

# 过街隧道施工对地下管线影响的三维数值模拟

魏 纲<sup>1</sup>, 魏新江<sup>1</sup>, 裘新谷<sup>2</sup>, 姚 宁<sup>3</sup>

(1. 浙江大学城市学院, 浙江 杭州 310015; 2. 杭州市建设委员会, 浙江 杭州 310006; 3. 宁波市建筑设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315012)

**摘要:** 采用三维有限元方法分析过街隧道施工引起的相邻地下管线变形和受力, 研究路面、管线材质、管线埋深、管线与隧道轴线间距以及管线与土体弹性模量比等因素对地下管线位移的影响, 并与实测值进行比较。研究结果表明: 有限元模拟结果与实测值较吻合, 略大于实测值; 路面的存在使浅埋管线的位移变小、沉降槽宽度变窄; 隧道开挖引起的管线水平位移远小于竖向位移; 与隧道垂直管线的竖向位移和水平位移最大值与管线埋深基本呈线性变化, 且随着管线与土体模量比的增大逐渐减小; 与隧道平行管线的最大竖向位移和水平位移值均随管线间距和埋深之比( $L/h$ )增大而减小, 最大水平位移值与  $L/h$  值基本呈线性关系, 最大竖向位移值在  $L/h < 10$  时迅速增大; 管线最大拉应力和压应力均随着  $L/h$  值增大而减小, 当  $L/h < 5$  时急剧增大, 当  $L/h \geq 5$  时缓慢减小, 且应力值比较小。

**关键词:** 隧道工程; 过街隧道; 地下管线; 数值模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 1 - 2853 - 07

## 3D NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF UNDERGROUND URBAN STREET-PASSAGE TUNNEL CONSTRUCTION ON ADJACENT PIPELINE

WEI Gang<sup>1</sup>, WEI Xinjiang<sup>1</sup>, QIU Xingu<sup>2</sup>, YAO Ning<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China; 2. Hangzhou City Committee of Construction, Hangzhou, Zhejiang 310006, China; 3. Ningbo Architectural Design and Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315012, China)

**Abstract:** Three-dimensional finite element analysis model is established to simulate the effects of tunnel excavation on adjacent underground pipeline. The influences of pavement, pipeline material, buried depth, spacing distance between pipeline and tunnel, and elastic modulus ratio of soil and pipeline on the displacement of underground pipeline is discussed. Then the calculation values are compared with the test values. It shows that the results of finite element numerical simulation are well in accordance with but slightly larger than measured data. Displacement of shallow-buried pipeline decreases and settlement trough width becomes narrow due to the existence of pavement. Horizontal displacement of underground pipeline induced by tunnel excavation is far less than vertical displacement. The maximum horizontal displacement and vertical displacement of pipeline perpendicularly crossing with tunnel change linearly with buried depth of pipelines, and decrease with the increase of elastic modulus ratio of soil and pipeline. Defining  $L$  as ratio of distance between axial lines of pipeline and tunnel, and  $h$  as buried depth of pipelines, The maximum horizontal displacement and vertical displacement of pipeline parallel with tunnel decrease with the increase of  $L/h$ . The maximum horizontal displacement changes linearly with  $L/h$ , and the maximum vertical displacement increases quickly when  $L/h < 10$ . The maximum stress of pipeline decreases with the increase of  $L/h$ , and increases quickly when  $L/h < 5$ . The maximum stress of pipeline changes slowly with small value when  $L/h \geq 5$ .

**Key words:** tunnelling engineering; street-passage tunnel; underground pipeline; numerical simulation

**收稿日期:** 2007 - 10 - 07; **修回日期:** 2007 - 12 - 03

**基金项目:** 浙江大学城市学院教师科研基金资助项目(J09020)

**作者简介:** 魏 纲(1977 -), 男, 博士, 2000 年毕业于宁波大学建筑工程专业, 现任副教授, 主要从事地下隧道施工技术及其对周边环境影响等方面的教学与研究工作。E-mail: weig@zucc.edu.cn

# 1 引言

随着城市化进程的加速，城市地面交通变得越来越拥挤，我国很多大城市已经开始修建地下隧道，特别是地下人行通道。为了不影响地面交通，对于主要交通干道的地下人行通道(以下简称过街隧道)，通常采用浅埋暗挖法施工。由于市区道路下面地下管线密集，近年来过街隧道暗挖施工引起相邻地下管线开裂的事故时有发生，对日常生活、生产造成很大影响。因此，过街隧道暗挖施工对相邻地下管线影响的研究具有重要的意义。

