

# 合肥地铁浅埋暗挖隧道施工对邻近管线的影响

裴子钰<sup>1</sup> 周仕波<sup>2</sup> 马明杰<sup>3,4</sup> 杨新安<sup>3,4</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 2. 合肥市轨道交通集团有限公司, 230001, 合肥;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

4. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

**摘要** 以合肥地铁 2 号线浅埋暗挖隧道工程为研究背景, 运用数值模拟和现场实测的方法, 研究隧道开挖影响下埋地管线变形及受力问题。研究结果表明, 管材、管径、管线所处地层、管隧间距及开挖工法是影响管线受力变形的主要因素。提出了施工时需要特别重视的工况及工况组合。

**关键词** 地铁; 隧道施工; 浅埋暗挖; 管线

**中图分类号** U456.3

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.023

## Influence of Hefei Metro Shallow-buried Underground-excavated Tunnel Construction on Adjacent Pipelines

PEI Ziyu, ZHOU Shibo, MA Mingjie, YANG Xin'an

**Abstract** With the shallow-buried underground-excavated tunnel project of Hefei Metro Line 2 as research background, adopting numerical simulation and field measurement methods, the influence of tunnel excavation on deformation and stress of buried pipelines is studied. Results show that pipe material, pipe diameter, pipeline level stratum, pipe-tunnel spacing and excavation method are the most significant factors affecting the stress and deformation of pipelines. In the end, the working conditions and the combination of working conditions that require special attention in construction are given.

**Key words** metro; tunnel construction; shallow-buried underground excavation; pipeline

**First-author's address** Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China

由于市区建筑物众多且地下管网密集, 地铁隧道建设施工受到日益复杂的周围环境条件制约。目前, 国内外关于地铁施工对邻近地下管线的影响问题已有一定的研究, 其分析方法大致可分为数学解析法、模型试验法及数值模拟法三类, 而数值模拟法的优点是可以建立真实反映工程实际情况的

模型。文献[1]利用 FLAC3D 有限差分法软件建立了隧道-土体-地下管线三维数值模型, 发现土质、管道材质、管道直径、管道埋深和管隧水平间距等因素对埋管沉降有较为明显的影响。文献[2-3]根据现场实测数据及有限元分析模型对平行于区间隧道的地下管线变形受力进行了分析, 研究发现管道沉降趋势与地面沉降趋势相吻合, 隧道开挖初期土体扰动对上部管线沉降影响较大, 开挖速度、施工方法和支护衬砌的封闭则是影响后期开挖过程中管线沉降的重要因素。但目前的研究多针对某一特定工程, 缺少对某一特定地区宏观范围的总结。

本文以合肥地铁 2 号线浅埋暗挖隧道工程为例, 采用 Abaqus 有限元软件分析地铁隧道施工对邻近管线受力变形的影响, 并根据合肥地区管线沉降控制标准及 2 号线现场实测结果, 总结合肥地区各因素影响下的管线变形超限工况。

## 1 合肥地区典型地层及管线情况

合肥地区地质条件较为复杂, 区内地面大都为第四系地层所覆盖。第四系地层厚度一般为 10~20 m, 第四系沉积物厚度、分布受地貌和基底控制。南淝河河漫滩与一级阶地为全新统黏土、粉质黏土、粉土及粉细砂层, 二级阶地上广泛出露上更新统黏土, 中、下更新统粉土夹砂层位于全新统与上更新统之下。基底由第三系、侏罗系泥岩、砂岩组成。其中, 上更新统黏土分布最广, 全新统黏土次之。根据文献[4-6]及多份地铁工程地质勘查报告, 合肥地区典型地层特征如表 1 所示。

城市地下管线结构复杂、种类繁多, 按照其用途不同一般可以分为给水管、排水管道、燃气管道、热力管道、电力管线、电信管线、工业管道和油气管道八大类; 按照材质不同则可以分为钢管、混凝土管、铸铁管、PVC(聚氯乙烯)/PE(聚乙烯)管

