

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220903001

# 基于能量法的隧道穿越引起既有管线变形研究\*

罗文俊<sup>1,2</sup>, 刘天宇<sup>1,2</sup>, 郝结平<sup>1</sup>, 江学辉<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西南昌 330013)

**摘要:** 针对隧道穿越引起既有管线变形的问题, 本文出发点并非沿用力学平衡, 而是从系统能量入手。将既有管线视为 Euler-Bernoulli 梁, 并搁置于可考虑地基连续变形的 Pasternak 地基上。参考 Rayleigh-Ritz 法给出位移函数, 写出地基梁系统各部分的功能表达式, 建立关于管线变形的总势能方程。依据最小势能原理对其进行变分运算并求解, 推导得到计算管线变形的理论解析。分别利用有限元软件的模拟结果和已发表文献中实际工程的监测数据验证所提方法的合理性。进一步对既有管线抗弯刚度、新旧结构穿越角度以及地层损失率展开参数分析。研究结果表明, 随着既有管线抗弯刚度和新旧结构穿越角度的增大, 既有管线的变形减小; 而随着地层损失率的增大, 既有管线的变形也随之增大。所提方法可快速评估隧道开挖对既有管线的影响。

**关键词:** 隧道穿越; 管线变形; 能量法; 弹性地基梁理论; 理论解析

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0128-09

## Research on Deformation of Existing Pipeline Induced by Shield Tunneling Based on Energy Method

LUO Wenjun<sup>1,2</sup>, LIU Tianyu<sup>1,2</sup>, HAO Jieping<sup>1</sup>, JIANG Xuehui<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;  
2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The start point of this paper is to figure out the deformation mechanism of existing pipelines induced by shield tunneling using the system energy technique instead of the general namely mechanical balance method. The existing pipeline is simplified as an Euler-Bernoulli beam on the Pasternak foundation which can deform continuously. After giving the displacement function referring to the Rayleigh-Ritz method, the energy expressions of each component in the elastic foundation beam system are achieved, and then the total potential energy equation about pipeline deformation is obtained. Based on the principle of minimum potential energy, the theoretical method is derived to assess the pipeline deformation by employing a variational method to solve the governing equation. The rationali-

\* 收稿日期:2022-09-03;修回日期:2022-11-09

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(52225210)、国家自然科学基金项目(51978265)、江西省防灾减灾及应急管理重点实验室项目(20212BCD42011)资助

作者简介:罗文俊(1979—),女,教授,博导,博士。主要从事轨道交通线路防灾减灾领域研究。

E-mail: lwj06051979@163.com

ty of the proposed method is verified by comparing the calculated results with those of the simulation results of the finite element software (FEM) and the monitoring data from the engineering project in the published literature. Then, the parameter analysis on the bending stiffness, cross angles and ground loss is conducted to figure out their influence on the deformation of the pipeline. The results show that with the increase of the bending stiffness of the existing pipeline and the crossing angle between the new and existing structures, the deformation of the pipeline decreases. However, the deformation increases as the ground loss increases. The proposed method can quickly evaluate the impact of tunnel excavation on existing pipelines.

**Keywords:** tunnel crossing; pipeline deformation; energy method; elastic foundation beam theory; theoretical analysis

## 0 引言

盾构法因其安全开挖、掘进较快、自动化程度高等优点被广泛应用于地铁隧道的修建工程中。尽管盾构法的技术工艺已经比较成熟,但在修建隧道过程中,仍然会对邻近既有管线产生一定程度的扰动影响。盾构机在施工作业时,由于掘进前方的土体被切削,打破了地层中原始的应力平衡状态,产生复杂的卸荷作用,该响应通过土体传播后作用在既有结构上。既有管线由于受到附加荷载的作用,产生不均匀沉降变形(如图1所示),过大的变形会导致发生结构性损伤,影响稳定性和安全使用。

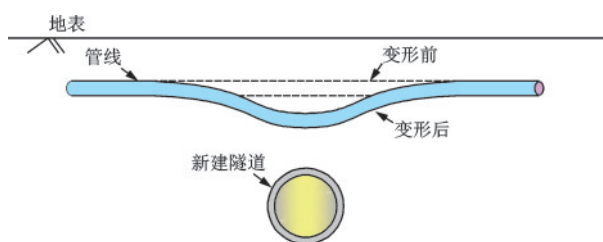


图1 隧道下穿既有管线示意

Fig.1 Diagram of tunnel under-crossing the existing pipeline

目前,针对隧道盾构施工对既有管线影响的研究方法主要集中在以下方面:(1)物理模型试验。程霖等<sup>[1]</sup>利用土工离心机模拟了新建隧道垂直盾构穿越对上卧既有管线的影响;(2)现场监测。J. L. Zhu等<sup>[2]</sup>报道了某市地铁隧道盾构施工引起的地表沉降以及既有管线变形情况;(3)数值模拟。柳程柱等<sup>[3]</sup>利用三维软件FLAC<sup>3D</sup>模拟了隧道全开挖过程,研究总结了管线在各个沉降时期的沉降规律;(4)理论研究。弹性地基梁理论常常贯穿于理

