



考虑管-土分离的基坑开挖引起 邻近地下管线位移分析

何小龙¹, 杨天鸿¹, 周云伟¹, 梁禄钜², 徐长节^{2,3}

(1. 杭州市钱江新城建设开发有限公司, 杭州 310058; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;
3. 华东交通大学 土木建筑学院; 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013)

摘要:在城市建设中,深基坑开挖会对邻近既有地下管线产生较大威胁。目前,基于有限元数值模拟和传统弹性地基梁模型分析方法无法考虑由于管线与土体之间刚度和变形的差异性而造成的管-土相互分离现象,使得对于基坑开挖引起管线变形的预测偏于不安全。基于 Pasternak 弹性地基梁理论,引入管-土相互分离计算模型,推导了基坑开挖引起的邻近管线变形计算解析解。参数分析结果表明,管线最大位移随管-土分离段长度的增大而增大,且当管线抗弯刚度较小时,土体剪切作用对管线变形影响较大。通过理论计算结果和有限元数值模拟结果及现场实测数据的对比,验证了分析模型的适用性。

关键词:管-土分离;地基模型;位移;刚度;内力

中图分类号:TU432 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0009-08

Analysis of pipeline displacement induced by adjoining foundation pit excavation considering pipeline-soil separation

He Xiaolong¹, Yang Tianhong¹, Zhou Yunwei¹, Liang Lujie², Xu Changjie^{2,3}

(1. Hangzhou CBD Construction Development Co., Ltd, Hangzhou 310058, P. R. China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;
3. School of Civil Engineering and Architecture; Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: The foundation pit excavation in urban city construction will form a serious threat to the nearby existing pipeline. Present analytical methods based on FEM numerical simulation and classical elastic foundation beams theories can hardly consider the pipeline-soil separation phenomenon results from the differences of stiffness and deformation between pipeline and soil mass, which will lead to an unsafety

收稿日期:2019-00-00

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB057801); 国家杰出青年科学基金(51725802); 国家自然科学基金(51878276)

作者简介:何小龙(1964-),男,高级工程师,主要从事工程建设管理研究,E-mail:qjxc2009@126.com。
徐长节(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xucj@zju.edu.cn。

Received:2019-00-00

Foundation item: National Program on Key Basic Research Project of China (No. 2015CB057801); National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276)

Author brief: He Xiaolong (1964-), senior engineer, main research interest: project construction management, E-mail: qjxc2009@126.com.
Xu Changjie (1972-)(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

prediction of pipeline displacement induced by foundation pit excavation. Based on Pasternak model of elastic foundation beams, an analytical solution of pipeline deformation induced by adjoining foundation pit excavation considering pipeline-soil separation is proposed. Parameter analysis indicates that the maximum displacement of pipeline increases with increase of the length of pipeline-soil separation portion. Moreover, vertical shear stiffness of the soil mass has a significant influence on pipeline deformation when the flexural rigidity of pipeline is small. The analytical model is validated by comparison among analytical calculation results.

Keywords: pipeline-soil separation; foundation model; displacement; stiffness; internal force

近年来,随着中国城市立体化建设逐渐由地面及上部建设向地下延伸,城市地下工程规模越来越大,基坑越来越深。各大城市市政工程尤其是地铁工程的大量上马,使得繁华城区开挖深基坑变得越来越普遍,这将不可避免地出现地下工程深基坑邻近既有地下管线开挖的情况。

深基坑的开挖往往会改变土体的初始应力状态,使土体产生变形,进而造成基坑边邻近管线的破坏。对于此类邻近地下工程施工对既有管线影响的工程问题,已有不少学者开展了相应研究。Tan等^[1]对两例邻近地下既有管线深基坑开挖工程进行了详细的案例分析,并通过大量现场实测数据,提出了邻近深基坑开挖情况下既有地下管线变形计算的公式;Zhang等^[2]通过有限元数值模拟方法,对深基坑开挖对邻近管线的内力与变形特性进行了研究;Wham等^[3]针对下卧盾构隧道施工对上覆既有铸铁管线接头的影响,开展了数值模拟研究;通过离心模型试验方法,Oliveira等^[4]和Shi等^[5]分别研究了土体侧向移动及下方盾构施工对既有地下管线三维变形特性的影响。韩焯等^[6]基于大量地下管线实测变形数据,提出了连续管线变形和内力预测的刚度修正法。这一系列研究结果进一步说明了地下工程施工对邻近管线的危害,但所得到的多为经验性结论,缺乏对附加荷载作用下地下管线内力与变形方面的定量评估。