表 1 合肥地区典型地层特征

Tab. 1 Typical stratigraphic characteristics of Hefei area

| 地层代号 | 地层名称    | 状态特征                        | 层底埋深/m    | 常见厚度/m    |
|------|---------|-----------------------------|-----------|-----------|
| ①1   | 杂填土     | 褐灰~灰黄色,湿,松散,土质不均,以黏性土为主     | 0.4~6.7   | 0.8~5.4   |
| ②3   | 全新统粉质黏土 | 灰褐色、灰黄色,可塑,中压缩性             | 5.2~12.0  | 2.3~9.1   |
| ④2   | 全新统黏土   | 黄褐色、灰褐色,可塑、硬塑,中低压缩性         | 8.4~29.4  | 5.2~22.8  |
| ⑥2   | 上更新统黏土  | 褐黄色、灰黄色,硬塑、坚硬,中低压缩性         | 27.0~40.5 | 10.1~31.6 |
| ⑧1   | 全风化泥质砂岩 | 棕红色、紫红色,风化剧烈,呈黏土状,原岩结构基本被破坏 | 34.5~50.5 | 1.0~5.4   |

等。合肥地区采用的管线沉降控制标准规定:有压管线或重要管线的沉降需控制在 10 mm 以内,无压雨水、污水管沉降控制在 20 mm 以内,无压其他管线沉降控制在 30 mm 以内。合肥地区地下管线性质如表 2 所示。

表 2 合肥地区地下管线性质

Tab. 2 Underground pipeline properties of Hefei area

| 管线类型 | 材质         | 管径或外形尺寸                | 管底埋深/m    |
|------|------------|------------------------|-----------|
| 自来水管 | 钢          | $\phi$ 500~1 200 mm    | 1.20~2.70 |
| 给水管  | 铸铁、混凝土     | $\phi$ 500~1 000 mm    | 1.20~2.66 |
| 污水管  | PE、混凝土     | $\phi$ 400~1 000 mm    | 1.85~5.30 |
| 雨水管  | PVC、PE、混凝土 | $\phi$ 300~1 600 mm    | 1.50~4.76 |
| 燃气管  | 钢          | $\phi$ 400~600 mm      | 1.40~2.10 |
| 电力管  | 混凝土        | 600 mm $\times$ 600 mm | 1.18~1.90 |
|      | 玻璃纤维       | 900 mm $\times$ 900 mm | 1.18~1.90 |
| 热力管  | 钢          | $\phi$ 400~630 mm      | 0.97~2.70 |

元模型,将土层分为管线所处土层、隧道所处土层和隧道下卧土层。地层断面分布示意图如图 1 所示。为简化计算且不失一般性,本文选取的模型参数为:隧道埋深为 6 m,断面型式为直墙拱形,隧道跨度为 6 m,隧道净高为 3.5 m,隧道开挖进尺为 2 m。采用控制变量法定性定量地分析相关主要因素对管线受力变形的影响规律。

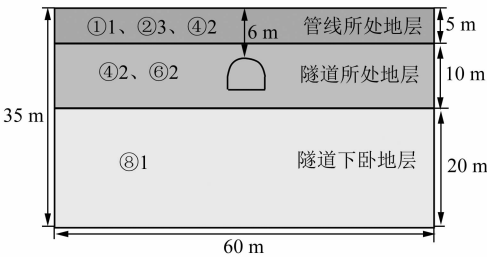


图 1 地层断面分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stratum section distribution

2 隧道开挖对邻近管线的影响因素分析

2.1 工况分析

隧道开挖对管线受力变形的主要影响因素为管线自身因素(管材、管径)、地层因素(管线所处地层、隧道所处地层)、管线与隧道相对位置因素(相交角度、相对距离)和隧道施工因素(开挖工法),详见表 3。

表 3 影响管线受力变形的主要因素及其细分类别

Tab. 3 Main factors influencing pipeline deformation under stress and their detailed classification

| 影响因素       | 细分类别                                      |
|------------|---|
| 管材         | 钢管(刚性接头)、铸铁管(柔性接头)、混凝土管(柔性接头)、PVC 管(刚性接头) |
| 管径/mm      | 600~1 200                                 |
| 管线所处地层     | ①1、②3、④2                                  |
| 隧道所处地层     | ④2、⑥2                                     |
| 管隧相交角度/(°) | 0~90                                      |
| 管隧间距/m     | 1~4(垂直距离),0~12(水平距离)                      |
| 开挖法        | 台阶法、四部 CRD 法、六部 CRD 法                     |