论分析过程中,而最先使用的地基模型就是 Winkler 地基<sup>[4]</sup>。张治国等<sup>[5]</sup>基于 Winkler 地基模型,提出了分析类矩形隧道穿越施工引起既有管线变形的理论方法。魏纲等<sup>[6]</sup>研究了地面出入式盾构开挖对邻近地下管线的影响,并对管线埋深、管径等因素展开了参数分析。由于 Winkler 地基中仅有一层弹簧层导致该模型无法考虑土体的连续性(图2(a)),为了解决该问题,P.L.Pasternak<sup>[7]</sup>在 Winkler 模型基础上增加了一个剪切层在弹簧层上,将弹簧层的变形联系了起来(图2(b))。S.W. Zhao等<sup>[8]</sup>基于 Pasternak 地基模型,推导了盾构隧道斜穿引起既有管线变形的理论方法,并利用现场实测数据和数值模拟结果验证所提方法的正确性。林存刚等<sup>[9]</sup>关注了管线接口的影响作用,针对非连续接口管线给出了计算其变形挠曲的有限差分解。并于将该方法的计算结果与连续介质弹性解相比,发现所提方法的数学求解更为简便,有利于在工程中推广。黄明华等<sup>[10]</sup>给出了计算管线变形的显式解析解,并验证了该方法的优越性。C.G.Lin等<sup>[11]</sup>将管线视为 Euler-Bernoulli 梁,研究了隧道穿越引起上方管线的变形响应问题。

在理论方面,虽然针对隧道盾构引起既有管线

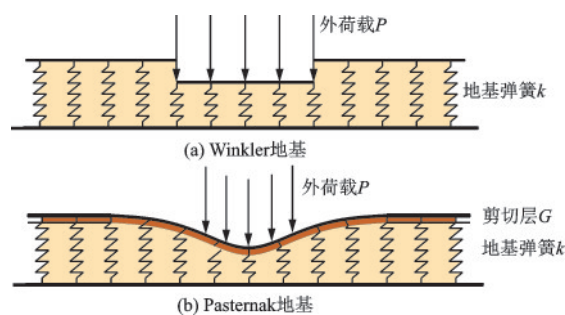


图2 不同地基模型变形示意

Fig.2 Deformation diagram of different foundation models

的变形影响已展开了大量研究,但多数出发点仍集中于力学平衡角度,而忽视了管线变形过程中系统的功能关系。实际上,存在着三种能量,分别为既有管线的弯曲变形能、地基反力所做功以及新建隧道开挖产生的附加荷载所做功。因此,能量法可成为一个新的出发点。刘晓强等<sup>[12]</sup>基于 Winkler 地基,利用能量变分法求解得到隧道穿越引起既有管线变形的计算公式。魏纲等<sup>[13]</sup>采用最小势能原理提出了一种可计算新建隧道下穿引起既有盾构隧道环间错台量的理论方法。笔者在前人的基础上,基于弹性地基梁理论,从能量角度出发,建立关于管线变形的控制方程,依据最小势能原理对其进行变分运算并求解。利用有限元软件(FEM)建立隧道盾构穿越既有管线的三维模型。并将理论方法的计算结果与模拟结果以及工程监测数据相比较,以验证所提方法的合理性。

## 1 管线变形理论分析

本文采用弹性地基梁理论,将既有管线视为搁置于 Pasternak 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁。为简化计算,需要进行以下几点假设:

(1)既有管线被视为具有等效抗弯刚度的 Euler-Bernoulli 梁;

(2)隧道与地基之间的相互作用通过 Pasternak 地基考虑;

