

# 隧道开挖引起管线沉降计算的刚度修正法

韩 焯<sup>1</sup>, 雷崇红<sup>2</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司院士大师工作室, 北京 100038;

2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100037)

**摘要:**在城市地铁隧道掘进中,地层位移会对密布的城市地下管线形成较大的威胁。由于管-土-隧道相互作用问题的复杂性,除了数值分析方法以外,一般在工程实践中均忽略了结构刚度对其变形的影响作用,因此结构变形预测结果大大偏于保守。在理论分析的基础上,通过机理研究和实测数据的分析,提出了管线变形及其内力计算的高斯分布模型与结构刚度影响机理;给出了管线沉降槽宽度系数  $K$  和管线刚度之间的经验关系,建立了考虑隧道-管-土相互作用的管线沉降和内力的预测方法——刚度修正法。

**关键词:**管线;隧道掘进;地层位移;管土相互作用;变形;内力;刚度;风险评估

**中图分类号:**TU279.76 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)03-0021-07

## A Modified Stiffness Approach to Predict Tunnelling-Induced Deformation and Force of Pipelines

HAN Xuan<sup>1</sup>, LEI Chonghong<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

(1. National Academician & Master's Research Office, BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, P. R. China;

2. Beijing MTR Construction Management Co., Ltd., Beijing 100037, P. R. China)

**Abstract:** The urban tunnel construction will cause ground movement and the deformation or even damage of the nearby pipelines. It's very common in practice that the structural stiffness is ignored in the settlement prediction and damage assessment because of the complexity of tunnel-soil-pipeline interaction. Based on the study of pipeline settlement profiles measured from several tunnelling projects, an observation is put forward that the settlement profiles of the pipeline can be fit very well by the Gaussian equation in case of using a larger trough-width parameter  $K$  influenced by the stiffness of the pipeline. Thus an empirical relationship between the parameter  $K$  and the stiffness of the pipeline was proposed which can be used to predict the trough parameter according to the stiffness, and a 'Modified Stiffness Method' was proposed.

**Key words:** pipelines; tunnelling; ground movement; soil-pipe interaction; deformation; inner force; stiffness; risk assessment

随着地铁工程建设的大规模开展,施工扰动是影响地下管网安全的重要因素之一。研究发现,地铁事故很大一部分都与地下管线有关,其中地铁渗水、涌水等地铁施工事故与管线有关的比例高达59%。这类事故又可以具体分为2大类:1)地层塌

陷或位移过大造成管线断裂,管线中的水涌入隧道,继而使塌陷加剧;2)管线在其他原因下(例如汽车碾压等外力)首先断裂,产生渗水或涌水,继而造成土的渗透破坏并最终形成塌陷。由此可见,在地铁施工中对于地下管线安全问题应给予足够的重视<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2011-09-21

基金项目:北京市优秀人才培养资助项目(2008F-13);北京市科技计划项目(Y0605010040821)

作者简介:韩 焯(1972-),男,博士,教授级高级工程师,从事地基基础工程、隧道与地下工程相关研究,(E-mail)xuan-han2002@163.com。

作为城市环境保护的一个新兴课题,许多学者都对城市地下工程施工对地层及邻近管线的影响研究作了很多工作,得出许多有意义的结论,为科学评价城市隧道施工对邻近管线的影响提供了一定的理论基础<sup>[2-12]</sup>。例如很多学者把该问题近似为简单的弹性温克尔模型,其中有代表性的工作包括英国剑桥大学的学者 Vorster 等<sup>[8-9]</sup>、Klar 等<sup>[10-11]</sup>、Marshall 等<sup>[12]</sup>依据连续体的弹性解提出了隧道施工对管线影响的解析解,研究了在连续弹性介质中,管线变形的一个闭合形式的解,提出了一种估算隧道开挖引起的地层位移影响下的连续管线最大弯矩的方法。

