

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.091



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 隧道下穿引起管线非线性变形的简化计算方法

殷鑫

(重庆市勘测院有限公司, 重庆 401120)

**摘要:**城市地铁修建过程中不可避免下穿既有市政管线,威胁管线安全。现有管线变形的预测理论多采用 Winkler 和 Pasternak 等弹性地基模型,无法考虑土体非线性变形特性。提出将既有刚性接头的市政管线视为非线性地基上的连续梁模型,进而建立管线非线性变形预测方法。首先,通过 Peck 经验公式和考虑先建隧道影响的修正 Peck 公式,分别计算单线和双线隧道下穿引起管线轴线处的地层位移;然后,建立管线变形的微分控制方程,通过有限差分法和牛顿迭代法得到管线的数值解;最后,通过与已有离心机试验和两个工程案例的监测结果对比,验证所提方法的合理性和适用性。结果表明:与常用弹性地基模型相比,所提方法计算结果与实测结果趋势更为接近;考虑平行双线隧道先后施工的影响后,该方法可以较好地预测双线隧道下穿引起的管线变形。

**关键词:**双线隧道;隧道下穿;刚性接头管线;非线性地基;理论分析

**中图分类号:**U455.7;TU470.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)06-0114-09

## Simplified calculating method for the pipeline nonlinear deformation caused by tunnel undercrossing

YIN Xin

(Chongqing Survey Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, P. R. China)

**Abstract:** The construction of urban subways involves undercrossing existing municipal pipelines, which may threaten pipeline safety. Most of the existing prediction theories for pipeline deformation use elastic foundation models such as the Winkler model and the Pasternak model, which cannot account for the nonlinear deformation characteristics of soil. Therefore, an existing municipal pipeline with rigid joints was regarded as a continuous beam on a nonlinear foundation and a nonlinear deformation prediction method for pipelines was established. Firstly, the ground displacement along the axis of the pipeline caused by single-line and double-line tunneling was calculated respectively, using the Peck empirical formula and the modified Peck empirical formula that considers the tunnel construction sequence. Then, the differential governing equation for pipeline deformation caused by tunneling was established, and the deformation solution of the pipeline was obtained using the finite difference method and the Newton iteration method. Finally, the rationality and applicability of the proposed method were verified by comparing its results with monitoring data from a centrifuge experiment and two engineering cases. The results show that the proposed method is in better agreement with the measured data compared with other foundation models such as the Winkler model, Pasternak model, and Kerr model. It can

**收稿日期:**2023-04-26

**基金项目:**重庆市建设科技计划项目(城科学 2021 第 2-10)

**作者简介:**殷鑫(1995-),男,主要从事隧道掘进环境效应和地基处理研究,E-mail:499272724@qq.com。

**Received:** 2023-04-26

**Foundation item:** Chongqing Construction Science and Technology Plan Project (No. [2021] 2-10)

**Author brief:** YIN Xin (1995-), main research interest: environmental effects due to tunneling and foundation treatment, E-mail: 499272724@qq.com.

also predict the pipeline deformation caused by twin-tunnel undercrossing while considering the effect of tunnel construction sequence.

**Keywords:** twin-tunnel; tunnel undercrossing; pipeline with rigid joints; nonlinear foundation; theoretical analysis

据统计,到2021年底,中国有42座城市开通地铁与市域快轨,其中6座城市的地铁里程位居全球前十行列,且保持快速增长<sup>[1]</sup>。为了提高地下轨道交通利用率,地铁线路多修建在地下环境复杂的城市中心区域,隧道施工过程中不可避免会穿越既有市政管线。新建隧道施工会对土体造成扰动,改变地层应力状态,产生地层损失,引起上部地层沉降,进而导致上部既有市政管线发生变形,出现损伤、开裂、泄漏、运行受阻等问题。为避免此类安全事故,在施工前需准确评估地铁隧道施工对既有管线的影响。因此,建立隧道-土-管相互作用的力学模型,研究隧道下穿对邻近市政管线的影响,具有重要的社会意义和工程价值。

学者们通过实测数据分析<sup>[2-3]</sup>、数值模拟<sup>[4-5]</sup>、模型试验<sup>[6-7]</sup>和理论分析等方法对隧道下穿引起既有市政管线的力学响应进行了研究。这些方法中,理论分析建立的简化计算方法可方便快捷地用于既有市政管线对下方盾构隧道开挖响应的初步分析。目前,理论分析中主要将市政管线分为柔性管线和刚性接头管线;对于现浇混凝土管或采用焊接、法兰等方式连接的管线,接口与管线刚度相差较小,在计算中可视为连续梁<sup>[4, 8-15]</sup>。此外,管线与土体相互作用的地基模型也是管线对隧道开挖响应解的重要研究内容。吴为义等<sup>[8]</sup>、Zhang等<sup>[9]</sup>、魏纲等<sup>[10]</sup>利用Winkler地基模型,分别建立了连续管线或接头管线在隧道穿越影响下的理论解。Yu等<sup>[16]</sup>在Winkler地基的基础上,提出考虑管线埋深的修正地基模量参数;在此基础上,张陈蓉等<sup>[17]</sup>和Huang等<sup>[18]</sup>分别建立了修正地基模量下隧道开挖引起管线变形的数值解。Wang等<sup>[11]</sup>、Lin等<sup>[12]</sup>和邓皇适等<sup>[4]</sup>进一步采用增加剪切层的Pasternak双参数地基,考虑土体-管线的相互作用,建立了隧道下穿既有管线变形的数值解,并分别开展理论分析。在此基础上,可文海等<sup>[14]</sup>和管凌霄等<sup>[19-20]</sup>通过修正Vlasov模型,对Pasternak地基模型的两个参数进行修正。冯国辉等<sup>[15]</sup>采用精度更高的三参数Kerr地基模型,并考虑侧向土体对管线变形的影响,建立了盾构隧道引起上覆管线竖向位移的数值解。以上研究对管土相互作用进行了有益探索,提出了多种地基模型的修正参数,但仍局限于线弹性框架。土体变形具有非线性特点,即随着地基变形增大,地基反力并不会