(3)不考虑地层排水固结和蠕变作用。

隧道下穿管线的理论计算模型如图 3 所示。

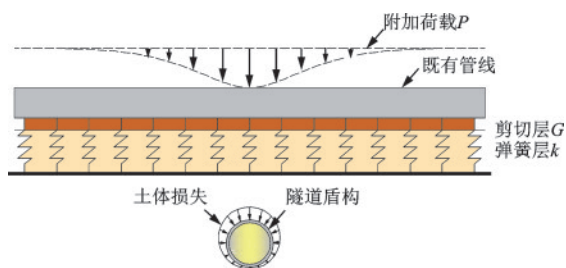


图3 隧道下穿既有管线的理论分析模型

Fig.3 Theoretical analysis model of tunnel crossing the existing pipeline

### 1.1 能量平衡方程建立

在采用能量法研究既有管线的位移变形时,选择合适的位移函数十分重要。本文参考 Rayleigh-Ritz 法<sup>[14]</sup>给出位移函数,表达式见下:

$$w = \sum_{i=0}^n a_i \cos \frac{i\pi x}{L} \quad (1)$$

式中, $w$ 为管线的变形量; $a_i$ 是位移函数中的待定系数; $x$ 为沿隧道纵向方向的坐标值; $i$ 的取值为 $0, 1, 2, \dots, n-1, n$ ;  $L$ 为管线计算长度的一半。

接着,将上式改写为矩阵的形式<sup>[12]</sup>:

$$w = \{C\}_{1 \times (n+1)} \{a\}_{(n+1) \times 1} \quad (2)$$

其中:

$$\{C\} = \left\{ 1, \cos \frac{\pi x}{L}, \cos \frac{2\pi x}{L}, \dots, \cos \frac{n\pi x}{L} \right\} \quad (3)$$

$$\{a\} = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_n\}^T \quad (4)$$

要得到系统总势能方程,需要写出管线变形时系统中各部分的能量表达式。在新建隧道盾构下穿引起管线变形的过程中,系统包含三部分能量,即既有管线的弯曲变形能、地基反力所做功以及新建隧道开挖产生的附加荷载所做功。

当位移变形量为  $w$  时,梁的弯曲变形能  $E_1$  的计算公式为:

$$E_1 = \frac{1}{2} \int_{-L}^L (EI)_{eq} \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

式中,  $(EI)_{eq}$  为管线的等效纵向抗弯刚度。

在 Pasternak 模型中地基反力所做功  $E_2$  的表达式为:

$$E_2 = \frac{D}{2} \int_{-L}^L k w^2 dx + \frac{D}{2} \int_{-L}^L G \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (6)$$

式中,  $D$  为梁直径;  $k$  为地基反力系数;  $G$  为地基剪切层系数。

新建隧道盾构开挖对周围土体产生扰动,该影响通过土体的传播进而以附加荷载的形式作用在既有管线结构上。附加荷载所做功  $E_3$  可通过下式计算:

$$E_3 = -D \int_{-L}^L P w dx \quad (7)$$

式中,  $P$  为附加荷载。

将系统中各部分能量相加,即可获得系统总势能  $E$ :

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (8)$$

### 1.2 能量平衡方程求解

利用能量变分法,总势能对各项待定系数取极值:

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0 \quad (9)$$

即,

$$\frac{\partial E_1}{\partial a_i} + \frac{\partial E_2}{\partial a_i} + \frac{\partial E_3}{\partial a_i} = 0 \quad (10)$$

其中:

$$\frac{\partial E_1}{\partial a_i} = \int_{-L}^L (EI)_{\text{eq}} \frac{\partial(\partial^2 w / \partial x^2)}{\partial a_i} \frac{\partial^2 \{C\}}{\partial x^2} \{a\} dx \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial a_i} = D \int_{-L}^L k \frac{\partial w}{\partial a_i} \{C\} \{a\} dx + \quad (12)$$

$$D \int_{-L}^L G \frac{\partial(\partial w / \partial x)}{\partial a_i} \frac{\partial \{C\}}{\partial x} \{a\} dx$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial a_i} = -D \int_{-L}^L P \{C\} dx \quad (13)$$

将式(11)、(12)以及(13)带入式(10)中可得:

$$\begin{aligned} & \int_{-L}^L (EI)_{\text{eq}} \frac{\partial(\partial^2 w / \partial x^2)}{\partial a_i} \frac{\partial^2 \{C\}}{\partial x^2} \{a\} dx \\ & + D \int_{-L}^L k \frac{\partial w}{\partial a_i} \{C\} \{a\} dx \\ & + D \int_{-L}^L G \frac{\partial(\partial w / \partial x)}{\partial a_i} \frac{\partial \{C\}}{\partial x} \{a\} dx + \\ & - D \int_{-L}^L P \{C\} dx = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

