



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309789

引用格式:叶俊能,王忠瑾,王乾浩,等.工程堆载诱发邻近管线变形响应的快速解析方法[J].科学技术与工程,2025,25(5):2082-2089.

Ye Junneng, Wang Zhongjin, Wang Qianhao, et al. Fast analytical method for deformation response of existing pipeline induced by engineering surcharge[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 2082-2089.

交通运输

工程堆载诱发邻近管线变形响应的快速解析方法

叶俊能¹, 王忠瑾², 王乾浩³, 冯国辉^{4,5*}

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 宁波 315101; 2. 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 宁波 315100;
3. 浙江鸿晨建设有限公司, 宁波 315020; 4. 浙大城市学院土木工程系, 杭州 310015;
5. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘要 既有管线附近存在工程堆载情况下,管线会产生下沉位移,并进一步威胁到既有管线的正常工作。在这方面的研究大部分停留在有限元和室内试验方面,较少理论解用于分析既有邻近管线在工程堆载作用下的受力变形响应。基于此,采用理论解析的手段研究该工况下管-土相互作用。首先采用 Boussinesq 解解析得到既有管线轴线处的附加应力,随后将管线简化成放置在双参数 Pasternak 模型上的无限长梁,进一步获得管线变形过程中的系统总能量,最后根据能量变分理论获得邻近管线受力变形响应。通过与既有试验实测数据对比,验证了所提方法的正确性;相比于所提方法的退化解析,所提方法更贴近实测数据。参数研究表明:管线的受力变形会随管线埋深的增大而非线性减小;增大管线直径会引起管线变形响应增强;管线和堆载区域夹角对管线受力变形不敏感;增大管线与堆载区域的水平距离能够有效减小管线受力变形响应,且减速呈现先增大后减小的现象。一系列分析成果可用于实际工程中工程堆载对邻近既有管线受力变形的影响分析。

关键词 能量变分;工程堆载;既有管线;双参数地基模型;简化解析

中图分类号 U173; **文献标志码** A

Fast Analytical Method for Deformation Response of Existing Pipeline Induced by Engineering Surcharge

YE Jun-neng¹, WANG Zhong-jin², WANG Qian-hao³, FENG Guo-hui^{4,5*}

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315101, China; 2. School of Civil Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo 315100, China; 3. Zhejiang Hongchen Construction Co., Ltd., Ningbo 315020, China;
4. Department of Civil Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China;
5. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

[Abstract] In the condition of engineering surcharge near the existing pipeline, the pipeline produce subsidence deformation and further threaten the normal operation of the existing pipeline. Most of the research in this area stays in the finite element and indoor tests, and few theoretical solutions are used to analyze the stress and deformation response of existing pipelines under adjacent engineering surcharge. Based on this, the pipeline-soil interaction under this working condition was investigated by using theoretical analysis. Firstly, the Boussinesq solution was used to analyze the additional stress at the axis of the existing pipeline. Then, the pipeline was simplified as an infinite beam rest on the Pasternak model to further obtain the total energy of the system during the deformation of the pipeline. Finally, the stress and deformation response of the pipeline can be obtained according to the energy variation theory. By comparing with the existing experimental data, the correctness of the proposed method was verified. Compared with the degradation analysis of the proposed method, the proposed method is closer to the measurements. The parameter study shows that the stress deformation of the pipeline will decrease nonlinearly with the increase of the buried depth of the pipeline. Increasing the diameter of the pipeline would increase the deformation response of the pipeline, the deformation of the pipeline is not sensitive to the angle between the pipeline and the loading area. Increasing the horizontal distance between the pipeline and the loading area can effectively reduce the stress

收稿日期: 2023-12-12 修订日期: 2024-11-16

基金项目: 宁波市公益类科技计划(2024S079); 国家重点研发计划(2023YFC3009400); 国家自然科学基金(52238009, U1934208, 52408448); 江西省自然科学基金(20223BBG71018)

第一作者: 叶俊能(1975—),男,福建三明人,博士,教授级高级工程师。研究方向:城市轨道交通领域的岩土工程。E-mail:yjn75@139.com。

* 通信作者: 冯国辉(1996—),男,汉族,安徽合肥人,博士后,助理研究员。研究方向:隧道工程及土与结构相互作用。E-mail:ghfeng@zju.edu.cn。

and deformation response of the pipeline, and the deceleration increases first and then decreases. A series of analysis results can be used to analyze the influence of engineering surcharge on the stress and deformation of existing pipelines in practical engineering.