呈线性无限增大;目前,对土体-管线非线性相互作用的研究仍较少。在研究隧道下穿引起的既有管线响应时,Voster等<sup>[21]</sup>通过等效线性方法考虑土壤非线性,该方法考虑了管线沿线的平均土壤剪切应变。Klar等<sup>[22]</sup>对该方法进一步研究,提出了更严格的平均土壤剪切应变三系数表达式。

在现有研究基础上,考虑土体-管线非线性作用,采用两阶段分析法,建立单线和双线盾构隧道下穿引起既有市政管线纵向非线性变形的控制微分方程,通过有限差分法和牛顿迭代法求解,得到管线受力变形的数值解。结合离心机实验数据及两个工程实测数据验证方法的合理性和适用性,并将其计算结果与常用的Winkler、Pasternak及Kerr地基模型计算结果进行比较分析。

## 1 隧道下穿既有管线响应的理论推导

### 1.1 非线性地基模型

管线抗震设计规范明确指出,进行管-土相互作用设计时,应采用非线性地基模型评估管线的受力和变形特点<sup>[23]</sup>。柯宅邦等<sup>[24]</sup>、康成等<sup>[25]</sup>在研究地表堆载、基坑开挖等邻近施工引起既有盾构隧道响应时也发现,采用非线性地基模型能更好地预测既有隧道的受力变形响应。笔者在考虑土体-管线非线性相互作用时,采用非线性Pasternak地基形式<sup>[24-25]</sup>,假定地基反力和位移关系满足双曲线形式,即

$$q(x) = \frac{w(x)}{\frac{1}{k_d} + \frac{w(x)}{Q_d}} - G_c \frac{dw(x)}{dx} \quad (1)$$

式中: $q(x)$ 为地基反力; $w(x)$ 为地基竖向位移; $k_d$ 为初始斜率; $G_c$ 为剪切层系数; $Q_d$ 为极限反力,计算中极限土压力值采用ALA建议的管线向下的极限反力公式<sup>[23]</sup>

$$Q_d = N_c c D + N_q \gamma z_p D + N_\gamma \gamma \frac{2D^2}{2} \quad (2)$$

式中: $N_c$ 为无量纲黏土系数,与黏聚力和埋深比相关; $N_q$ 为无量纲砂土系数,与内摩擦角和埋深比相关; $N_\gamma$ 为无量纲参数; $c$ 为黏聚力; $D$ 为管线外径; $\gamma$ 为土体重度; $z_p$ 为管线埋深。上述3个无量纲参数 $N_c$ 、 $N_q$ 和 $N_\gamma$ 的取值可以参考式(3)~式(5)。

$$N_c = 2 \left( \frac{z_p}{D} \right) \leq 10 \quad (3)$$

$$N_q = \left( \frac{\phi z_p}{44D} \right) \leq \exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4)$$

$$N_\gamma = \exp(0.18\phi - 2.5) \quad (5)$$

地基反力与位移的关系如图 1 所示,呈双曲线关系。当管线位移持续增大时,地基反力  $Q$  最终会达到其极限值  $Q_d$ 。极限位移  $\delta_d$  与土层、管线直径和埋深相关:当土层从密砂到松砂时,取值  $0.01z_p \sim 0.02z_p$ ,且小于  $0.1D$ ;当土层从硬黏土到软黏土时,取值  $0.1z_p$  到  $0.2z_p$ ,且小于  $0.2D$ 。基于上述地基模型,可推导隧道下穿引起的上方既有市政管线的纵向变形。