将上式进一步写为矩阵方程的形式,如下:

$$[K] \{a\} = \{P\} \quad (15)$$

式中,  $[K]$  为总刚度矩阵 ( $[K] = [K_1] + [K_2]$ );  $\{a\}$  为待定系数向量;  $\{P\}$  为附加荷载向量。其中分刚度矩阵  $[K_i]$  的表达形式分别为:

$$[K_1] = \frac{(EI)_{\text{eq}} \pi^4}{L^3} \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 2^4 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & n^4 & \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[K_2] = kDL \begin{bmatrix} 2 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} + \frac{GD\pi^2}{L} \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 2^2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & n^2 & \end{bmatrix} \quad (17)$$

将式(16)和(17)带入式(15)中便可求解得到待定系数向量  $\{a\}$  的表达式,随后将其带入式(2)即可得到关于管线变形量  $w$  的表达式,其中刚度矩阵

阶数取值可参考文献[12-13]。

### 1.3 相关参数取值

参数的取值关乎着最终计算结果的精准与否。在以上研究中,有部分未知参数需要被确定,包括地基反力系数、剪切层系数以及隧道开挖产生的附加荷载。

#### (1) 地基反力系数

在文献[15]中,A.B.Vesic指出梁所受压力与其变形之比是恒定的,该恒定比(弹性地基梁理论中定义为地基反力系数)可以通过下式计算:

$$k_{\text{Vesic}} = \frac{0.65E_s}{B(1-\nu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{EI}} \quad (18)$$

式中,  $E, I$  分别为梁的弹性模量和惯性矩(在本文中即为  $(EI)_{\text{eq}}$ );  $B$  为梁截面的宽度(在本文中即为  $D$ );  $\nu$  为土体泊松比;  $E_s$  为土体弹性模量。

由于上式是基于梁置于地表时计算得到的,但当梁被埋置于地下土层时,其计算精度不够,所以 P.B. Attewell<sup>[16]</sup>对其进行了修正:

$$k = 2k_{\text{Vesic}} \quad (19)$$

虽然 P.B. Attewell 等<sup>[16]</sup>已经考虑了梁的埋深,但梁体被搁置在无限深度,此时会高估土体的刚度作用<sup>[17]</sup>。为了考虑埋深因素的影响, J.Yu 等<sup>[18]</sup>对管线埋置于任意深度和受到任意自由土体位移的影响进行研究,提出了可以考虑埋深因素的影响系数  $\eta$ :

$$\eta = \begin{cases} 2.18 & z/D \leq 0.5 \\ 1 + \frac{1}{1.7z/D} & z/D > 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $z$  为梁的轴线埋置深度。

本文结合式(19)和(20)得到所采用的地基反力系数的计算公式如下:

$$k = \frac{1.3E_s}{\eta D(1-\nu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{(EI)_{\text{eq}}}} \quad (21)$$

#### (2) 剪切层系数

为考虑变形的连续性, Pasternak 增加了剪切层在 Winler 模型中的弹簧层上,使得计算结果更加精准。 H.Tanahashi<sup>[19]</sup>研究了 Pasternak 地基上无限长 Euler-Bernoulli 梁的位移和应力问题,并给出了剪切层刚度系数  $G$  的计算公式:

$$G = \frac{E_s t}{6(1+\nu)} \quad (22)$$

式中,  $t$  为弹性层的厚度。

确定隧道下方地基的计算厚度是一个重要的环节,这影响着使用Pasternak地基模型中的剪切层系数的取值,从而影响着最终计算结果的准确性。因此徐凌<sup>[20]</sup>建议在计算时,考虑管线下方6D范围内土体的影响,即:

$$t = 6D \quad (23)$$

此时将式(23)代入式(22)中,可得到Pasternak地基中剪切层系数的计算公式。

### (3)附加荷载

在文献[21]中,N.Loganathan和H.Poulos在前人的基础上给出了地表下某一位置处沉降 $u_z$ 的计算公式:

$$u_z = R^2 \left\{ -\frac{z-H}{x^2+(z-H)^2} - \frac{2z[x^2-(z+H)^2]}{[x^2+(z+H)^2]^2} + (3-4\nu) \cdot \frac{z+H}{x^2+(z+H)^2} \right\} \cdot \epsilon_0 \exp \left\{ -\left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (24)$$