[**Keywords**] energy variation; engineering surcharge; existing pipeline; double parameters foundation model; simplified analytical solutions

开发城市地下空间一直以来都是极大便利城市人类生活的必要手段,随着城市市政网管的普及,城市所需要的水、气、电等生活物资质量均得到了较大地提高。然而,邻近堆卸载会对既有管线(隧道)产生较大的影响^[1-5],例如在工程实际中经常存在铁路货物堆载引起地表沉降,并进一步引起下卧管线受力变形,甚至威胁到管线的正常工作。基于此,研究既有管线在上方堆载作用下的受力变形十分必要。

邻近工程堆卸载引起既有管线变形的影响分析主要集中在有限元方法、室内试验方法和理论解析法。有限元方法是研究人员通过不同的第三方有限元软件针对不同工程进行模拟分析^[6-7],并进一步获得邻近堆卸载对既有管线受力变形的影响,该方法缺点在于正版有限元软件需要版权,运算时间很长,且针对的单一类工程,普适性较差。室内试验的方法是基于工程实际进行模型缩尺试验模拟^[8-9],该方法的缺点是耗时耗力,人为误差较大。而理论解析法能够作为一种快速简捷的途径评价既有管线在邻近堆卸载作用下的管-土相互作用,耗时耗能较少,且普适性较强。在前人的研究中,该方面的理论主要基于两阶段分析法和力学平衡方程,通过解析方程获得管线变形响应。蔡忠祥等^[10]基于单参数 Winkler 和欧拉梁理论,采用传递矩阵法获得了变截面埋管在上方堆载作用下变形解析解;俞剑等^[11]考虑到管线埋深的影响,采用 Winkler 地基模型模拟管-土相互作用,随后获得考虑地基埋深的地基模型理论解;张陈蓉等^[12]、李海丽等^[13]基于非连续接口管线的工况,采用 Winkler 地基模型模拟土与管线相互作用,随后获得隧道开挖引起既有管线变形响应分析;进一步的,张陈蓉等^[14]基于非连续接口管线和修验证的 Winkler 地基模型参数获得工程堆载引起下卧管线受力变形解析解。然而,Winkler 地基未能考虑土体剪切变形影响,进一步的,可考虑剪切变形的双参数 Pasternak 地基受到专家学者的青睐。魏纲等^[15]基于 Pasternak 地基和欧拉梁理论,获得既有管线在邻近盾构影响下的竖向变形力学平衡方程,随后通过解方程获得管线变形解析解;可文海等^[16]基于能量法获得 Pasternak 地基模型精确计算参数,并进一步获得了修正后 Pasternak 地基模型下盾构开挖引起上覆管线受力变形解析解,且计算结果与实测数据接近;林

存刚等^[17]基于 Pasternak 地基和管线接口非连续的工况,采用有限差分法获得隧道开挖引起邻近管线受力变形简化计算方法;章李刚等^[18]考虑到管廊的轴向内力作用,进一步采用 Pasternak 地基模型获得管廊轴向内力影响盾构下穿引起上覆管线受力变形简化计算,通过与既有工程实测数据对比,验证了该方法的可靠性。冯国辉等^[19-21]基于三参数 Kerr 地基模型,考虑到管线侧向土体作用和管线的剪切刚度影响,获得了隧道下穿引起上覆管线受力变形简化解,并通过与离心机和实测数据对比,验证了该方法的正确性。同时,也有既有文献指出多参数 Kerr 地基更能精确模拟隧-土相互作用^[22-26],但由于其公式过于复杂,应用较少。

综上所述,工程卸载对既有管线受力变形的影响较多,而工程堆载对既有管线影响的理论较少。同时众多文献在堆卸载对管线变形影响理论研究停留在力学平衡方面,鲜有采用能量法研究管-土相互作用。基于此,现通过能量法获得管线变形解析,采用双参数 Pasternak 地基模拟土与管线相互作用,随后获得管线变形系统总能量,利用最小势能变分原理获得管线受力变形解析解。将所提方法计算结果与既有试验数据对比,验证了该方法的正确性。最后分析不同管线埋深、管线直径和管线与堆载区域水平距离和夹角对管-土相互作用的影响。

1 管线变形理论解析

1.1 附加应力的计算

如图 1 所示,邻近管线上方突发长 L 、宽 B 的矩形工程堆载。

由 Boussinesq 解可知,下卧既有管线受到工程堆载影响下产生的附加应力 $q(x)$ 为

$$q(x) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{3pz^3}{2\pi R^5} d\lambda d\eta \quad (1)$$