注:CRD 法为交叉中隔墙法。

由于管线埋深较浅,隧道基本都是下穿既有管线,因此,为建立与实际更为接近的分层地基有限

2.2 建立计算模型

考虑计算效率及计算边界的影响,模型横向长度( $x$  方向)取为 60 m,模型纵向长度( $y$  方向)取为 30 m,模型竖向高度( $z$  方向)取为 35 m。为了提高管线和隧道附近区域的计算精度,对管线及隧道部分的网格进行局部加密,有限元网格的单元总数为 48 635。在模型的  $x$  向边界面与  $y$  向边界面施加水平约束,在模型底部边界面施加竖向约束,顶部边界面为自由面。三维计算模型如图 2 所示。隧道衬砌及周围岩土体采用实体单元模拟,单元类型选择 C3D8R 单元,采用减缩积分计算。衬砌本构模型采

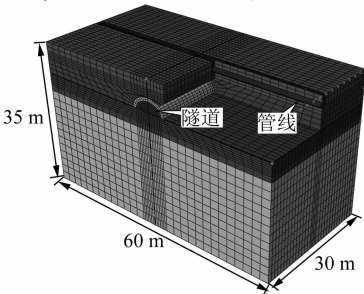


图 2 三维计算模型

Fig. 2 Three-dimensional calculation model

用线弹性模型,岩土体本构模型采用摩尔-库伦模型。地层及相关结构参数取值如表 4 所示。

表 4 地层、结构及材料相关参数取值  
Tab. 4 Related parameter values of stratum, structure and material

| 项目           | 密度/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性<br>模量/kPa         | 泊松比  | 黏聚力/<br>kPa | 内摩<br>擦角/(°) | 厚度/<br>m        |
|--------------|-----------------------------|----------------------|------|-------------|--------------|-----------------|
| ①1 杂填土       | 18.5                        | 1.20×10 <sup>4</sup> | 0.38 | 16.0        | 12.0         | 2.600           |
| ②3 全新统粉质黏土   | 19.7                        | 2.80×10 <sup>4</sup> | 0.30 | 45.0        | 15.0         | 6.700           |
| ④2 全新统黏土     | 19.5                        | 7.50×10 <sup>4</sup> | 0.29 | 34.0        | 18.0         | 19.300          |
| 初期支护/<br>中隔壁 | 25.0                        | 2.80×10 <sup>7</sup> | 0.20 | —           | —            | 0.300/<br>0.250 |
| 二次衬砌         | 25.0                        | 3.15×10 <sup>7</sup> | 0.20 | —           | —            | 0.400           |
| 等效加固圈        | 19.8                        | 4.20×10 <sup>4</sup> | 0.30 | 67.5        | 22.5         | 0.800           |
| 钢管           | 78.5                        | 2.06×10 <sup>8</sup> | 0.30 | —           | —            | 0.012           |
| PVC 管        | 15.0                        | 2.76×10 <sup>6</sup> | 0.20 | —           | —            | 0.020           |

Abaqus 软件虽提供了 PSI(管-土相互作用单元),但该单元将管-土位移视为连续,不能真实反映隧道开挖过程中埋地管道与管周土体的相对变形关系。因此,本文引入接触面功能来解决管-土接触问题,通过定义主从接触面和接触面上的相互作用来模拟不同材质的接触面,法向接触采用硬接触,切向接触采用罚函数摩擦类型。

分析管材因素影响时,需分析不同刚度的管线接头。将管线分为刚性和柔性接头两种。对于刚性接头管线,将其看作是刚度一致的连续管线,一般较为简单。而对于柔性接头管线则将其看作需要模拟接头性质的非连续管线。Abaqus 软件中,可以通过定义连接单元模拟柔性接头,即:将管线分为若干管节,使用 2 节点连接单元在管节之间建立连接,并采用耦合约束将各节点和对应管节横截面的运动约束在一起,再通过定义连接属性描述接头间的相互作用和约束关系。

对不同隧道开挖工法的模拟,则是按照实际施工过程,采用软化模量法,在相互作用模块对开挖分析步下的模型改变类型进行设置,移除预先划分好的隧道开挖部分的实体单元。

### 2.3 管线受力变形影响因素分析

#### 2.3.1 管线自身因素

控制地层组合为①1+④2+⑧1,管底埋深为 3 m。在与隧道垂直的情况下,不同材质及管径的管线沉降和管线轴向拉应力计算结果如图 3 所示。由图 3 可知:4 种材质管线的沉降排序为钢管沉降<球磨铸铁管沉降<混凝土管沉降<PVC 管沉降;4 种材

