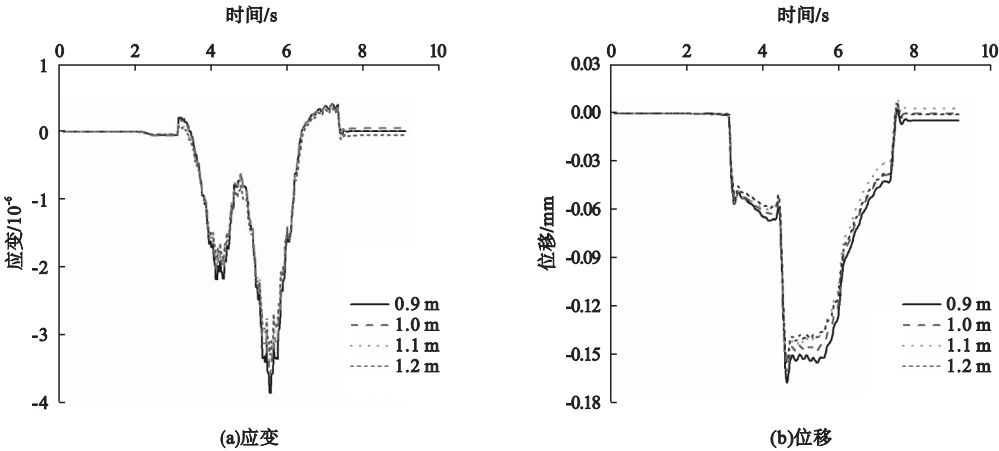


图 8 不同埋深作用下底部应变和顶部位移对比曲线

Fig. 8 Comparison curve between bottom strain and top displacement under different buried depth

可以看出位移与埋深成反比,当埋深从 0.9 m 分别增加到 1.0 m、1.1 m 和 1.2 m 时,J3 钢承口截面底部应变最大值分别减小了 0.266 MPa、0.212 MPa 和 0.088 MPa,P3 插口内顶部位移最大值分别减小了 0.005 mm、0.004 mm 和 0.003 mm。说明埋深增量相同时,随埋深的增加,J3 钢承口截面底部应变和 P3 插口内顶部位移最大值的减少量在减小。

当车辆后轮经过 J3 采集点时,J3 承插口的环向 Mises 应力如图 9 所示。Mises 应力最大值与埋深成正比,承口部位的环向 Mises 应力要远大于插口部位,这是由于两

个部位材料属性的不同,管道部位的 Mises 应力同时受到土体和管道自重及交通荷载的影响。

图 10 为除去了土压力,即车辆荷载对 J3 承插口的环向 Mises 应力的附加影响。可以看出,埋深为 0.9 m 时交通荷载产生的 Mises 应力增量较大,埋深为 1.1 m 和 1.2 m 这两种情况产生的 Mises 应力增量较小且较为一致,说明随着埋深的增加,交通荷载对管道施加的应力逐渐减小,即土压力呈线性增加,成为管道的主要荷载,相较于土压力引起的管道受力变化,交通荷载不再起主导作用<sup>[18]</sup>。

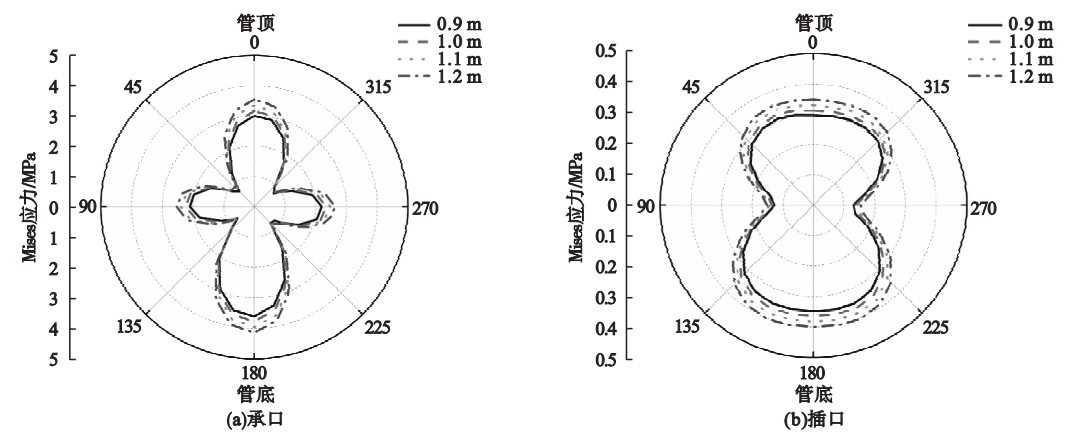


图 9 不同埋深作用下 J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线

Fig. 9 Comparison curve of circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different buried depth