式中, $R$ 为新建隧道的开挖半径; $H$ 为新建隧道的轴线埋深; $\epsilon_0$ 为地层损失率。

新建隧道通常并非垂直穿越既有管线,而是以一定的角度穿越,此时倘若仍然采用上式对地层位移进行计算,会导致脱离实际情况,产生较大的误差。为了将上式拓展至新旧结构之间存在夹角的情况,梁荣柱等<sup>[22]</sup>在上式中引入了坐标变换,计算如下:

$$u_z = R^2 \left\{ -\frac{z-H}{(x \sin \alpha)^2+(z-H)^2} + (3-4\nu) \cdot \frac{z+H}{(x \sin \alpha)^2+(z+H)^2} - \frac{2z[(x \sin \alpha)^2-(z+H)^2]}{[(x \sin \alpha)^2+(z+H)^2]^2} \right\} \cdot \epsilon_0 \exp \left\{ -\left[ \frac{1.38(x \sin \alpha)^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (25)$$

式中, $\alpha$ 为新旧结构之间的夹角。

在Pasternak地基中,隧道盾构开挖所引起作用在既有结构上的附加荷载 $P$ 可通过下式计算得到<sup>[23-24]</sup>:

$$P = ku_z - G \frac{d^2 u_z}{dx^2} \quad (26)$$

## 2 算例验证

### 2.1 数值模拟

有限元软件常被用于隧道开挖对既有结构影响等岩土-结构问题的研究中<sup>[25-27]</sup>。本文利用有限元软件PLAXIS 3D建立了隧道垂直下穿既有管线的三维模型。新建隧道修建长度为75 m,盾构机每次推进3 m;既有管线长度为60 m,单元模型采用板单元。新建隧道和既有管线的相关取值见表1。土体本构模型为摩尔-库伦模型,具体土层的相关信息见表2。为消除边界效应的影响<sup>[28]</sup>,模型尺寸建立为60 m( $X$ ) $\times$ 75 m( $Y$ ) $\times$ 40 m( $Z$ )。对模型进行网格划分后(图4),得到123 358个单元以及192 418个节点。

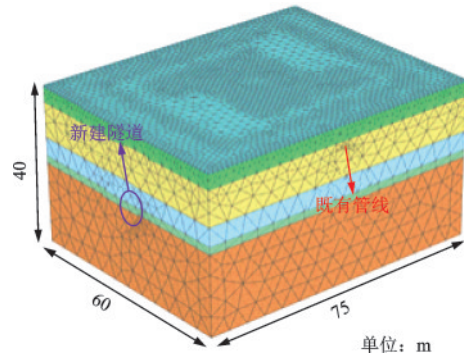


图4 模型网格划分

Fig.4 Meshing of the model

表1 隧道和管线相关参数

Table 1 The related parameters of tunnel and pipeline				
参数	轴线埋深/ m	外径/m	壁厚/m	弹性模量/ kPa
新建隧道	19.6	6.0	0.30	$34.5 \times 10^6$
既有管线	7.6	1.2	0.01	$2.1 \times 10^8$

图5展示了有限元模拟结果与理论方法计算结果的对比情况。其中理论计算所取土体数据为粗砂和砾砂参数的加权平均值。从图5中可以看出计算结果与模拟结果吻合较好,但是在个别点位上,两者有一定的偏差。这是由于有限元软件会考虑施工进度和施工工艺等因素,这些特点会造成理论解与模拟结果之间存在一定的偏差。但整体上,计算变形曲线与模拟结果曲线走势一致,验证了本文所提方法的合理性。

表2 土体相关信息

Table 2 The related information of soil

土层	厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
杂填土	0.55	18.23	8×10 <sup>3</sup>	0.28	12	6
粉质黏土	3.70	19.49	10×10 <sup>3</sup>	0.30	22	15
粗砂	8.90	19.43	25×10 <sup>3</sup>	0.25	1	30
砾砂	5.80	19.35	28×10 <sup>3</sup>	0.27	1	36
强风化粉砂质泥岩	1.90	22.10	130×10 <sup>3</sup>	0.30	42	28
中风化粉砂泥质岩	19.15	24.10	800×10 <sup>3</sup>	0.32	850	38

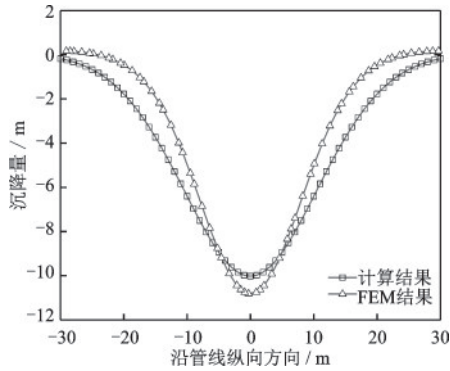


图5 管线的计算结果与模拟结果比较

Fig.5 Comparison between calculation and simulation results of pipeline

## 2.2 工程实例

深圳地铁一期工程某隧道区间采用盾构法修建,地铁分左右两条线路,两线中心线间距为15.0 m<sup>[29]</sup>。新建地铁隧道在掘进施工期间,会垂直

下穿一电缆隧道(大直径管线),两者竖向净距为1.2 m(图6)<sup>[29]</sup>。为监测既有结构的变形影响,在电缆隧道中布置了两排测点,分别记为E和W<sup>[29]</sup>。参考文献[30]中管线抗弯刚度的取值,新建隧道和既有管线的计算参数以及土体信息列在表3中。详细隧道施工参数以及测点布置情况可见文献[29]。

