

交通荷载对淤泥地层中地下管线的扰动影响

张立梅^{1*}, 郑鹏鹏¹, 王程鹏^{2#}, 陈保国², 贺洁星²

¹中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: 45310976@qq.com, #wangchpeng@foxmail.com

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2020年11月17日; 发布日期: 2020年11月24日

摘要

交通荷载是地下管线的主要荷载之一, 合理调节相关参数对于控制管线扰动具有重要意义。本文以深圳固成污水净化厂二期工程配水管项目为依托, 通过Midas分析了地表交通荷载在不同的行驶位置, 行驶速度和管线埋深条件下对地下管线的扰动影响规律。分析认为车辆的行驶位置和管线埋深是影响地下管线扰动程度的重要因素, 而本工程中车辆行驶速度对管线的扰动影响有限。

关键词

交通荷载, 地下管线, 行驶位置, 行驶速度, 管线埋深

Disturbance Effect of Traffic Load on Underground Pipeline in Silt Stratum

Limei Zhang^{1*}, Pengpeng Zheng¹, Chengpeng Wang^{2#}, Baoguo Chen², Jiexing He²

¹Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: 45310976@qq.com, #wangchpeng@foxmail.com

Received: Nov. 2nd, 2020; accepted: Nov. 17th, 2020; published: Nov. 24th, 2020

Abstract

Traffic load is one of the main loads of underground pipelines. It is important to adjust the relevant parameters reasonably for controlling pipeline disturbance. Based on the water distribution project of Shenzhen Gushu sewage treatment plant phase II project, through Midas, this paper

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张立梅, 郑鹏鹏, 王程鹏, 陈保国, 贺洁星. 交通荷载对淤泥地层中地下管线的扰动影响[J]. 土木工程, 2020, 9(11): 1179-1186. DOI: 10.12677/hjce.2020.911123

analyzes the impact of surface traffic load on the underground pipeline under the conditions of different driving position, driving speed and pipeline buried depth. The analysis shows that the driving position and buried depth of the vehicle are the important factors affecting the disturbance degree of the underground pipeline, but the impact of the vehicle speed on the pipeline disturbance is limited in this project.

Keywords

Traffic Load, Underground Pipelines, Driving Position, Travel Speed, Buried Depth of Pipeline

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交通荷载是埋设在路面以下管线的主要荷载之一，随着城市交通与运输业的快速发展，由交通荷载引起的地下管线破裂与损坏问题也逐渐加剧，因此分析研究交通荷载对地下管线的扰动影响是维护地下管线安全的重要课题。

当前国内外学者大多基于理论分析、数值模拟和现场监测等方式分析研究交通荷载对地下管线的扰动影响。吴小刚[1]利用随机摄动法表示了地下管线各参数的随机性，推导了管线在随机载荷下响应特性的计算表达式并提出一种简化求解算法。全勇[2]考虑车辆动荷载系数，推导改进分布角法，计算出不同土层深度处的车辆荷载扩散值并得出地下管线所受力的计算公式。龚伦等[3]通过数值模拟分析了两列车同时行驶时对下穿隧道的叠加效应影响，认为列车驶过时隧道所受的竖向压力随埋深增加呈多段非线性变化，且沿隧道纵向呈悬链形分布。在分析车辆荷载对地下管线的影响因素问题上，李昕等[4]采用二维有限元方法分析了直埋管道在动力荷载作用下的反应，认为一般情况地震波频率对管道影响较小，而埋管周围土体种类对管道反应有重要影响。叶飞等[5]将列车荷载模拟为单一的移动荷载，考虑围岩为黏弹性成层地基，利用分层法研究了移动荷载作用下围岩的动力响应，认为列车荷载引起的振动效应对下穿公路隧道稳定性影响较小。仇敏玉等[6]提出黏弹性边界单元有限元模型，认为软土地基中行车荷载引起的动响应深度一般为6~10 m，提高行车速度和道路结构层的回弹模量可减少车辆荷载的影响深度。曲村等[7]运用耦合动力学建立车辆-轨道振动分析模型研究高速车辆振动荷载对地下隧道结构产生的动力影响，认为板桩结构下的电缆隧道不会受高速列车振动荷载扰动而产生显著的不利影响。肖成志等[8]通过开展静载和循环荷载模型试验认为循环荷载对埋地管道上方土层的沉降影响明显大于静载，当加载范围关于管道轴线对称时，埋地管线所受影响显著。