总体来看,目前相关的研究开展了很多,但由于管-土-隧道相互作用问题的复杂性,大部分成果都是基于数值模拟方法对具体工程问题的模拟,没有得到具有广泛适用性的方法。Vorster、Klar、Marshall 以及其他基于弹性理论的方法由于推导求解的需要,往往引入很多假定条件,例如一般都假定管线与隧道走向垂直(目前文献中尚未见到针对隧道与管线斜穿、平行 2 种情况的研究成果),这往往使成果的实际应用受到了很大的限制,且涉及较为复杂的矩阵计算,需要编制专门的程序计算,因此难以在工程中推广应用。中国针对具体工程一般采用数值分析的方法,但一是计算工作量大,二是由于对管线变形规律本身认识不足,单纯的数值模拟结果也往往与实际有较大的偏差。目前实际工程中还缺乏管线在隧道施工作用影响下的变形和内力的实用分析方法。

针对上述问题,本文在充分分析了现有的理论研究成果和实际管线变形监测成果的基础上,深入研究了隧道施工作用下的管线变形的特征,归纳了管线变形规律,然后分别针对隧道与管线走向正交、斜交、平行 3 种情况,提出了连续管线变形和内力预测的刚度修正法,该方法不仅简单而灵活地考虑了复杂的管-土-隧道相互作用问题,而且分析效率较数值模拟方法大大提高,因此对实际工程具有很好的适用性。

## 1 隧道施工影响下的地下管线的变形特征

### 1.1 基于实测成果的分析

北京地铁某暗挖段下穿多个地下管线,其中:地铁暗挖段正交下穿管径为 1 800 mm 的钢筋混凝土污水管,竖向净距 2.0 m;除此以外,还正交下穿 2 m×2 m 的钢筋混凝土电力管沟,竖向净距为 4.3 m。施工过程中通过监测分别得到了地下管线周边的地

层沉降和管线自身的变形沉降,得到的监测点沉降值见图 1 和图 2。

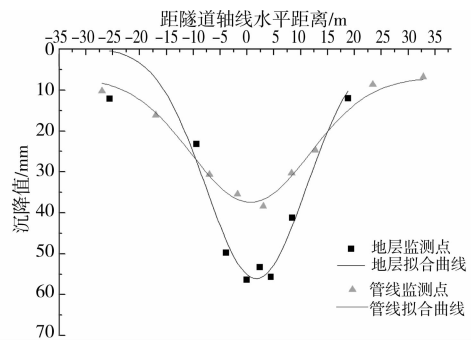


图 1 隧道施工引起某电力管沟的沉降及地层沉降

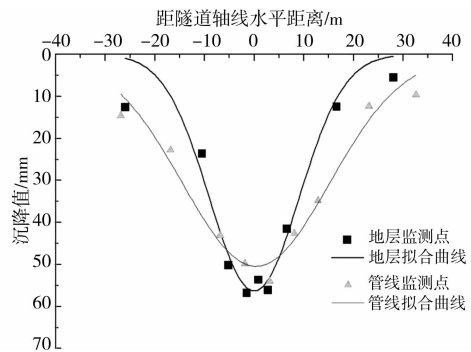


图 2 隧道施工引起某污水管的沉降及地层沉降

根据上述监测成果,管线的变形具有以下基本规律:1)管线的最大沉降小于地层沉降(管土相互作用的结果),沉降曲线宽度也要大一些,这主要可以归结为管线结构刚度的影响。2)管线沉降仍可看作连续曲线,且形态与地层位移曲线类似。

### 1.2 基于数值模拟成果的分析

对于隧道施工引起管线的变形问题,开展了大量的数值模拟试验,就管线的变形规律而言,具有一定的共性。本文研究了英国剑桥大学 Vorster、Klar、Marshall 等人的典型成果,他们在文献<sup>[8-12]</sup>中给出了隧道施工作用下,不同刚度管线位移的数值解,如图 3 所示。图中  $B$  为管土相对刚度<sup>[8]</sup>,其表达式为  $B = EI/E_s r_0 i^3$ 。

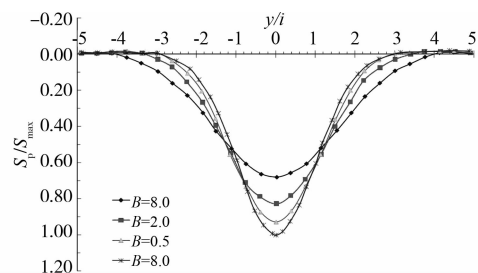


图 3 不同管土刚度下的管线的沉降曲线(Vorster<sup>[10]</sup>)