目前，国内外关于地下隧道施工对相邻地下管线影响的研究较多，大多采用经验控制标准方法<sup>[1~3]</sup>、数值模拟<sup>[4~11]</sup>以及解析方法<sup>[12~16]</sup>，但主要集中在地铁隧道施工方面(包括暗挖法和盾构法)，对采用浅埋暗挖法施工的过街隧道研究非常少<sup>[10]</sup>，且均不考虑路面的影响。而实际上由于地下管线埋深较浅，路面会对其产生较大影响，这与实际情况不符，需作进一步研究。

本文采用三维有限元方法分析了过街隧道采用浅埋暗挖法施工对相邻地下管线(以下简称管线)的影响，在模拟中考虑了路面的影响。

## 2 有限元建模说明

### 2.1 基本假定

针对城市过街隧道浅埋暗挖法施工工况，采用有限元软件建立了三维有限元模型，分析了过街隧道开挖施工对邻近管线的影响。

本文假定：(1) 管线为等直径、等壁厚的薄壁管，且不考虑管道接头的影响，管道材料按照各向同性的线弹性体考虑；(2) 岩土体材料符合 Drucker-Prager 模型；(3) 土体为弹塑性，为便于讨论，土体不考虑分层情况；(4) 土体在自重作用下产生的变形和应力在开挖前已经完成，在有限元计算中不予考虑；(5) 管线与周围土体始终紧密接触。

### 2.2 建模及参数选择

管线埋深一般为 0~6 m<sup>[6]</sup>，故仅对这一范围内的埋深作分析。分析时仅考虑管线在隧道上方的工况，包括垂直于和平行隧道 2 种工况。

#### (1) 模拟工况说明

标准工况：隧道覆土深度为 6 m、土体弹性模量 21 MPa、铸铁管线埋深 2 m、垂直于隧道掘进方向。隧道尺寸见图 1(图中， $H$  为隧道埋深(m)， $h$  为

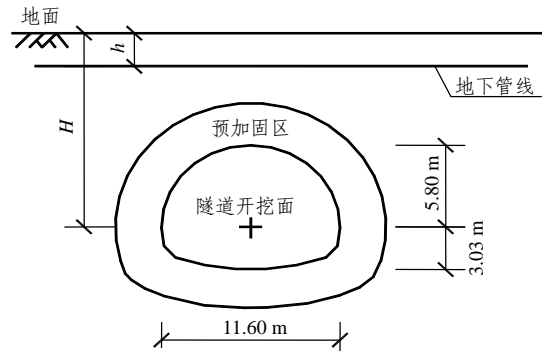


图 1 管线和隧道几何关系图

Fig.1 Chart of geometrical relations between pipeline and tunnel

管线埋深(m))。

然后改变管线材质和管线埋深，分析影响因素。对平行于隧道的管线，分析管线和隧道间距不同时隧道施工对管线的影响。

#### (2) 计算模型的位移边界条件

模型上表面为自由面，四周表面约束其垂直方向上的位移，底部约束全部位移。管线节点与土体节点耦合，隧道衬砌节点与周围土体节点耦合。由于管线较长，可假定管线端部无位移，将管线两端位移全部约束。

#### (3) 计算参数及单元类型

模型尺寸为 120 m×50 m×30 m( $X \times Y \times Z$ )， $Z$  向为隧道开挖方向。将锚杆的力学作用等效为锚杆作用范围内土体力学参数的改善，采用预加固区进行模拟，厚度为 2 m。隧道衬砌厚度为 0.4 m，按线弹性材料考虑，材料为 C30 钢筋混凝土。路面厚度 0.7 m，按线弹性材料考虑。管线采用梁单元模拟，把梁单元的截面定义成圆环形，外直径均取为 600 mm，壁厚取 15 mm。

土体、预加固区、衬砌和路面的材料参数见表 1。不同材料物理力学参数见表 2。隧道和管线的相对位置见图 1。隧道采用 CRD 四步开挖法施工(开挖顺序：左上、左下、右上、右下)。三维有限元计算模型见图 2。管线与隧道的空间相对位置关系见图 3。

表 1 不同材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of different materials

材料	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kN	内摩擦角 /( $^\circ$ )
一般土体	1 900	21	0.31	19	25
预加固区	2 000	100	0.25	35	25
二次衬砌	2 500	30 000	0.20	-	-
路面	1 900	40	0.29	-	-