本文依托深圳固成水质净化厂二期工程配水管项目，采用 Midas 数值模拟软件分析研究了地表交通荷载在不同的行驶位置，行驶速度和管线埋深条件下对地下管线的扰动影响规律，可为地下管线的布置与防护提供一定参考。

2. 数值模拟

数值模拟采用 Midas GTS 数值分析软件建立模型并分析计算。根据现场实际情况结合项目研究内容，模型尺寸长宽高分别设为 40 m, 50 m 和 30 m，土体采用摩尔-库伦弹塑性本构模型，用实体单元模拟，模型中各土层厚度和土体参数均取自勘察报告，见表 1，而模型顶部 0.5 m 深度范围采用 C30 混凝土属性

用以模拟路面。地下管线管径为 2.6 m，壁厚 0.26 m，上覆土厚 7.6 m，管长取 40 m，使用板单元建立并采用 C40 混凝土属性。模型底部约束水平和竖向位移，侧面约束水平位移，上表面设为自由边界。

在模拟交通荷载时，通过数值分析首先计算出模型的振动特征值，再选择“列车动力荷载”将模拟的车辆荷载施加在设计行驶路线上。考虑到管线上方属于市政道路，根据规范可在模型上将施加的动力荷载取标准轴载，即双轮组单轴载 100 kN，同时将车辆行驶速度设为 60 km/h。本文将通过改变交通荷载的行驶位置，行驶速度和管线埋深三个参数来分析研究不同的交通荷载条件对地下管线的扰动影响。

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil layers

表 1. 土层物理力学参数

土层名称	层厚/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)	压缩模量/(MPa)	变形模量/(MPa)
黏性素填土①	4.61	16.7	8	10	3.2	3.5
碎石素填土②	2.3	18.5	5	22	/	5.5
淤泥③	5.81	17.1	6	1.8	2.79	3.0
淤泥质中砂④	1.88	17.5	5	18	3.2	3.4
粉质黏土⑤	2.05	19.8	18	15.0	4.8	6.5
黏土质粗砂⑥	2.13	18.2	22.1	20	5.3	11
粗砂⑦	1.66	19.5	0	29	/	30
残积土⑧	5.19	18.3	21	22.4	4.6	30
风化花岗岩⑨	4.13	19.0	24	22.9	7	60

3. 交通荷载行驶位置影响分析

3.1. 垂直管线方向行驶对管线的影响

当车辆垂直于管线方向行驶逐渐靠近管线上方时，对管线产生的影响也逐渐增大，由图 1 所示当车辆行驶到管线正上方时对地下管线产生的影响最大，最大竖向变形达到 0.19 mm，管片竖向变形沿管中心向两侧呈对称分布，且变形值逐渐减小。管线整体受荷载影响呈现出向管底弯曲的变形状态。当车辆行驶至正上方时对管线的影响范围约为车辆两侧各 20 m，整体变形平缓，未出现变形大小突变的情况，在距离车辆约 20 m 的管端处竖向变形已均匀减少至 0.08 mm，因此认为当车辆荷载垂直管线方向行驶时管线竖向变形很小且变化均匀，基本不会出现因不均匀沉降而导致的管节断裂或错位的现象。