通过对其中管线变形曲线(图3)的研究,可以发现如下基本特征:

1)随着管线刚度的增加(即图3中 $B$ 的增大),变形曲线逐渐变宽。

2)管线刚度的增大,对曲线与 $y$ 轴包围的面积没有明显影响,即“管线沉降曲线”的地层损失率可认为不变。

上述规律和1.1节中所给出的实测结果反映出的规律相符合。

## 2 地下管线与地层沉降的关系

管线的变形规律和天然地层的变形规律既有区别又有联系,因此本文重点研究二者之间的关系。

### 2.1 地表下某一深度地层沉降曲线的数学描述

大量研究表明,隧道施工引起的地表位移可采用基于高斯曲线的Peck公式描述,即:

$$s = s_{\max} e^{-\frac{y^2}{z^2}} \quad (1)$$

$$\text{或: } s = \frac{A \cdot V_1}{\sqrt{2\pi} K z_0} e^{-\frac{y^2}{2K^2 z_0^2}} \quad (2)$$

其中: $y$ 为从沉降曲线中心到所计算点的距离; $s$ 为地表任一点的沉降值; $s_{\max}$ 为地表沉降的最大值,它与地层损失率有如下关系: $s_{\max} = \frac{AV_1}{\sqrt{2\pi}i}$ ;  $V_1$ 为地层

损失率; $i$ 为沉降槽宽度,与隧道深度 $z_0$ 之间存在简单的线性关系: $i = Kz_0$ ;  $K$ 为地表沉降槽宽度参数。

对于地层中某一深度 $z$ 的地层位移可描述为:

$$s = \frac{A \cdot V_1}{\sqrt{2\pi} K (z_0 - az)} e^{-\frac{y^2}{2K^2 (z_0 - az)^2}} \quad (3)$$

$$\text{或: } s = \frac{A \cdot V_1}{\sqrt{2\pi} K_z (z_0 - z)} e^{-\frac{y^2}{2K_z^2 (z_0 - z)^2}} \quad (4)$$

其中: $K_z$ 为地表以下深度为 $z$ 处的沉降槽宽度参数; $a$ 为和土质有关的参数。

韩焯等<sup>[13-15]</sup>根据国内的大量实测资料研究表明,上述公式与国内地铁施工引起的地面沉降规律具有很好的符合性。

### 2.2 管线变形曲线的数学描述

基于对管线变形的现场监测、数值模拟成果分析,管线变形与土层位移有类似规律,因此,当假定天然地层的变形符合高斯曲线分布时,相应的地下管线的变形曲线也符合高斯分布,即管线沉降曲线采用式(5)或(6)。

$$s^p = s_{\max}^p e^{-\frac{y^2}{2K^p z_0^2}} \quad (5)$$

$$\text{或 } s^p = \frac{A \cdot V_1^p}{\sqrt{2\pi} K^p (z_0 - z_p)} e^{-\frac{y^2}{2K^p (z_0 - z_p)^2}} \quad (6)$$

其中: $s^p$ 为管线任一点处的沉降值; $s_{\max}^p$ 为管线沉降的最大值; $i^p$ 为从管线沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离,可称为管线“沉降槽宽度”,可定义为: $i^p = K^p (z_0 - z_p)$ ;  $z_p$ 为管线埋深; $K^p$ 为管线沉降槽宽度参数。

在图1、图2中除了管线变形的实测值外,还给出了采用(5)式的拟合曲线,可见吻合很好。同时,根据公式(5)的特点,若管线沉降 $s^p$ 数据符合Peck公式规律,则绘制“ $\ln\left(\frac{s^p}{s_{\max}^p}\right) - y^2$ ”的关系曲线应得到直线。本文仍采用图3中的数据来验证,图4为验证结果,从图4中可以明显看到,对于不同的管土相对刚度,管线的沉降曲线数据在图中均具有非常好的线性关系,由此进一步证明采用(5)式描述管线沉降曲线的有效性。