弹性地基梁模型分析方法是研究此类地下管线变形问题的主要理论方法之一。基于Winkle弹性地基梁模型,李大勇等^[7]和Zhang等^[8]分别得到了邻近基坑开挖和下卧盾构施工情况下地下既有管线变形和内力的解析解;Zhang等^[9]采用有限差分法与弹性地基梁模型分析方法相结合的方法,对下卧隧道开挖情况下上覆既有管线的变形进行计算;李海丽等^[10]在Winkle弹性地基梁模型基础上考虑土体弹性模量的衰减,对隧道开挖条件下的管线响应

进行分析;Klar等^[11-14]运用弹性地基梁模型及复变函数展开的方法,研究了隧道开挖引起地层损失与管线变形之间的关系,并进行了有限元模拟的验证。然而,上述研究中存在两个问题:一是传统Winkle地基模型无法考虑土体之间的剪切效应,而对于地下管线的变形计算,由于管线刚度相对较小,此时忽略土体之间的剪切效应将造成较大的计算误差^[15];另一方面,目前的理论分析往往基于管-土之间无相互分离的假定,然而,在实际工程中,由于管线与土体之间刚度和变形的差异性,管-土相互分离的现象较为普遍^[16],而传统的弹性地基梁理论将无法对管-土分离部分管线的变形和内力进行计算。

为考虑地基土体之间的剪切作用,已有不少学者采用Pasternak弹性地基梁模型^[17]对盾构施工引起桩基变形^[18]、深基坑开挖引起既有隧道变形^[19]等方面进行研究。本文将在上述研究基础上,考虑管-土相互分离的影响,通过Pasternak弹性地基梁理论建立基坑开挖对邻近既有地下管线影响的计算模型,并进行相应的参数分析及与现有文献数值模拟结果的对比较证。

1 计算模型与基本假定

如图1所示,基坑围护结构长度为 L ,既有地下管线与基坑围护结构平行,直径为 D ,其与围护结构的间距为 s 。在最不利工况下,管-土分离发生在围护结构中部,分离部分长度为 l 。由于基坑开挖卸载的影响,管线将同时发生竖向位移和水平位移。考虑到基坑开挖引起土体变形的特点,Zhang等^[2]和李大勇等^[7]均假设荷载为抛物线形分布,对邻近基坑开挖管线变形进行计算,Wang等^[16]也假定在存在局部管-土分离情况下,作用在地下管线上的荷载为抛物线形分布。为方便计算,本文亦沿用这一假定,即在基坑开挖范围内,作用在地下管线上的拖拽力沿管线轴向呈抛物线形分布。另一方面,考虑到

埋管刚度相对土体较大,在基坑开挖卸荷条件下,其变形相对较小,为便于分析,参考已有的研究方法(Tan 等^[1]、Zhang 等^[2]),假定在基坑开挖卸荷影响下,管线及其周边土体处于弹性状态。

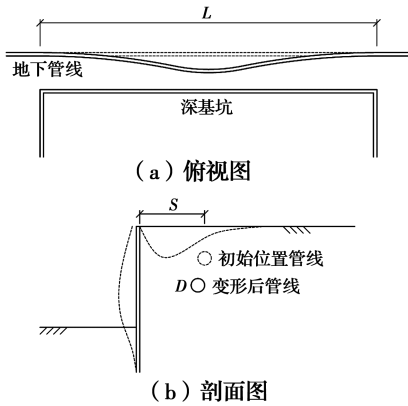


图1 邻近深基坑开挖地下管线

Fig. 1 Buried pipeline adjacent to a foundation pit

为对存在局部管-土分离情况下的管线变形和内力进行分析和计算,还进行如下假定:

- 1) 地下管线为一无限长的 Euler-Bernoulli 梁;
- 2) 地基土为由剪切层和弹簧组成的 Pasternak 弹性地基^[17],地基土间的剪应力由剪切层承担;
- 3) 除管-土分离段外,其他部分管线与地基土体紧密结合,且无相对滑移。