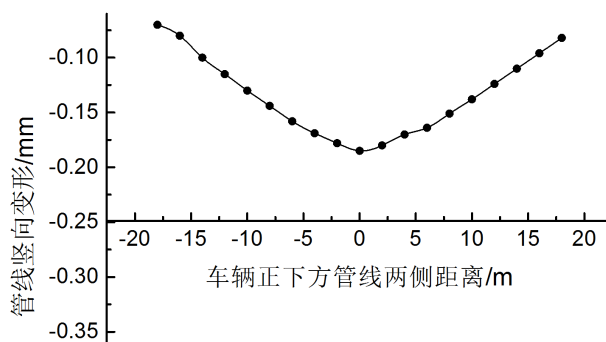


Figure 1. Vertical deformation curve of both sides of pipeline when vehicle passes by

图 1. 车辆经过车时管线两侧竖向变形曲线

车辆经过时管线顶部受到动态交通荷载的作用,在约 20 m 的管长范围内压力明显增大,压力最大约为 33 kPa;而管底由于管线向下变形弯曲的缘故,产生了最大约为 45 kPa 的拉应力,管线受压和受拉部分的范围基本相同。地下管线为 C40 混凝土材料,抗拉强度设计值为 1.71 MPa,远大于 45 kPa,因此管线在交通荷载作用下受力状态基本处于安全状态。

由图 2 可知,管线竖向变形大小与车辆距管线距离成反比,当车辆行驶至管线前方约 15 m 处管线开始发生竖向变形,并随着距离的减小逐渐增大,当距离管线 5 m 时竖向变形已经达到 0.18 mm,当位于管线正上方时管顶达到最大竖向变形 0.19 mm,之后随着车辆的远离管线的竖向变形逐渐减小恢复。管顶在车辆到达前后 5 m 范围内变形值最大,因此认为车辆行驶过程中对地下管线影响最大的路段正是垂直管线前后 10 m 范围内。

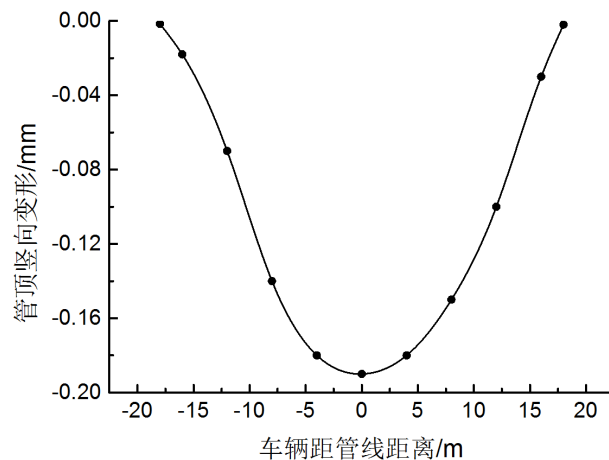


Figure 2. Vertical deformation curve of pipe top with vehicle distance

图 2. 管顶随车辆距离变化竖向变形曲线

3.2. 平行管线方向行驶对管线的影响

与垂直管线方向行驶不同,当车辆平行于管线方向行驶时,交通荷载对管线的扰动影响是沿着管线方向连续进行的,管线竖向变形的最大值位于地表车辆的正下方并且随着车辆的移动而逐渐移动。当车辆平行于管线方向并位于其正上方行驶时,随着车辆的靠近,管段某点处的竖向变形也开始逐渐增大,当距离 20 m 时该点处管段开始发生较小的竖向变形,当车辆行驶至距离该点约 8 m 处位置时管线竖向变形值已经达到了 0.18 mm,随后变形值缓缓增大,当车辆经过该点正上方时管片达到最大变形值 0.19 mm,最后随着车辆的远去而逐渐恢复,管线上某点受交通荷载较大扰动的影响范围为前后约 16 m 的距离。就管线的竖向变形变化规律和最大变形值而言,车辆垂直于管线方向行驶和平行管线方向行驶基本类似,但垂直管线行驶时每次只会对路面宽度两侧较小一段范围内的管线产生扰动影响,而平行管线行驶时却是沿着管线方向对管线整体都产生了扰动影响,因而会对地下管线产生更大的扰动作用。因此从管线的安全性和耐久性来说不建议在管线的正上方修建平行于管线方向的市政道路。