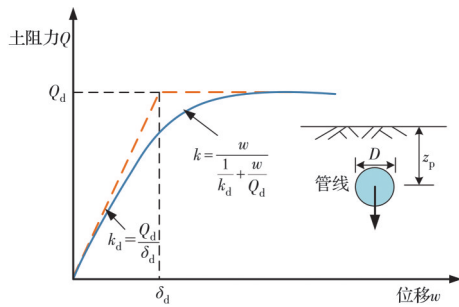


图 1 地基反力与位移关系曲线

Fig. 1 Relationship between ground reaction and displacement

## 1.2 盾构隧道开挖引起的地层位移计算

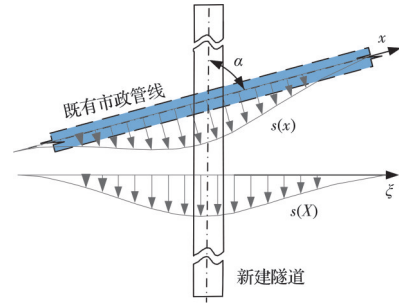
### 1.2.1 单线隧道开挖引起的地层位移

已有研究<sup>[8,12,22]</sup>表明,隧道开挖引起的垂直于横断面方向的地层沉降  $s(x)$  符合高斯曲线分布。众多学者在研究隧道开挖引起上方既有市政管线响应问题时,采用 Peck 经验公式计算隧道开挖引起的地层位移。因此,笔者也采用该经验公式计算盾构隧道开挖引起的既有管线处的地层位移,该公式的表达式为

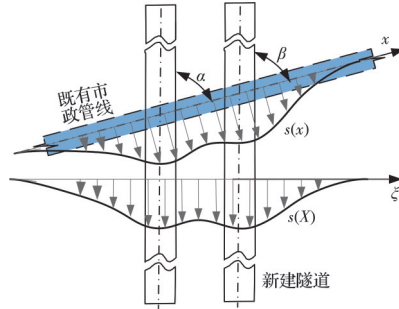
$$s_1(x) = -S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) = -\frac{\pi R^2 V_1}{\sqrt{2\pi} K(z_0 - z_p)} \exp\left[-\frac{x^2}{2K^2(z_0 - z_p)^2}\right] \quad (6)$$

式中:  $S_{\max}$  为沉降槽的最大沉降值;  $x$  为与隧道轴线的水平距离;  $i$  为沉降槽宽度系数,  $i = K(z_0 - z_p)$ ;  $K$  为沉降槽宽度参数;  $z_0$  和  $z_p$  分别为隧道和既有管线的轴线埋深;  $R$  为隧道的外半径;  $V_1$  为隧道开挖引起的地层损失率。

在城市地下隧道建设时,由于空间条件限制,隧道与既有管线多呈一定角度相交,如图 2(a) 所示,垂直相交的情况较少。因此,采用坐标转换的方法,扩展式(6)的使用范围,得到任意角度  $\alpha$  下隧道开挖引起的既有管线处的位移计算式



(a) 单线隧道



(b) 双线隧道

图 2 隧道与既有管线相对平面位置示意图

Fig. 2 Relative planar position between tunnel and existing pipeline

$$s_1(x) = -\frac{\pi R^2 V_1}{\sqrt{2\pi} K(z_0 - z_p)} \exp\left[-\frac{(x \sin \alpha)^2}{2K^2(z_0 - z_p)^2}\right] \quad (7)$$

### 1.2.2 双线隧道开挖引起的地层位移

双线隧道施工诱发的地层沉降规律与单线隧道施工不同。在双线隧道施工过程中,特别是双线隧道之间净距较小的情况下,先建隧道施工对地层产生了前期扰动,改变了地层的性质,导致土体变疏松,因此,后建隧道施工诱发的土体变形往往要大于先建隧道,最终地层沉降曲线会呈现不对称分布。在这种情况下,简单地将两条隧道施工分别引起的沉降进行叠加,不能准确地反映双线隧道施工诱发的地层沉降特点。现有研究表明,土体受扰动程度在先建隧道的轴线处最大,随着与隧道轴线距离的增大而下降。因此,在用 Peck 公式计算第二次隧道穿越引起的地层位移时,需考虑先建隧道的影响,对其进行修正, Liu 等<sup>[26]</sup>给出了后建隧道地表位移的计算式

$$s_2(x) = -\left(1 + M_d - M_d \frac{|x - x_1|}{n_1 i}\right) \frac{\pi R^2 V_1}{\sqrt{2\pi} i} \exp\left[-\frac{(x - x_2)^2}{2i^2}\right] \quad (8)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  分别为先建隧道轴线和后建隧道轴线的坐标;  $M_d$  为与两隧道轴线距离相关的无量纲修正系数,其取值范围为  $0 \sim 1$ ,当两隧道距离足够远、互

无影响时取0,当后建隧道轴线在先建隧道轴线上  
方时取1;  $n_i$ 为沉降槽宽度系数  $i$  的倍数,通常取  
2.5~3;其中,  $\frac{|x-x_1|}{n_i i}$  的值大于1时,按1取值。

当两条新建隧道与既有管线分别呈  $\alpha$  和  $\beta$  角度

$$s(x) = s_1(x) + s_2(x) = -\frac{\pi R^2 V_1}{\sqrt{2\pi} K(z_0 - z_p)} \exp\left[-\frac{(x \sin \alpha - x_1 \sin \alpha)^2}{2K^2(z_0 - z_p)^2}\right] - \left(1 + M_d - M_d \frac{|x \sin \alpha - x_1 \sin \alpha|}{n_i K(z_0 - z_p)}\right) \times \frac{\pi R^2 V_1}{\sqrt{2\pi} K(z_0 - z_p)} \exp\left[-\frac{(x \sin \beta - x_2 \sin \beta)^2}{2K^2(z_0 - z_p)^2}\right] \quad (9)$$

