

Numerical Simulation Study on Influence of Double Line Tunnel Excavation on Existing Underground

Yangkou Yuan¹, Kaisen Cheng², Hao Zhang¹, Zhiyuan Fan¹, Liang Liu¹, Chengbin Liu¹

¹Department of Hydraulic and Architectural Engineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

²China Real Estate Development Group Co., Ltd., Beijing

Email: 757146058@qq.com

Received: Dec. 27th, 2018; accepted: Jan. 10th, 2019; published: Jan. 17th, 2019

Abstract

The city development of the society leads to the congestion of ground traffic, which makes people build a large number of underground tunnels. Underground tunnels often encounter underground pipelines or other tunnels, and how to build safety is the most important. However, at present, the theoretical knowledge of tunnel construction is far behind engineering practice, so it is urgent to develop relevant research. The shallow excavation method is an important method to build the tunnel. During the construction, the ground disturbance is small, the ground traffic and the buildings are not affected. The funds and equipment are relatively small, and many different sections can be excavated flexibly. Based on the excavation of the Tunnel Six in Beijing metro line, this paper uses FLAC3D modeling. The influence of soil pressure and lining parameters on ground subsidence and the influence of shallow buried excavation method on the pipeline are analyzed by changing the size of soil pressure and lining parameters.

Keywords

Shallow Underground Excavation, Underground Pipeline, Numerical Simulation

双线隧道暗挖法施工对既有地下管道影响的数值模拟研究

袁羊扣¹, 程凯森², 张昊¹, 范志远¹, 刘靓¹, 刘诚斌¹

¹北京农业职业学院, 北京

²中国房地产开发集团有限公司, 北京

Email: 757146058@qq.com

文章引用: 袁羊扣, 程凯森, 张昊, 范志远, 刘靓, 刘诚斌. 双线隧道暗挖法施工对既有地下管道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程, 2019, 8(1): 114-123. DOI: 10.12677/hjce.2019.81015

收稿日期：2018年12月27日；录用日期：2019年1月10日；发布日期：2019年1月17日

摘要

城市的快速发展导致地面交通拥挤，大量地下隧道被修建，修建过程中会遇到地下管线或者其他隧道等情况，如何安全的修建是重中之重。目前隧道修建的理论知识远远落后于工程实践，需发展隧道修建的相关研究。浅埋暗挖法是一个修建隧道的重要方法，施工过程中对地面扰动小，不影响地面交通和建筑物，需要的资金和设备相对较少，可以开挖多种不同的断面，本文基于北京地铁六号线西延段田村站~海淀五路居站区间隧道的开挖，利用FLAC3D建模，通过更换土压大小和衬砌参数来分析土压、衬砌参数等对地面沉降的影响以及浅埋暗挖法对管线的影响。

关键词

浅埋暗挖，地下管线，数值模拟

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 前言

隧道施工对既有管线影响较大，不同施工方法的影响会有差别，可以概括为土体位移导致管道受力的改变。如今城市地铁迅速发展，轨道交通建设技术掌握不熟练，施工经验不足，缺乏熟练技术人员，加之高密度的城市区域施工环境复杂，城市轨道交通建设事故发生率居高不下[1]，造成了巨大的经济损失，故必须重视施工安全。需对地质、环境安全风险因素和上覆松散填土等地质条件复杂、下穿地下管线等环境条件复杂的部位[2]开展深入研究，具体工程具体分析，暗挖法施工对既有管线研究的文章并不是很多，因此针对暗挖法施工对既有管线影响的研究是十分必要的，有限元的数值模拟也是不可或缺的。

王丽[3]以西安地铁4号线为背景，使用有限元软件flac3d模拟了黄土地区隧道开挖对管线影响的研究，得出了沉降槽宽度、沉降量之间的函数关系，还指出了不同施工法会引起不同沉降量。

邱美丽[4]在充分考虑边界条件、力学模型等各种因素下的数值模拟研究中，得出单一变量中土体弹性模量越小，隧道直径开挖越大，都会给管线带来更多不利因素；管道和隧道间的净距越小，弯矩会越大。

张伦政[5]在弹性数值计算基础上建立的数值模拟和在基于塑性数值计算基础上的离心试验分别得出的结果和数值进行对比分析，得出二者都能反映实验结果，但是理论模型能更好地反映情况。