通过数值模拟分别分析计算了车辆在距管线不同水平距离处平行管线行驶对管线竖向变形的影响。如图 3 所示,当平行于管线方向行驶时,车辆对管线的影响程度与其距管线的水平距离呈反比,当车辆位于管线正上方行驶时对管线造成的最大竖向变形为 0.19 mm,而当位于管侧 2 m 位置处行驶时对管线造成的最大竖向变形降至 0.16 mm,并随着水平距离的增大逐渐减小。当车辆水平距离距管线 6 m 时,车辆动荷载对管线造成的最大竖向变形已降至 0.12 mm,且管线对车辆驶近与驶离时的竖向变形响应也

随着水平距离的增大而减小。管线上某点受车辆荷载影响的范围基本不变，仍为该点处前后约 16 m 的距离，但是造成管线产生最大竖向变形的交通荷载位置却随着车辆距管线水平距离的变化而发生改变，即随着距管线水平距离的增大，管线越早受交通荷载影响而产生最大竖向变形。

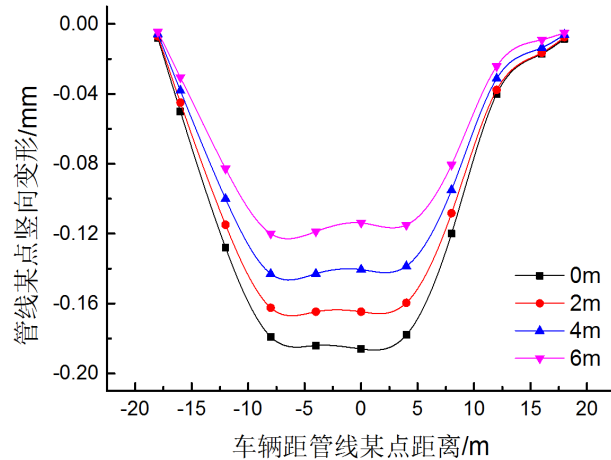


Figure 3. Influence curve of different horizontal distance on pipeline when parallel pipelines of vehicles are running
图 3. 车辆平行管线行驶时不同水平距离对管线影响曲线

综上分析认为车辆平行于管线方向行驶相对于垂直管线方向行驶对于管线的安全性更加不利，而当平行于管线方向行驶时增大车辆与管线的水平距离可有效减少对地下管线的扰动影响。因此若必须要修建平行于管线方向的市政道路时，建议尽量将主路面远离管线，不建议将道路直接修建在管线的正上方。

4. 行驶速度影响分析

市政道路中路况复杂，不同车辆不同路况都会有不同的行驶速度，而不同的行驶速度可能会对管线的受力或变形造成较大的影响。通过数值模拟分别分析车辆以 60 km/h，40 km/h 和 20 km/h 的速度垂直经过管线上方时车辆两侧管线的竖向变形分布规律，得出的管线两侧竖向变形曲线见图 4。当车辆以不同的速度垂直管线经过时，对两侧管线的扰动影响基本呈对称分布且分布均匀，并未出现变形值突变的

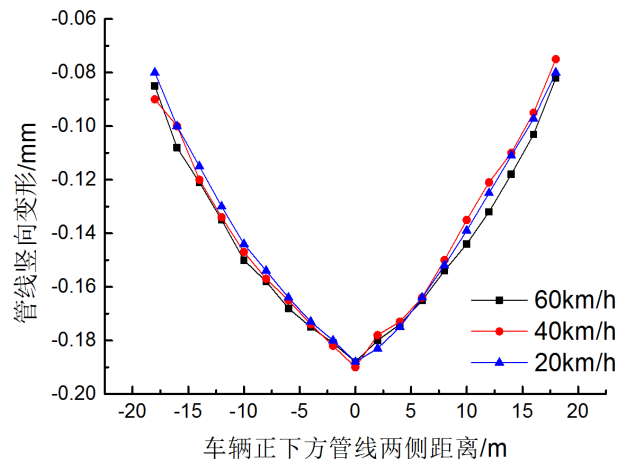


Figure 4. Vertical deformation curve of both sides of pipeline when vehicle passes by at different speed
图 4. 车辆以不同行驶速度经过时管线两侧竖向变形曲线