### 1.3 管线响应的微分控制方程

计算模型示意图如图3所示,将既有管线简化  
为搁置于非线性地基上的 Euler-Bernoulli 梁。假定  
既有管线与周围土体未发生脱空(即管线与土体变  
形协调),则隧道开挖引起的土体自由位移  $s(x)$ 、管  
线抵抗土体变形的位移  $u(x)$  和管线最终位移  $w(x)$   
之间的关系为

$$w(x) = s(x) + u(x) \quad (10)$$

式中:  $w(x)$ 、 $s(x)$  和  $u(x)$  均为既有管线轴线位置  
的位移。

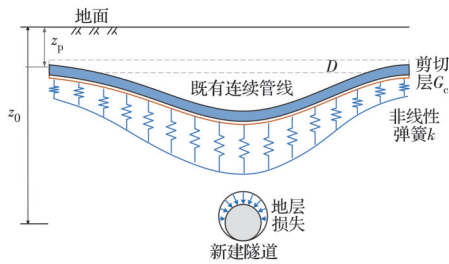


图3 计算剖面示意图

Fig. 3 Sketch of the calculation section

在连续管线任意位置取一微元体,其受力分析  
如图4所示,剪力向上为正,弯矩顺时针为正。对该  
微元体进行受力分析,通过受力平衡可得到

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -q(x)D \quad (11)$$

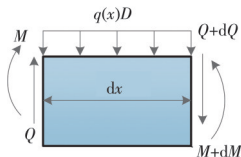


图4 微元体受力分析

Fig. 4 Force analysis of an infinitesimal element

管线引起地层产生位移  $u(x)$  的力  $p(x)$ , 与管线  
受到的地层的力  $q(x)$  互为反作用力, 则

$$-q(x) = p(x) = \frac{u(x)}{\frac{1}{k_d} + \frac{u(x)}{Q_d}} - G_c \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \quad (12)$$

联合式(10)~式(12), 再结合材料力学中 Euler-

下穿时, 如图2(b)所示, 需要采用坐标转换的方法,  
扩展式(8)的使用范围。同时结合单线隧道引起地  
层位移的计算式(7), 可得到任意角度下双线隧道  
开挖引起的既有管线处的位移计算式

Bernoulli 梁理论, 可得到管线变形的微分控制方程

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \frac{w(x)D}{\frac{1}{k_d} + \frac{w(x)}{Q_d}} - G_c D \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = \frac{s(x)D}{\frac{1}{k_d} + \frac{s(x)}{Q_d}} - G_c D \frac{d^2 s(x)}{dx^2} \quad (13)$$

式中:  $EI$  为连续管线的抗弯刚度。

式(13)为四阶非齐次方程, 且存在两项非线性  
项, 难以求解其显性解, 因此结合有限差分法和牛  
顿迭代法对其进行求解。首先, 如图5所示, 将既有  
连续市政管线离散为有限节点单元, 单元长度为  $l$ ,  
共计  $n+5$  个单元(包括两端各两个虚拟单元)。根  
据中心标准有限差分公式, 可得到式(13)的差分形  
式为

$$EI \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{l^4} + \frac{w_i D}{\frac{1}{k_d} + \frac{w_i}{Q_d}} - G_c D \frac{w_{i+1} - 2w_i - w_{i-1}}{l^2} = \frac{s_i D}{\frac{1}{k_d} + \frac{s_i}{Q_d}} + G_c D \frac{s_{i+1} - 2s_i - s_{i-1}}{l^2} \quad (14)$$

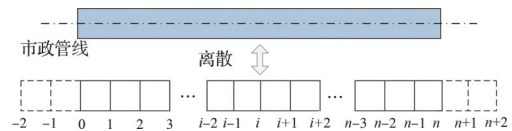


图5 连续管线离散模型

Fig. 5 Discrete model of the continuous pipeline

假定管线两端自由, 则其边界条件为两端弯矩  
和剪力均为零, 由此可得到两端4个虚拟节点的位  
移表达式

$$\left. \begin{aligned} w_{-2} &= 4w_0 - 4w_1 + w_2, & w_{-1} &= 2w_0 - w_1 \\ w_{n+2} &= 4w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2}, & w_{n+1} &= 2w_n - w_{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将上述虚拟节点位移表达式代入式(14)中, 可  
得到关于既有管线  $n+1$  个节点位移的差分方程, 且  
该差分方程可写成位移向量的矩阵代数表达式



$$K_t \mathbf{w} + \frac{\mathbf{w}}{\frac{1}{k_d} + \frac{\mathbf{w}}{Q_d}} D - G \mathbf{w} = \frac{s}{\frac{1}{k_d} + \frac{s}{Q_d}} D - G s \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{w}$  为管线竖向位移向量;  $K_t$  为既有管线刚度矩阵;  $G$  为地基剪切刚度矩阵;  $s$  为隧道开挖引起的土体位移向量。各个向量的表达式分别为

$$K_t = \frac{EI}{l^4} \begin{bmatrix} 2 & -4 & 2 & & & & 0 \\ -2 & 5 & -4 & 1 & & & \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ & & & & & 1 & -4 & 5 & -2 \\ 0 & & & & & & 2 & -4 & 2 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (17a)$$

$$G = \frac{G_c D}{l^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ & 1 & -2 & 1 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (17b)$$

$$\mathbf{w} = \{w_0, w_1 \cdots w_{i-1}, w_i, w_{i+1} \cdots w_{n-1}, w_n\}^T \quad (17c)$$

$$\mathbf{s} = \{s_0, s_1 \cdots s_{i-1}, s_i, s_{i+1} \cdots s_{n-1}, s_n\}^T \quad (17d)$$