表 2 不同材质管线物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of pipelines with different materials

管线	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
铸铁管线	7 800	9.000 × 10 <sup>4</sup>	0.275
钢管线	7 850	2.060 × 10 <sup>5</sup>	0.300
混凝土管线	2 500	2.500 × 10 <sup>4</sup>	0.170
PVC 管线	1 500	2.261 × 10 <sup>3</sup>	0.350

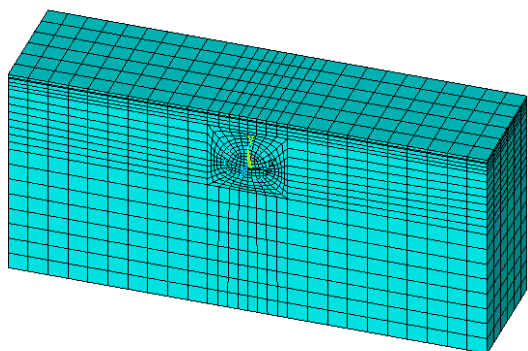


图 2 三维有限元计算模型

Fig.2 3D finite element computing model

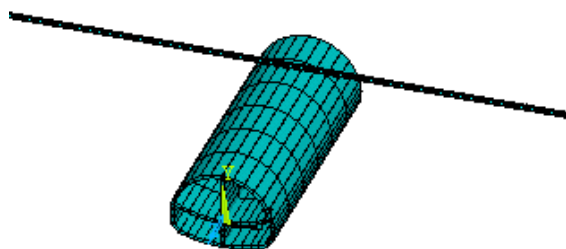


图 3 隧道与管线的空间位置关系图

Fig.3 Spatial position relation of tunnel and pipe

### 2.3 有限元模拟步骤

#### (1) 建立模型

根据模拟工况, 选取参数和单元类型, 建立三维有限元模型, 定义所需的单元集合和节点集合。

#### (2) 初始应力场计算

需要先在土体中施加重力, 杀死衬砌单元, 然后进行计算, 从而得到初始位移场和初始应力场。隧道开挖后, 土体有向临空面移动的趋势, 为了真实地模拟实际施工中隧道开挖后二次衬砌达到强度之前这一时间段内的情况, 采用应力释放率来模拟土体变形的真实情况。

#### (3) 土体开挖计算

开挖土体就是将开挖的土体单元设置为死单

元。首先隧道开挖后, 杀死衬砌并且只施加一定的节点力进行计算; 然后激活衬砌, 将剩余的节点力施加到节点上去再进行计算。这样才完成一次开挖过程。节点力释放率的大小则需要根据经验和实际施工情况进行选择。

#### (4) 模拟细则

本次模拟隧道长度为 30 m, 采用中隔墙法(CD工法)开挖(分 4 个部分开挖)。每步进尺 5 m、分 2 个时间步计算, 分别代表实际施工时间 1 d。

## 3 有限元模拟结果分析

为便于分析规律, 本文在考虑某一因素的影响时, 均假定其他条件不变。

### 3.1 管线埋深对垂直地下管线的影响

对不同管线埋深时隧道施工引起的垂直铸铁材质管线的变形情况进行模拟, 管线埋深分别取 1, 2, 3 和 4 m。

图 4 给出了不同埋深时隧道施工引起的管线水平位移, 如图所示, 隧道施工引起的管线水平位移较小, 最大值为 5.5 mm; 随着管线埋深增加, 隧道施工引起的管线最大水平位移值也逐渐增大, 但增加幅度很小, 同时影响范围也基本不变, 表明管线埋深对管线水平位移的影响较小, 可忽略不计。

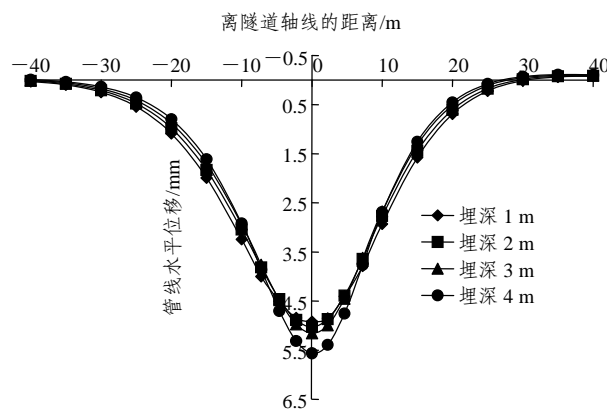


图 4 不同埋深时隧道施工引起的管线水平位移

Fig.4 Horizontal displacements of underground pipeline induced by tunnel excavation with different buried depths