式(1)中: p 为工程堆载单位荷载; z 为管线埋深; R 为地表以下任一点到与堆载范围内任一点的空间距离,其可表示为

$$R = \sqrt{(X - \lambda)^2 + (Y - \eta)^2 + z^2} \quad (2)$$

堆载区域和邻近管线分别位于 $\xi O_1 \eta$ 坐标系和 xOy 局部坐标系。

如图 1 所示,当管线轴线与堆载中心点最短距离

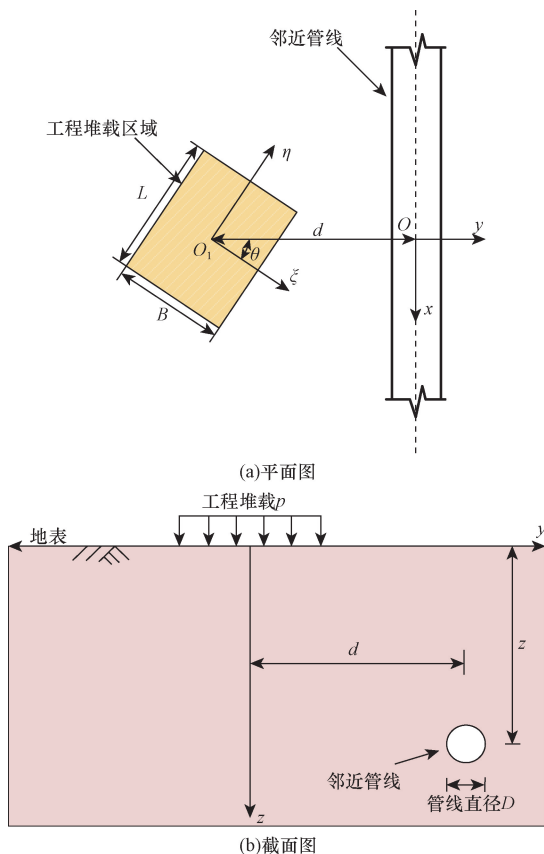


图1 工程堆载与邻近管线位置图

Fig. 1 The position between adjacent pipeline and engineering surcharge

为 d , 且堆载边缘与管线轴线夹角为 θ 。此时, 两个坐标系之间的关系如下。

$$\begin{cases} X = x \sin \theta + d \cos \theta \\ Y = x \cos \theta + d \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

1.2 管线变形推导

如图2所示, 采用双参数 Pasternak 地基模拟邻近管线与周边土体相互作用, 其中管线被简化为直径为 D , 抗弯刚度为 EI 的无限长梁。

双参数 Pasternak 地基模型下管线所受到的土体反力为

$$p(x) = k_c w(x) - G_c \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (4)$$

式(4)中: k_c 为土体弹簧刚度; G_c 为土体剪切层刚度, 其具体数值可由式(5)进行计算^[27-28]。

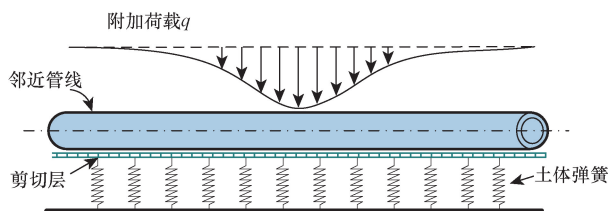


图2 双参数 Pasternak 地基模型

Fig. 2 Double parameters Pasternak foundation model

$$k_c = \frac{1.3 E_s}{D(1-v^2)} \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{1/12} \quad (5)$$

$$G_c = \frac{E_s t}{6(1+v)} \quad (6)$$

式中: E_s 为土体弹性模量; v 为土体泊松比; t 为土体剪切层厚度, 取 $t = 2.5D$ 进行计算^[29]。

为了获得管线变形的离散解析, 将管线简化成 n 份微元, 假设每一小段微元为 i , 再根据文献[30]的方法可得管线任一点变形位移 w_i 满足条件为

$$w_i = \sum_{i=0}^n C_i \cos \left(\frac{i\pi x}{L} \right) \quad (7)$$

式(7)中: L 为管线轴向长度; C_i 为待定系数; $i = 0, 1, 2, \dots, n-1, n$ 。

式(5)可简化为

$$w = EC \quad (8)$$

式(8)中:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \left\{ 1, \cos \left(\frac{\pi x}{L} \right), \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right), \dots, \cos \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \right\}_{1 \times (n+1)} \\ \mathbf{C} = \{ C_0, C_1, C_2, \dots, C_n \}_{(n+1) \times 1}^T \end{cases} \quad (9)$$