考虑管-土分离情况下的 Pasternak 弹性地基梁模型如图 2 所示。

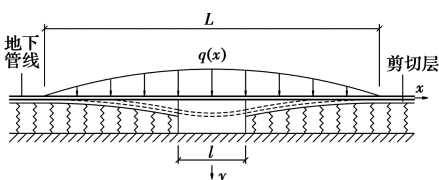


图2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

2 解析公式推导

2.1 管-土分离部分

管-土分离段管线的受力分析如图 3 所示。取管线中点为坐标原点建立坐标系,则由土体位移产生的抛物线形分布荷载 $q(x)$ 可表示为

$$q(x) = -\frac{4q_m}{L^2}x^2 + q_m = \lambda x^2 + q_m \quad (1)$$

式中: q_m 为基坑开挖前后现场实测管线中点处最大附加荷载。考虑到管-土分离段管线受力的对称性,取左半部分管线($x \leq 0$)进行分析,建立新的坐标系

(x_1, y_1)。

$$\begin{cases} x_1 = x + \frac{l}{2} \\ y_1 = y \end{cases} \quad (2)$$

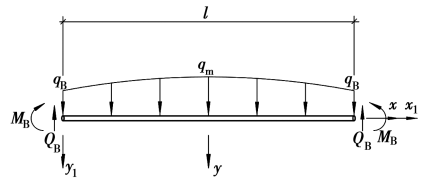


图3 管-土分离部分管线受力分析

Fig. 3 Mechanical analysis of a pipeline in the separation section

在新的坐标系下,根据 Euler-Bernoulli 梁理论,地基梁上任一点的弯矩可表示为

$$EI \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -M(x_1) = -\left(M_B + Q_B x_1 - \int_0^{x_1} q(x_1) x_1 dx_1 \right) \quad (3)$$

式中: M_B 和 Q_B 分别为管线端点上的弯矩与剪力。

将式(1)和式(2)代入式(3)并积分,可得

$$y_1 = \frac{1}{EI} \left[\frac{\lambda x_1^6}{120} - \frac{\lambda x_1^5}{60} + \left(\frac{\lambda l^2}{4} + q_m \right) \frac{x_1^4}{24} - \frac{Q_B x_1^3}{6} - \frac{M_B x_1^2}{2} + C_1 x_1 + C_2 \right] \quad (4)$$

式中: C_1 和 C_2 为未知积分常数。该段地基梁的边界条件为

$$\begin{cases} x_1 = 0, y_1 = y_B \\ x_1 = l/2, y_1' = 0 \\ x_1 = l/2, -EI y_1''' = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: y_B 为端点处地基梁的位移。将边界条件式(5)代入式(4),解得

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{3\lambda l^5}{1920} + \frac{q_m l^3}{24} + \frac{M_B l}{2} \\ C_2 = EI y_B \\ Q_B = \frac{q_m l}{2} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 管-土未分离部分

根据管线的对称性,取图 1 中管-土分离部分右侧管线进行受力分析,如图 4 所示。

为方便分析,建立新的坐标系(x_2, y_2)。

$$\begin{cases} x_2 = x - \frac{l}{2} \\ y_2 = y \end{cases} \quad (7)$$

根据 Pasternak 弹性地基梁理论,在外荷载 $q(x_2)$ 作用下,管线需满足控制方程

$$EI y_2^{(4)} - GD y_2^{(2)} + kD y_2 = q(x_2) \quad (8)$$

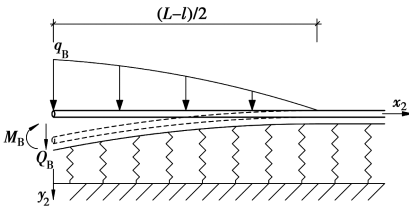


图4 管-土未分离部分管线受力分析

Fig. 4 Mechanical analysis of a pipeline in the nonseparation section

式中: $y_2^{(4)} = \frac{d^4 y_2}{dx_2^4}$; $y_2^{(2)} = \frac{d^2 y_2}{dx_2^2}$; G 为剪切层竖向剪切刚度 (PL^{-1}); k 为地基竖向基床系数 (PL^{-3}); E 为地下管线弹性模量 (PL^{-2}); I 为地下管线横截面惯性矩 (L^4)。