#### 1.4 牛顿迭代法求解

由于式(16)中存在非线性项,无法直接求解,因此通过牛顿迭代法求其数值解。首先由式(16)可得到一个关于管线位移向量的矩阵

$$F(\mathbf{w}) = K_t \mathbf{w} + \frac{\mathbf{w} D}{\frac{1}{k_d} + \frac{\mathbf{w}}{Q_d}} - G \mathbf{w} - \mathbf{p} = 0 \quad (18)$$

假设该矩阵的雅可比矩阵的逆矩阵存在且有界,对其求导可得其雅可比矩阵

$$F'(\mathbf{w}) = K_t + K_s - G \quad (19)$$

式中:  $K_s$  是关于函数  $f_i$  的对角矩阵,  $f_i$  为

$$f_i = \frac{1}{\frac{1}{k_d} + \frac{w_i}{Q_d}} D - \frac{w_i}{Q_d \left( \frac{1}{k_d} + \frac{w_i}{Q_d} \right)^2} D, \quad i = [0, n] \quad (20)$$

根据牛顿迭代公式,则有

$$\mathbf{w}^{(k+1)} = \mathbf{w}^{(k)} - (F'(\mathbf{w}^{(k)}))^{-1} F(\mathbf{w}^{(k)}) \quad (21)$$

$$\Delta \mathbf{w}^{(k)} = -(F'(\mathbf{w}^{(k)}))^{-1} F(\mathbf{w}^{(k)}) \quad (22)$$

式中:  $(F'(\mathbf{w}^{(k)}))^{-1}$  为  $F(\mathbf{w}^{(k)})$  的雅可比矩阵的逆矩阵;  $k$  为求近似值的迭代次数;  $\mathbf{w}^{(k)}$  为迭代第  $k$  次求得

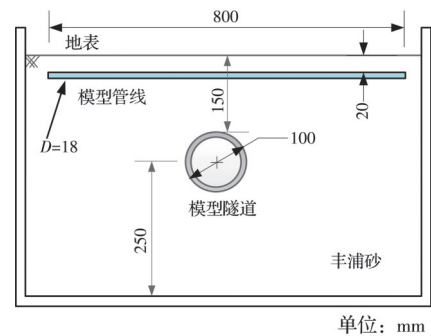
的管线竖向位移;  $\mathbf{w}^{(k+1)}$  为第  $k+1$  次的竖向位移,可由前一次位移  $\mathbf{w}^{(k)}$  求得;  $\Delta \mathbf{w}^{(k)}$  为第  $k+1$  次与第  $k$  次计算结果之间的误差。因此,给定管线近似初始值  $\mathbf{w}^{(0)}$  后,可迭代计算,直至精度满足要求,即得到管线的最终变形结果。

## 2 案例验证

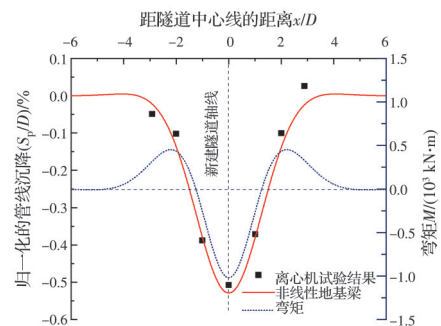
### 2.1 离心机模型试验

在隧道下穿管线的离心机试验中,史江伟等<sup>[7]</sup>采用铝合金管模拟连续管线。离心试验剖面示意图如图 6(a)所示,试验离心加速度为  $60g$ ,对应的原型隧道埋深和外径分别为  $9.0 \text{ m}$  和  $6.0 \text{ m}$ ,既有管线埋深、外径和壁厚分别为  $1.2$ 、 $1.08$ 、 $0.06 \text{ m}$ 。铝合金材料的弹性模量为  $70 \text{ GPa}$ ,可得到管线的抗弯刚度为  $1.76 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。试验所用土体采用国际标准砂——日本丰浦砂,具体参数见文献[7]。通过试验计算得到管线向下运动的最大阻力为  $1950 \text{ kN}$ ,对应的极限位移为  $135 \text{ mm}$  ( $0.125 D_p$ ),由此可得到管土相互作用初始斜率为  $14400 \text{ kN/m}$ 。根据文献[7],当试验得到的地层损失为  $2\%$  时,由地表沉降拟合得到的沉降槽宽度系数为  $4.81 \text{ m}$ ,反算可得到地层沉降宽度参数  $K=0.53$ 。