由于既有管线在上覆堆载作用下会产生附加荷载作用功 X_1 、土体反力作用功 X_2 和管线弯曲变形能 X_3 , 其可分别表达为

$$\begin{cases} X_1 = - \int_{-L}^L q w dx \\ X_2 = \frac{D}{2} \int_{-L}^L k_c w^2 dx - \frac{D}{2} \int_{-L}^L G_c \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \\ X_3 = \frac{1}{2} \int_{-L}^L EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \end{cases} \quad (10)$$

由能量变分的方法得

$$\delta X = \delta X_1 + \delta X_2 + \delta X_3 = 0 \quad (11)$$

通过能量变分法可将式(10)转化为

$$\int_{-L}^L EI \frac{\partial}{\partial C_i} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} \mathbf{C} dx + D \int_{-L}^L k_c \frac{\partial w}{\partial C_i} \mathbf{E} C dx - D \int_{-L}^L G_c \frac{\partial}{\partial C_i} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \mathbf{C} dx - D \int_{-L}^L q \mathbf{E} dx = 0 \quad (12)$$

将式(12)进一步写为矩阵方程形式为

$$(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2) \mathbf{C} = \mathbf{q} \quad (13)$$

式(13)中: \mathbf{q} 为管线附加应力矩阵; \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 分别为管线刚度矩阵和土体刚度矩阵, 其表达如下。

$$\mathbf{K}_1 = \frac{EI\pi^4}{L^3} \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 2^4 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & n^4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$K_2 = k_c DL \begin{bmatrix} 2 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} - \frac{G_c D \pi^2}{L} \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 2^2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & n^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(14)和(15)代入式(13)中,待定系数向量 C 即可求出,随后可解得式(7)中管线变形位移 w_i 。

同时,既有管线的弯矩和剪力也可求得。

$$M = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (16)$$

$$Q = -EI \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (17)$$

此外,当不考虑地基模型中土体剪切作用时,解析将退化成 Winkler 地基能量法解析(EB-W 模型)。

2 算例验证

2.1 试验工程

为了研究铁路货场临时堆载作用下对下卧市政管线受力变形的影响,文献[14]曾基于该工况开展了相应的室内模型缩尺试验研究。在既有管线正上方进行临时矩形工程堆载(作用面积为 $0.5 \text{ m} \times 0.13 \text{ m}$)用来模拟货场堆载,在堆载作用下地表和管线均会产生变形,其简化变形如图3所示。为了获得管线受力变形实测数据,在管线外侧贴上应变片和位移计用来测量管线位移和弯矩。为了验证本文方法的可靠性,将文献[14]中对应的实际工程管线实测数据与本文方法计算结果进行对比验证,管线及土体参数详细信息如表1所示。

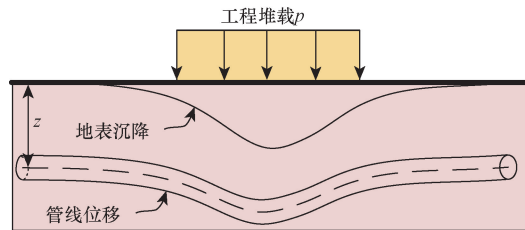


图3 堆载引起地表和管线变形简化图
Fig. 3 Simplified diagram of ground and pipeline deformation due to surcharge loading

表1 试验参数

Table 1 Test calculation parameters

p/kN	E_s/MPa	z/m	d/m	$\theta/(\text{^\circ})$	ν	D/m	$EI/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$
6	0.32	0.2	0	0	0.25	0.025	2.35×10^3

2.2 计算结果分析

根据文献[14]的研究,工程堆载对既有下卧管线的影响不可忽视,较大的工程堆载易引起既有管线受力变形破坏。为了验证本文方法的可靠性,现基于试验工况计算管线受力变形响应,并将计算数据与实验数据进行对比如图4所示。可知,本文方法及其退化解 EB-W 方法计算结果趋势和试验实测数据一致,管线大变形数据集中体现在距离管线轴线两侧 20 m 范围内,说明该区域管线极易产生断裂破坏。同时,本文方法计算所得的管线位移和弯矩峰值分别为 1.14 mm 和 $0.66 \text{ N}\cdot\text{m}$,退化解 EB-W 模型(即不考虑土体剪切变形)所得管线变形和弯矩峰值分别为 1.66 mm 和 $0.94 \text{ N}\cdot\text{m}$;而实测数据显示管线轴线中心附近的变形和弯矩峰值分别为 0.91 mm 和 $0.45 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。显而易见,本文方法计算结果更贴近但仍小于实测数据。产生这一现象的原因在于 Winkler 地基模型未能考虑到土体剪切变形的影响,其计算结果会导致管线位移预测值的偏大;同时,由于堆载作用使得地表以下的土体模量进一步增大,而土体模量的增大会减小工程堆载对下卧管线变形的影响,而这是本文理论计算方法无法考虑的。总的来说,本文方法计算结果能够较好地