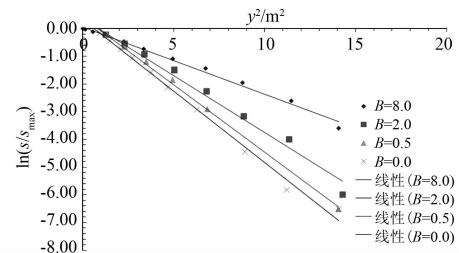


图4 对管线沉降曲线的Gaussian分布验证

由式(4)、(6)可见,地层、管线沉降曲线的表达式形式上一致,区别只在于管线采用了2个新的参数,即管线沉降曲线的地层损失率 $V_1^p$ 、沉降槽宽度参数 $K^p$ 。基于以上基本公式,分别对管线与隧道走向正交、斜交、平行几种情况进行具体分析,给出其刚度修正法中 $V_1^p$ 、 $K^p$ 的相应公式。

## 3 管线与隧道走向正交

首先讨论地下管线与隧道走向正交的情况,如图5。

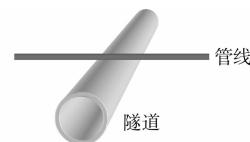


图5 管线与隧道正交的情况

在管线与隧道正交情况下,可以合理地假定管线沉降曲线的地层损失率 $V_1^p$ 等于相应的天然地层的地层损失率 $V_1$ ,从图3中各条沉降曲线的关系以及上面的分析可以说明上述假定的合理性。

而沉降槽宽度参数  $K^p$ ，则可以通过对地表以下相应于管线深度的地层沉降曲线宽度参数进行修正获得，可表达为式(7)。

$$K^p = \eta^M K_z, \quad (7)$$

式中  $\eta^M$  为考虑管线管土刚度影响下管线沉降曲线宽度影响的修正系数，可以根据 Klar 等<sup>[9]</sup> 提出的管线的归一化弯矩  $f(B)$  及其管土相对刚度的关系进行推导，具体如下。

管线的归一化弯矩  $f(B)$  定义为式(8)。

$$f(B) = \frac{Mi^2}{EIs_{\max}} \quad (8)$$

Klar 等<sup>[9]</sup> 2005 年发现归一化弯矩与管土相对刚度成对数形式关系。对于土的沉降形态符合高斯曲线的情况，最大的正弯矩的归一化曲线方程为式(9)。

$$f(B) = \frac{1}{1 + 0.55B^{0.67}} \quad (9)$$

根据管线沉降槽与天然地层情况沉降槽的地层损失率参数相等的假定，可以得到管线、土的最大沉降  $s_{\max}^p$ 、 $s_{\max}$  之间关系为式(10)。

$$s_{\max}^p = \frac{i}{i^p} s_{\max} \quad (10)$$

根据  $i$ 、 $i^p$  的定义以及(7)式，进一步可得到式(11)。

$$s_{\max}^p = \frac{s_{\max}}{\eta^M} \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(8)，可得式(12)。

$$f(B) = \frac{Mi^{p2}}{\eta^3 EIs_{\max}^p} \quad (12)$$

在式(12)中注意到  $\frac{Mi^{p2}}{EIs_{\max}^p} = 1$ ，即  $M =$

$\frac{EIs_{\max}^p}{i^{p2}}$ 。含义是：当土的变形与管线的变形相同时，

其归一化的弯矩  $f(B) = 1$ 。将上述条件代入式(12)，可得到刚度修正系数  $\eta^M$  与归一化弯矩  $f(B)$  之间的关系为式(13)。

$$\eta^M = \frac{1}{\sqrt[3]{f(B)}} \quad (13)$$

将式(9)代入，进而可以得到刚度修正系数  $\eta^M$  与管土相对刚度  $B$  的关系为式(14)。

$$\eta^M = \sqrt[3]{1 + 0.55B^{0.67}} \quad (14)$$

通过上式，给定一个管线相对刚度因子  $B$ ，即可得到其沉降槽宽度的刚度修正系数  $\eta^M$  (图 6)。

利用式(6)、(7)、(14)，即可得到地下管线的沉降曲线。已知管线沉降，进一步可以得到管线上任意一点处的弯矩值：

$$M^p(x) = -EI \frac{s_{\max}^p}{i^{p2}} \left( \frac{y^2}{z_i^{p2}} - 1 \right) e^{-\frac{y^2}{z_i^{p2}}} \quad (15)$$