图 6(b)为离心机模型试验中地层损失  $2\%$  工况下试验数据与本文非线性地基模型计算结果的对



(a) 剖面示意图



(b) 管线变形的试验结果和计算值

图 6 离心机试验案例

Fig.6 Case of centrifuge model tests for tunneling underneath a continuous pipeline

比。由图6(b)可知,下方隧道开挖引起的连续管线沉降曲线近似呈正态分布,新建隧道轴线下方沉降最大,此处也是管线弯矩极值处,工程中应重点关注。此外,除个别数据外,计算结果与实测结果趋势一致,二者沉降曲线均近似呈正态分布。根据试验参数计算得到的归一化纵向最大沉降为0.528%,试验测得隧道轴线上方最大归一化沉降为0.507%,两者相差0.021%,该差值在合理范围内。因此,可以采用该非线性地基模型计算砂土地层中隧道下穿引起的管-土相互作用。

## 2.2 深圳地铁下穿电缆管线

深圳地铁益田站至香蜜湖站区间采用土压平衡盾构下穿既有混凝土电缆管线<sup>[3,8]</sup>。既有地下电缆管线与新建隧道的相对位置示意图如图7(a)所示,盾构隧道与既有市政电缆管线近似垂直相交。盾构隧道外径和内径分别为6 m和5.5 m,隧道埋深8.7 m,既有电缆管线外径3 m,其与新建隧道最小竖向间距为1.2 m(间距较小),管线抗弯刚度 $EI$ 为 $5.87 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。隧道盾构施工穿越区域土体主要为砾质黏土和砂质黏土。根据文献[3,15],平均地层损失比取0.84%,地层沉降宽度参数 $K$ 取0.53,土体弹性模量 $E_s$ 为8.2 MPa,泊松比 $\nu$ 为0.3,黏聚力为68.9 kPa,内摩擦角为 $13.7^\circ$ ,土体重度为 $18.7 \text{ kN/m}^3$ 。由此可计算得到管线向下运动的极限阻力值 $Q_d$ 为1 213.8 kN,地基反力与位移双曲线

的初始斜率 $k_d$ 为2 023 kN/m。

由图7(b)中计算结果与实测结果的对比可以看出,相较于增加剪切层的Pasternak地基梁计算结果,Winkler地基模型的计算结果更偏离工程监测实际值。这是由于Winkler地基模型假定地基由一系列独立弹簧组成,弹簧间互不影响,即土体位移与作用力呈纯线弹性关系,而实际土体不是离散存在的,土体间存在黏聚力;Pasternak地基模型通过添加剪切层考虑弹簧间的相互影响,可进一步考虑土体连续性,因此结果较Winkler地基更精准。Kerr地基模型是对Pasternak地基模型的改进,增加了上层弹簧刚度,即包括两个弹簧层和一个剪切层,更为精确,计算结果与实测结果也更接近。但3种地基模型的地基参数 $k$ 均为定值,即地基反力与位移成正比,因此会高估地层刚度,导致计算结果均偏小,而且计算的管线受影响范围比实测数据更大。相较而言,本文提出的非线性地基模型因考虑了土体与作用力的非线性变形关系,计算得到的管线纵向变形趋势和沉降量均与实测值更接近。因此,考虑土体非线性变形的地基模型更为合适,能更准确预测黏土地层中隧道下穿引起邻近既有市政管线的纵向变形。

## 2.3 双线隧道下穿雨水管线

合肥地铁4号线南站至呈坎路区间下穿一混凝土雨水管线<sup>[27]</sup>,新建隧道与既有管线的相对位置如图8(a)所示。新建地铁4号线为外径6 m的双线盾构隧道,右侧隧道(FT)施工完成后再施工左侧隧道(ST),两隧道轴线间距为15 m,隧道埋深约8.9 m。既有的雨水管线为钢筋混凝土材质,外径1.5 m,壁厚0.1 m,计算可得其抗弯刚度 $EI$ 为 $2.7 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。管线上覆土层厚度约4.5 m,与新建隧道拱顶最小净距仅2.9 m。隧道与管线均位于黏土地层,土体弹性模量 $E_s$ 为16.1 MPa,泊松比 $\nu$ 为0.29,黏聚力 $c$ 为55 kPa,内摩擦角为 $15^\circ$ ,土体重度为 $19.8 \text{ kN/m}^3$ 。由此可计算得到管线向下运动的极限阻力值 $Q_d$ 为582.7 kN,地基反力与位移双曲线的初始斜率 $k_d$ 为1 942.2 kN/m。根据文献[27],盾构施工引起的地层损失取0.48%,沉降槽宽度参数取0.7,后建隧道引起地层沉降的修正参数 $M_d$ 取0.6, $n_t$ 取2.8。管线变形的计算结果与实测数据对比如图8(b)所示。

由图8(b)可知,由于两条隧道水平间距较近,各自对管线的影响区存在重叠。第1条隧道穿越后,管线呈现单峰V形沉降曲线;第2条隧道穿越后,叠加第1条隧道穿越的影响,沉降槽向后建隧道方向扩展,此时管线沉降呈U型沉降曲线。两条隧道分别穿越后,计算结果与实测沉降趋势一致、沉