图 5 给出了不同埋深时隧道施工引起的管线竖向位移, 由图可见, 管线埋深对管线竖向位移的影响较大。当管线埋深为 2, 3, 4 m 时, 管线的最大沉降值和沉降曲线斜率都随着埋深增大而增大, 其竖向沉降曲线的最大斜率分别为 1.172, 1.968 和

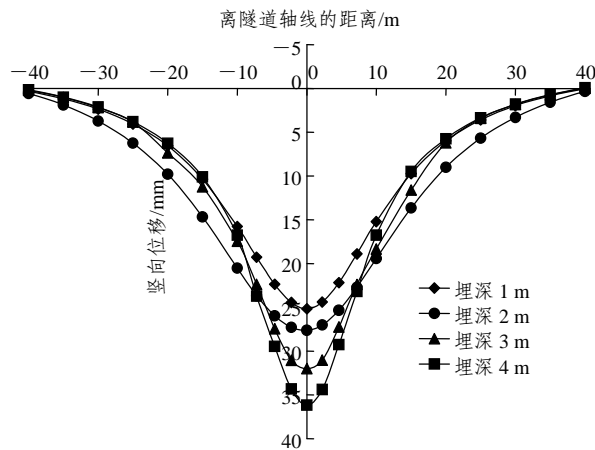


图5 不同埋深时隧道施工引起的管线竖向位移

Fig.5 Vertical displacements of underground pipeline induced by tunnel excavation with different buried depths

2.495 mm/m。其沉降槽宽度则随着埋深的增大而减小,表明在均匀土层中,管线离隧道越近(埋深越大),隧道施工对管线的影响越大。

模拟中发现,当管线埋深为1 m时其最大沉降值和沉降槽宽度都小于埋深为2 m的工况,其竖向沉降曲线的最大斜率为1.256 mm/m,则要大于埋深为2 m的工况。这是由于当管线埋深为1 m时,管线顶部和路面的下表面相切(管线外径为600 mm、路面厚度为0.7 m)。而在路面模拟中,路面材料的弹性模量指标要比一般土体高,相当于对土体进行了加固,导致管线和土体的模量比值变小。因此与相同条件下不考虑路面的管线相比,管线位移要变小、沉降槽宽度变窄,其沉降曲线斜率也要变大。

从图6可以看出:隧道开挖引起的管线最大竖向位移和水平位移与管线埋深基本成线性变化,可用下面公式分别进行拟和:

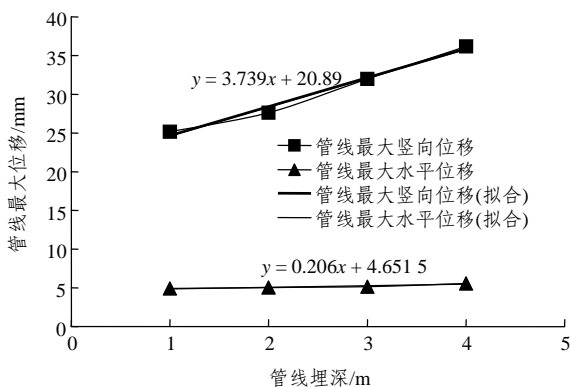


图6 不同埋深时隧道施工引起的管线最大位移

Fig.6 Maximum displacements of underground pipeline induced by tunnel excavation with different buried depths

$$y = 3.739x + 20.89 \tag{1}$$

$$y = 0.206x + 4.6515 \tag{2}$$

式(1), (2)中常数值与隧道施工情况、隧道断面、管线材质、隧道埋深等因素相关。

### 3.2 管线材质对垂直地下管线的影响

城市管线主要用于给排水、供气、供电及工业用途等,对常用管道材质:PVC管、混凝土管、钢管和铸铁管进行分析,管线埋深均为2 m。

图7给出了不同材质时隧道施工引起的管线竖向位移,由图可见,钢管、铸铁管、混凝土管和PVC管引起的管线最大竖向位移分别为22.57, 27.63, 31.40, 38.99 mm,管线影响范围也逐渐变大。表明管线材质对管线变形大小有较大影响。管线刚度越大,管线变形越小,管线对土体的约束作用越大。钢管、铸铁管、混凝土管和PVC管引起的管线竖向沉降曲线的最大斜率分别为1.86, 1.38, 1.32和1.18 mm/m,按照北京和广州地铁的实测数据,该斜率不会对管线产生较大影响,属于正常工作情况。