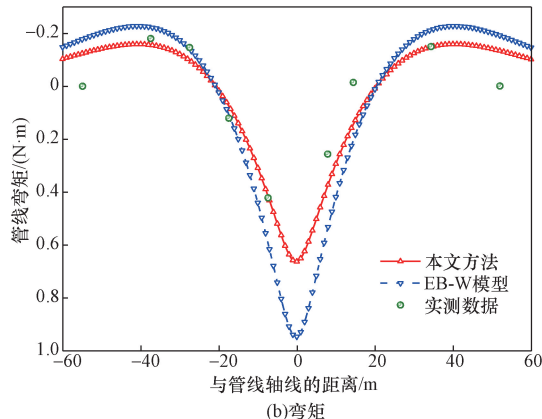
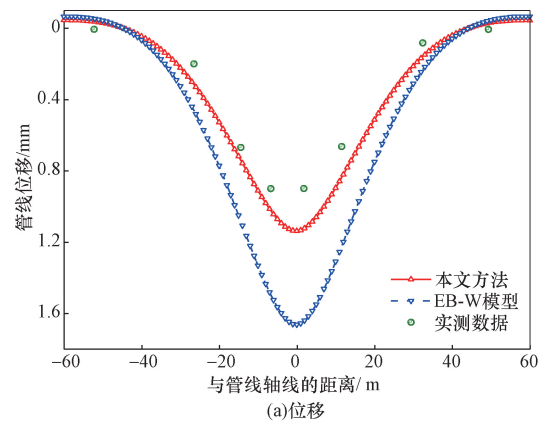


图4 管线受力变形计算与实测数据对比
Fig. 4 Comparison between the calculation of the pipeline stress deformation and measurement results

反映管-土相互作用,进一步验证了该方法的正确性,该理论也可适用于实际工程中既有管线在上方堆载作用下管线受力变形的预测。

3 参数分析

为了研究不同堆载与管线的参数对管线受力变形的影响,通过改变管线埋深、管线直径、管线与堆载中心水平距离及夹角来分析管线受力变形响应。假设工程堆载区域为 $50\text{ m} \times 20\text{ m}$,其他计算参数如表 2 所示,在研究某一参数对管线受力变形的影响时,其余参数均保持不变。

表 2 基本计算参数

Table 2 Basic calculation parameters

p/kN	E_s/MPa	z/m	d/m	$\theta/(\text{°})$	ν	D/m	$EI/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
60	10	10	0	90	0.33	3	5.87×10^{11}

3.1 管线埋深

不同管线埋深下工程堆载引起下卧管线受力变形曲线如图 5 所示。可知,既有管线在邻近堆载的影响下,其位移和弯矩变化曲线均以中心轴呈现对称分布,且位移和弯矩峰值均在中心轴处取得。随

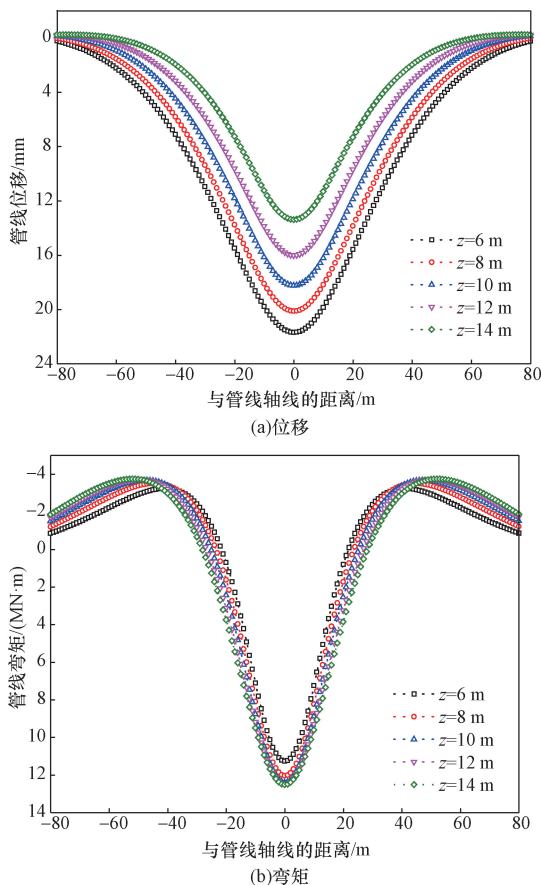


图 5 不同管线埋深下管线位移及弯矩变化曲线

Fig. 5 The curve of pipeline displacement and bending moment under different depth of pipeline