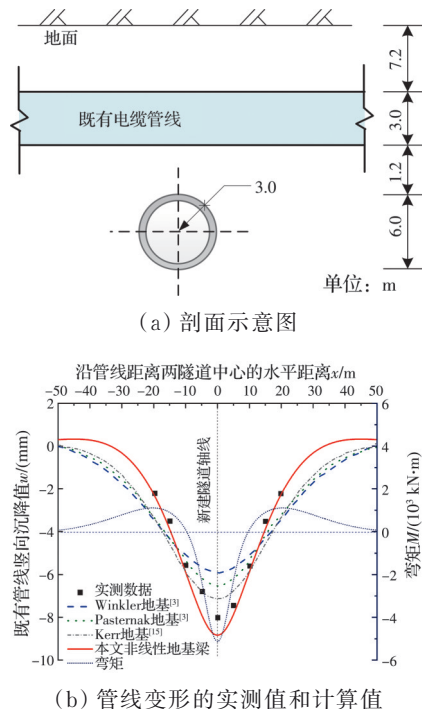
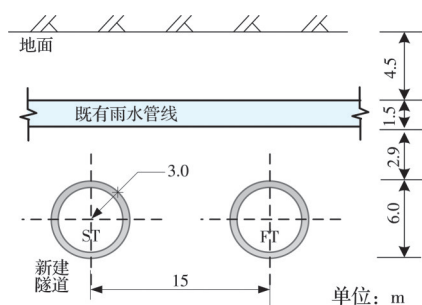


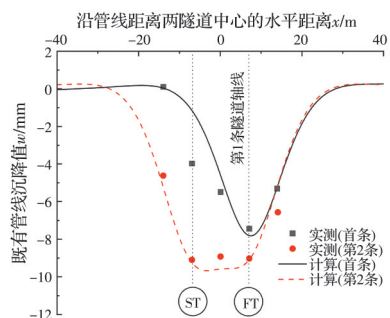
图7 深圳地铁下穿混凝土管工程案例

Fig. 7 Case study of Shenzhen Subway undercrossing a concrete pipe

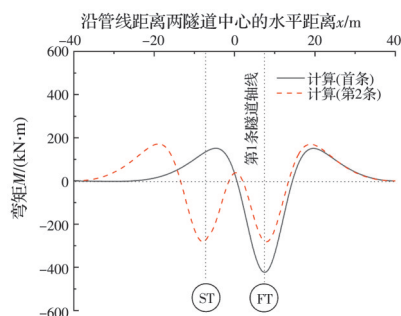
降值较为接近。因此,该方法可用来预测黏土地层中双线隧道下穿引起的既有市政管线纵向变形。此外,由图 8(c)可知,第 2 条隧道穿越后,管线最大弯矩值有所减小,且最大弯矩位于两隧道轴线附近。这是因为第 2 条隧道穿越使管线沉降范围变大,两隧道轴线中间的差异沉降减小,进而导致管线内力减小。



(a) 剖面示意图



(b) 管线变形的实测值和计算值



(c) 管线弯矩

图 8 合肥双线隧道下穿混凝土雨水管工程案例

Fig. 8 Case study of Hefei twin tunnels undercrossing a concrete rain pipe

### 3 结论

1)在现有研究基础上,引入非线性 Pasternak 地基模型,考虑管-土非线性相互作用,建立了单线和双线隧道下穿引起的既有刚性接头管线纵向变形控制方程,并通过有限差分法和牛顿迭代法求解,得到其数值解。

2)结合离心机模型试验和两个工程案例的监测数据,验证了所提计算模型的适用性和合理性。

考虑管-土非线性相互作用的简化计算方法,在砂土地层和黏土地层中均能较好预测隧道下穿引起的既有刚性接头市政管线的纵向变形,且该方法考虑了平行双线隧道先后施工的影响,能够较好预测其先后穿越引起的管线变形。

3)通过与常用的 Winkler 地基、Pasternak 地基和 Kerr 地基模型对比可知:3 种地基模型计算得到的管线变形均近似呈正态分布,但均采用线弹性地基反力系数  $k$ ,高估了地层刚度,进而低估了管线变形。3 种地基模型计算结果的峰值依次增大,影响范围依次减小,即引入的地基参数越多,对土体性质的反映越准确,与实测结果也更为接近;而本文方法考虑土体非线性后,得到的结果与实测结果更为接近。因此,采用非线性地基模型的简化计算方法,在计算隧道下穿引起的管线纵向变形时具有更高可靠性。

### 参考文献

- [1] 韩宝明,李亚为,鲁放,等. 2021 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 5-11.
- [2] HAN B M, LI Y W, LU F, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations in the world in 2021: A review [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 5-11. (in Chinese)
- [3] HOU Y J, FANG Q, ZHANG D L, et al. Excavation failure due to pipeline damage during shallow tunnelling in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46: 76-84.
- [4] 张恒,张子新. 盾构隧道开挖引起既有管线的竖向变形[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1172-1178.
- [5] ZHANG H, ZHANG Z X. Vertical deflection of existing pipeline due to shield tunnelling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1172-1178. (in Chinese)
- [6] 邓皇适,傅鹤林,史越,等. 盾构隧道曲线段掘进引发邻近地下管线变形分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3008-3020.
- [7] DENG H S, FU H L, SHI Y, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by shield machine tunneling along curve section [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3008-3020. (in Chinese)
- [8] SHI J W, WANG J P, JI X J, et al. Three-dimensional numerical parametric study of tunneling effects on existing pipelines [J]. Geomechanics and Engineering, 2022, 30(4): 383-392.
- [9] 马少坤,邵羽,刘莹,等. 不同埋深盾构双隧道及开挖