王霆[6]结合北京地铁5号线10号线工程概况，使用数值模拟，并用现场实测方法加以辅助，描述了PBA法对地面沉降的影响和对周围管线的影响，还进一步指出了土体、管线、施工之间的关系。

2. 工程概况

北京地铁6号线西延段田村站~海淀五路居站区间，西起田村站，沿田村路自西向东延伸，直至六号线一期起点海淀五路居站。区间沿线地势平缓，地面高程为54 m~57 m，轨面埋深24~29 m左右。沿线地面以下63 m勘探范围内地层可分为：人工堆积层、新近沉积层、一般第四纪沉积层及二叠系基岩四大层见表1。区间稳定水位位于底板以下，不需降水。拟建隧道上方纵横向管线众多，由于地质条件复杂，

管线残留水对施工影响较大，且燃气、电信管线对沉降有严格的要求，施工风险高，施工过程中如何保证管线安全是施工控制的重难点。

Table 1. Formation Physical and Mechanical Index Table
表 1. 地层物理力学指标表

名称	物理力学性质	天然密度 ρ (g/cm ³)	天然快剪		摩擦系数	静止侧压 力系数	垂直基床系数 Kv (MPa/m)	水平基床系数 Kh (MPa/m)	地基承载力特 征值(kPa)
			c (kPa)	φ (°)					
人工堆积 地层	粉质黏土素填土①	1.75	8	10	—	0.50	—	—	—
	卵石素填土① ₁	2.00	0	8	—	0.50	—	—	—
新近沉积层	细砂② ₃	2.00	0	15	0.35	0.35	25	20	130
	卵石② ₃	2.10	0	35	0.40	0.35	45	40	280
	卵石⑤	2.20	0	43	0.43	0.30	70	60	400
一般第四纪 沉积层	粉质黏土⑥	2.20	22	18	0.25	0.35	38	40	180
	卵石	2.20	0	45	0.45	0.30	90	80	500
	中粗砂⑦ ₁	2.05	0	30	0.40	0.35	50	45	280
	卵石⑨	2.20	0	45	0.45	0.28	100	90	700

3. 材料本构关系

3.1. 土体

土体采用摩尔 - 库伦本构模型能有效的模拟真实情况，其破坏或屈服准则为[7]：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2fc\sqrt{N_\varphi} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (2)$$

式中： $N_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ； f_s 为应力空间的屈服函数。kN/m²； σ_1 、 σ_3 为最小和最大主应力，kN/m²； c 为材料的粘聚力，kN/m²； φ 为内摩擦角，(°)； f_t 为应力水平，kN/m²。

3.2. 地下管线

地下管线视为刚性管，其接头处不发生相对转角，接头和管身拥有一样的刚度，一旦管线发生较大的沉降就会造成破坏[8] [9] [10]。为了便于分析建模，不考虑接头影响，管线均按无内压计算，忽略地下水的影响。

3.3. 边界条件

考虑施工位置周围边界是相对不变的，模拟中荷载主要为自重荷载，其他荷载忽略不计。模型上表面为自由面，其它面受到法向约束不能产生位移，管线两端也为固端约束。建模时让管道和周围土体节点不重合，模拟土体与管道可分离，使模拟情况更加符合实际。