着管线埋深从 6 m 逐渐增加到 14 m 时,管线最大位移从 13.37 mm 增加到 21.67 mm,增幅约为 62%;弯矩峰值从 11.26 MN·m 增加到 12.56 MN·m,增幅约为 12%。同时,管线位移和弯矩峰值增幅呈现逐渐递减的现象。形成这一现象主要是由于随着管线埋深的逐渐增大,堆载荷载作用在土体的附加应力在土层中充分消散,且随着土体深度呈现出非线性递减的过程,进一步管线受到的附加应力随之非线性较小。在实际工程中,应尽量避免在既有管线上方进行工程堆载,尤其是管线埋深较浅的工况下,应禁止在管线上方进行临时工程堆载。

3.2 管线直径

不同管线直径下邻近工程堆载引起的既有管线最大受力变形曲线如图 6 所示。可知,当管线直径由 2.0 m 增大至 4.5 m,既有管线最大位移从 16.51 mm 增加到 19.54 mm,增幅约为 18%;而既有管线弯矩峰值从 9.9 MN·m 逐渐增大到 14.43 MN·m,增幅约为 46%。这是由于管线直径的增大会引起更加强烈的管-土相互作用,从而进一步引起管线的位移和弯矩都会逐渐增大。这也说明工程堆载极易对既有大直径管线造成较大安全隐患。

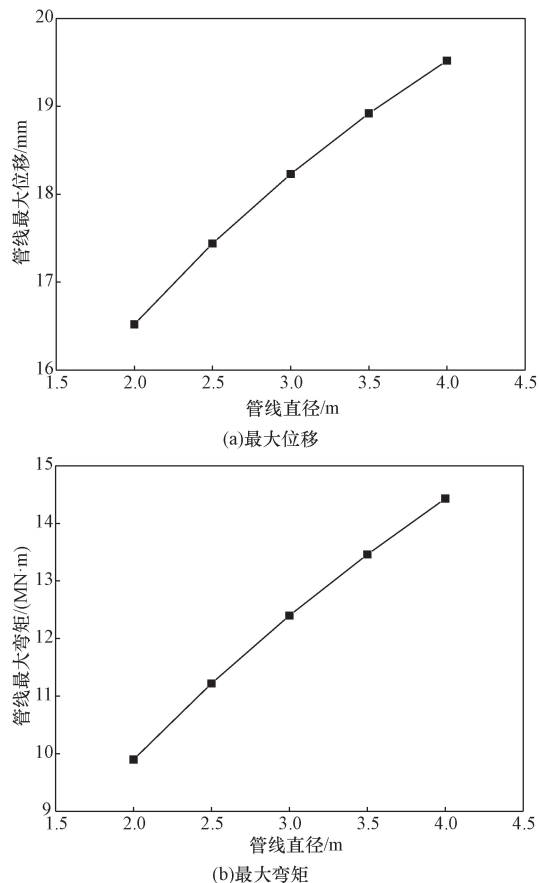


图 6 不同管线直径下管线最大位移及弯矩曲线

Fig. 6 The maximum displacement and bending moment curve of pipeline under different pipeline diameters

3.3 管线与堆载中心水平距离及夹角

不同管线与堆载中心水平距离及夹角下工程堆载引起既有管线最大变形及弯矩如图7所示。可知,随着管线与堆载中心水平距离从0 m增加到50 m时,既有管线位移峰值从18.23 mm迅速减小到0.15 mm,其减速呈现先增大后减小的过程;同样的,当管线与堆载中心水平距离越来越大时,既有管线弯矩峰值从12.4 MN·m迅速减小至0.07 MN·m,其减速呈现先增大后减小的过程。这主要归因于工程堆载引起管线处的附加应力会随着两者水平距离的增大逐渐减小,而当管线位置超过堆载作用的正下方区域时,堆载引起的管线附加应力迅速减小,故管线受力变形在堆载作用正下方区域边缘时变化最快,随后呈现逐渐平缓减小的现象。然而,改变管线与堆载边缘的夹角,管线最大受力变形曲线基本无变化。这是由于堆载区域较大,改变堆载边缘和管线的夹角不能改变管线中心点处的附加应力,故管线受力变形峰值基本无影响。以上分析说明应尽量避免在管线正上方进行堆载,在远离堆