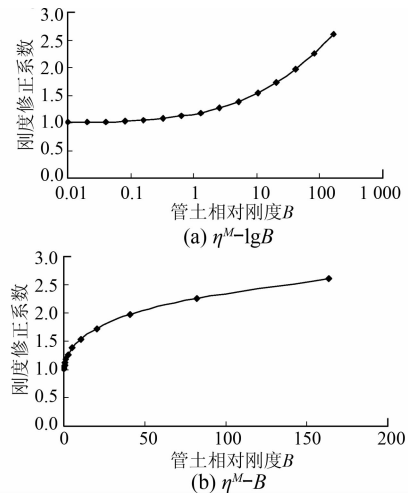


图 6 管线沉降的刚度修正系数与管土相对刚度的关系

#### 4 管线与隧道走向斜交

为便于研究，一般都假定管线走向与隧道走向呈垂直正交方向，但在实际情况中这仅仅是一种特例。事实上，会遇到大量的管线与隧道斜交的情况，因此考虑管线与隧道之间非正走向交情况下(图 7)的计算方法具有重要意义。

对于管线和隧道斜交的情况，可以对上述正交情况进行修正得到。经过简单的推导可以证明：在图 8 中，若夹角为 0 时的沉降槽  $f_1(y_1)$  (代表正交情况下的沉降槽)符合高斯曲线，则夹角为  $\alpha$  的沉降槽  $f(y)$  (代表斜交时的沉降槽)同样为高斯分布，但其地层损失率和沉降槽宽度均发生变化。

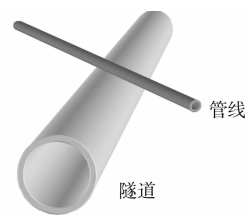


图 7 管线与隧道斜交的情况

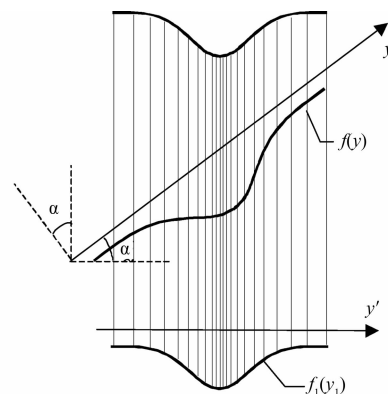


图 8 沿不同角度切割沉降槽<sup>[9]</sup>

因此,斜交情况下地层损失率的修正因素主要是考虑管线与隧道的走向夹角,即式(16)。

$$V_1^p = \lambda^\alpha V_1 \quad (16)$$

式中:  $V_1^p$  为管线沉降曲线的地层损失系数;  $\lambda^\alpha$  为管线和隧道走向夹角对天然地面沉降槽地层损失率的几何修正系数,取为  $\frac{1}{\cos\alpha}$ 。

管线沉降槽宽度参数的修正主要考虑夹角和管线的刚度,即式(17)。

$$K^p = \eta^M \eta^\alpha K^s \quad (17)$$

$\eta^\alpha$  为沉降槽宽度几何修正系数,取为  $\frac{1}{\cos\alpha}$ ,由此可得管线与隧道非正交情况下的管线的沉降计算表达式(18)、(19)。

$$s^p(x) = s_{\max}^p e^{-\frac{x^2}{2i^2p^2}} \quad (18)$$

$$s^p(y) = \frac{AV_1^p}{\sqrt{2\pi}\eta^M\eta^\alpha K^s(z_0 - z_1)} e^{-\frac{y^2}{2[\eta^M\eta^\alpha K^s(z_0 - z_1)]^2}} \quad (19)$$

## 5 管线与隧道走向平行

在实际工程当中,多数情况下,地铁隧道、管线往往都是沿道路走向分布,此时管线与隧道走向平行(图9)。在这种情况下,虽然管线的最终沉降沿其长度方向理论上为均匀沉降(忽略地质条件、施工条件等的变化),但在隧道掘进的过程中,管线事实上受到了动态的不均匀沉降和弯矩的作用。



图9 管线与隧道平行的情况

Attewell等<sup>[16]</sup>于1982年提出采用累积概率曲线(Cumulative Probability Curve)来描述沿隧道开挖方向的沉降曲线,推导并讨论了沉降槽的在地表平面上任意一点的表达式,即深层的一个线形位移源产生的地表位移为式(20)。

$$s = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \left[ G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right] \quad (20)$$