4. 模型建立

因隧道与管线位置关系复杂，存在平行、垂直、斜交等多种关系，并且不同关系有不同弯矩。限于篇幅，本文只进行隧道与管线垂直关系的模拟。

依据工程概况，管线埋深 4 米，隧道断面直径 6 米，埋深 20 米，两个隧道之间间隔 10 米，建立模型如图 1、2。

隧道和管道的位置关系如图 3，隧道和管道相互垂直，两隧道平行。

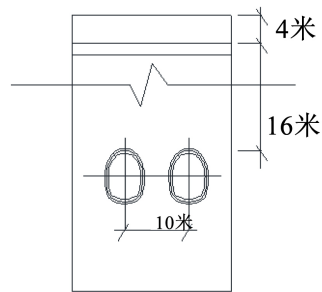


Figure 1. Model front view
图 1. 模型正面图

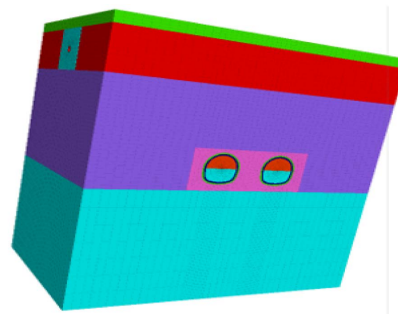


Figure 2. Complete modeling
图 2. 完整建模

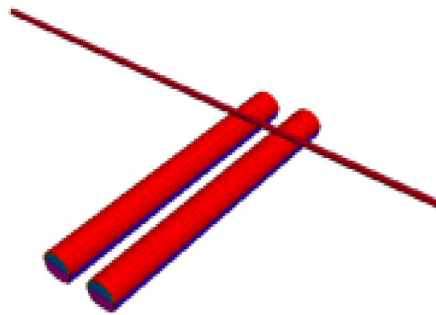


Figure 3. Position relationship between tunnel and pipeline
图 3. 隧道和管道位置关系

5. 模拟数据分析

5.1. 沉降分析

1) 数值模拟是双线隧道同时开挖，形成凹槽形式的对称沉降槽，且在沉降槽距离隧道中心两侧 17 米内都有较大沉降，达到 3 毫米以上，在 17 米之外影响小，较大影响范围大约在隧道的三倍隧道直径范围内，在距离隧道中心两侧 30 米之外的沉降几乎为零见图 4。

2) 模拟发现管道在上侧受力均匀，侧面受力较大见图 5。完全开挖后管道不同位置的位移图是凹槽型，管道的竖直最大位移大约为 5.5 毫米，左右方向的沉降是对称的，在 30 米之外的沉降约为 0，管道在隧道中心 30 米开外受隧道开挖的影响很小。

3) 管线沉降在隧道中心位置略大于地表沉降，在距离隧道中心 20 米的地方管道沉降地表沉降接近，在距离隧道中心 20 米以外地表沉降略大于管道沉降。

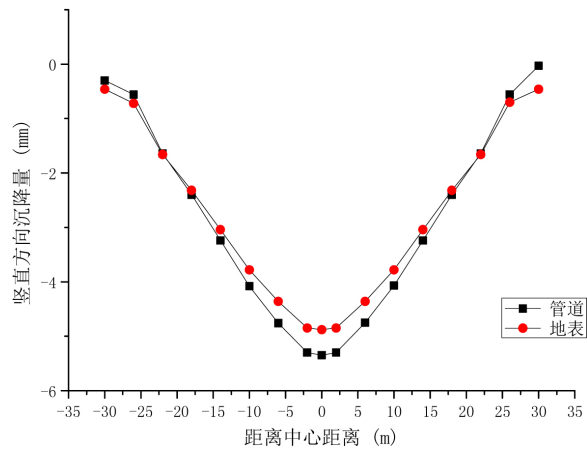


Figure 4. Pipeline and ground subsidence
图 4. 管线和地面沉降

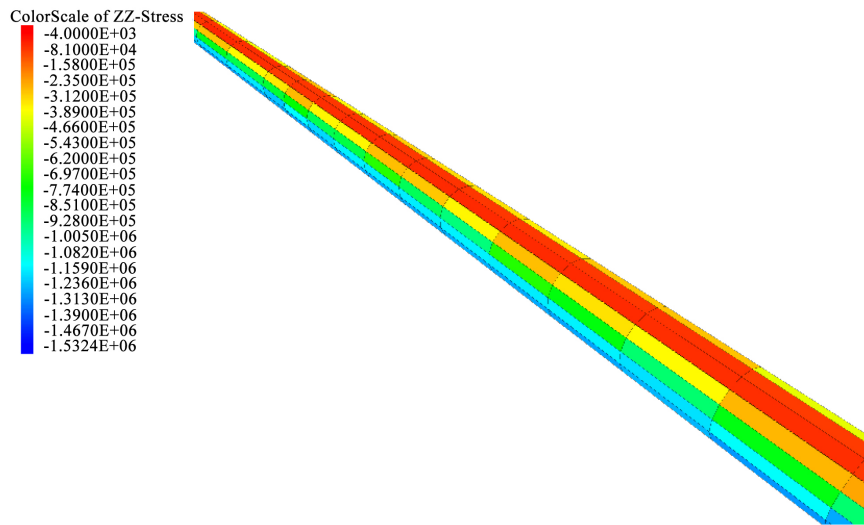


Figure 5. Pipeline vertical stress
图 5. 管道竖直方向应力

5.2. 管线参数的影响分析

5.2.1. 管线弹性模量参数

选用 DN1200 管道研究管道弹性模量对管道沉降的影响，其他条件也不变，然后分别设置管道弹性模量见表 2。

Table 2. Parameter setting table
表 2. 参数设置表

管道分组	管厚/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角埋深/(°)	泊松比/m
第一组	40	300,000	/	4	0.2
第二组	40	22,000	/	4	0.2
第三组	40	16,000	/	4	0.2