地基竖向基床系数 k 可通过工程地质勘察报告获得。当无相关参考资料时,地基竖向基床系数 k 和剪切层竖向剪切刚度 G 可由式(9)进行计算^[15,18]。

$$\begin{cases} k = \frac{0.65}{D} \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{1/12} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \\ G = \frac{E_s t}{6(1 + \nu_s)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: E_s 和 ν_s 分别为地基土体的弹性模量和泊松比。 t 为土体剪切层厚度,其大小与土体参数有关。根据文献[19]建议,取 $t = 2.5D$ 进行计算。令

$$\begin{cases} \beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \\ \gamma = \sqrt{\frac{k}{G}} \\ \rho = (\beta/\gamma)^2 = \frac{G}{2\sqrt{kEI/D}} \end{cases} \quad (10)$$

则常微分方程(8)所对应的齐次方程可写为

$$y_2^{(4)} - 4\beta^2 \rho y_2^{(2)} + 4\beta^4 y_2 = 0 \quad (11)$$

对于目前工程中常用的PVC管线、铸铁管线和混凝土管线, ρ 的计算结果一般均小于1。此时,该四阶齐次常微分方程的通解为

$$y_2 = (A_1 e^{-\varphi_1 x_2} + A_2 e^{\varphi_1 x_2}) \cos \varphi_2 x_2 + (A_3 e^{-\varphi_1 x_2} + A_4 e^{\varphi_1 x_2}) \sin \varphi_2 x_2 \quad (12)$$

式中:

$$\varphi_1 = \beta \sqrt{1 + \rho}, \varphi_2 = \beta \sqrt{1 - \rho} \quad (13)$$

A_1, A_2, A_3, A_4 为4个积分常数,由于无穷远处管线位移为0,故必有 $A_2 = A_4 = 0$ 。其他两个积分常数可通过边界条件求解。根据图4中的受力分析,作用在该段地基梁上的外力包括:梁端剪力 Q_B 、

梁端弯矩 M_B 以及非均布荷载 $q(x_2)$ 。故可分3种情况分别进行求解,最后,将所得结果叠加,从而得到该段地基梁位移的最终解。

第1种情况,即梁端作用集中力 Q_B 。由于该集中力是由管-土分离段管线端部剪力产生,故其全部由地基梁承担,这种情况下地基梁的边界条件为

$$\begin{cases} x_2 = 0 : M(x_2) = -EI \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = 0 \\ x_2 = 0 : Q(x_2) = -EI \frac{d^3 y_2}{dx_2^3} = -Q_B \end{cases} \quad (14)$$

将式(12)代入式(14),解得

$$y_2^A = \frac{Q_B}{2EI\beta^4} e^{-\varphi_1 x_2} \left(\varphi_1 \cos \varphi_2 x_2 + \frac{\rho \beta^2 \sin \varphi_2 x_2}{\varphi_2} \right) \quad (15)$$

第2种情况,即梁端作用集中弯矩 M_B ,这种情况下地基梁的边界条件为

$$\begin{cases} x_2 = 0 : M(x_2) = -EI \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = M_B \\ x_2 = 0 : Q(x_2) = -EI \frac{d^3 y_2}{dx_2^3} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

将式(12)代入式(16),解得

$$y_2^B = -\frac{M_B}{2EI\beta^2} e^{-\varphi_1 x_2} \left[(1 + 2\rho) \cos \varphi_2 x_2 - \sqrt{\frac{1+\rho}{1-\rho}} (1 - 2\rho) \sin \varphi_2 x_2 \right] \quad (17)$$

第3种情况,由于抛物线形外荷载 $q(x_2)$ 的分布函数为小于三阶的多项式,故方程式(8)的解可写为其齐次方程式(11)的通解式(12)加上一个特解 \tilde{y}_2^C 的形式。

$$y_2^C = e^{-\varphi_1 x_2} (A_1^C \cos \varphi_2 x_2 + A_3^C \sin \varphi_2 x_2) + \tilde{y}_2^C \quad (18)$$

当 $x_2 \in [0, (L-l)/2]$ 时,因为 $q(x_2)$ 为二阶多项式,故假设

$$\tilde{y}_2^C = ax_2^2 + bx_2 + c \quad (19)$$

将式(19)代入式(8),解得

$$\begin{cases} a = \frac{\lambda}{kD} \\ b = \frac{\lambda l}{kD} \\ c = \frac{\lambda l^2}{4kD} + \frac{q_m}{kD} + \frac{2G\lambda}{k^2 D} \end{cases} \quad (20)$$