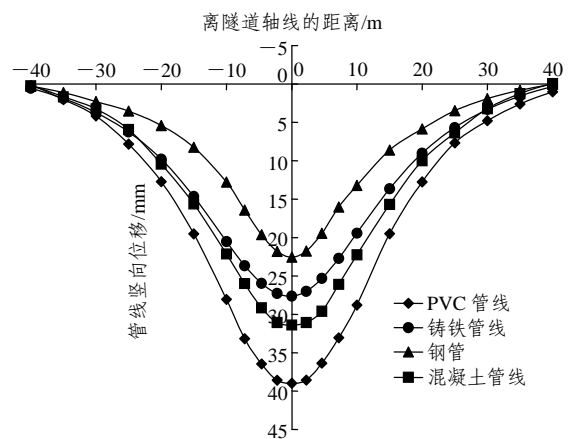


图7 不同材质时隧道施工引起的管线竖向位移

Fig.7 Vertical displacements of underground pipeline induced by tunnel excavation with different materials

图8给出了不同材质时隧道施工引起的管线水平位移,由图可见,隧道施工引起的管线水平位移与竖向位移的规律一致,但数值较小,可忽略不计,其斜率也在正常影响范围内。

图9给出了垂直管线与土体模量比与管线最大位移之间的关系,如图所示:随着垂直管线与土体模量比的增大,管线最大位移逐渐减小;当垂直管线与土体模量比在1 000以内时,管线最大位移比较大,此时管线与土体的协调变形能力较强;当垂直管线与土体模量比>1 000时,管线最大位移基本成线性变化。

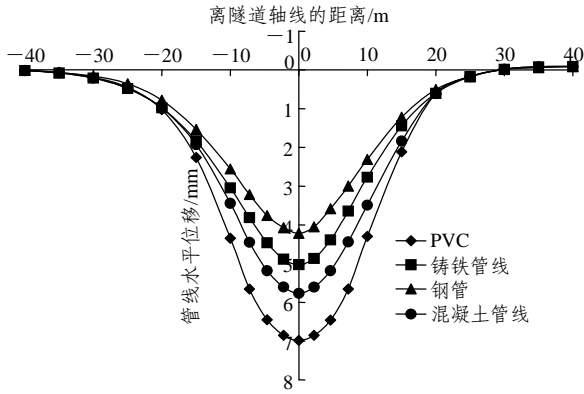


图 8 不同材质时隧道施工引起的管线水平位移  
Fig.8 Horizontal displacements of underground pipeline induced by tunnel excavation with different materials

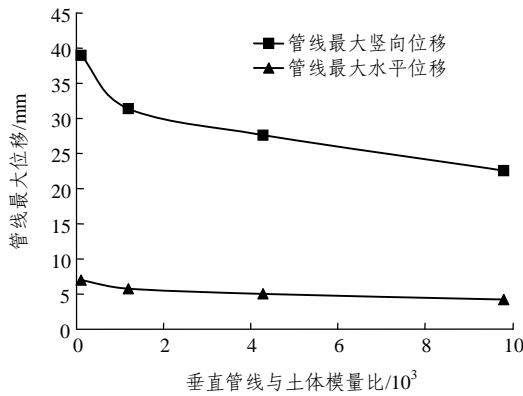


图 9 垂直管线与土体模量比与管线最大位移之间的关系  
Fig.9 Relations of elastic modulus ratios of soil and vertical pipeline between maximum displacement of pipeline

### 3.3 管线与隧道间距对平行地下管线的影响

在城市隧道施工过程中,经常遇到平行于隧道的管线,本文对该工况进行了分析,采用铸铁管线、埋深均为 2 m。模拟了隧道轴线与管线轴线平行间距为 5, 10, 20, 30, 40 m 这 5 种情况。

图 10 给出了隧道与管线间距不同时管线的竖向位移,如图所示,随着管线与隧道距离(均指轴线距离,以下同)的增大,隧道施工引起的管线竖向沉降逐渐变小,表明离隧道越近影响越大。当管线与隧道距离 $\geq 10$  m 时,随着隧道开挖长度的增加,管线竖向沉降值逐渐增大;当管线与隧道距离为 20 m 时,管线竖向沉降值基本成线性变化;当管线与隧道距离 $> 20$  m 时,隧道施工引起的管线变形非常小,可忽略不计。如果单从竖向位移角度考虑,此时可认为管线是安全的。当管线与隧道距离为 10~20 m 时,则要针对实际工况酌情考虑。