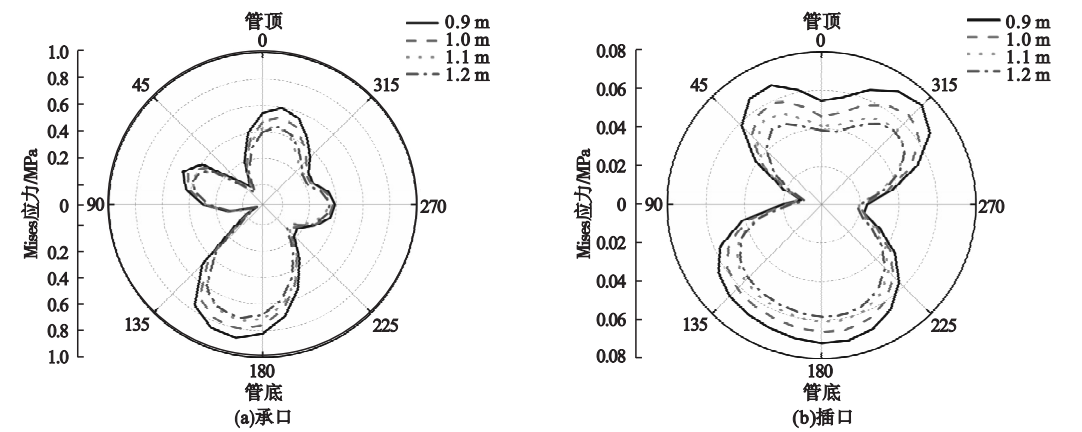


图 10 车辆荷载对 J3 承插口环向 Mises 应力附加影响的对比曲线

Fig. 10 Effect of vehicle load on circumferential Mises stress of J3 bell and spigot

3.4 不同车载排水管道动力响应分析

在管道埋深为 1.1 m, 行车速度和车载作用位置不变, 计算对比 4 种不同的车辆荷载对管道力学响应的影响(见表 5)。

表 5 不同车载作用下管道 J3 承插口最大应变、位移和环向 Mises 应力

Table 5 Maximum strain, displacement and circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different vehicle loads

车载/ t	应变/ 10 <sup>-6</sup>	位移/ mm	承口应力/ MPa	插口应力/ MPa
4.1	-2.166	-0.104	3.666	0.358
6.1	-3.403	-0.160	3.955	0.381
8.1	-4.291	-0.207	4.152	0.399
10.1	-4.810	-0.243	4.275	0.410

图 11 为 J3 钢承口截面底部应变时程和 P3 插口内顶部位移时程。且随着车载的增大, J3 钢承口截面底部应变和 P3 插口内顶部位移也随之增加。尤其在车辆后轮经过 J3 接口时, 车载为 6.1 t、8.1 t 和 10.1 t 时的 J3 钢承口截面底部应变分别是 4.1 t 时的 1.57、1.98 和 2.22 倍, P3 插口内顶部位移分别是 4.1 t 时的 1.54、1.99 和 2.34 倍。

不同车载作用下 J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线如图 12 所示, 因为车辆载重不一样, 轮胎接触地面时压力的分布也会有所差异, J3 承插口的环向 Mises 应力差别明显, 所以地面交通荷载越大, 对管道的受力状态越不利。