故特解 \tilde{y}_2^C 的表达式为

$$\tilde{y}_2^C = \frac{\lambda}{kD} x_2^2 + \frac{\lambda l}{kD} x_2 + \frac{\lambda l^2}{4kD} + \frac{q_m}{kD} + \frac{2G\lambda}{k^2 D} \quad (21)$$

当 $x_2 > (L-l)/2$ 时,因为 $q(x_2) = 0$,故特解

$$\bar{y}_2^C = 0。$$

管-土未分离部分地下管线位移的最终解可表示为上述 3 种情况解的叠加。

$$y_2 = y_2^A + y_2^B + y_2^C \quad (22)$$

根据管-土分离部分管线与管-土未分离部分管线的变形协调条件

$$\begin{cases} y_2 |_{x_2=0} = y_B \\ y_2^{(2)} |_{x_2=0} = y_1^{(2)} |_{x_1=0} \end{cases} \quad (23)$$

可解得

$$\begin{cases} A_1^C = y_B - \left(\frac{\lambda l^2}{4kD} + \frac{q_m}{kD} + \frac{2G\lambda}{k^2 D} \right) + \frac{M_B \beta^2 (1 + 2\rho) - Q_B \varphi_1}{2EI\beta^4} \\ A_3^C = \frac{A_1^C \beta^2 \rho + \frac{\lambda}{kD}}{\beta^2 \sqrt{1 - \rho^2}} \end{cases} \quad (24)$$

进一步根据变形协调条件

$$\begin{cases} y_1' |_{x_1=0} = -y_2' |_{x_2=0} \\ y_1^{(3)} |_{x_1=0} = -y_2^{(3)} |_{x_2=0} \end{cases} \quad (25)$$

解得

$$\begin{cases} M_B = \frac{960Q_B + 3\beta^2 \lambda^5 - 80q_m l^3 \beta^2}{960(2\varphi_1 + \beta^2 l)} - \frac{2\lambda EI}{kD} \\ y_B = \frac{\lambda l^2}{4kD} + \frac{q_m}{kD} + \frac{2G\lambda}{k^2 D} + \frac{Q_B \varphi_1}{2EI\beta^4} - \frac{M_B(1 + 2\rho)}{2EI\beta^2} - \frac{\lambda(2\rho + 1)}{\beta^2 kD} \end{cases} \quad (26)$$

至此,所有未知参数均已解得。考虑管-土分离情况下邻近深基坑既有管线的总位移可由式(4)和式(22)获得。进而根据 Euler-Bernoulli 梁理论,可求得该地下管线的转角、弯矩和剪力分别为

$$\begin{cases} \theta(x) = \frac{dy}{dx} \\ M(x) = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \\ Q(x) = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \end{cases} \quad (27)$$

3 结果验证

3.1 有限元结果对比

为验证文中所提出的考虑管-土分离的弹性地基计算模型的正确性,采用 ABAQUS 数值分析软件,建立二维有限元数值计算模型(如图 5 所示)进行计算。管线采用梁单元进行模拟,地基土体采用二维弹性平面应变单元进行模拟,模型边界为标准边界,即模型两侧约束其水平位移与转角,模型底部

约束其水平位移、竖向位移及转角。模型计算参数如表 1 所示。其中,土体模量 E_0 为通过土体压缩模量 E_s 换算而来的土体变形模量,即弹性模量。数值模拟结果如图 6 所示。可见,理论分析模型计算结果与有限元数值模拟结果吻合良好,从而验证了理论分析模型的合理性。

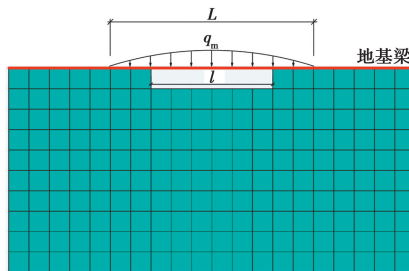


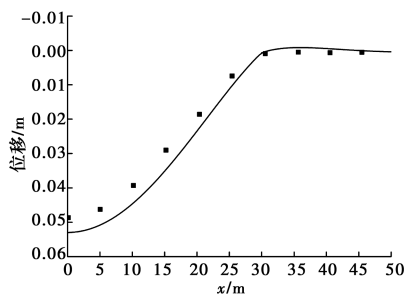
图 5 数值分析模型

Fig. 5 Analytical model of numerical simulation

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters of numerical simulation