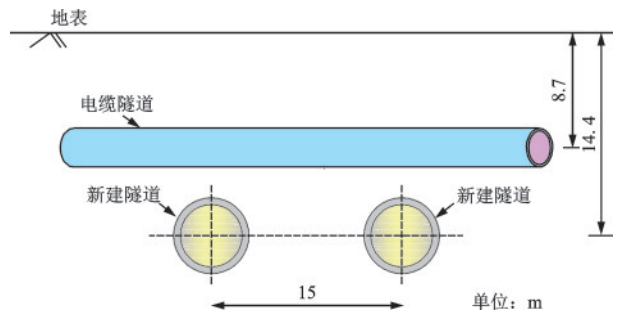


图6 隧道和管线的位置示意

Fig.6 Sectional view of relative position of tunnels and existing pipeline

表3 案例相关取值

Table 3 Relevant values in the case

参数	轴线埋深/m	外径/m	抗弯刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	参数	弹性模量/kPa	泊松比	地层损失率/%
新建隧道	14.4	6.0	—	土体	8.2×10 <sup>3</sup>	0.3	0.84
既有管线	8.7	3.0	5.87×10 <sup>7</sup>	—	—	—	—

图7展示采用不同方法计算得到的既有管线变形结果以及工程监测数据的对比。可以看出本文方法的计算结果相比于文献[29]方法的结果更加接近实测值。如果利用管线最大变形定义:偏差=(|理论计算值-工程监测值|)/工程监测值,此时本文方法计算的管线位移偏差分别约为3.1%(E)和3.8%(W),而文献[29]方法的偏差分别约为5.9%(E)和13.6%(W)。由此,可明显看出本文方法在计算精度上的优越性,从而再次验证了该方法的合理性。

## 3 参数分析

本节以深圳地铁一期工程为基本工况,对既有管线抗弯刚度、穿越角度以及地层损失率进行参数分析。在对某一参数作用的影响进行分析时,其余参数保持不变。

### 3.1 管线抗弯刚度

在基本工况下,将管线原始抗弯刚度作为初始

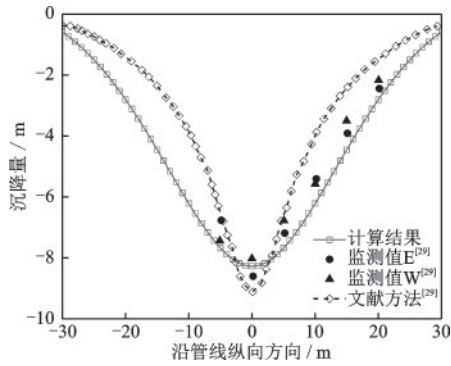


图7 管线的计算结果与实测数据比较

Fig.7 Comparison between calculation results and measured data of pipeline

值 $(EI)_{eq}$ ,并分别取 $0.5(EI)_{eq}$ 、 $0.75(EI)_{eq}$ 、 $1.25(EI)_{eq}$ 以及 $1.5(EI)_{eq}$ 这几种不同情况来分析其对既有管线变形的影响。

图8展示了不同抗弯刚度下既有管线的变形情况。在这里,将横坐标和纵坐标做归一化处理,令沿管线轴线方向的距离与管线的外径之比作为横坐标 $(x/D)$ ,令不同抗弯刚度下的变形值与初始抗弯刚度 $(EI)_{eq}$ 下最大变形值之比作为纵坐标 $(|w|/w_{max})$ 。可以明显看出,随着抗弯刚度的增大,管线的沉降量随之减小。这是因为既有管线的抗弯刚度越大,其抵抗变形的能力越强,因而结构在同等荷载作用下,发生的变形就越小。