其中:  $x_i$  为隧道起点位置;  $x_f$  为隧道开挖面的位置。概率函数  $G$  定义为式(21)。

$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta \quad (21)$$

采用同样上述对于管线与隧道走向正交或斜交的方法思路,考虑管土相对作用关系,引入管土刚度的修正系数,可以将式(20)改写为式(22)。

$$s^p = \frac{AV_1}{\sqrt{2\pi} \cdot i^p} e^{-\frac{x^2}{2i^2p^2}} \left[ G\left(\frac{x-x_i}{i^p}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i^p}\right) \right] \quad (22)$$

其中:  $i^p$  的定义仍可采用  $i^p = \eta^M K_z(z_0 - z_p)$ 。

管线弯矩计算公式为式(23)。

$$M(x)^p = -EI \frac{\partial^2 s(s)^p}{\partial x^2} = \frac{EIS_{\max}^p}{\sqrt{2\pi} \cdot i^{p2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2p^2}} \cdot \left[ e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2i^2p^2}} \cdot (x-x_i) - e^{-\frac{(x-x_f)^2}{2i^2p^2}} \cdot (x-x_f) \right] \quad (23)$$

## 6 算例分析

将本文提出的刚度修正法和 Vorster<sup>[10]</sup>的方法做一个比较,采用 Vorster 原文中的算例进行计算和验证。基本条件如下:铸铁管外半径 0.4 m,  $EI = 105\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,管线的轴线埋深 1.5 m。该管线在直径 1.5 m、轴线埋深 5 m 的隧道影响下产生变形。土质是干砂( $e = 0.67$ ,  $\gamma_g = 16 \text{ kN/m}^3$ ),隧道掘进引起的地表地层体积损失率为 5%,地层沉降槽宽度参数  $i = 2.6 \text{ m}$ ,假定场区沉降符合高斯曲线分布。Vorster 等人的方法计算得到隧道中心点上方的最大管线弯矩为  $M = 134.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,相应的弯曲应变为  $514 \mu\text{m}$ ,管线的最大沉降是 12 mm。

采用本文的刚度修正法,可以得到管线各点处的沉降变形值(如图10,图中同时还给出了天然地层沉降槽曲线作为比较)和弯矩值(图11)。其中中心点的计算结果与 Vorster 等人的结果完全一致(Vorster 等人成果仅给出了管线中心点计算结果)。

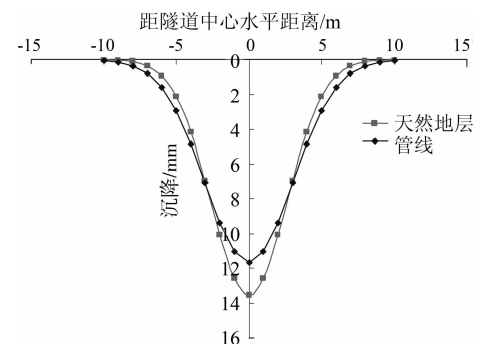


图10 地层与管线的沉降曲线

图12给出了天然地层沉降曲线和相应的与隧道夹角不同的管线的沉降曲线。图13进一步给出了斜交下的不同角度时,根据管线沉降曲线方程计

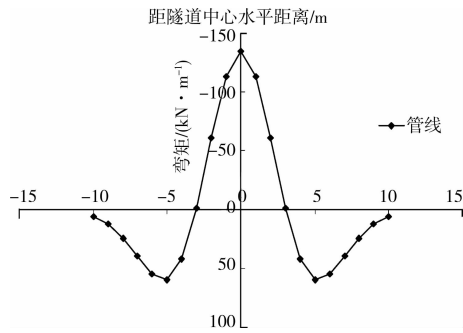


图 11 管线的计算弯矩

算得到的弯矩图。从中也可以看到,随着角度的增加,管线受到的弯矩越来越小,逐渐趋近于 0(当角度为  $90^\circ$  时,意味着二者平行,对于无限长隧道施工来说,不会引起管线的弯矩)。