受荷段长度 L/m	分离段长度 l/m	管线直径 d/m	截面惯性矩 I/m^4
100	60	1	0.008 1
土体泊松比 ν_s	土体模量 E_0/MPa	管线模量 E/GPa	最大荷载 $q_m/(N \cdot m^{-1})$
0.3	6.89	270	1 320



注:—解析解计算结果 ·有限元模拟结果
图 6 解析解计算结果与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between analytical and numerical simulation results

3.2 实测数据对比

为进一步验证理论模型在基坑开挖引起邻近管线响应分析方面的适用性,引用一组基坑工程实例进行分析。杭州市钱江新城沿江大道综合管廊基坑呈长条形状,长度为 216.0 m,深度为 16.0 m,宽度为 10.7 m,基坑围护结构采用地下连续墙加 4 道内支撑的支护形式,地下连续墙为 800 mm 的 C30 混凝土,第 1、3 道为钢筋混凝土支撑,第 2、4 道为钢支撑。基坑周边有需要保护的大直径污水管线,坑边

与污水管线水平距离相距 4.0 m,污水管线由 2 根型号 D2400 的预应力钢筒混凝土管组成,污水管管径为 2.4 m 埋深约 10 m 左右。典型的基坑围护剖面如图 7 所示。现场实测基坑围护结构中点位置管线的最大荷载 $q_m = 14.9 \text{ kN/m}$,其他计算参数如表 2 所示。

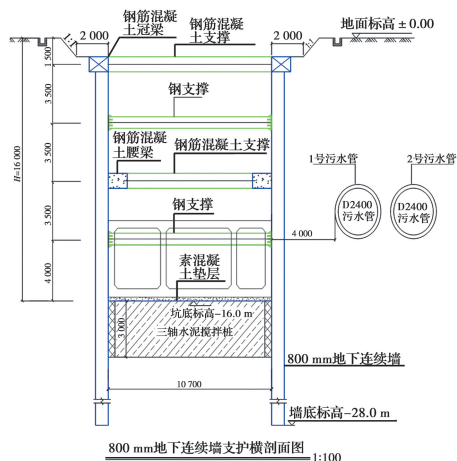


图 7 基坑围护结构剖面图

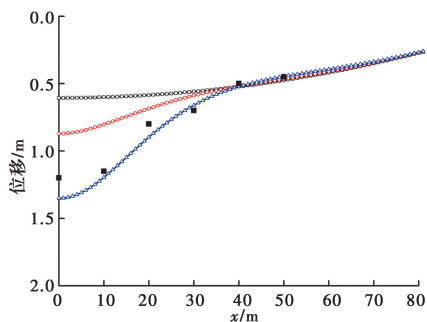
Fig. 7 Profile map of foundation pit enclosure structure

表 2 计算参数

Table 2 Calculation Parameters

土体基床系数 $k / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	土体模量 E_s / MPa	管线抗弯刚度 $EI / (\text{kN} \cdot \text{m}^2)$
1 026	5.4	1 460

图 8 为基坑开挖至底部后,污水管线位移现场实测值与理论解的对比图。可见,考虑管-土分离情况下的管线变形计算结果大于不考虑管-土分离情况下的计算结果,且管-土分离部分越长,管线最大位移越大。与现场实测结果相比,未考虑管-土分离情况下的解析解计算结果偏小,而考虑管-土分



注: — 解析解结果($l/2=0 \text{ m}$) — 解析解结果($l/2=5 \text{ m}$)
— 解析解结果($l/2=10 \text{ m}$) ■ 现场实测管线位移

图 8 解析解与现场实测结果对比

Fig. 8 Comparison between analytical results and measured dates

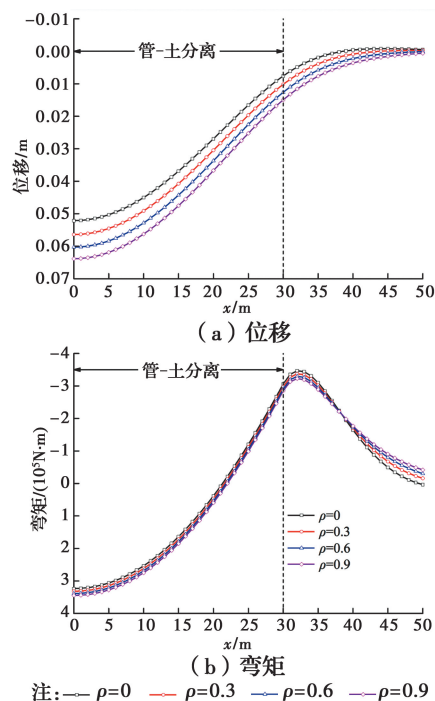
离情况下的解析解计算结果(管-土分离段长度 $l = 20 \text{ m}$)则与现场实测结果吻合较好,证明了理论分析模型在实际工程中的适用性。