载区域正下方的管线来说,堆载对其影响较小,而改变堆载区域与管线夹角对管线受力变形基本无影响,这些建议均可有效地服务于实际工程。

4 结论

基于Pasternak地基模型,结合能量变分原理提出了一种工程堆载诱发邻近管线变形响应的快速解析方法。得到的结论如下。

(1) 将既有管线简化成无限长梁放置在Pasternak地基模型上,考虑堆载作用下管线受力变形系统总能量控制方程,随后采用能量变分的方法获得既有管线受力变形解析。

(2) 将本文方法及其退化解计算结果与既有文献的实验数据对比,本文方法相比于退化解更贴近实测数据,进一步验证了本文方法的可靠性。

(3) 在邻近工程堆载的影响下,增大管线的埋深会引起管线受力变形的非线性减小,而增大管线直径会造成管线受力变形的逐渐增大;改变管线与堆载区域的夹角对管线受力变形基本无影响,但增大管线与堆载区域的水平距离可迅速减小管线的变形响应,且当管线离开堆载区域正下方时,管线受到的邻近堆载影响较小。

参 考 文 献

- [1] 冯国辉,肖明清,倪建中,等. 盾构下穿引起上覆管线变形的简化计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(5): 68-75.
Feng Guohui, Xiao Mingqing, Ni Jianzhong, et al. Simplified calculated method for pipeline deformation induced by shield tunneling [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(5): 68-75.
- [2] Feng G H, Xu C J, Ding Z, et al. Improved analytical solution for forecasting overlying excavation-induced tunnel response [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 43: 101142.
- [3] 吴峥,姚黎芳,陈学良,等. 基坑开挖对下卧管线竖向变形影响的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2843-2849.
Wu Zheng, Yao Lifang, Chen Xueliang, et al. Numerical analysis on the influence of the foundation pit excavation on the vertical deformation of subjacent pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2843-2849.
- [4] 冯国辉,陈光仔,张迪,等. 基坑开挖诱发下卧既有隧道隆起变形解析解[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3908-3917.
Feng Guohui, Chen Guangzai, Zhang Di, et al. Analytical solution on uplift deflection of underlying existing tunnel induced by foundation pit excavation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3908-3917.
- [5] Feng G H, Xu C J, Ding Z, et al. Simplified method for evaluating tunnel response induced by a new tunnel excavation underneath [J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geotechnical, 2024, 48(5): 1797-1813.

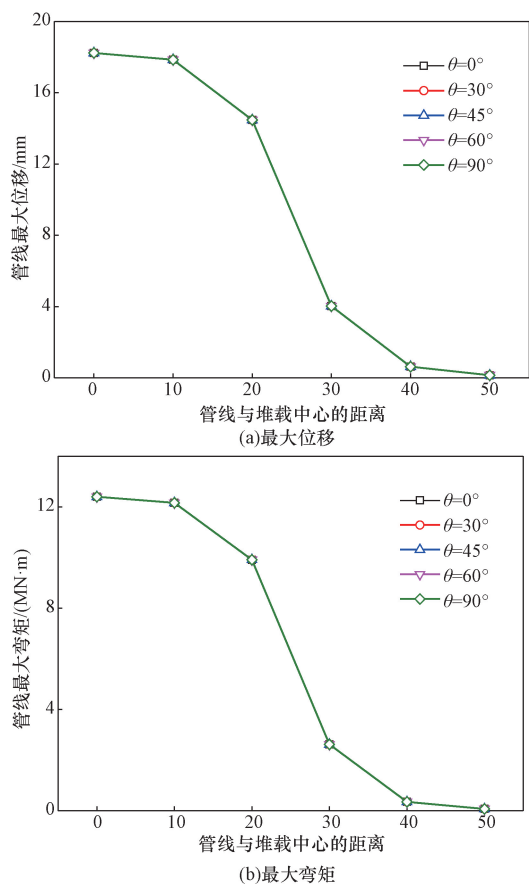


图7 不同管线与堆载中心距离下隧道最大位移及其弯矩曲线

Fig. 7 The maximum displacement and bending moment curve of tunnel under different distance between pipeline and surcharge center