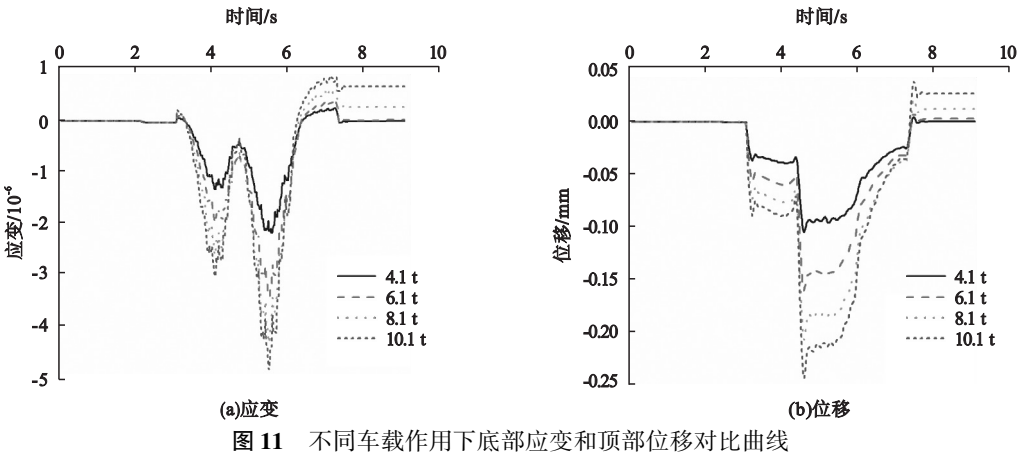


图 11 不同车载作用下底部应变和顶部位移对比曲线

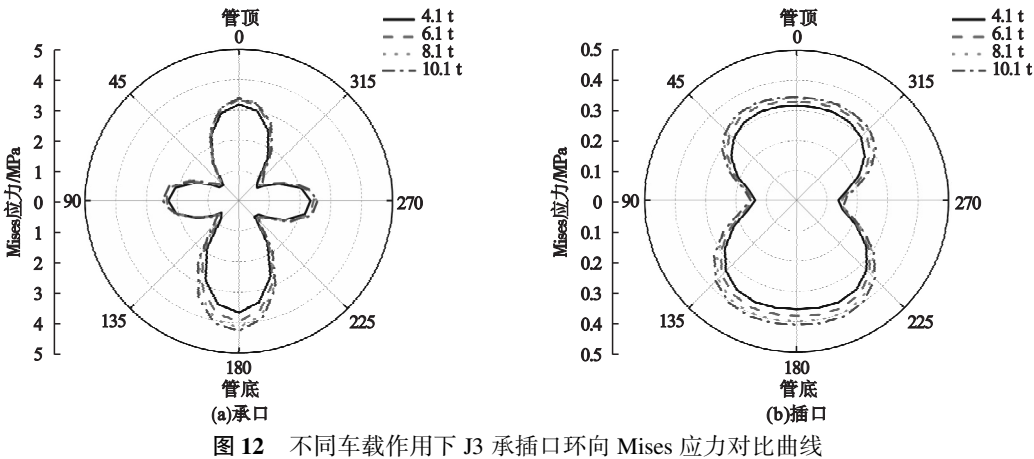


图 12 不同车载作用下 J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线

Fig. 12 Comparison curve of circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different vehicle loads

3.5 不同车速排水管道动力响应分析

在管道埋深为 1.1 m, 车载大小和作用位置不变, 改变车速为 10 km/h、40 km/h、70 km/h 和 100 km/h, 管道 J3 钢承口截面底部应变、P3 插口内顶部位移和环向 Mises 应力如表 6 所示。

表 6 不同车速作用下管道 J3 承插口最大应变、位移和环向 Mises 应力

Table 6 Maximum strain, displacement and circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different vehicle speeds

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	应变/ 10 <sup>-6</sup>	位移/ mm	承口应力/ MPa	插口应力/ MPa
10	-3.403	-0.160	3.955	0.381
40	-3.221	-0.156	3.930	0.379
70	-3.070	-0.153	3.903	0.377
100	-2.911	-0.150	3.854	0.372

不同车速作用下, 底部应变和顶部位移对比曲线如图 13 所示, J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线图 14 所示。当车速由 10 km/h 增加到 100 km/h 时, 各项指标均有所减小, 以 J3 钢承口截面底部应变为例, 随着移动车速的增加, 其值不断减小, 减幅分别为 5.4%、4.7% 和 5.2%。这是因为行驶的汽车对地面施加的荷载有瞬时性<sup>[19]</sup>, 随着车辆速度的提高, 使轮胎与地面的接触时间变短。由于地下结构中应力的传递是由相邻颗粒来完成的, 若应力出现的时间很短, 则来不及传递分布到地面及管道结构中去, 其动力特性便不能像速度较慢时呈现的那样完全, 从而降低了对埋地管道的影响。