质管线的轴向拉应力排序为钢管轴向拉应力>球磨铸铁管轴向拉应力>混凝土管轴向拉应力>PVC 管轴向拉应力。随着管线自身弹性模量的增大,受隧道开挖影响产生的管线沉降逐渐减小,但轴向拉应力逐渐增大。对于管径为 600~1 200 mm 的管线而言,随着管径的增大,管线沉降和管线轴向拉应力都表现为逐渐减小的趋势,且减小的速率也在逐渐降低。主要原因是随着管径的增大,管线抗弯刚度也随之增大,导致管线抵抗地层变形的能力有所增强。对于弹性模量差异最大的钢管和 PVC 管,沉降差都约为 9.67 mm,轴向拉应力差都约为 20.19 MPa。由此可以看出,不同材质管线的沉降值差异相对较小,而轴向拉应力值差异较大。当管径从 600 mm 增大到 1 200 mm 时,4 种材质管线的沉降量都约减小了 6.50 mm,轴向拉应力都约减小了 8.02 MPa。

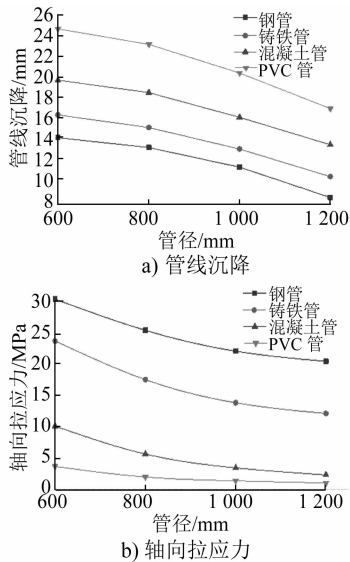


图 3 不同材质及管径的管线沉降和轴向拉应力计算结果  
Fig. 3 Calculation results of pipeline settlement and axial tensile stress for different materials and pipe diameters

#### 2.3.2 地层因素

控制管线的管径为 1 000 mm 的钢管,管底埋深为 3 m,管线与隧道垂直的情况下,计算不同管线及隧道所处地层的管线沉降和轴向拉应力。根据计算结果:管线所处地层对管线受力变形的影响较为显著;隧道所处地层为④2 的管线沉降和轴向拉应力非序为①1 地层管线沉降和轴向拉应力>②3 地层管线沉降和轴向拉应力>④2 地层管线沉降和轴向拉应力;管线沉降为 8.23~11.24 mm,轴向拉应力为 17.42~22.26 MPa。隧道所处地层对管线受力变形的影响相对较小,控制管线所处地层为①1,则

两种地层的管线沉降和轴向拉应力排序为④2 地层  
管线沉降和轴向拉应力>⑥2 地层管线沉降和轴向  
拉应力;管线沉降为 10.68~11.24 mm,轴向拉应力  
为 20.78~22.26 MPa。

2.3.3 管线与隧道相对位置因素

控制地层组合为①1+④2+⑧1,管线为管径为  
1 000 mm 的钢管。不同管隧垂直距离、水平距离和  
相交角度情况下的管线沉降和管线轴向拉应力计  
算结果如图 4—图 6 所示。随着管线埋深的增加,  
管线沉降和轴向拉应力值也随之增大。管底埋深

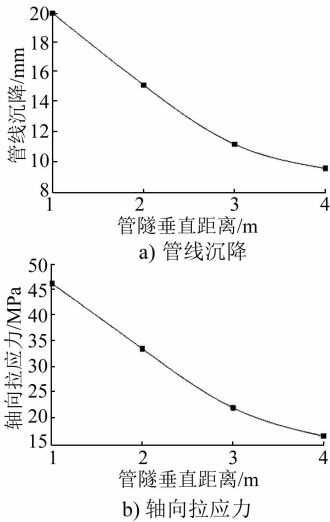


图 4 不同管隧垂直距离下管线沉降和轴向拉应力计算结果  
Fig. 4 Calculation results of pipeline settlement and axial tensile stress for different pipe-tunnel vertical distances