在三种弹性模量下的位移变化规律见图 6。

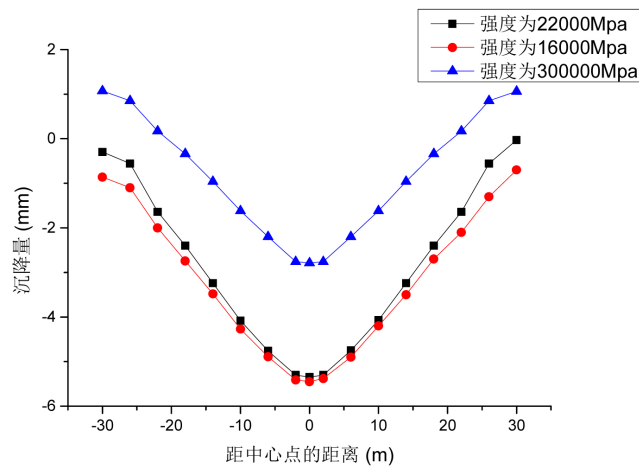


Figure 6. Pipeline Settlement Map of Various Strengths
图 6. 各强度管道沉降图

从图 6 可以看出，在管线埋深 4 M 的情况下，不同弹性模量参数管线之间的差异不大，变形基本一样，沉降形状均关于隧道中心线对称，最大沉降量在隧道中心线上方，弹性模量大的管道沉降比弹性模量小的管道沉降略小。因为管土相互作用，管受到土的压力而表现出抵抗作用，弹性模量大的管道沉降变形小，从管道沉降图看没有较大差异，所以增加管道的弹性模量来减少隧道开挖对管道带来的沉降是不可取的，耗资巨大，效果不明显。

5.2.2. 管线厚度

在隧道与管道垂直、管径为 1200 mm 的情况下，为了研究管道刚度对管道沉降的影响，设置参数进行对比见表 3。

Table 3. Pipeline thickness parameter table
表 3. 管道厚度参数表

管道分组	埋深管道/m	厚度/mm	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
第一组	4	20	40	45	14,500	0.2
第二组	4	40	40	45	14,500	0.2
第三组	4	60	40	45	14,500	0.2

各厚度管道沉降变化规律见图 7。

1) 在只改变管道厚度，其他条件不变情况下，管道沉降随着管道厚度增加会有一些的减少，不过影响范围都几乎一样，在距离隧道中线 30 米的地方沉降近似的接近于零，在距离隧道中心 26 米的位置到距离隧道中心 2 米位置的沉降斜率基本保持不变，都在隧道中心位置得到最大沉降。

2) 管道厚度的增加让管道的刚度提升，土与管道的相互作用也会提升，同时应注意施工对管线的扰动影响较大。

5.2.3. 开挖进尺分析

隧道的开挖进尺对管道沉降的影响非常大，虽然开挖进尺越大，施工速度越快，但是过大的开挖进尺容易导致事故的发生，所以确立合适的进尺很重要。为了更好的研究开挖进尺大小对管道沉降的影响，分别设置开挖进尺为 2 米、4 米、6 米，其塑性区分布见图 8、9、10。不同开挖进尺下的管道沉降量见图 11。