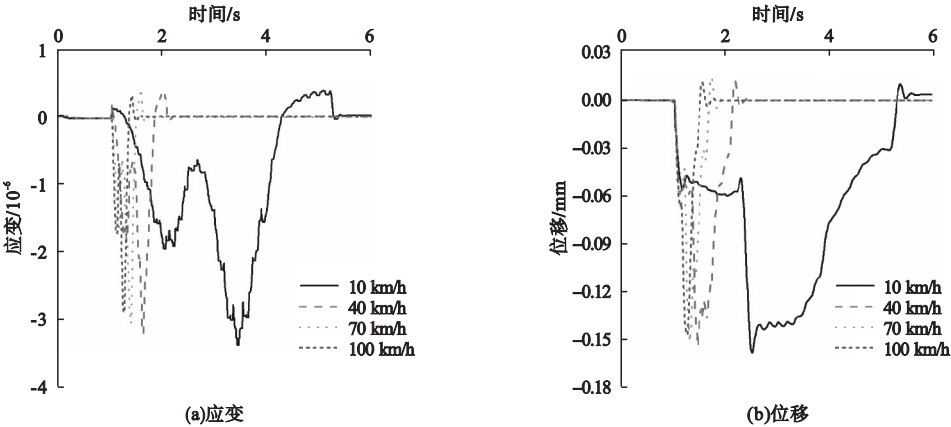


图 13 不同车速作用下底部应变和顶部位移对比曲线

Fig. 13 Comparison curve between bottom strain and top displacement under different vehicle speeds

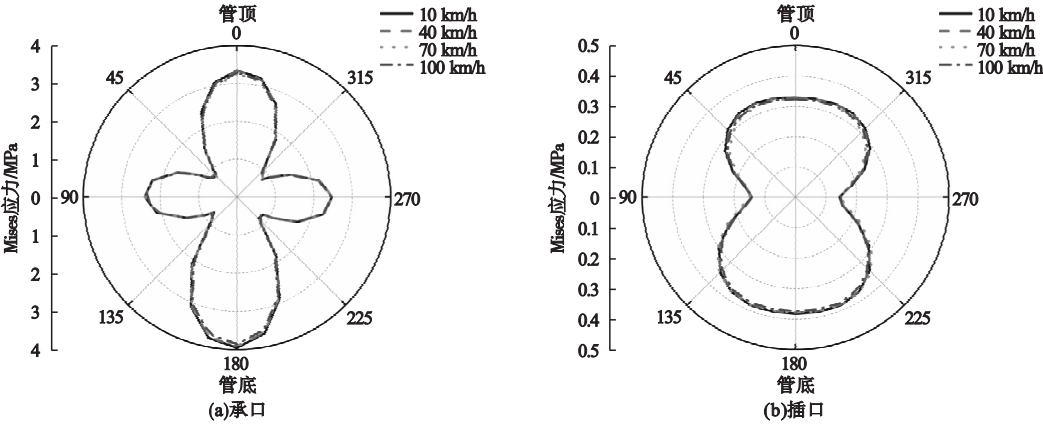


图 14 不同车速作用下 J3 承插口环向 Mises 应力对比曲线

Fig. 14 Comparison curve of circumferential Mises stress of J3 bell and spigot under different vehicle speeds

4 结 论

(1)数值模拟结果略大于试验值,两者符合较好,说明建立的 ABAQUS 数值分析模型模拟车辆多轮动载的分析方法具有正确性和有效性,可进一步开展地下排水管道结构的数值分析。