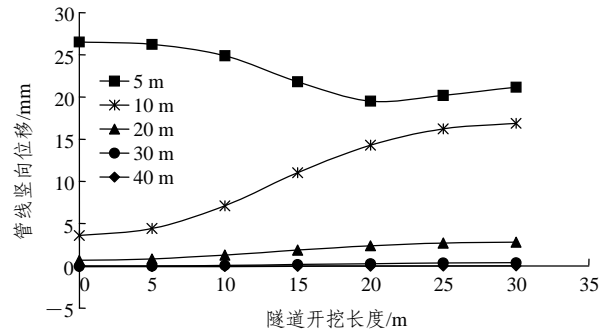


图 10 管线与隧道距离不同时管线竖向位移  
Fig.10 Vertical displacements of underground pipeline with different spacing distance between pipeline and tunnel

模拟中发现,当管线与隧道距离 $< 10$  m 时,管线的竖向位移曲线非常不规则。可能原因如下:(1)模拟中采用的是 CD 工法,即每一个断面分成 4 个小断面开挖(按左上、左下、右上、右下顺序),造成了隧道开挖的不规则性;(2)在求解过程中考虑了土体的非线性特点;(3)开挖模拟中考虑了土体的时间效应,先开挖部分土体在后续土体开挖中继续进行计算,由此产生工后沉降;(4)在离隧道轴线 10 m 范围内,隧道施工对管线的影响较大。

图 11 给出了隧道与管线间距不同时管线的水平位移,由图可见:5 条曲线规律比较相似,管线水平位移都随着开挖深度增加而增大;随着管线与隧道距离的增大,隧道施工引起的管线竖向沉降逐渐变小;隧道施工引起的平行管线的水平位移比较小,基本不会对管线造成影响。当管线与隧道距离 $> 20$  m 时,隧道施工引起的管线水平位移可忽略不计。

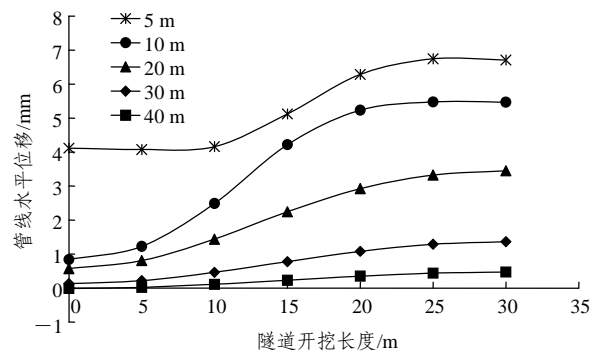


图 11 隧道与管线间距不同时管线水平位移  
Fig.11 Horizontal displacements of underground pipeline with different spacings between pipeline and tunnel

图 12 给出了管线间距和埋深比与管线最大位

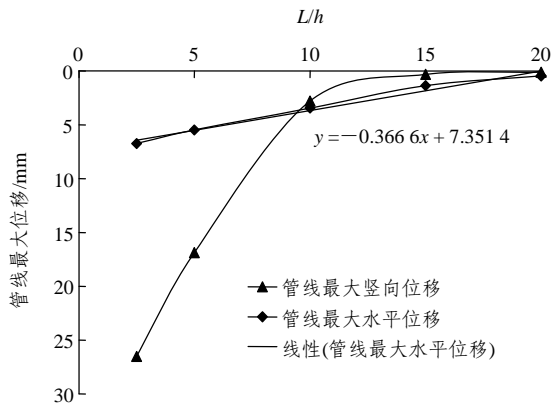


图 12 管线间距和埋深比与管线最大位移的关系

Fig.12 Relations of pipeline distance and buried depth ratio and maximum displacement of pipeline

移的关系，如图所示：管线最大竖向和水平位移均随  $L/h$  增大而减小。对于竖向位移：当  $L/h < 10$  时，管线最大竖向位移值迅速增大；当  $L/h$  为 10 时产生突变；当  $L/h > 10$  时，管线最大竖向位移值明显减小，可忽略不计。对于水平位移：管线的最大水平位移值较小，基本与  $L/h$  呈线性关系；当  $L/h < 2.5$  时，要针对实际施工工况，对管线酌情考虑相应的加固措施。