现象,且扰动范围也基本均为车辆两侧各 20 m。由管线变形分布曲线可知本工程中不同的行驶速度对地下管线的扰动影响规律并不明显,不同速度造成的管线竖向变形大小基本类似,随着行驶速度增加管线两侧的竖向变形值产生微小的增长,但并未出现明显的由于速度不同而引起的扰动增大或减小情况。

分析认为本工程数值模拟中车辆行驶速度对地下管线扰动影响较小主要有三个原因。第一是由于管线本身埋深较深,受地表交通荷载的影响较小,因此当车辆以不同速度行驶时即使对动态简谐荷载产生了影响,但传递到埋设于近 8 m 土层以下的管线时已经被上覆土体损耗了绝大部分,因此作用在管线上的扰动影响会降低到很小的水平;第二是由于该段道路为市政道路,对车辆行驶速度有一定的限制,当行驶速度控制在 60 km/h 以下时,一般情况速度改变并不显著,因此对管线的影响也不会有明显变化;第三是由于在建立数值模型时,地表路面是理想状态下的绝对平整,而不同车辆速度下由于路面不平整而对路面产生的冲击作用不能体现,所以导致数值分析中不同的车辆速度对管线影响程度较小。综合以上分析认为本工程中管线由于本身埋深较深及市政道路车速限制所以受速度影响有限,而在路面施工及后期使用中如果能够积极维护路面平整性,管线基本不受车辆行驶速度影响。

5. 管线埋深影响分析

由前文分析可知在正常交通荷载条件下,本项目中的管线受扰动影响较小,对管线产生的竖向变形均控制在很小范围之内,而造成的应力集中也远小于设计的标准值,处于安全范围内。分析认为主要是由于本项目中的管线埋深较深,上覆土体厚度达到 7.6 m,受土体介质的削弱作用交通荷载传递至管线时已经削弱到较低水平。现研究管线在不同埋深条件下受交通荷载的影响,分析管线埋深对管线使用安全性的影响程度。

通过数值模拟分别分析了管线上覆土厚度为 1 m, 3 m 和 7.6 m 条件下的受力变形情况。如图 5 所示当上覆土厚减小至 3 m 时,管线的最大主应力主要集中于车辆正下方的管线处,管顶处的压力达到 47 kPa,而管底则产生约 104.8 kPa 的拉应力。当上覆土厚继续减小至 1 m 时,管顶处的最大压应力增大至 78 kPa,而管底处的最大拉应力则增大至 141 kPa。即管线所受到来自交通荷载的应力影响会随着上覆土体厚度的减小而逐渐增大,且影响程度较大。不同埋深条件下管线两侧竖向变形曲线见图 6,当上覆土厚度为 7.6 m 时,管线最大竖向变形为 0.18 mm,当土厚减少至 3 m 时,管线的最大竖向变形增大至 0.35 mm,距离车辆 18 m 处竖向变形约为 0.12 mm,而当土厚再继续减少至 1 m 时,管线最大竖向变形达到 0.44 mm,距离车辆 18 m 处管线竖向变形约为 0.13 mm,即随着管线埋深的减小,交通荷载对管线产生的竖向变形会显著增大。