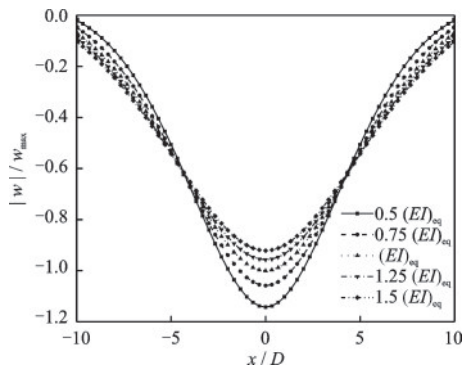


图8 不同土体弹性模量下既有管线变形

Fig.8 Deformation of existing pipeline under different soil elastic moduli

### 3.2 穿越角度

在基本工况下,将分别取 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 以及 $90^\circ$ 这几种不同穿越角度来分析其对既有管线变形的影响。

图9展示了不同穿越角度下既有管线的变形情况

况。可以看出,随着角度的增加,管线的变形逐渐减小。这是因为穿越角度越小,新旧结构在空间上重叠部分越多,既有管线受影响范围越大。其次,虽然角度以 $15^\circ$ 等间距变化,但是位移变化值并非等间距,而是随着角度的增加,减小幅度随之减缓。

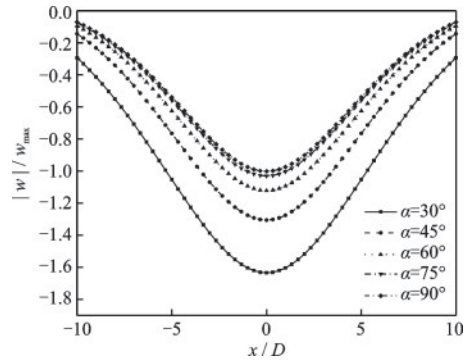


图9 不同穿越角度下既有管线变形

Fig.9 Deformation of existing pipeline at different crossing angles

### 3.3 土体损失率

在基本工况下,将原始地层损失率作为初始值 $\epsilon_0$ ,并分别取 $0.5\epsilon_0$ 、 $0.75\epsilon_0$ 、 $1.25\epsilon_0$ 以及 $1.5\epsilon_0$ 这几种不同情况来分析其对既有管线变形的影响。

图10展示了不同地层损失率下既有管线的变形情况。可以看出,随着地层损失率的增加,管线的变形逐渐增大。地层损失率联系着附加荷载,其数值增加使得作用在既有管线上的荷载也随之增大,进而导致结构受到更大的影响,产生更大的变形。并且,对比参数分析3.1中管线抗弯刚度与本部分中土体损失率对既有结构的变形影响,不难发现,增大抗弯刚度或减小土体损失率皆可控制结构

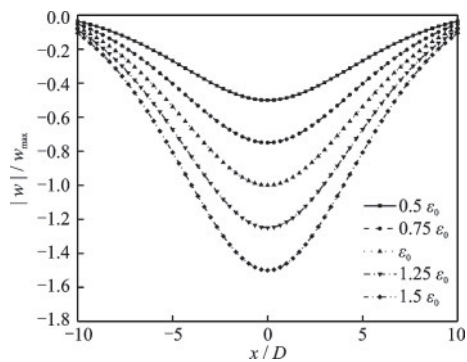


图10 不同地层损失率下既有管线变形

Fig.10 Deformation of existing pipeline under different ground loss values

变形,但同等条件下(增大或减小相同比例),土体损失率产生更大的影响。在新建盾构隧道施工期间,应及时采取相应的措施来控制地层损失率,减小隧道开挖对既有管线带来的变形影响。

## 4 结 论

(1)从能量角度出发,结合 Rayleigh-Ritz法和最小势能原理,推导出隧道穿越施工引起既有管线沉降的理论计算公式。该方法可快速评估既有隧道受到新建隧道的开挖影响。

(2)利用有限元软件 PLAXIS 3D 建立三维模型,将模拟结果与本文方法计算结果进行比较,发现计算变形曲线与模拟结果曲线走势基本一致;利用深圳地铁隧道下穿既有管线的监测数据与不同方法的计算结果进行比较,发现本文方法明显优于他人文献方法。两个案例均验证本文所提方法的合理性。

(3)参数分析结果表明,既有管线的抗弯刚度的增加可减小结构变形;随新旧结构之间穿越角度的增加,既有管线的变形随之减小;地层损失率的减小可有效控制既有管线沉降。

本文的理论研究方法未将土体非线性等特征考虑其中,这可成为下一步的研究方向。

### 参考文献:

[1] 程霖,杨成永,马文辉,等.地铁隧道开挖引起的管线变形计算与试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(4):7-13.  
Cheng L, Yang C Y, Ma W H, et al. Deformation calculation and experimental study on buried pipes induced by subway tunnel excavation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 7-13. (in Chinese)

[2] Zhu J L, Zhu D Y. Deformation of pipelines induced by the construction of underlying twin-tunnel [J]. Tehnick-ivjesnik-Technical Gazette, 2020, 27(4): 1311-1315.