图 13 给出了管线间距和埋深比与管线最大应力之间的关系，从图中可以看出：管线最大应力随着  $L/h$  的增大而减小。当  $L/h < 5$  时，管线受到的拉应力及压应力值随着  $L/h$  的减小而急剧增大。当  $L/h = 2.5$  时，拉应力及压应力分别为 21.05 和 36.55 MPa；当  $L/h \approx 5$  时，隧道施工引起的管线轴向应力值产生突变；当  $L/h > 5$  时，隧道施工引起的管线应力值比较小，且变化比较平稳，对铸铁管线的使用不会产生影响。

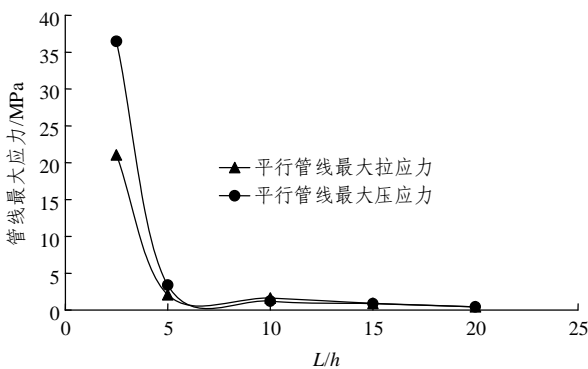


图 13 管线间距和埋深比与管线最大应力之间的关系

Fig.13 Relations of pipeline distance and buried depth ratio and maximum stress of pipeline

### 4 算例

杭州一过街隧道与主干道垂直，全长 146 m，覆土深度 3.68 m，净宽 6.2 m，净高 3.1 m。隧道结构处于粉质黏土层中。某排水管道与该隧道主通道垂直，管道埋深 2.95 m，外径 300 mm，壁厚 35 mm，混凝土材质。隧道所处土层物理力学参数见表 3。

表 3 土层物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层编号	土性	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$	厚度 /m
1	杂填土	1800	2.8	0.35	-	-	1
2	粉质黏土	1890	4.0	0.35	-	-	9
3	淤泥质黏土	2040	10.0	0.33	29.3	20.4	5
4	粉质黏土	1970	8.5	0.33	35.0	16.0	15

对过街隧道开挖过程中管线产生的沉降进行了监测，沉降曲线如图 14 所示。采用有限元方法对该工况进行了模拟，管线沉降计算结果见图 14。由图 14 可知，有限元预测的管线沉降曲线与实测值较吻合，计算结果略偏大实测值，偏保守，但规律一致，验证了有限元方法的可靠性。管线在离隧道轴线约 18 m 的位置出现隆起，原因是预加固区范围影响到该区域的管线，但是在该区域以外的管线不受预加固区的影响。

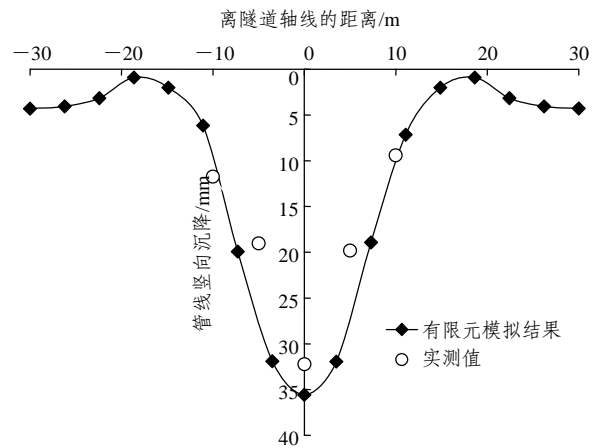


图 14 地下管线沉降曲线

Fig.14 Curves of underground pipeline settlement

### 5 结论

本文采用三维有限元方法分析了过街隧道施工引起相邻地下管线的变形与受力，在研究中考虑了

实际路面的存在, 研究结果表明:

(1) 路面存在将对浅埋地下管线产生较大影响, 与相同条件下不考虑路面的管线相比, 管线位移要变小、沉降槽宽度要变窄。

(2) 相同条件下隧道开挖引起的管线水平位移远小于竖向位移。与隧道垂直管线的竖向位移和水平位移最大值与管线埋深基本呈线性变化, 且随着管线与土体模量比的增大逐渐减小; 与隧道平行管线的最大竖向位移和水平位移值均随  $L/h$  增大而减小, 最大水平位移值与  $L/h$  值基本呈线性关系, 最大竖向位移值在  $L/h < 10$  时迅速增大。