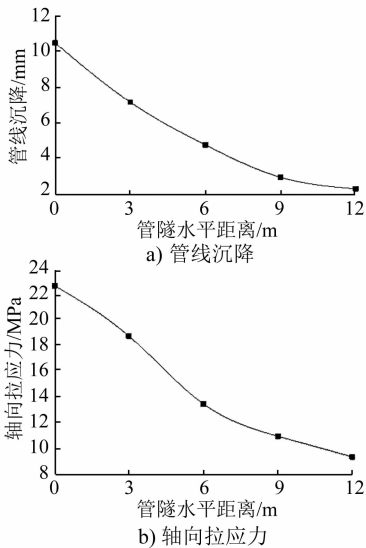


图 5 不同管隧水平距离下管线沉降和轴向拉应力计算结果  
Fig. 5 Calculation results of pipeline settlement and axial tensile stress for different pipe-tunnel horizontal distances

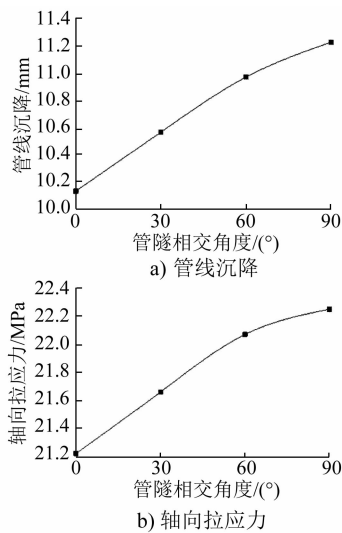


图 6 不同管隧相交角度下管线沉降和轴向拉应力计算结果  
Fig. 6 Calculation results of pipeline settlement and axial tensile stress for different pipe-tunnel intersection angles

从 2 m 增大到 5 m 时,管隧垂直距离从 4 m 减小到  
1 m,管线沉降增加了 10.31 mm,管线轴向拉应力增  
加了 24.66 MPa。管隧水平距离在 0~12 m(2 倍隧  
道跨度)范围内变化时,管线沉降和轴向拉应力随  
水平距离的增加而减小,其中管线沉降减小了 8.24  
mm,轴向拉应力减小了 13.45 MPa;超过 1.5 倍隧  
道跨度后,曲线趋于平缓,管线响应几乎不再发生  
变化。

2.3.4 隧道施工因素

控制地层组合为①1+④2+⑧1,管线为管径为  
1 000 mm 的钢管,管底埋深为 3 m。管线与隧道垂  
直的情况下,不同隧道施工工法的管线沉降和轴向  
拉应力计算结果如表 5 所示。由表 5 可知,隧道施  
工工法对管线受力变形的影响较为明显,其中台阶  
法产生的沉降和轴向拉应力最大,分别为 13.33 mm  
和 27.35 MPa。

表 5 不同隧道施工工法的管线沉降和轴向拉应力计算结果  
Tab. 5 Calculation results of pipeline settlement and axial tensile stress for different tunnel construction methods

| 施工方法     | 管线沉降/mm | 管线轴向拉应力/MPa |
|----------|---------|-------------|
| 台阶法      | 13.33   | 27.35       |
| 四部 CRD 法 | 11.24   | 22.26       |
| 六部 CRD 法 | 9.67    | 18.66       |

相比于管线自身条件、地层条件及管隧相对位  
置,隧道施工工法属于可控因素,可根据实际管线  
与隧道情况进行相应调整。即当其他三类因素处

于对管线受力变形不利的情况时,可以对施工方案进行相应调整,以达到保护管线的目的。

### 3 基于现场实测的管线变形分析

以合肥地铁2号线的6个暗挖通道及其上部管线为研究对象。选取种类多样且受隧道施工影响较大的管线,并剔除监测数据误差较大的管线,共确定15条监测管线。绘制管线材质、管隧垂直距离、管隧相交角度和管线所处地层4个因素影响下的管线沉降时程曲线。

不同管线材质的管线沉降时程曲线如图7所示。由图7可知,管线沉降的现场实测结果与计算结果较为接近。图7仅针对管线材质进行了分析,其他因素导致的管线沉降差距较大,所以管线沉降变化范围较