4 参数分析

为进一步分析本文计算模型中各计算参数对邻近基坑开挖管线响应的影响,现以表 1 中的计算参数为基础,进行相应的参数敏感性分析。

4.1 土体及管线刚度影响

图 9 为无量纲参数 ρ 在不同情况下管线位移和弯矩的变化图。由式(10)可知,在其他参数相同的情况下,土体剪切刚度 G 越大,无量纲参数 ρ 也越大。当 $G=0$ 时, $\rho=0$,此时的 Pasternak 弹性地基退化传统的 Winkle 地基模型。可见,随着无量纲参数 ρ 逐渐增大,管线的位移和管线中部正弯矩将逐渐增大,而管-土分离边界处的负弯矩则逐渐减小。当无量纲参数 ρ 从 0 增大到 0.9 时,管线位移和弯矩的变化量分别达到 20% 和 10%,说明若不考虑土体间的剪切刚度,将导致地下管线的变形计算结果偏于不安全。另一方面,在式(10)中,若土体剪切刚度 G 不变,则管线的抗弯刚度 EI 越小,无量纲参数 ρ 越大。说明对于刚度较小的地下管线,在变形计算时应考虑土体剪切刚度的影响。



注: — $\rho=0$ — $\rho=0.3$ — $\rho=0.6$ — $\rho=0.9$

图 9 不同土体剪切刚度情况下管线响应

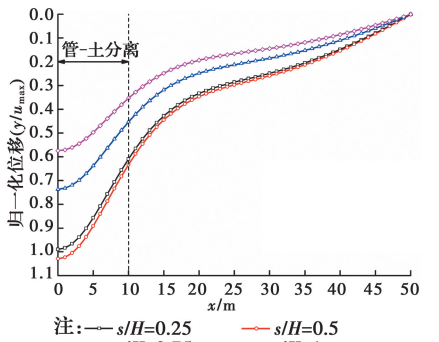
Fig. 9 Responses of pipeline under different shear stiffness

4.2 管线最大荷载影响

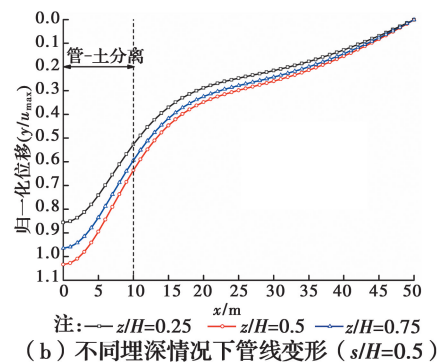
当 q_m 较难通过现场实测获得时,根据 Pasternak 弹性地基模型,可通过基坑开挖情况下管线位置处土体自由位移场进行计算得到。

$$p_m = -G \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)_{x=0} + kv_{x=0} \quad (28)$$

根据木林隆等^[20]提出的经验公式,管线开挖引起周边土体三维位移场可通过实测基坑围护墙最大水平位移 u_{max} 计算得到,具体计算方法见文献[20]。图 10 为不同管线中心点处理深 z 和管线-基坑围护结构间距 s 情况下,基坑开挖对既有管线的变形影响。计算过程中,取基坑开挖深度 $H=16$ m,基坑围护结构入土深度 $D=12$ m,管-土分离段长度 $l=10$ m,其他计算参数同表 1。



(a) 不同间距情况下管线变形 ($z/H=0.625$)



(b) 不同埋深情况下管线变形 ($s/H=0.5$)

图 10 基坑开挖对既有管线变形影响

Fig. 10 Influences of foundation pit excavation on existing pipeline

由图 10 可知,在其他因素相同的情况下,管线及基坑间距对管线变形的影响大于管线埋深对管线变形的影响。而由于基坑开挖周边土体三维位移场的影响,邻近基坑既有管线的变形随着其埋深和与基坑围护结构间距的增加,均呈先增大后减小的趋势。在 $z/H=0.5$ 和 $s/H=0.5$ 的位置附近,存在一管线变形的最大区域。因此,在实际工程中,对于位于这一位置附近的既有管线应进行重点保护。