- 顺序对临近管线的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2487-2495.
- MA S K, SHAO Y, LIU Y, et al. Effects of construction sequences of twin tunneling at different depths on the adjacent pipeline [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2487-2495. (in Chinese)
- [7] 史江伟, 范燕波, 裴伟伟, 等. 盾构下穿非连续管线变形特性及预测方法研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 143-150.
- SHI J W, FAN Y B, PEI W W, et al. An investigation of deformation mechanisms of jointed pipelines due to underneath tunnel excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 143-150. (in Chinese)
- [8] 吴为义, 孙宇坤, 张土乔. 盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 58-62.
- WU W Y, SUN Y K, ZHANG T Q. Analysis of the effects on the adjacent underground pipelines by shield tunneling construction [J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 58-62. (in Chinese)
- [9] ZHANG Z G, ZHANG M X, ZHAO Q H. A simplified analysis for deformation behavior of buried pipelines considering disturbance effects of underground excavation in soft clays [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(10): 7771-7785.
- [10] 魏纲, 黄文, 姜鑫. 地面出入式盾构开挖对邻近地下管线的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9): 1934-1941.
- WEI G, HUANG W, JIANG X. Analysis of influence of ground penetrating shield tunnel excavation on adjacent underground pipeline [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1934-1941. (in Chinese)
- [11] WANG H T, ZHUANG X X, SUN H Y. Prediction of pipeline displacement induced by water leakage during tunnel construction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5383-5389.
- [12] LIN C G, HUANG M S, NADIM F, et al. Tunnelling-induced response of buried pipelines and their effects on ground settlements [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96: 103193.
- [13] FRANZA A, VIGGIANI G M B. Role of shear deformability on the response of tunnels and pipelines to single and twin tunneling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(12): 04021145.
- [14] 可文海, 管凌霄, 刘东海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 221-228, 234.
- KE W H, GUAN L X, LIU D H, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221-228, 234. (in Chinese)
- [15] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8): 1453-1463.
- FENG G H, XU C J, TEY M W, et al. Deflection of overlying pipeline induced by shield tunneling considering effect of lateral soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(8): 1453-1463. (in Chinese)
- [16] YU J, ZHANG C R, HUANG M S. Soil-pipe interaction due to tunnelling: Assessment of Winkler modulus for underground pipelines [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 50: 17-28.
- [17] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 隧道开挖对邻近非连续接口埋管的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1018-1026.
- ZHANG C R, YU J, HUANG M S. Responses of adjacent underground jointed pipelines induced by tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1018-1026. (in Chinese)
- [18] HUANG M S, ZHOU X C, YU J, et al. Estimating the effects of tunnelling on existing jointed pipelines based on Winkler model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 89-99.
- [19] 管凌霄, 徐长节, 可文海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平位移研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 54-62.
- GUAN L X, XU C J, KE W H, et al. Analysis of horizontal pipeline deformation caused by shield tunnelling [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 54-62. (in Chinese)
- [20] 管凌霄, 徐长节, 可文海, 等. 隧道下穿引起既有管道竖向位移的简化计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 66-72.
- GUAN L X, XU C J, KE W H, et al. Simplified method for calculating the vertical displacement of existing pipelines caused by tunnel undercrossing [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 66-72. (in Chinese)
- [21] VORSTER T E, KLAR A, SOGA K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399-1410.
- [22] KLAR A, ELKAYAM I, MARSHALL A M. Design oriented linear-equivalent approach for evaluating the effect of tunneling on pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015062.
- [23] ALA. Guidelines for the design of buried steel pipe [R]. American Lifelines Alliance (ALA), 2005.
- [24] 柯宅邦, 梁荣柱, 童智能, 等. 地表堆载下盾构隧道纵向非线性变形简化解析解[J]. 岩土工程学报, 2019, 41



- (增刊 1): 245-248.
- KE Z B, LIANG R Z, TONG Z N, et al. Simplified analytical solution for nonlinear longitudinal deformation of shield tunnels under surface surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 245-248. (in Chinese)
- [25] 康成, 叶超, 梁荣柱, 等. 基坑开挖诱发下卧盾构隧道纵向非线性变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2341-2350.
- KANG C, YE C, LIANG R Z, et al. Nonlinear longitudinal deformation of underlying shield tunnels induced by foundation excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2341-2350. (in Chinese)
- [26] LIU Z Y, XUE J F, YE J Z, et al. A simplified two-stage method to estimate the settlement and bending moment of upper tunnel considering the interaction of under-crossing twin tunnels [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 29: 100558.
- [27] SUN S C, RONG C X, WANG H L, et al. The ground settlement and the existing pipeline response induced by the nonsynchronous construction of a twin-tunnel [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-12.
- (编辑 朱备)