(3) 管线材质不同引起的管线位移值也不同, 相同壁厚时管线刚度越大、管线变形越小, 从小到大依次为: 钢管、铸铁管、混凝土管、PVC 管。

(4) 管线最大拉应力和压应力均随着  $L/h$  值增大而减小, 当  $L/h < 5$  时急剧增大, 当  $L/h \geq 5$  时缓慢减小, 且应力值比较小。

本文在研究中存在一定不足之处: 如在有限元模拟中假定不同材质的管线壁厚相同, 与实际情况不符。因此管线刚度越大、管线变形越小的结论不一定成立, 建议进一步考虑管线实际壁厚影响。

## 参考文献(References):

- [1] 王 霆, 刘维宁, 李兴高, 等. 地铁施工影响邻近管线的研究现状与展望[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 117 - 123.(WANG Ting, LIU Weining, LI Xinggao, et al. Current situation and prospect of studies on tunneling-induced effect of adjacent pipelines[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 117 - 123.(in Chinese))
- [2] 袁正辉, 贺美德. 地铁隧道施工对地下管线的影响[J]. 市政技术, 2006, 24(5): 317 - 320.(YUAN Zhenghui, HE Meide. Elementary introduction the influences of subway tunneling construction on buried pipeline[J]. Municipal Engineering Technology, 2006, 24(5): 317 - 320.(in Chinese))
- [3] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures[M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [4] 吴 波, 高 波. 地铁区间隧道施工对近邻管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 451 - 2 456.(WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect of tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 451 - 2 456.(in Chinese))
- [5] 吴 波, 高 波, 索晓明, 等. 城市地铁隧道施工对管线的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 657 - 662.(WU Bo, GAO Bo, SUO Xiaoming, et al. Study on influence of metro tunnel excavation on buried pipeline[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 657 - 662.(in Chinese))
- [6] 魏 纲, 余振翼, 徐日庆. 顶管施工中相邻垂直交叉地下管线变形的三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 523 - 2 527.(WEI Gang, YU Zhenyi, XU Riqing. 3D finite element analysis of deformation of perpendicularly crossing buried pipeline in pipe jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 523 - 2 527.(in Chinese))
- [7] 彭基敏, 张孟喜. 盾构法施工引起邻近地下管线位移分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(9): 50 - 53.(PENG Jimin, ZHANG Mengxi. Analysis of the displacements of underground pipelines caused by shield construction[J]. Industrial Construction, 2005, 35(9): 50 - 53.(in Chinese))
- [8] 毕继红, 刘 伟, 江志峰. 隧道开挖对地下管线的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 317 - 1 321.(BI Jihong, LIU Wei, JIANG Zhifeng. Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 317 - 1 321.(in Chinese))
- [9] 姜忻良, 赵志民, 李 圆. 天津地铁盾构施工对邻近工程设施影响的动态模拟[J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 188 - 193.(JIANG Xinliang, ZHAO Zhimin, LI Yuan. Dynamic simulation of the effects of shield tunneling in Tianjin subway project on neighboring engineering facilities[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(2): 188 - 193.(in Chinese))
- [10] 孙卫民, 王秋生. 过街隧道开挖对周围管群的影响分析[J]. 甘肃科技, 2006, 22(9): 165 - 167.(SUN Weimin, WANG Qiusheng. Analysis of effect of underground urban street-passage tunnel construction on adjacent pipelines[J]. Gansu Science and Technology, 2006, 22(9): 165 - 167.(in Chinese))
- [11] 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 - 128.(LUO Jianjun, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Influence of metro construction on underground pipeline[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 124 - 128.(in Chinese))
- [12] HUNTER A. Effect of trenchless technologies on existing iron pipelines[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 158(3): 159 - 167.
- [13] VORSTER T E B, KLAR A, SOGA K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1 399 - 1 401.
- [14] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunneling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. Geotechnique, 2005, 55(6): 461 - 466.
- [15] CHUNGSIK Y, JAE-HOON K. A web-based tunneling-induced building/utility damage assessment system: TURISK[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(5): 497 - 511.
- [16] 王 涛, 魏 纲, 徐日庆. 隧道开挖对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增): 483 - 486.(WANG Tao, WEI Gang, XU Riqing. Prediction for influence of tunneling on adjacent pipelines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Supp.): 483 - 486.(in Chinese))