- [6] 詹辉. 地面堆载对坚硬地基和软土地基中沟埋式天然气管道的影响差异评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 57-63, 94.
Zhan Hui. Evaluation of the effect of landfilling on trenching natural gas pipelines with solid foundation and soft foundation[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 57-63, 94.
- [7] 李长俊, 马树锋, 季楚凌, 等. 地面堆载对埋地管道的安全影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 23-28.
Li Changjun, Ma Shufeng, Ji Chuling, et al. Study on influence to safety of buried pipelines caused by ground loads[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 23-28.
- [8] Vorster T E, K A, Soga K. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399-1410.
- [9] 朱治齐, 张陈蓉, 卢恺. 工程荷载对埋地管线纵向响应影响的模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 518-524.
Zhu Zhiqi, Zhang Chenrong, Lu Kai. Model tests on the longitudinal responses of buried pipeline due to construction load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 518-524.
- [10] 蔡忠祥, 陈蓉, 黄茂松. 地面堆载对变截面埋地管线影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 408-412.
Cai Zhongxiang, Zhang Chenrong, Huang Maosong. Analysis of influence of surcharge loads on buried pipelines with variable cross-section [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 408-412.
- [11] 俞剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下埋地管线的地基模量[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 123-132.
Yu Jian, Zhang Chenrong, Huang Maosong. Subgrade modulus of underground pipelines subjected to soil movements [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 123-132.
- [12] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 隧道开挖对邻近非连续接口埋地管线的影晌分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1018-1026.
Zhang Chengrong, Yu Jian, Huang Maosong. Responses of adjacent underground jointed pipelines induced by tunneling [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1018-1026.
- [13] 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(S1): 289-296.
Li Haili, Zhang Chenrong, Lu Kai. Nonlinear analysis of response of buried pipelines induced by tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 289-296.
- [14] 张陈蓉, 卢恺, 黄茂松. 工程堆载对市政管线纵向响应的影晌分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3055-3061.
Zhang Chenrong, Lu Kai, Huang Maosong. Study on the longitudinal response of municipal pipelines induced by construction load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3055-3061.
- [15] 魏纲, 王彬, 许讯. Pasternak 地基中盾构隧道穿越引起地下管线竖向位移[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 158-165.
Wei Gang, Wang Bin, Xu Xun. Vertical displacement of underground pipeline caused by shield tunnel crossing in Pasternak foundation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 158-165.
- [16] 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 Wenhai, Guan Lingxiao, Liu Donghai, et al. Study on vertical displacement of adjacent pile group caused by shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221-228, 234.
- [17] 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 Cungang, Huang Maosong. Deflections of discontinuous buried pipelines induced by shield tunnelling based on Pasternak foundation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1200-1207.
- [18] 章李刚, 楼佳悦, 冯国辉, 等. 考虑残余顶推力作用时盾构下穿引起既有顶管管廊变形研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15784-15791.
Zhang Ligang, Lou Jiayue, Feng Guohui, et al. Study of deformation of existing jacking pipeline induced by tunneling underlying considering residual jacking force [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(35): 15784-15791.
- [19] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 新建隧道下穿既有隧道引起的隧-土相互作用研究[J]. 工程力学, 2023, 40(5): 59-68.
Feng Guohui, Xu Changjie, Zheng Mingwang, et al. Study of tunnel-soil interaction induced by tunneling underneath [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 59-68.
- [20] 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 Guohui, Xu Changjie, Zheng Mingwang, 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.
- [21] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 考虑剪切变形下盾构隧道引起上覆管线变形分析[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 287-295.
Feng Guohui, Xu Changjie, Zheng Mingwang, et al. Deformation analysis of shield tunnel undercrossing existing pipeline considering shear deformation [J]. Advance Engineering Science, 2023, 55(3): 287-295.
- [22] Zhang D M, Huang Z K, Li Z L, et al. Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 197-211.
- [23] Feng G, Xu C, Liang L, et al. Simplified method for evaluating the response of existing tunnel induced by adjacent excavation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geotechnical, 2023, 47: 54-81.
- [24] Feng G, Chen Q, Xu C, et al. Improved theoretical solutions for estimating the tunnel response induced by overlying excavation [J]. Sustainability, 2023, 15(4): 2589-2605.
- [25] 冯国辉, 郑茗旺, 黄展军, 等. 考虑剪切变形下隧道开挖引起邻近桩基水平向响应简化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 209-219.
Feng Guohui, Zheng Mingwang, Huang Zhanjun, et al. Simpli-

- fied analysis for evaluating lateral response of adjacent pile due to tunneling considering shearing effect [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(1): 209-219.
- [26] 冯国辉, 徐兴, 侯世磊, 等. 基于 Kerr 地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(4): 474-485.
- Feng Guohui, Xu Xing, Hou Shilei, et al. Deflections of the adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr foundation model [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2022, 56(4): 474-485.
- [27] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil movement induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. London: Blackie and Son Ltd. , 1986.
- [28] Tanahashi H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. *Journal of the Japanese Geotechnical Society*, 2004, 44(5): 109-118.
- [29] Liang R, Xia T, Huang M, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. *Computers & Geotechnics*, 2017, 81(1): 167-187.
- [30] Washizu K. Variational methods in elasticity and plasticity [M]. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1975.