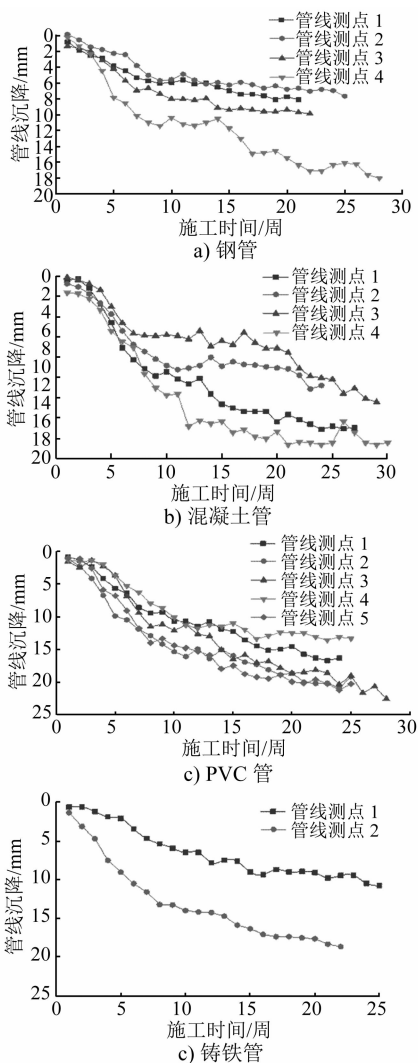


图7 不同管线材质的管线沉降时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of pipeline settlement for different pipeline materials

大。钢管、混凝土管、PVC管、铸铁管的最终沉降值变化区间依次为7.59~17.95 mm、10.75~16.70 mm、13.31~22.50 mm、10.73~18.62 mm。

选取3条管径、地层因素差别不大的PVC管,对管隧垂直距离分别为1.76 m、2.67 m、3.41 m的管线进行比较,其管线沉降时程曲线如图8所示。由图8可知:管隧间距为1.76 m、2.67 m、3.41 m的管线最终沉降值分别为-22.50 mm、-16.29 mm、-13.31 mm;与隧道距离越近的管线,受隧道施工影响越严重,必须采取适当的管线保护措施以防止管线变形超限。

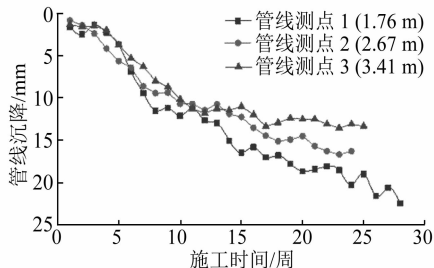


图8 不同管隧垂直距离的管线沉降时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of pipeline settlement for different pipe-tunnel vertical distances

选取与隧道分别处于斜交和垂直状态的4条PVC管和钢管进行比较。不同管隧相交角度的管线沉降时程曲线如图9所示。由图9可知:钢管和PVC管在斜交和垂直两种位置下的管线最终沉降值分别为-7.59 mm和-8.02 mm,-19.14 mm和-22.50 mm;不同管隧相交角度对管线变形有一定影响,但其影响有限,且在管隧垂直状态下,管线沉降最大。

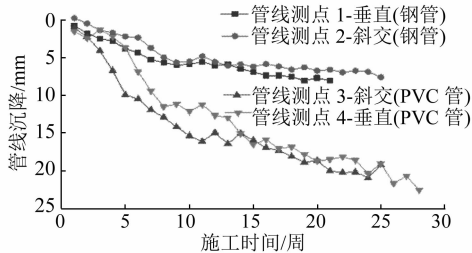


图9 不同管隧相交角度的管线沉降时程曲线

Fig. 9 Time-history curve of pipeline settlement for different pipe-tunnel intersection angles

选取分别位于①1、②3和④2这3种土层且其他因素差别不大的3条混凝土管进行比较。不同管线所处地层的管线沉降时程曲线如图10所示。由图10可知:管线最终沉降值分别为-16.40 mm、-14.90 mm和-10.75 mm;埋置于土性越好土层中的管线,其沉降越小。

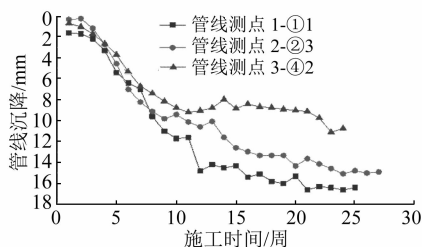


图10 不同管线所处地层的管线沉降时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of pipeline settlement for pipelines in different strata