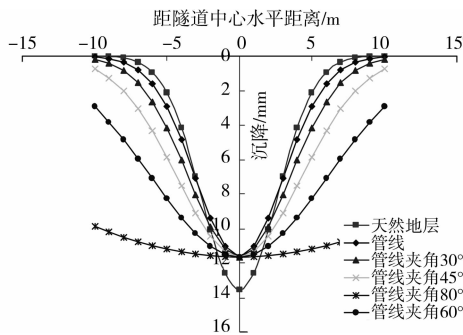


图 12 不同斜交角度下的地层与管线的沉降曲线

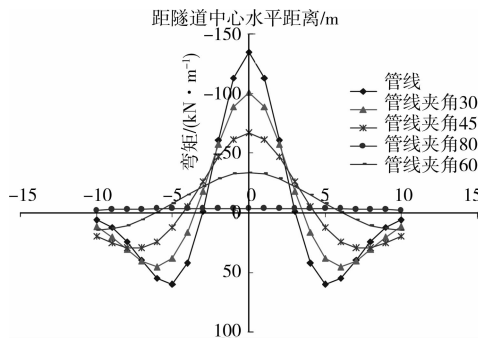


图 13 不同斜交角度下的管线弯矩

仍以上面的算例来说明当管线与隧道走向平行时隧道在动态施工过程中引起的管线的变形与弯矩。假定管线位于隧道正上方,此时  $y = 0$ ; 现在研究当隧道施工 30 m 后,引起的管线变形和弯矩。变形曲线和天然地层沉降曲线的关系见图 14。

另外,以北京某地铁隧道下穿地下管线工程中实际管线变形的监测成果为基础,采用本文提出的刚度修正法计算的地下管线变形与实测结果对比(图 15~图 17),其结果也表明了本评估方法的可行性。

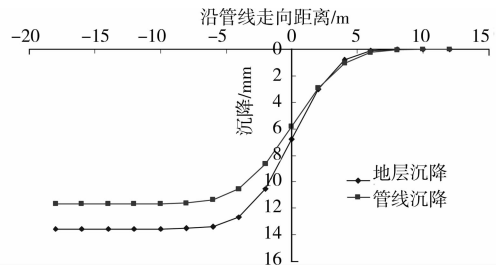


图 14 管线与地层沉降的比较(管线与隧道走向一致)

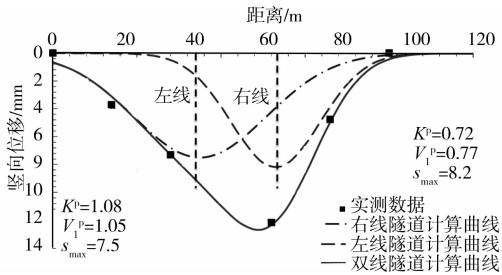


图 15 北京地铁某盾构区间正交下穿管径为 1 200 mm 的钢筋混凝土水管引起的管线沉降

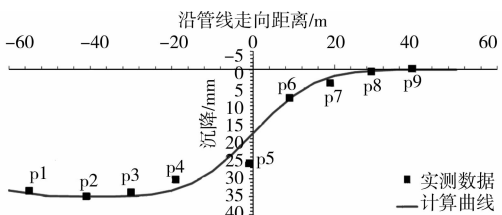


图 16 北京某地铁区间平行下穿直径 1 500 mm 混凝土雨水管引起的管线沉降

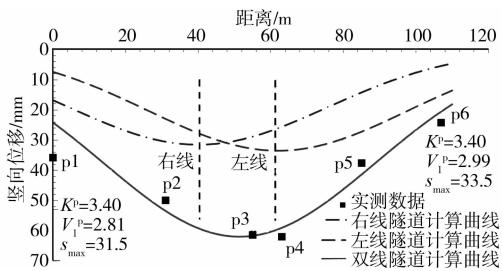


图 17 北京某地铁区间斜交下穿管径为 1 800 mm 的钢筋混凝土污水管引起的管线沉降

## 7 结 语

基于监测和数值模拟成果,提出实用管线变形、内力(弯矩)分析方法,在此基础上,对一般工程采用的管线变形控制标准进行讨论。

1)提出了管线沉降与内力计算的刚度修正法。相比目前已有的数值分析方法或弹性地基梁方法,更加简便,并且可以考虑隧道和管线走向非正交的一般情况(包括任意夹角、平行等)且在积累了一定