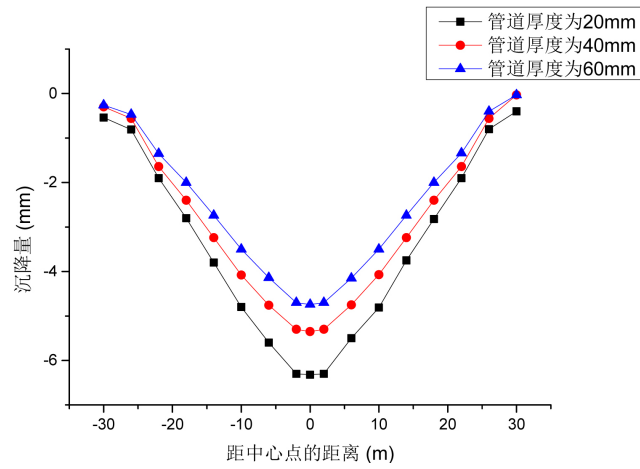


Figure 7. Pipeline settlement map of various thicknesses
图 7. 各厚度管道沉降图



Figure 8. Plastic zone with 2 m excavation step
图 8. 开挖步距 2 米的塑性区

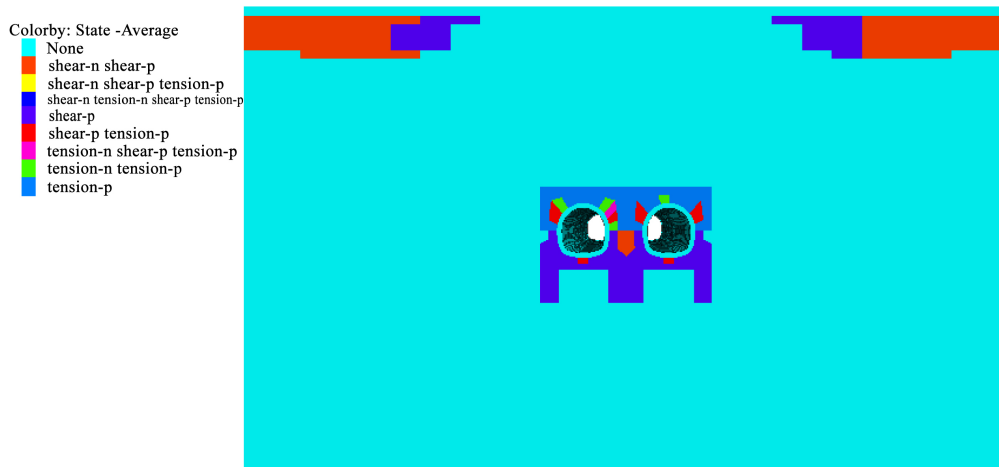


Figure 9. Plastic Zone with 4 m Excavation Step
图 9. 开挖步距 4 米的塑性区

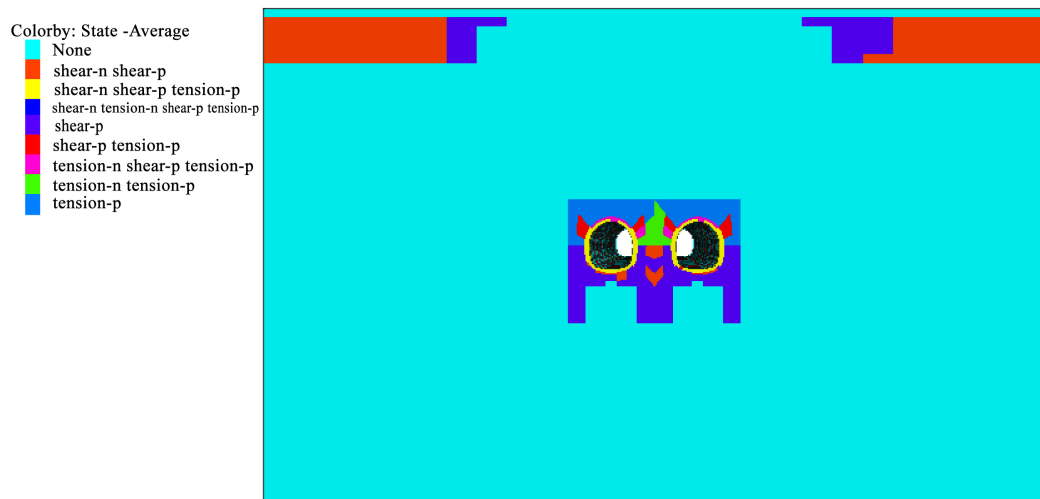


Figure 10. Plastic zone with 6 m excavation step
图 10. 开挖步距 6 米的塑性区

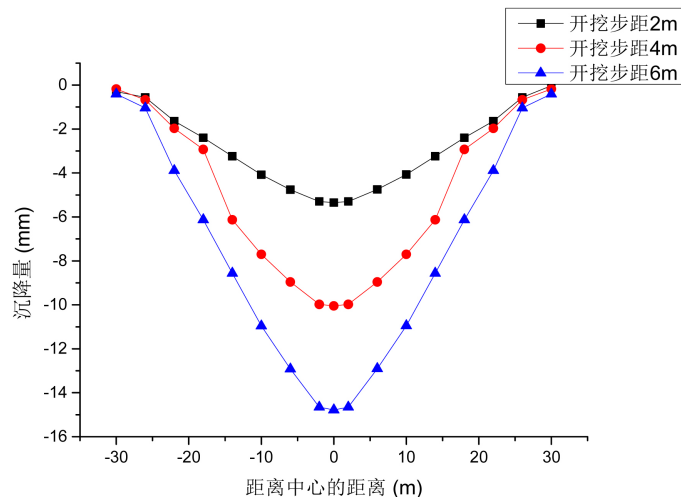


Figure 11. Settlement of different excavation steps
图 11. 不同开挖步距的沉降

1) 不同开挖步距的沉降曲线都是关于隧道中心对称的，且不同开挖步距的水平影响范围差不多，都在左右 30 米范围内，在隧道中心位置的沉降量最大。

2) 不同开挖步距对沉降的影响很大，开挖步距 2 米改为开挖步距 4 米增加一倍沉降量 5 mm，开挖步距从 4 米改为 6 米，沉降量增加了 4.5 mm，虽然增加趋势略有减少，但是沉降不可忽视，开挖步距为 2、4、6 米的斜率分别为 0.21 mm/m、0.51 mm/m、0.56 mm/m，斜率逐渐增大。