(2)管道底部脱空对管道受力影响较大,高聚物注浆对底部脱空管道起到了较好的修复作用,并能够将其受力状态恢复到正常埋置状态。

(3)随着排水管道埋深的增加,交通荷载对管道施加的应力逐渐减小,而土压力呈线性增加,成为管道的主要承重荷载,相较于土压力引起的管道受力变化,交通荷载不再

起主导作用。

(4)荷载大小对埋地管道的受力特性影响较大,交通荷载越大对管道越不利。

(5)交通荷载对管道产生的应变和位移影响随着移动车速的增加呈减小趋势,说明交通荷载的移动车速对地下排水管道的动力响应具有时间效应。

参考文献

[1] 刘洋. 对城市排水管道系统规划设计研究[J]. 科技与企业, 2015(5):105.  
(LIU Yang. Research on urban drainage pipeline system planning and design[J]. Technology and enterprise, 2015(5):105.)  
[2] 刘郅磊. 关于城市排水系统建设的思考[J]. 门窗, 2017(3):137.  
(LIU Zhilei. Thinking about the construction of urban drainage system[J]. Doors & windows, 2017(3):137.)  
[3] 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.  
(XU Jianguo, HU Huiming, LI Songtao, et al. The numerical analysis of underground pipe settlement and vacancy repairing with polymer injection[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2015, 13(3): 35-40.)
- [4] 范新卓, 戴宗宏, 宋夫杰, 等. 车辆多轮荷载作用下埋地管道动应力仿真分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(2): 78-84.  
(FAN Xinzhuo, DAI Zonghong, SONG Fujie, et al. Simulation analysis of buried pipeline under multiple wheel loads of vehicle[J]. Journal of Qingdao university (engineering & technology edition), 2019, 34(2): 78-84.)
- [5] 吴小刚, 张士乔, 杨玉龙, 等. 交通荷载下参变管-土系统的耦合响应分析[J]. 工业建筑, 2004(8): 36-37.  
(WU Xiaogang, ZHANG Shiqiao, YANG Yulong, et al. Analysis of coupling response of pipeline-soil system with changing parameters under traffic loads[J]. Industrial construction, 2004(8): 36-37.)
- [6] 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.  
(XU Jianguo, HU Huiming, ZHONG Yanhui, et al. Numerical analysis on underground pipe settlement and vacancy repairing with polymer injection[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13(5): 1165-1172.)
- [7] 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, 2006.  
(WANG Zhimin. Study on mechanical behaviors of buried pipelines under traffic loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [8] 王复明, 方宏远, 李斌, 等. 交通荷载作用下埋地承插口排水管道动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2274-2280.  
(WANG Fuming, FANG Hongyuan, LI Bin, et al. Dynamic response analysis of drainage pipes with gasketed bell and spigot joints subjected to traffic loads[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(12): 2274-2280.)
- [9] 兰国冠, 赵向前, 孙安勇. 穿越公路输气管道力学性状影响因素研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2012, 31(3): 290-294.  
(LAN Guoguan, ZHAO Xiangqian, SUN Anyong. Research on influencing factors on mechanical properties of road crossing gas pipelines[J]. Journal of Chengdu university (natural science edition), 2012, 31(3): 290-294.)
- [10] 周正峰, 凌建明, 梁斌, 等. 机坪输油管道荷载附加应力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1219-1224.  
(ZHOU Zhengfeng, LING Jianming, LIANG Bin, et al. Analysis on additional stress for apron oil pipe under external loads[J]. Journal of tongji university (natural science), 2013, 41(8): 1219-1224.)
- [11] FANG H Y, LI B, WANG F M, et al. The mechanical behaviour of drainage pipeline under traffic load before and after polymer grouting trenchless repairing [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2018, 74: 185-194.
- [12] 张倩倩. 排水管道脱空高聚物注浆修复数值模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
(ZHANG Qianqian. Numerical simulation of repairing by polymer grouting for drainage pipeline voids [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.)
- [13] 张世杰. 管道橡胶密封圈力学性能试验研究与数值模拟[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.  
(ZHANG Shijie. Experimental research and numerical simulation of the mechanical properties of the pipe rubber seals [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.)
- [14] 孙中菊. 地面堆载作用下埋地管道的力学性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
(SUN Zhongju. Analysis on mechanical characteristics of buried pipelines under surcharge loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [15] 徐健. 车辆荷载作用对综合管廊结构受力性能影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.  
(XU Jian. Mechanical characteristics analysis of prefabricated pipe gallery under vehicle load [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.)
- [16] 李斌, 方宏远, 王复明. 脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(1): 62-66.  
(LI Bin, FANG Hongyuan, WANG Fuming, et al. Analysis of the mechanical characteristics of disengaging drainage pipe before and after polymer repairing [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2019, 40(1): 62-66.)
- [17] 姬奎香. 基于 ABAQUS 的基坑开挖对邻近管线变形影响的数值分析[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.  
(JI Kuixiang. Numerical analysis of effects of excavation on deformation of the adjacent pipeline based on ABAQUS [D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2014.)
- [18] 李兵, 孙小飞, 于忠诚, 等. 地铁深基坑施工与邻近建筑的关联效应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 86-93.  
(LI Bing, SUN Xiaofei, YU Zhongcheng, et al. Analysis of correlation effect between deep foundation pit construction of subway and adjacent buildings [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(1): 86-93.)
- [19] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
(DENG Xuejun. Subgrade pavement engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.)  
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)