地区基础数据经验的基础上,可以得到比较符合实际的解答,因此大大增强了其实用性。

2)采用上述方法计算了各种情况下的算例,表明本方法相对于数值分析方法和其他经验法的优势,可在工程中逐步验证和应用。

需要说明的是,本文主要研究了可以忽略管线接头的柔性管线变形问题,对于非柔性管线,管线的接头会对管线的变形和内力有不同程度的影响。但根据已有的研究(Klar等),考虑接头影响的地下管线,其弯矩一般要小于连续管线。对于工程实践来说,在绝大多数情况下,可以通过计算连续管线的弯矩来评估和论证管线的破坏问题。特殊复杂情况,可以采用数值模拟方法。

致谢:感谢北京市勘察设计研究院有限公司王鑫博士对本文所做出的贡献。

#### 参考文献:

- [1] 北京市勘察设计研究院有限公司. 地铁建设及运营期间突发灾害调查报告[R]. 北京:北京市勘察设计研究院有限公司,2008.
- [2] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures [M]. London:Blackie and Son Ltd, 1986.
- [3] 孙宇坤,吴为义,张土乔. 软土地区盾构隧道穿越地下管线引起的管线沉降分析[J]. 中国铁道科学,2009, 30(1):80-85.  
SUN Yukun, WU Weiyi, ZHANG Tuqiao. Analysis on the pipeline settlement in soft ground induced by shield tunneling across buried pipeline [J]. China Railway Science, 2009, 30(1):80-85.
- [4] 漆泰岳,高波,谭代明. 软土地层地铁隧道施工对地下管线的影响[J]. 西南交通大学学报,2010, 45(1):45-53.  
QI Taiyue, GAO Bo, TAN Daiming. Influence of metro tunneling in soft clay strata on underground pipelines [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 45-53.
- [5] 王霆,罗富荣,刘维宁,等. 地铁车站洞桩法施工引起的邻近管线沉降规律研究[J]. 隧道建设,2011, 31(2): 192-197,207.  
WANG Ting, LUO Furong, LIU Weining, et al. Study on pipeline settlement induced by construction of metro station by PBA method [J]. Tunnel Construction, 2011, 31(2):192-197,207.
- [6] Marshall A M, Mair R J. Centrifuge modelling to investigate soil-structure interaction mechanisms resulting from tunnel construction beneath buried pipelines [C]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground-Proceedings of the 6th International Symposium, Is-Shanghai, 2008, c2009:703-707.
- [7] Mair R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons [J]. Geotechnique, 2008, 58(9): 695-736.
- [8] Vorster T E B, Klar A, Soga K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines [J]. ASCE Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399-1410.
- [9] Vorster T E B. The effects of tunnelling on buried pipes [D]. Cambridge:Cambridge University, 2005.
- [10] Klar A, Vorster T E B, Soga K, et al. Soil-pipe-tunnel interaction: comparison between Winkler and elastic continuum solutions [J]. Geotechnique, 2005, 55(6): 461-466.
- [11] Klar A, Marshall A M, Soga K, et al. Tunneling effects on jointed pipelines [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(1):131-139.
- [12] Marshall A M, Klar A, Mair R J. Tunneling beneath buried pipes: View of soil strain and its effect on pipeline behavior [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12):1664-1672.
- [13] 韩焯,李宁,STANDING J R. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学,2007, 28(1): 23-28.  
HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunnelling in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28.
- [14] 韩焯,李宁,STANDING J R. 地铁隧道施工引起地层位移规律的探讨[J]. 岩土力学,2007, 28(3): 609-613.  
HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. Study on subsurface ground movement caused by urban tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 609-613.
- [15] 韩焯,STANDING J R,李宁. 隧道施工引起建筑物变形预测的刚度修正法[J]. 岩土工程学报,2009, 31(4): 539-545.  
HAN Xuan, STANDING J R, LI Ning. Modified stiffness approach to predict deformations of building induced by tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4):539-545.
- [16] Attewell P B, Woodman J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil [J]. Ground Engineering, 1982, 15(8): 13-22, 36.

(编辑 王秀玲)