3) 开挖引起的塑性区主要集中在隧道周围和管线所在地层。随着开挖步距的增大，塑性区逐渐增大，主要是因为衬砌不能维持隧道周围土体的变形，引起大量土体的拉剪变形发展成塑性区。模拟中由于上台阶先开挖和支护，隧道下方产生很大的压力，在开挖步距较大情况下导致了每个隧道两侧会有很大剪切变形。

5.2.4. 衬砌强度分析

衬砌强度对管道位移的影响较大，确定合适的衬砌强度很重要，下文从不同强度衬砌引起的管道变

形来进行数值模拟，衬砌参数见表 4。

Table 4. Lining parameters

表 4. 衬砌参数

衬砌分组	弹性模量/MPa	体积模量/kPa	剪切模量/(°)	泊松比	
第一组	一衬	25,500	17e9	10.2e9	0.25
	二衬	32,500	21.7e9	12e9	0.25
第二组	一衬	20,000	13.3e9	8e9	0.25
	二衬	25,000	16.7e9	10e9	0.25
第三组	一衬	15,000	10e9	6e9	0.25
	二衬	15,000	10e9	6e9	0.25
第四组	一衬	5000	3.3e9	2e9	0.25
	二衬	5000	3.3e9	2e9	0.25

四组不同衬砌下管道沉降变化规律见图 12。

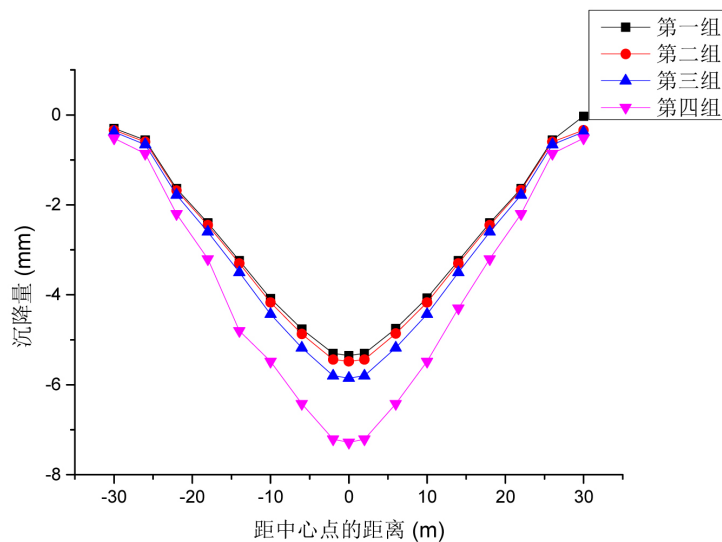


Figure 12. Settlement diagrams with different lining parameters

图 12. 不同衬砌参数沉降图

通过对不同衬砌下管道沉降图分析得到如下结论：

1) 所有沉降槽都是关于隧道中心线对称，在隧道中心线位置的沉降量最大，在距离隧道中心线约为 30 米的地方的沉降趋于零，认为隧道开挖影响范围约为距离隧道中心线约为 30 米范围内。