5 结论

采用 Pasternak 弹性地基模型,引入管-土分离的影响,推导了邻近基坑开挖既有地下管线变形的解析解,并通过数值模拟的现场实测数据,验证了理论模型的准确性。通过算例分析,得到以下主要结论:

- 1) 基坑开挖卸荷影响下,地下管线的最大位移随着管-土分离部分的增长而增大,此时若不考虑管-土分离的影响,将使得管线变形计算结果偏于不安全。
- 2) 既有地下管线最大位移随着其埋深和距基坑围护结构距离的增大,呈先增大后减小的趋势,且管线及基坑间距对管线变形的影响较大。

3) 土体剪切刚度对地下管线变形计算具有显著影响。计算过程中若不考虑土体间的剪切效应,将使得计算结果偏于不安全。同时,管线刚度越小,土体间剪切效应对管线变形计算的影响将越大。

参考文献:

- [1] TAN Y, LU Y. Responses of shallowly buried pipelines to adjacent deep excavations in Shanghai soft ground [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018, 9(2): 05018002.
 - [2] ZHANG J, XIE R, ZHANG H. Mechanical response analysis of the buried pipeline due to adjacent foundation pit excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 78: 135-145.
 - [3] WHAM B P, ARGYROU C, O'ROURKE T D. Jointed pipeline response to tunneling-induced ground deformation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(11): 1794-1806.
 - [4] OLIVEIRA J R M S, RAMMAH K I, TREJO P C, et al. Modelling of a pipeline subjected to soil mass movements [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2017, 17(4): 246-256.
 - [5] SHI J W, WANG Y, NG C W W. Three-dimensional centrifuge modeling of ground and pipeline response to tunnel excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(11): 04016054.
 - [6] 韩焯, 雷崇红, 张鹏. 隧道开挖引起管线沉降计算的刚度修正法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 21-27.
- HAN X, LEI C H, ZHANG P. A modified stiffness

- approach to predict tunnelling-induced deformation and force of pipelines [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(3): 21-27. (in Chinese)
- [7] 李大勇, 张土乔, 龚晓南. 深基坑开挖引起邻近地下管线的位移分析[J]. *工业建筑*, 1999, 29(11): 36-42.
LI D Y, ZHANG T Q, GONG X N. Analysis of the displacements of buried pipelines caused by deep excavations [J]. *Industrial Construction*, 1999, 29(11): 36-42. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] ZHANG C R, YU J, HUANG M S. Effects of tunnelling on existing pipelines in layered soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 43: 12-25.
- [10] 李海丽, 张陈蓉, 卢恺. 隧道开挖条件下埋地管线的非线性响应分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(Sup1): 289-296.
LI H L, ZHANG C R, LU K. Nonlinear analysis of response of buried pipelines induced by tunneling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(Sup1): 289-296. (in Chinese)
- [11] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil: pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(6): 461-466.
- [12] KLAR A, MARSHALL A M. Shell versus beam representation of pipes in the evaluation of tunneling effects on pipelines [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(4): 431-437.
- [13] KLAR A, MARSHALL A M. Linear elastic tunnel pipeline interaction: the existence and consequence of volume loss equality [J]. *Géotechnique*, 2015, 65(9): 788-792.
- [14] KLAR A. Elastic continuum solution for tunneling effects on buried pipelines using fourier expansion [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(9): 04018062.
- [15] TANAHASHI H. Formulas for an infinitely long bernoulli-euler beam on the pasternak model [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(5): 109-118.
- [16] WANG C Q, LI C D, LIU W Q, et al. Pipeline-soil separation model for natural gas pipelines subjected to parabolic driving force [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2019, 10(1): 04018028.
- [17] PASTERNAK P L. On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants [J]. *Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu I Arkhitekture*, Moscow, 1954. (in Russian)
- [18] ZHANG Z G, HUANG M S, XU C, et al. Simplified solution for tunnel-soil-pile interaction in Pasternak's foundation model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 146-158.
- [19] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 94-105.
- [20] 木林隆, 黄茂松. 基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 820-827.
MU L L, HUANG M S. Simplified method for analysis of soil movement induced by excavations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 820-827. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)