## 4 结论

1) 将隧道开挖对管线受力变形的主要影响因素总结为四类:管线自身因素(管材、管径)、地层因素(管线所处地层、隧道所处地层)、管线与隧道相对位置(管隧相交角度、管隧间距)和隧道施工因素(隧道开挖工法)。

2) 4种材质管线的沉降排序为:钢管沉降<球磨铸铁管沉降<混凝土管沉降<PVC管沉降;4种材质管线的轴向拉应力排序为:钢管轴向拉应力>球磨铸铁管轴向拉应力>混凝土管轴向拉应力>PVC管轴向拉应力。管线所处地层对管线受力变形的影响较为显著,隧道所处地层对管线受力变形的影响相对较小。随着管径的增大,或是管隧相对距离的增大,管线沉降和管线轴向拉应力均呈现逐渐减小的趋势。

3) 结合合肥地区的管线沉降控制标准,需重点关注4种可能出现的典型工况及其组合:管径小于800 mm的PVC管和混凝土管和管径小于600 mm的钢管和铸铁管;管隧垂直间距在2 m以内且管隧水平间距在1.5倍隧道跨度内的管线;跨度大于8 m

但未采用六部CRD法开挖的隧道的邻近管线;处于①1、②3地层中的管线。对此应引起格外重视,施工中应加强监测,必要时可采取管线保护措施。

## 参考文献

- [1] 吴为义. 盾构隧道周围地下管线的性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.  
WU Weiyl. Study on mechanical behaviors of buried pipelines induced by shield tunneling construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2008.
- [2] 骆建军,张顶立,王梦恕,等. 地铁施工对管线的影响[J]. 中国铁道科学,2006,27(6):124.  
LUO Jianjun,ZHANG Dingli,WANG Mengshu,et al. Influence of metro construction on underground pipeline[J]. China Railway Science,2006,27(6):124.
- [3] 王绍君. 暗挖隧道施工对平行地下管线性状影响研究[J]. 土木工程学报,2014,47(增刊2):334.  
WANG Shaojun. Influence of tunneling construction on buried pipelines paralleled with running tunnel[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(S2):334.
- [4] 王国强. 安徽省江淮地区膨胀土的工程性质研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):119.  
WANG Guoqiang. Study on engineering properties of expansive soil in Jianghuai area of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(1):119.
- [5] 汤明玉. 合肥市开发区工程地质条件综合评述[J]. 上海地质,1999,20(2):34.  
TANG Mingyu. A comprehensive evaluation on engineering geological conditions in the developing area of Hefei city, Anhui Province[J]. Shanghai Geology,1999,20(2):34.
- [6] 李晓昭,罗国煜,龚洪祥,等. 土体工程地质层组的划分[J]. 岩土力学,2004,25(5):759.  
LI Xiaozhao, LUO Guoyu, GONG Hongxiang, et al. The division of engineering geological strata groups of soil mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(5):759.

(收稿日期:2020-10-15)

(上接第115页)

题,通过提升城市轨道交通环境的主题性与教育性,帮助培养儿童审美想象力和理解力。关注城市中的儿童环境,强调其社会参与价值,促进儿童身心健康发展,也有助于城市治理发展的永续,创造宜居城市。

## 参考文献

- [1] 张艺馨. 斯德哥尔摩地铁站内的公共艺术[J]. 都市快轨交通,2016,29(4):121.  
ZHANG Yixin. Public art in Stockholm subway station[J]. Urban Rapid Rail Transit,2016,29(4):121.

- [2] 王建平,郭亚新. 蒙台梭利环境教育思想与儿童发展关系的理论建构[J]. 比较教育研究,2016,38(11):55.  
WANG Jianping, GUO Yaxin. The theoretical construction of the relationship between Montessori's environmental education thought and children's development[J]. International and Comparative Education,2016,38(11):55.
- [3] 邱学青,高妙. 传承与超越:从教学游戏化到课程游戏化[J]. 学前教育研究,2021(4):3.  
QIU Xueqing, GAO Miao. Inheritance and transcendence: from teaching based on play to curriculum based on play[J]. Studies in Early Childhood Education,2021(4):3.

(收稿日期:2021-08-22)