2) 沉降量随着衬砌强度的降低而增大，并且增大速度越来越快，在强度低于第三组值后，沉降量迅速变大，出现高达 8 mm 的沉降量。第三组的参数可以作为一个分界线，在第三组参数前后会出现较大差异的影响，对实际工程有一定的参考意义。

6. 数值模拟与实际情况对比分析

数值模拟认为双线隧道同时开挖，加固注浆是均匀的，衬砌强度也是均匀的，施工工序速度一样，忽略了地下水的影响，这些与现实情况存在一定差异。通过数值模拟试验与现场实测数据形成相应的沉降曲线，如图 13 所示。与实际工程相比，数值模拟的最大沉降为 5.75 mm 和实际情况的 4.35 mm 相差

1.4 mm, 不过规律基本一致, 在距离管道约为 10 米处开始出现明显沉降变化, 在远离管道 20 米处沉降量变化趋于稳定。在隧道开挖前期管道的沉降量十分微小, 随着施工的推进, 出现了一段快速的沉降段, 跟数值模拟过程趋于一致。

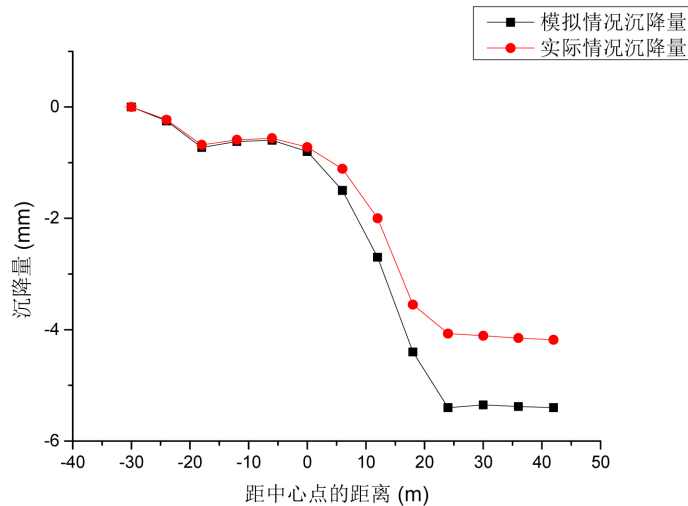


Figure 13. Contrast diagram of site settlement and simulated settlement
图 13. 现场沉降与模拟沉降对比图

7. 结论

1) 管片厚度对管片沉降有一定的影响, 在只改变管道厚度其他条件不变的情况下, 沉降量会随着管片厚度的增加而出现微小的减少。

2) 沉降在隧道中心位置最大, 随着开挖步距的增大沉降增加趋势略有减少, 但是沉降量不可忽视。开挖引起的塑性区主要集中在隧道衬砌周围和管线所在地层。随着开挖步距的增大, 塑性区逐渐增大, 由于隧道上台阶先开挖和安装衬砌会导致拱脚的应力增大, 拱脚位置最为危险。沉降量随着衬砌强度的降低而增大, 并且增大速度越来越快, 施工过程中应保证衬砌的强度。

3) 从力学方面分析, 为了减少塑性区域, 考虑预留部分土体作为支撑, 能改善围岩应力, 使得土中应力重新分布, 降低沉降量, 提高施工的安全性。

4) 模拟结论可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 胡群芳, 秦家宝. 2003-2011 年地铁隧道施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 705-710.
- [2] 董延昭. 浅埋暗挖法地铁隧道施工安全风险管理的分析[J]. 价值工程, 2014(21).
- [3] 王丽. 暗挖隧道施工诱发的邻近管线变形规律与控制技术[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [4] 邱美丽. 隧道施工中地下管线与土层相互作用数值分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [5] 张伦政. 地下管线与土层相互作用数值模拟与离心模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [6] 王霆. 地铁浅埋暗挖法施工对邻近管线的影响与控制[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [7] 李杰. 浅埋暗挖法地铁隧道预加固技术对比研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [8] 吴为义. 盾构隧道周围地下管线的性状研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] 唐波. 城市地铁隧道施工引起的地面沉降与处理[J]. 科技创新与应用, 2016(31): 248.
- [10] 王立宏. 浅埋暗挖地铁隧道衬砌受力变形机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2010.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org