[3] 柳程柱,苏永华.盾构施工引起的管线变形规律及安全风险评估[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2882-2891.  
Liu C Z, Su Y H. Pipeline deformation laws and safety risk assessments caused by shield construction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2882-2891. (in Chinese)

[4] Winkler E. Die lehre von der elasticitaet und festigkeit [M]. Prague: Dominicus, 1867.

[5] 张治国,师敏之,张成平,等.类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):852-864.  
Zhang Z G, Shi M Z, Zhang C P, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by excavation of quasi-rectangular shields [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 852-864. (in Chinese)

[6] 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)

[7] Pasternak P L. Fundamentals of a new method of analyzing structures on an elastic foundation by means of two foundation constants [M]. Moscow: Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Literatury po Stroitel'stvu i Arkhitekture, 1954.

[8] Zhao S W, Li X L, Li X, et al. Analysis of pipeline deformation caused by shield tunnel excavation that obliquely crosses existing pipelines [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(3): 1-14.

[9] 林存刚,黄茂松.基于 Pasternak 地基的盾构隧道开挖非连续地下管线的挠曲[J].岩土工程学报,2019,41(7):1200-1207.  
Lin C G, Huang M S. Deflections of discontinuous buried pipelines induced by shield tunnelling based on Pasternak foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1200-1207. (in Chinese)

[10] 黄明华,周钰霖.双参数地基中隧道下穿既有管线的显式解析解分析[J].安全与环境学报,2023,23(6):1852-1858.  
Huang M H, Zhou Z L. Explicit solution analysis of tunnel excavation under existing pipelines on double-parameter foundation [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 1852-1858. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 刘晓强,梁发云,张浩,等.隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J].岩土力学,2014,35(增2):217-222,231.  
Liu X Q, Liang F Y, Zhang H, et al. Energy variational

- solution for settlement of buried pipeline induced by tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup2): 217-222, 231. (in Chinese)
- [13] 魏纲, 俞国骅, 杨波. 新建盾构隧道下穿既有隧道剪切错台变形计算[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(9): 103-112.  
Wei G, Yu G H, Yang B. Calculation of existing shield tunnel shearing dislocation platform deformation due to undercrossing new shield tunnel undercrossing[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(9): 103-112. (in Chinese)
- [14] Washizu K. *Variational methods in elasticity and plasticity*[M]. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1975.
- [15] Vesic A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1961, 87(2): 35-53.
- [16] Attewell P B, Yeates J A, Selby A R. *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*[M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [17] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 考虑埋深与剪切效应的基坑卸荷下卧隧道的形变响应[J]. *岩土力学*, 2020, 41(增1): 195-207.  
Xu R Q, Cheng K, Ying H W, et al. Deformation response of a tunnel under foundation pit unloading considering buried depth and shearing effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Sup1): 195-207. (in Chinese)
- [18] 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(5): 17-28.
- [19] Tanahashi H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(5): 109-118.
- [20] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.  
Xu L. Research of the longitudinal settlement of soft soil shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- [21] Loganathan N, Poulos H. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9): 846-856.
- [22] 梁荣柱, 宗梦繁, 康成, 等. 考虑隧道剪切效应的隧道下穿对既有盾构隧道的纵向影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(3): 420-430, 472.  
Liang R Z, Zong M F, Kang C, et al. Longitudinal impacts of existing shield tunnel due to down-crossing tunnelling considering shield tunnel shearing effect [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(3): 420-430, 472. (in Chinese)
- [23] Zhang Z G, Huang M G, Xu C, et al. Simplified solution for tunnel-soil-pile interaction in Pasternak's foundation model[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78(8): 146-158.
- [24] 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 undercrossing twin tunnels [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 29(9): 100558.
- [25] Lin X T, Chen R P, Wu H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 89: 78-90.
- [26] Yin M L, Jiang H, Jiang Y S, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 245-258.
- [27] Avgerinos V, Potts D M, Standing J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels [J]. *Geotechnique*, 2017, [s.n.]: 1-15.
- [28] Liang R Z. Simplified analytical method for evaluating the effects of overcrossing tunnelling on existing shield tunnels using the nonlinear Pasternak foundation model [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59: 1711-1727.
- [29] 马涛. 隧道施工引起的地层位移及其对邻近地下管线的影响分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.  
Ma T. The research of tunneling-induced ground Surface movements and their influence to adjacent utilities [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2005. (in Chinese)
- [30] 张桓, 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.  
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)

(本文编辑: 张艺)