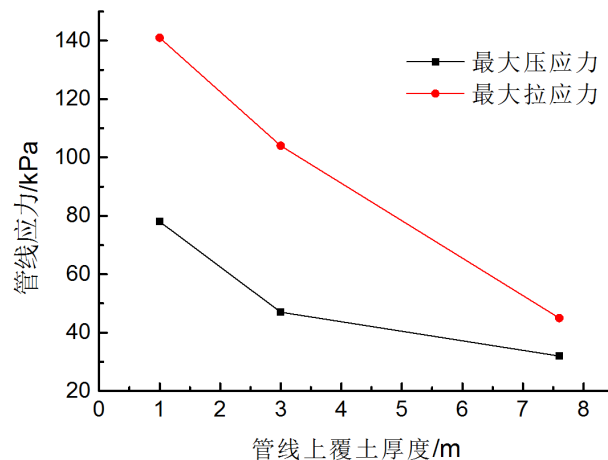


Figure 5. Stress variation of pipeline under different buried depth

图 5. 不同埋深条件下管线应力变化

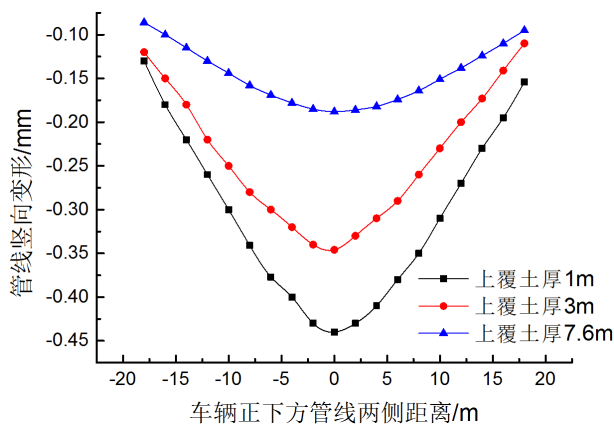


Figure 6. Vertical deformation curve of both sides of pipeline under different buried depth

图 6. 不同埋深条件下管线两侧竖向变形曲线

分析认为随着管线埋深的减小, 管线所受到交通荷载的影响也随之增大, 当埋深越来越浅时管线受埋深的影响也越来越剧烈。整体而言, 管线埋深是控制管线扰动的重要因素, 当上覆土体厚度仅为 1 m 时交通荷载已经对管线产生了剧烈的扰动, 而基本影响范围均控制在车辆两侧各约 20 m 范围内。因此在进行地下管线设计时应尽量选择较深的埋深, 避免因距离地表较近而容易造成管线的后期损坏。

6. 结论

本文通过数值模拟分析了地表交通荷载在不同的行驶位置, 行驶速度和管线埋深条件下对地下管线的扰动影响规律, 得出以下结论:

1) 车辆的行驶位置对地下管线扰动影响较大, 当平行于管线方向行驶时, 交通荷载对地下管线的影响随着车辆与管线之间距离的增大而逐渐减小, 而影响范围基本保持不变。

2) 本工程中由于管线埋深较深, 市政道路上交通速度受限, 在能够保证路面平整的条件下交通荷载对地下管线的扰动作用基本不受车辆速度的影响。

3) 管线埋深是影响地下管线扰动程度的重要因素, 交通荷载对地下管线的扰动作用随着管线埋深的减小而逐渐增大, 且当埋深越来越浅时管线受埋深的影响也越来越剧烈, 因此在进行管线设计时合理选择管线埋深对于管线安全有着重要意义。

基金项目

国家自然科学基金(51108434)。

参考文献

- [1] 吴小刚. 交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [2] 全勇. 车辆荷载作用下老城区支线地下综合管廊的响应分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [3] 龚伦, 郑余朝, 仇文革. 列车动载引起下穿隧道振动三维数值分析[J]. 现代隧道技术, 2008(4): 23-27+43.
- [4] 李昕, 周晶, 陈健云. 考虑土体非线性特性的直埋管道-土体系统的动力反应分析[J]. 计算力学学报, 2001(2): 167-172.
- [5] 叶飞, 丁文其, 王国波, 王士民. 列车移动荷载对下穿公路隧道稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2008(2): 549-552.
- [6] 仇敏玉, 俞亚南. 道路行车荷载影响深度分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1822-1826.

- [7] 曲村, 高亮, 辛涛, 徐亮. 高速列车振动荷载作用下电缆隧道结构动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 264-268.
- [8] 肖成志, 王嘉勇, 何晨曦. 静/动载作用下埋地管道力学性能的试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 747-754.